

О ДВУХ ПРОГРАММАХ СИНТЕЗА ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ XX В.: К 100-ЛЕТИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОЛЕВОЙ ПРОГРАММЫ И К 60-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ СИММЕТРИИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

DOI: 10.19181/smtp.2021.3.2.8

Визгин Владимир Павлович¹

¹ Институт истории естествознания и техники
им. С. И. Вавилова РАН, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена 100-летию геометрической полевой программы (ГПП) и 60-летию открытия симметрии стандартной модели в физике элементарных частиц. Эти события связаны с двумя масштабными программами построения единой полевой теории фундаментальных взаимодействий. ГПП возникла на базе триумфа общей теории относительности и опирающихся на неё первых единых геометрических теорий гравитационного и электромагнитного полей Г. Вейля и Т. Калуцы (1921). Вскоре её лидером стал А. Эйнштейн, напряжённые тридцатилетние усилия которого так и не привели к успеху, несмотря на математическую глубину этой программы. Частицы и их квантовые свойства в рамках ГПП должны были получиться как решения нелинейных уравнений единого поля. Это привело и к критическому отношению Эйнштейна к копенгагенской вероятностной интерпретации квантовой механики. Несмотря на своё поражение, ГПП и связанная с ней эйнштейновская критика оснований квантовой механики имели важное эвристическое значение для теоретической физики.

Открытие симметрий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, сделанное в 1961 г. М. Гелл-Манном, Ю. Нееманом, Ш. Глэшоу и А. Саламом, вместе с концепцией калибровочных полей, предложенной ранее Ч. Янгом и Р. Миллсом (1954), легли в основу симметрично-калибровочной квантовополевой программы построения единой теории трёх фундаментальных взаимодействий физики микромира. Именно в рамках этой программы удалось преодолеть все теоретические и экспериментальные трудности и триумфально завершить к середине 1970-х гг. построение электрослабой теории и квантовой хромодинамики, другими словами, стандартной модели. Твёрдая вера ряда теоретиков в красоту и мощь симметрично-калибровочной программы стали залогом её успеха. Отмечено влияние ГПП на симметрично-калибровочную программу, прежде всего в отношении концепции «симметрия ergo динамика».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

общая теория относительности, единые теории поля, геометрическая полевая программа, Эйнштейн, критика оснований квантовой механики, симметрии в физике элементарных частиц, симметрично-калибровочная программа, электрослабая теория, квантовая хромодинамика, стандартная модель, калибровочная концепция Янга-Миллса

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Визгин В. П. О двух программах синтеза фундаментальной физики XX в.: к 100-летию геометрической полевой программы и к 60-летию открытия симметрии стандартной модели в физике элементарных частиц // Управление наукой: теория и практика. 2021. Т. 3, № 2. С. 185–210.

DOI: 10.19181/smtp.2021.3.2.8

«Я начал со скептического эмпиризма, более или менее подобного эмпиризму Маха. Но проблема тяготения обратила меня в верующего рационалиста, то есть в человека, который ищет единственный надёжный источник истины в математической простоте.»

А. Эйнштейн (Из письма к К. Ланцошу от 24 января 1938 г. [1, с.82–83])

«Подобно Сизифу, он наблюдал, как одна за другой рассыпаются теории, которые он возводил камень за камнем в течение многих лет. Но это никогда не останавливало его. К тому же он никогда не воспринимал трагически свои многочисленные неудачи. Отношение Эйнштейна прекрасно иллюстрируют как идея Камю о том, что «не нужно представлять себе Сизифа несчастным», так и мысль Лессинга, говорившего что «поиск истины важнее, чем обладание истиной.»

Т. Дамур [2, с. 188]

«Постепенно приходит понимание того, что группы симметрии – это самое важное, что мы сегодня можем узнать о природе. Я хотел сейчас сказать кое-что, в чём я до конца не уверен, но что вполне может стать реальностью, а именно: всё, что нам потребуется сверх квантовой механики для описания физической картины мира, – это определить группу симметрии природы.»

С. Вайнберг [3, с. 94]

«Тема симметрии, или инвариантности, ... много раз и с разными вариациями звучит в нашей медитации. Сначала она робкая и приглушённая, но затем становится всё более яркой и усиливается, пока в конце концов не оказывается господствующей в нашем самом глубоком понимании Природы.»

Ф. Вильчек [4, с. 506]

ВВЕДЕНИЕ

Сто лет назад на основе ОТО и первых единых теорий гравитации и электромагнетизма была выдвинута геометрическая полевая программа синтеза физики. А затем, через сорок лет, т. е. 60 лет назад, были установлены симметрии сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, и на этой основе развита симметрично-калибровочная программа синтеза физики. До появления ядерной физики были известны два таких взаимодействия – гравитация и электромагнетизм, которые описывались классической теорией поля. После создания общей теории относительности (1915) гравитационное поле стало рассматриваться как проявление кривизны четырёхмерного риманова пространства – времени. В 1921 г. возникла программа объединения гравитационного и электромагнитного полей на основе того или иного расширения четырёхмерной римановой геометрии, которую можно назвать геометрической полевой программой (ГПП) [5, 6]. Правда, проектом первой образцовой теории такого рода была единая теория гравитации и элект-

ромагнетизма, созданная Г. Вейлем в 1918 г. Но именно в 1921 г. появляется и второй, усовершенствованный вариант этой теории, а также ещё два новых варианта объединения – теория А. Эддингтона (использующая четырёхмерную геометрию пространств аффинной связности) и теория Т. Калуцы (основанная на использовании пятимерной римановой геометрии). Кроме того, в этом же году появляется первый набросок единой теории, принадлежащий Эйнштейну и являющийся определённым обобщением теории Вейля. К этому году можно отнести и оформление квантово-теоретической программы (КТП), связанной с именами Н. Бора, А. Зоммерфельда и их сотрудников и учеников, и противостоящей ГПП. Эти масштабные противостоящие друг другу программы носили по своим установкам в значительной степени полярный характер. Динамика их реализации была такова, что если первая (ГПП) к 1925–1927 гг. не привела к какому-либо заметному успеху, то вторая (КТП) так бурно прогрессировала, что к этому времени на её основе появился такой теоретический шедевр, как квантовая механика, которая стала ядром КТП. В результате к концу 1920-х – началу 1930-х гг. подавляющее большинство как ведущих, так и начинающих теоретиков переходят на рельсы КТП, а Эйнштейн остаётся чуть ли не единственным приверженцем ГПП, несмотря на её безрезультатность. И это продолжалось ещё почти три десятилетия, вплоть до кончины Эйнштейна. Поучительность этого противостояния, как показывает анализ, несомненна и приводит нас к нескольким выводам, своеобразным урокам истории, которые будут сформулированы в конце первого раздела, посвящённого ГПП.

Теперь о втором юбилее. Шестьдесят лет назад, то есть в 1961 г., всего через шесть лет после кончины Эйнштейна были созданы ключевые предпосылки для реализации идеи этого учёного о единой теории фундаментальных взаимодействий. Но не единой геометрической (неквантовой) теории гравитационного и электромагнитного взаимодействий, а единой квантовополевой теории электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий. В том году М. Гелл-Манн и Ю. Неэман, во многом опираясь на исследования Дж. Сакураи, открыли группу симметрии сильных взаимодействий, известную как $SU(3)$, а Ш. Глэшоу и А. Салам (вместе с Дж. Уордом) показали возможность объединения электромагнитного и слабого взаимодействий на основе группы симметрии $SU(2) \times U(1)$. Кроме того, тогда же была поддержана идея Ч. Янга и Р. Миллса о том, что сами эти взаимодействия можно описать неабелевыми калибровочными полями, полями Янга–Миллса, соответствующими этим группам. В результате возникла симметрично-калибровочная исследовательская программа, которая и привела к созданию стандартной модели. И тогда же была высказана идея, что проблему массы калибровочных бозонов можно будет решить на основе идеи спонтанного нарушения открытых симметрий (Ё. Намбу и др.). Потребовалось, однако, двенадцать и более лет, чтобы, опираясь на эти идеи, довести предложенный в 1961 г. проект до настоящей теории, именуемой стандартная модель [7–9].

Главным уроком этой истории является твёрдая вера в мощь симметрии. Несмотря на ряд серьёзных трудностей, возникших при физическом осмыслении открытых симметрий (проблемы массы калибровочных бозо-

нов и реальности кварков в соответствующей модели адронов), только на основе этих симметрий удалось разрешить названные и другие трудности. Напрашивается обозначить ещё один урок последующего за открытиями 1961 г. развития событий: отсутствие экспериментального подтверждения выводов красивой и простой гипотезы, основанной на симметрии, ещё не является достаточным аргументом для отказа от неё; надо настойчиво искать разумные причины этого неподтверждения в рамках выдвинутой гипотезы. Именно на поиски этих причин и на их согласование с экспериментом и понадобилось двенадцать лет. Через три года изучение $SU(3)$ -симметрии привело к созданию кварковой модели адронов (правда, в реальность самих кварков мало кто верил). Тогда же, развивая идею спонтанного нарушения симметрии, теоретики додумались до механизма наделения калибровочных частиц массой (позже получившего название механизма Хиггса). Ещё через три года, т. е. в 1967 г., на основе этого механизма была разработана единая теория электромагнитного и слабого взаимодействия (С. Вайнберга – А. Салама) с одним безмассовым (фотоном) и несколькими массивными калибровочными бозонами. Но ещё оставались проблемы, связанные с построением последовательной квантовой теории калибровочных полей и их перенормируемости, а также с кварк-глюонной моделью.

Важные сдвиги в этих направлениях произошли в конце 1960-х гг. и в 1971 г. Во-первых, возникла серьёзная экспериментальная поддержка кварковой модели: в опытах по глубоко-неупругому рассеянию лептонов на протонах была открыта их (протонов) квазиточечная (партоновая, по Р. Фейнману) структура, и вскоре выяснилось, что кварки и глюоны – это и есть партоны. Во-вторых, в 1971 г. была доказана перенормируемость как безмассовых калибровочных полей, так и массивных, в том числе теории Вайнберга–Салама. И затем, в 1973 г., вслед за электрослабой теорией, реальность обрела кварк-глюонная $SU(3)$ -симметричная теория сильного взаимодействия, объясняющая асимптотически свободное поведение кварков при малых расстояниях и их удержание внутри адронов при увеличении расстояний между ними. В этой теории, получившей название квантовой хромодинамики (КХД), калибровочные частицы, восьмёрка глюонов, оказались безмассовыми, но также, как и кварки, пленёнными. Вот на что ушло целых двенадцать лет – со времени открытия правильных симметрий сильного и электрослабого взаимодействий. И на каждом этапе эти симметрии, включая их калибровочно-полевое расширение на основе концепции Янга–Миллса, оставались основной путеводной нитью. Экспериментальная же необоснованность построений, опирающихся на эти симметрии, оказалась мнимой; более того, с помощью именно этих симметрий или их нарушения были предсказаны загадочные кварки и глюоны и новые калибровочные частицы, существование которых было подтверждено экспериментально.

Два слова об эпиграфах. В первых двух подчёркнуты главный мотив перехода Эйнштейна на рельсы ГПП и последующее поражение этой программы в её соревновании с квантово-теоретической программой. Мотив этот был связан с невероятным триумфом ОТО и идеей геометризации фундаментальных физических взаимодействий, а также с осознанием творческой мощи

математики при конструировании физических теорий. Поражение ГПП было и поражением Эйнштейна, который, подобно Сизифу, упорствовал в своих усилиях, которые, по его же словам, приводили к «кладбищу погребённых надежд». Вторые два эпиграфа принадлежат творцам стандартной модели. Оба «поют гимны» симметрии как ключевому структурно-образующему и эвристическому началу современной единой теории трёх фундаментальных взаимодействий.

В последующих двух разделах мы более подробно рассмотрим рождение и дальнейшую судьбу этих двух масштабных исследовательских программ и вытекающие из этого рассмотрения некоторые «уроки истории». В заключении мы обсудим также определённое родство обеих программ, некоторое влияние первой на вторую и причины неудачи одной и успеха другой.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОЛЕВАЯ ПРОГРАММА, ЕЁ НЕУДАЧА И ЭВРИСТИКА

Как мы уже говорили, ГПП потерпела поражение в соревновании с КТП на пути к синтезу физического знания и, значит, была ошибочной. Надо ли тогда изучать её историю и тем более отмечать её юбилей? Уместно вспомнить поэтические строки Николая Глазкова о творческой «силе ошибок», правда, у поэтов:

«Пусть поэзию довели
До сведения на нет враги её,
А велик ли поэт? Да, велик,
У него ошибки великие.
В наши дни ошибаться боятся,
Но писатели не кассиры,
Не мешайте им ошибаться,
Потому что в ошибках сила» [10, с. 350].

Да, ГПП была ошибочной программой, но великой – как по замыслу и глубине, так и потому, что лидер её, безусловно, велик. Заслуживает особого внимания то обстоятельство, что и провозвестником, и создателями первых образцовых единых геометрических теорий поля были математики (Эйнштейн не был в их числе), так или иначе связанные с Гёттингенской школой математики, а именно Д. Гильберт, его ученик Г. Вейль и кёнигсбергский математик Т. Калуца, получивший образование в Гёттингене. Напомним, что первую единую теорию гравитационного и электромагнитного полей, в которой гравитация описывалась геометрически в духе ОТО, а уравнения электродинамики рассматривались как следствие уравнений гравитации, создал патриарх Гёттингена Д. Гильберт. Но способ объединения полей был признан не вполне корректным и не приобрёл программный характер, хотя в

рамках этой теории Гильберт получил правильные общековариантные уравнения гравитации почти одновременно с Эйнштейном.

Первая единая геометрическая теория гравитации и электромагнетизма, в которой способ объединения полей стал программным, была теория, выдвинутая в 1918 г. Г. Вейлем [5, 6, 11]. Способ объединения полей в этой теории заключался в таком расширении четырёхмерной римановой геометрии, в котором, наряду с метрическим тензором, отождествляемым с гравитационным потенциалом, вводился фундаментальный метрический вектор, который интерпретировался как электромагнитный потенциал. Воодушевлённый теорией Вейля кёнигсбергский математик Т. Калуца предложил другую схему, а именно пятимерную риманову геометрию, метрический тензор которой содержал и гравитационный потенциал (четырёхмерная его часть), и электромагнитный потенциал (компоненты которого совпадали с компонентами пятимерного метрического тензора компоненты с индексом, соответствующим пятому измерению).

И Вейль, и Калуца сначала посылали свои статьи Эйнштейну, поскольку оба строили свои единые теории по образу и подобию ОТО. Статья Вейля была опубликована в «Докладах Прусской академии наук» с небольшим дополнением Эйнштейна, в котором он обратил внимание на физическую (экспериментально-эмпирическую) необоснованность вейлевского расширения: «Если бы природа была именно такова, то не могли бы существовать химические элементы, спектральные линии которых имели бы определённую частоту... Поскольку это не так, мне представляется, что основная гипотеза данной теории, к сожалению, неприемлема, хотя её глубина и смелость должны восхитить любого читателя» [12, с. 525–526]. Калуца первый вариант статьи также послал Эйнштейну (1919), после учёта замечаний которого статья была также опубликована в «Докладах Прусской академии наук» в 1921 г. И теорию Калуцы Эйнштейн считал физически недостаточно обоснованной или даже неприемлемой из-за того, что в ней, в отличие от ОТО, интервал « ds представляет собой чистую абстракцию, по-видимому, лишённую непосредственно метрического смысла, ... требование общей ковариантности всех уравнений в пятимерном континууме представляется совершенно необоснованным» [13, с. 131–132].

В 1921 же году появляется ещё несколько модификаций единой геометрической теории гравитационного и электромагнитного полей: теория А. С. Эддингтона – на основе расширения геометрии Вейля до геометрии произвольных пространств аффинной связности, новый вариант теории Вейля и набросок теории Эйнштейна, основанный на замене метрики уравнением локального светового конуса. В январе следующего года Эйнштейн вместе с Я. Громмером пытаются найти в теории Калуцы центрально-симметричные решения, которые можно было истолковать как заряженную частицу (электрон, прежде всего), но приходят к выводу, что таких решений в этой теории нет. Таким образом, в 1921 г. возникает целый пучок единых геометрических теорий поля, устроенных наподобие теории Вейля: варьируются геометрии, уточняется физическое обоснование, ищутся решения уравнений единого поля. Успех пока не достигается, но в результате оформляется

мощная исследовательская программа, именно геометрическая полевая программа синтеза физики (ГПП), тогдашний вариант «теории всего». Она была предназначена не только для объединения гравитации и электромагнетизма на геометрической основе (это – задача-минимум), но и для получения из уравнений единого поля таких решений, которые можно было бы интерпретировать как частицы (задача 2-го уровня), и, наконец, предполагалось, что эти частицеподобные решения должны описать квантовое поведение частиц (задача – максимум).

ГПП противостояла квантово-теоретической программе синтеза физики (КТП), которая опиралась на принципиально отличные от классики особенности микромира, связанные с открытием квантов, корпускулярно-волнового дуализма излучения и квантовой структуры атома (теория Бора-Зоммерфельда). Установки этих программ были во многом противоположны друг другу [5, с. 123]:

Таблица 1

Характерные особенности геометрической полевой программы (ГПП) и квантово-теоретической программы (КТП)

ГПП	КТП
Непрерывность (классическое поле)	Дискретность, атомизм (концепция квантов)
Классическая причинность	Вероятностная причинность
Теоретизм уровня ОТО	Теоретическая эклектика
Слабая связь с опытом	Сильная связь с опытом
Геометрический характер	«Материальный» характер
ГПП фундаментальных сущностей	КТП фундаментальных сущностей
Релятивизм, симметрия, инвариантность	Отсутствие развитого теоретико-инвариантного подхода
Аксиоматико-дедуктивный подход к проблеме синтеза физики	Индуктивный путь к проблеме синтеза физики

Сравнение программных установок объясняет, почему ГПП привлекла внимание математиков и своими первыми успехами во многом обязана математикам. Эйнштейн же вплоть до 1921 г., несмотря на высокую оценку, данную им теориям Вейля и Калуцы, считал их основания физически недостаточно обоснованными и не включался в формирующуюся ГПП. Но, в конце концов, он становится не только приверженцем, но и лидером ГПП, и объяснение этому «фазовому переходу» заключалось не только в установках программы, близких создателю ОТО, но и в том, что, по выражению С. Вайнберга, «он стал пленником собственного успеха», связанного с созданием ОТО, фактически, геометрической классической полевой теорией

гравитационного взаимодействия. Тогда же, т. е. в 1921 г., обозначились два главных направления ГПП: 1) расширение четырёхмерной римановой, связанное с переходом к тому или иному варианту геометрии четырёхмерного пространства аффинной связности (теории Вейля, Эддингтона и др.), и 2) расширение четырёхмерной римановой геометрии за счёт увеличения числа измерений, прежде всего пятимерные обобщения (теории Калуцы, О. Клейна и др.).

Поначалу (в 1922–1923 гг.) Эйнштейн ещё чувствовал, что для геометризации электромагнетизма ему недостаёт экспериментальной физической основы, подобной равенству инертной и гравитационной масс, и связанному с ним принципу эквивалентности. Но им всё больше овладевала идея, что математическая простота и элегантность геометрических структур и уравнений сами по себе могут привести к правильной теории, содержащей «новые физические связи», прежде всего, когда «она позволит описать элементарные электрические частицы с помощью решений, не содержащих особенностей». Об этом он говорил в июле 1923 г. в докладе в Гётеборге, который был включён в сборник Нобелевских лекций, хотя Нобелевской премии он был удостоен за кванты [14, с. 128]. Летом 1925 г. Эйнштейну показалось, что аффинно-метрическая схема способна привести к нужному результату. Он был полон энтузиазма и писал об этом своим друзьям, в частности М. Борну, который вместе с Гейзенбергом, Паули, Иорданом и др. разрабатывали КТП и приближались к созданию квантовой механики, и Борн уже знал о статье Гейзенберга по матричной механике, подготовленной к публикации. Особого внимания заслуживает ответное письмо, которое свидетельствует о том, что в середине 1925 г. научное общественное мнение, включающее и мнение лидеров КТП, не считало бесплодными усилия Эйнштейна по созданию единой геометрической теории поля. «Твоё сообщение о наконец-то удавшемся объединении гравитации и электромагнетизма, – писал Борн в письме, датированном 15 июля 1925 г., – меня очень воодушевило; указанный принцип выглядит очень простым. Иордан и я хотим его «проварьировать», как только появится время, но мы умоляем тебя как можно скорее выслать нам твою статью. Всё это намного глубже, чем наши небольшие работки». В комментарии к этому письму Борн вспоминал: «Я думаю, что мой восторг по поводу эйнштейновской теории был вполне искренним. Мы все считали тогда, что поставленная им цель достижима и очень важна» [15, с. 49–50].

Однако к концу 1925 г. Эйнштейн полностью разочаровывается в аффинных и аффинно-метрических вариантах ГПП. В письме к А. Зоммерфельду от 26 августа 1926 г. он с горечью признаётся в бесплодности всех его предшествующих попыток по созданию единой теории поля: «Я долго мучился, пытаюсь выявить связь между гравитацией и электромагнетизмом, но теперь уверен, что всё, сделанное до сих пор в этом направлении, напрасно» [16, с. 236]. А вторая половина 1925 г. и 1926 г. – это как раз решающий период в создании квантовой механики и начало триумфа КТП. Кризис ГПП, который Эйнштейн воспринимал как временный, совпал с потрясающим успехом КТП и последующим её бурным прогрессом. С этого времени и все видные теоретики, и научная молодёжь увлечённо погружаются в КТП с обновлён-

ным ядром в виде квантовой механики, и вскоре Эйнштейн остаётся со своей ГПП чуть ли не в полном одиночестве.

Успехи квантовой механики соседствовали с появлением проблем её физической интерпретации, вторжением в физику индетерминизма, точнее, вероятностной причинности и т. д. В этих условиях все ожидали, особенно после кризиса ГПП в 1926 г. (кстати, в этом году не появилось ни одной работы её лидера по единым теориям поля), что Эйнштейн обратится к квантовой механике и внесёт вклад в разрешение её трудностей. В этом плане очень показательны воспоминания А. Ф. Иоффе, который был дружен с Эйнштейном, о встрече и разговорах с последним по дороге в Амстердам в 1926 г., где проходили заседания Сольвеевского комитета. «Обрисовав глубокие противоречия явлений в микромире и разброд мыслей физиков, – вспоминал Иоффе, – я высказал убеждение, что Эйнштейн со своей исключительной физической интуицией скорее, чем кто-либо другой, может найти выход... Нельзя не видеть тумана мистики, который обволакивает чёткие контуры физики; в науку вливается неверие в свои силы, отказ от реальности самой природы. Выход один – Эйнштейн обязан выполнить свой долг и не имеет права скрываться в пучинах единого поля» [17, с. 228, цит. по [5, с. 201]]. Но уже в начале 1927 г. ему начинает казаться, что ресурсы пятимерия ещё не исчерпаны. В начале 1930-х гг. он особенно чётко сформулировал своё убеждение в том, что «единственный надёжный источник истины в математической простоте» (см. первый эпиграф): «Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов. Я убеждён, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы. Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остаётся единственным критерием пригодности математических конструкций. Но настоящее творческое начало присуще именно математике. Поэтому я считаю в известном смысле оправданной веру древних в то, что чистое мышление в состоянии постигнуть реальность» [18, с. 184]. И это несмотря на то, что его более чем десятилетние напряжённейшие усилия в поисках единой геометрической теории поля так и не привели к успеху, что за это время были исследованы десятки различных геометрических конструкций, которые, по его же словам, выглядели «кладбищем погребённых надежд».

При всей погрузённости в «пучины единого поля» Эйнштейн не мог не обратить внимания на лавину выдающихся теоретических работ 1925–1927 гг., означавших рождение квантовой механики, и оценить их по достоинству. В письме к М. Бессо от 25 декабря 1925 г. он писал: «Самое интересное теоретическое достижение последнего времени – это теория квантовых состояний Гейзенберга–Борна–Иордана. Настоящее колдовское исчисление, в котором вместо декартовых координат появляются бесконечные определители (матрицы)» [19, с. 227]. Особое воодушевление вызвал у него волновой вариант квантовой механики, открытый Э. Шрёдингером. «Из новых попыток получить более глубокую формулировку квантовых законов мне больше всего

нравится принадлежащая Шрёдингеру. Если бы только удалось пересадить введённые там волновые поля из n -мерного координатного пространства в трёх – и, соответственно, четырёхмерные! Теории Гейзенберга–Дирака заставляют меня восхищаться, но для меня они не пахнут реальностью», – писал он Зоммерфельду в августе 1926 г. [16, с. 236]. После появления вероятностной трактовки волновой функции и квантовой механики в целом, развитой Борном, он писал ему в декабре 1926 г.: «Квантовая механика заслуживает всяческого уважения, ... но к тайнам Старого (т. е. Бога. – *примечание переводчика*) она не подводит нас ближе. Во всяком случае, я убеждён, что он не играет в кости» [15, с. 7]. По-видимому, именно здесь появляется впервые эта крылатая формулировка, означающая неверие Эйнштейна в первичность, фундаментальность вероятностной причинности. В статье, посвящённой 200-летию со времени кончины И. Ньютона и опубликованной в 1927 г., признавая успехи квантовой теории, он подчёркивает свою обеспокоенность её концептуальными основаниями, вступающими в противоречие с установками ГПП: «Отрицается сама возможность пространственно-временного построения, однозначно соответствующего физическим явлениям... Те, кто применяет этот метод (т. е. квантовую механику. – *В. В.*), вынуждены отказаться от локализации материальных частиц и от строго каузальных законов» [20, с. 88].

С этого времени и затем с 5-го Сольвеевского конгресса, состоявшегося в конце 1927 г., начинается длительная дискуссия Эйнштейна с Бором и Борном по проблемам интерпретации квантовой механики. Обычно считается, что классики общепринятой копенгагенской интерпретации в конце концов сумели логично ответить на все каверзные вопросы Эйнштейна и вчистую обыграли его, доказав преимущество КТП в её сравнении с ГПП. Однако сам Бор не раз подчёркивал важность эйнштейновской критики, которая помогла глубже понять физические и эпистемологические основания квантовой механики, связанные с принципами дополнительности и её вероятностной концепцией [21, с. 399–400, 432–433]. Одна работа Эйнштейна, написанная им в соавторстве с Б. Подольским и Н. Розеном в 1935 г., содержала знаменитый парадокс ЭПР (Эйнштейна–Подольского–Розена), который, по их мнению, свидетельствовал о неполноте квантовой механики. Впоследствии исследование этого парадокса привело к возникновению понятия запутанности, открывшего новое направление как в изучении оснований квантовой механики, так и её новых приложений [2]. Эта работа трёх авторов иногда оценивается как «одна из самых важных статей в квантовой механике». «Возможно, именно эту статью, венчающую многолетнюю дискуссию Бора и Эйнштейна по основаниям квантовой механики, – говорится в одном из современных учебников по квантовой механике, – следует считать главным вкладом Эйнштейна в квантовую теорию» [22, с. 274]. И это при том, что, как известно, Эйнштейн внёс весьма немалый вклад в квантовую теорию на раннем этапе её развития и даже Нобелевскую премию получил не за теорию относительности, а за кванты [23]!

Приверженность ГПП и неприятие копенгагенской интерпретации квантовой механики творец теории относительности сохранил до конца своей

жизни, что как будто позволяет говорить о поражении ГПП и сравнивать Эйнштейна с Сизифом [2, 24]. Но здесь кроется один из самых нетривиальных уроков всей этой истории. Да, и ГПП проиграла, и в дискуссиях с Бором он оказался, скорее, неправ, да, всё это были ошибки, но так ли уж бесплодны, безрезультатны были его «сизифовы труды»? Если вспомнить Глазкова, то это были «ошибки великие», и они принесли важные плоды. Во-первых, неудача ГПП показала, что построить единую теорию поля только на основе классической полевой концепции даже при использовании идеи геометризации физического взаимодействия едва ли удастся. Хотя это не означало, что сама по себе идея построения единой теории фундаментальных взаимодействий ошибочна. И здесь, во-вторых, на пути развития ГПП были получены некоторые важные результаты, сыгравшие определённую роль как в формировании квантовой механики, так и в развитии квантовополевой единой теории фундаментальных взаимодействий. Речь идёт о влиянии теории Вейля на Шрёдингера при разработке им волнового варианта квантовой механики, а также о развитой, прежде всего, самим Вейлем калибровочной концепции электромагнитного взаимодействия (локализация абелевой калибровочной симметрии волновых функций в уравнениях Шрёдингера или Дирака приводила к появлению электромагнитного поля). За год до смерти Эйнштейна Ч. Янг и Р. Миллс, опираясь на эту концепцию, предложили теорию неабелевых калибровочных полей, которая легла в основу современной единой квантовополевой теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Наконец, в-третьих, связанное с ГПП критическое отношение Эйнштейна к копенгагенской трактовке квантовой механики, включая работу об ЭПР-парадоксе, имело немалое значение и для совершенствования самой этой трактовки, и для открытия нового направления квантовой механики, связанного с понятием запутанности [2].

И всё-таки ГПП как масштабная программа синтеза физики оказалась ошибочной, а её лидер Эйнштейн оказался неправ, несмотря на почти тридцатилетние титанические или, скорее, сизифовы усилия. И причины этого кроются в двух обстоятельствах. Первое – Эйнштейн стал пленником собственного успеха, связанного с созданием ОТО (но если для геометризации гравитации были физические и даже экспериментально-эмпирические основания, то для геометризации электромагнетизма их не оказалось). И второе обстоятельство – это вера в то, что единственное творческое начало при построении фундаментальных теорий заключается в математике. Речь, таким образом, идёт о двух уроках истории, которые должен иметь в виду теоретик: 1) всегда есть опасность стать пленником собственного успеха; и 2) математика чрезвычайно эффективна при построении теорий, но она – не единственное творческое начало, другое творческое начало заключено в физической интуиции, в частности, в экспериментально-эмпирическом анализе фундаментальных понятий. Третий же урок – как для теоретика, так и для историка: как заметил тот же поэт Н. Глазков, «бывает и так: ошибется поэт, и дремлет в ошибке сила!», особенно в том случае, если поэт или теоретик велик, и ошибки тоже великие.

СИММЕТРИЙНО-КАЛИБРОВОЧНАЯ ПРОГРАММА В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ЕЁ ТРУДНОСТИ И УСПЕХИ

Шестьдесят лет назад произошло замечательное событие в физике элементарных частиц и одновременно в физике фундаментальных взаимодействий, которому тогда, в начале 1960-х гг., теоретики не придали большого значения. В 1961 г. М. Гелл-Манн и независимо Ю. Неэман открыли правильную глобальную симметрию сильных взаимодействий, именно группу $SU(3)$, являющуюся обобщением уже используемой ранее группы изоспиновых преобразований $SU(2)$. И в этом же году Ш. Глэшоу и независимо А. Салам вместе с Дж. Уордом предложили объединить электромагнитное и слабое взаимодействия на основе глобальной симметрии $SU(2) \times U(1)$, которая оказалась правильной симметрией электрослабой теории. А с 1954 г. была хорошо известна, благодаря работе Ч. Янга и Р. Миллса, идея локализации глобальных внутренних симметрий, позволяющая ввести калибровочные поля, описывающие взаимодействия. Переводы на русский язык всех этих ставших классическими работ впервые были опубликованы в сборнике «Элементарные частицы и компенсирующие поля» под редакцией Д. Д. Иваненко в 1964 г. [25]. А что касается локально-калибровочной концепции Янга–Миллса, то её аналог фактически впервые появился в рамках ГПП, как и сами термины «калибровочные» («gauge») симметрии, «калибровочные» поля и т. п., восходящие к Г. Вейлю. Казалось бы, после открытия этих симметрий, при использовании калибровочной концепции открывался прямой путь к созданию единой квантовополевой теории трёх фундаментальных взаимодействий (сильного, электромагнитного и слабого). Что касается гравитационного взаимодействия, то оно в микромире, по-видимому, не играло существенной роли.

Почему же понадобилось ещё более двенадцати лет, чтобы создать эту теорию, называемую стандартной моделью в физике элементарных частиц? Оказалось, что на пути описанной симметриейно-калибровочной программы возникли как минимум две очень серьёзные трудности. Первая трудность заключалась в том, что калибровочные частицы, подобно фотонам, являющимися калибровочными бозонами электромагнитного взаимодействия, также оказывались безмассовыми. Но короткодействующие ядерные (как сильные, так и слабые) взаимодействия, как все тогда считали, должны были быть массивными, подобно пионам, ответственным за сильное взаимодействие. Так, даже В. Паули, судя по всему, знавший о калибровочной концепции, из-за проблемы массы калибровочных частиц отказался от этой [26, 27]. С другой стороны, других безмассовых частиц, кроме фотонов, никто не наблюдал.

Вторая трудность была ещё более значительной, подрывавшей базовые установки вообще квантовополевой программы. С середины 1950-х гг. стали особенно быстро накапливаться сомнения в том, что полевая программа способна решить проблемы построения теории фундаментальных взаимодействий в микромире. Учёт поляризации вакуума привёл некоторых выдающихся теоретиков, прежде всего Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука, к

выводу об исчезновении реального заряда электрона, а значит, и электромагнитного взаимодействия, если считать квантовую теорию поля справедливой на сверхмалых расстояниях (парадокс «московского нуля»). Аргументы в пользу того, что этот парадокс ещё в большей мере относится к ядерным взаимодействиям, были весьма весомыми.

Стали появляться альтернативные подходы, прежде всего феноменологическая программа, основанная на теории S-матрицы. Как писал об этом один из создателей стандартной модели Д. Гросс, «теория поля была заменена на теорию S-матрицы – теорию, основанную на общих принципах, таких как унитарность и аналитичность, но без фундаментального микроскопического гамильтониана». И хотя эта теория «достигла нескольких замечательных результатов, ... всё это были черновики теории, основанной на принципе, что никакой теории нет вообще, по крайней мере в традиционном смысле. Более того, до 1973 г. считалось неприличным использовать теорию поля» [28, с. 732]. Несмотря на эти трудности и вызванное ими переключение многих теоретиков на тот или иной вариант феноменологической программы, опирающейся на теорию S-матрицы, элегантность и глубина калибровочно-полевой концепции были настолько велики, что ряд ведущих теоретиков, таких, как Ю. Швингер, А. Салам, Дж. Сакураи, М. Гелл-Манн, Ш. Глэшоу и др., продолжали разрабатывать эту квантовополевую симметрично-калибровочную программу, первый образцовый вариант которой для сильных взаимодействий был предложен в 1954 г. Янгом и Миллсом. Естественно, эта программа включала в себя и поиск правильных глобальных внутренних симметрий, отвечающих сильным и слабым взаимодействиям. По открываемым во взаимодействиях элементарных частиц новым законам сохранения (барионного заряда, изоспина, странности и др.) устанавливались, в согласии с теоремой Нетер, отвечающие им внутренние симметрии. Дальнейший переход к локальным аналогам этих симметрий приводил, как показали Янг и Миллс, а также Р. Утияма в 1956 г., к калибровочным полям (частицам), реализующим сильные и слабые взаимодействия. Ещё раз обратим внимание на то, что в этой программе фактически использовался принцип Эйнштейна–Вейля–Швингера–Янга–Миллса–Сакураи о том, что динамика определяется симметрией. У Эйнштейна этот принцип содержался в идее геометризации гравитации в ОТО и гравитационного и электромагнитного полей в рамках ГПП. У Вейля он проявлялся во введении электромагнитного взаимодействия в квантовую механику за счёт локализации калибровочных преобразований с постоянной фазой, связанных с законом сохранения электрического заряда.

На Швингера сослался Дж. Сакураи в своей программной статье 1960 г.: «Эта идея чрезвычайно глубокая, возможно, – самая глубокая в теоретической физике со времени создания теории Дирака. Её основное следствие состоит в том, что при наличии закона сохранения некоторого внутреннего свойства должно с необходимостью существовать соответствующее ему взаимодействие векторного типа, иначе этот закон сохранения противоречил бы понятию локализованного поля. Как говорит Швингер, внутренние свойства должны “проявлять себя динамически”. Выражая эту идею более кратко, можно сказать: внутренняя симметрия – ergo динамика. Поразительно, что столь глубокая физическая идея привлекла за последние пять лет так мало

внимания» [29, с. 52]. Первую теорию на основе этого принципа разработали Янг и Миллс, попытавшись связать сильное взаимодействие с локализацией изоспиновой симметрии, т. е. группы $SU(2)$. Но вскоре открытие новых частиц и новых законов сохранения, например, закона сохранения странности, показало, что эта группа недостаточно широка для описания глобальной симметрии сильных взаимодействий, и в 1961 г. М. Гелл-Манн и независимо Ю. Нееман, опираясь на предшествующие работы японских теоретиков С. Сакаматы, его учеников М. Икеды, С. Огавы и И. Онуки, а также работавшего в США Дж. Сакураи, обнаружили подходящую группу глобальной симметрии – простую группу Ли унитарных унимодулярных матриц $SU(3)$. Впервые эта группа была исследована в связи с составной моделью Сакаматы (с тремя фундаментальными барионами протоном, нейтроном и лямбда-частицей) в работе Икеды, Огавы и Онуки 1958 г. Гелл-Манн же и Нееман показали, что совокупность известных адронов естественно разбивается на октеты и декуплет, в котором была одна частица, которая ещё не была открыта. Выделенная роль октетных представлений группы $SU(3)$ навела Гелл-Манна на мысль о том, чтобы назвать симметрию сильных взаимодействий восьмеричным путём по аналогии с восьмеричным путём буддистов к достижению нирваны. Динамику теории предполагалось получить на основе локализации этой группы, т. е. в духе соответствующего обобщения теории Янга–Миллса.

В это же время Ш. Глэшоу, а также А. Салам вместе с Дж. Уордом предложили единую теорию электромагнитных и слабых взаимодействий с лежащей в её основе глобальной симметрией $SU(2) \times U(1)$, которую Сакураи пытался использовать для описания сильных взаимодействий. Локализация этой симметрии должна была привести к описанию калибровочных бозонов. «Салам и Уорд мотивировали это (т. е. объединение электромагнитного и слабого взаимодействий на базе симметрии $SU(2) \times U(1) - B. V.$) неотразимой красотой калибровочной теории. Мне же казалось, – рассказывал Глэшоу в своей Нобелевской лекции, – что я вижу путь к созданию перенормируемой схемы. К группе $SU(2) \times U(1)$ я пришёл по аналогии с приближенной изоспин – гиперзарядовой симметрией, характеризующей сильные взаимодействия» [30, с. 56]. Тогда, в 1961 г. и последующие два-три года, мало кто верил в правильность этих симметрий, так как вообще мало кто стоял на позициях полевой программы, а также не была решена проблема массы калибровочных частиц и было недостаточно экспериментальных подтверждений предложенных теорий. Несмотря на это, как мы знаем, глобальные симметрии сильных и электрослабых взаимодействий были установлены правильно: стандартная модель, завершённая к середине 1970-х гг. и являющаяся единой теорией трёх фундаментальных взаимодействий элементарных частиц, опирается как раз на объединение этих симметрий $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Однако применение к этим симметриям концепции Янга–Миллса приводило к множеству безмассовых частиц, из которых наблюдался только фотон. Заслуживает внимания замечание видного теоретика Э. Зи, принимавшего участие в создании стандартной модели: «...Оглядываясь назад, мы, по-видимому, можем найти только два логических объяснения, почему экспериментаторы не видели никаких безмассовых частиц со спином 1 за исключением фотона: 1) частицы Янга–Миллса каким-то образом приобретают массу, или 2) части-

цы Янга–Миллса действительно являются безмассовыми, но почему-то не могут наблюдаться в экспериментах. Теперь мы знаем, что первая возможность была реализована в электрослабом взаимодействии, а вторая – в сильном взаимодействии» [31, с. 421].

Дальнейший путь мы опишем по необходимости бегло, подчёркивая только самые существенные моменты. Важные детали, о которых мы только упоминаем, а иногда и вообще ничего не говорим, помимо указанных ранее источников, можно найти в следующей литературе [32–40]. Следующим после 1961 г. поворотным годом в нашей истории стал 1964 год. Именно в этом году произошли существенные сдвиги или даже прорывы в обоих направлениях, отмеченных Зи. Уже маститый Гелл-Манн и начинающий теоретик Дж. Цвейг (опять же независимо и почти одновременно) открыли «кварковую реализацию» симметрии сильных взаимодействий. Оказалось, существует триплет своеобразных первичных, фундаментальных частиц, названных Гелл-Манном кварками (Цвейг их назвал «тузами»), из которых можно составить все адроны. Своеобразие их заключалось в том, что они обладали дробным электрическим зарядом, кратным $1/3$, а частицы подобного рода никогда не наблюдались. Эта ненаблюдаемость коснулась бы и калибровочных частиц, осуществляющих взаимодействие между кварками (впоследствии эти безмассовые частицы были названы глюонами; второе направление, согласно Зи). Поэтому единого мнения о статусе кварков не было: одни считали их только удобной математической моделью для классификации элементарных частиц, другие верили в их реальность (среди них один из их открывателей – Цвейг), третьи верили в их специфическую реальность, полагая, что они существуют только внутри адронов (такой точки зрения придерживался Гелл-Манн). Наконец, поскольку кварки были неразрывно связаны с $SU(3)$ -симметрией, а она была тоже экспериментально не подтверждённой, то и кварковую модель можно было считать если не ошибочной, то очень сомнительной. Однако почти одновременно с появлением этой модели экспериментаторы в Брукхейвенской лаборатории в США обнаружили предсказанный на основе $SU(3)$ -симметрии омега-минус гиперон. Отношение к $SU(3)$ -симметрии сразу изменилось, и это позитивно отразилось и на отношении к кварковой модели, хотя оставались проблемы, связанные с физической интерпретацией и реальностью кварков. В частности, были сделаны попытки ввести новое квантовое число для кварков, впоследствии получившее название «цвета» (Ё. Намбу и М. Ханом, а также Н. Н. Боголюбовым вместе со Б. В. Струминским и А. Н. Тавхелидзе). В этом же году тремя группами теоретиков независимо был открыт способ решения проблемы массы калибровочных частиц (первое направление, отмеченное Зи), оказавшийся особенно важным для теории слабых взаимодействий. На основе понятия спонтанного нарушения симметрии был разработан механизм наделения массой калибровочных бозонов, известный теперь как механизм Хиггса. П. Хиггс из Эдинбурга был одним из тех, кто сделал это; к этому же пришли бельгийские теоретики Ф. Энглерт и Р. Броут, а также Дж. Гуральник, Т. Киббл и Р. Хаген в Имперском колледже в Лондоне. Это открывало путь к применению теории неабелевых калибровочных полей с массивными калибровочными бозонами. Мы видим, как концепция симметрии модифицируется в процессе развития теории, как она приобретает новые

формы: сначала речь шла о глобальной симметрии только пространства и времени (группа Пуанкаре), затем появились глобальные внутренние симметрии типа $SU(n)$, вслед за ними их локализованные (или локально-калибровочные) аналоги и, наконец, появляются нарушенные симметрии. При этом концепция симметрии сохраняет своё и эвристическое значение: на её основе предсказываются новые частицы, она приводит к идее частиц нового типа (кварки), она же позволяет разрешать почти непреодолимые трудности (например, связанные с проблемой массы-безмассовости калибровочных частиц).

В 1967 г. С. Вайнберг и А. Салам, опираясь на открытую Ш. Глэшоу симметрию электрослабых взаимодействий, вводят её спонтанное нарушение, применяют механизм Хиггса и предсказывают соответствующие массивные заряженные и нейтральный бозоны слабого взаимодействия. Поначалу теоретики не проявили заметного интереса к теории Вайнберга–Салама не только из-за отсутствия объяснения экспериментальных фактов, которые бы не объяснялись предшествующей теорией слабого взаимодействия, но и потому, что им не удалось доказать её перенормируемость (т. е. отсутствие в ней бесконечностей или расходимостей). И только сразу после доказательства перенормируемости неабелевых калибровочных полей как безмассовых, так и массивных, проведённого молодым голландским теоретиком Г. 'т Хоофтом в 1971 г., электрослабая теория была признана, и экспериментаторы приступили к поиску калибровочных бозонов. Так, к симметрии в качестве ведущего начала в реализации калибровочно-симметричной программы добавляется второе начало – требование перенормируемости теории, неразрывно связанное с квантуемостью теории. Вспомним наш третий эпиграф, в котором как раз говорится об этом. Заметим, что метод квантования неабелевых калибровочных полей, который использовал 'т Хоофт, был разработан советскими теоретиками или, скорее, математическими физиками Л. Д. Фаддеевым и В. Н. Поповым, а также независимо американским физиком Б. Де Виттом в 1967 г. И это было, по-видимому, самым крупным вкладом советских учёных в создание стандартной модели. Нобелевскую премию, которой в 1999 г. были удостоены 'т Хоофт и его старший коллега М. Вельтман «за выяснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий», по мнению специалистов, прежде всего Ч. Янга, должен был разделить с ними Л. Д. Фаддеев (Попов к этому времени умер).

При рассмотрении реализации калибровочно-симметричной программы построения стандартной модели мы сосредотачивали основное внимание на развитии теории. Но теоретики постоянно держали руку на пульсе эксперимента. И на этот раз, к началу 1970-х гг., неожиданную поддержку со стороны эксперимента получила вызывавшая большие сомнения модель кварков. В опытах по глубоко-неупругому рассеянию электронов на протонах на ускорителе в Стэнфорде (США) обнаружилась квазиточечная структура протонов. Эти структурные элементы были названы Р. Фейнманом партонами. Это открытие создало новый импульс для развития кварковой модели. В 1973 г. почти одновременно было сделано два выдающихся открытия, означавших завершение основ теории сильных взаимодействий, получившей название квантовой хромодинамики. Американские теоретики Д. Гросс вместе с Ф. Вильчеком и независимо Х. Д. Политцер (Нобелевская премия

2004 г.) показали, что при сближении кварков взаимодействие между ними ослабевает настолько, что они ведут себя как свободные частицы. Это явление получило название асимптотической свободы. При удалении кварков друг от друга взаимодействие между ними возрастает, и это приводит, как предполагается, к явлению конфайнмента («пленения») и удержанию кварков внутри адронов.

Почти сразу после этого (в октябре 1973 г.) Гелл-Манн вместе с Х. Фричем и Х. Лейтвилером разработали «калибровочную модель Янга–Миллса, основанную на цветных кварках и цветных глюонных октетах» (цит. по [28, с. 746]). Здесь, таким образом, был реализован второй вариант решения проблемы ненаблюдаемости безмассовых калибровочных бозонов, указанный Зи: цветные глюоны действительно не имеют массы, но благодаря конфайнменту удерживаются внутри адронов и не могут наблюдаться в свободном виде. Эта теория, являющаяся янг–миллсовской теорией $SU(3)$ -симметрии, получила вскоре название квантовой хромодинамики, введённое Гелл-Манном, мастером новых замечательных именовании в истории создания стандартной модели (он же ввёл термины «восьмеричный путь», «кварки» и др.). Конечно, в 1973 г. были заложены только основы стандартной модели, которую один из её создателей Г.'т Хоофт предлагал называть «стандартной теорией» фундаментальных взаимодействий. Эти основы сохранились до нынешнего времени, хотя это не означает, что крупных достижений в развитии теории не было.

Прежде всего, надо сказать об экспериментальном открытии очарованных частиц (1974), предсказанных ранее Глэшоу, которое потребовало определённого усовершенствования теории. Тогда же, используя решеточную модель, К. Вилсон продвинулся вперёд при решении проблемы конфайнмента кварков. И тогда же, казалось, были предложены более общие и простые симметрии для описания стандартной модели. Было показано Х. Джорджи, Глэшоу и др., что «составную» группу симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ можно вложить в другие, более «простые» группы $SU(5)$ или $SO(10)$. Но это «великое объединение» вело к таким катастрофическим следствиям, как распад протона, хотя и очень медленный, но всё-таки такой, что его можно было зарегистрировать экспериментально (ранее в связи с космологическими обстоятельствами это явление предсказывал А. Д. Сахаров). Экспериментально этот распад подтвердить не удалось, и от теорий великого объединения с их замечательными симметриями пришлось отказаться. В дальнейшем экспериментаторы только подтверждали стандартную модель-теорию, открывая предсказанные ею нейтральные токи, промежуточные слабые массивные бозоны и, наконец, знаменитый бозон Хиггса, с помощью которого в электрослабой теории калибровочные бозоны наделялись массой (в опытах на Большом адронном коллайдере). Чему учит эта триумфально завершившаяся история симметрично-калибровочной программы? Прежде всего, вера в глубину и мощь симметрии. Правда, эту симметрию, математически формулируемую на языке теории групп (главным образом, групп Ли), сначала надо установить, используя экспериментальные подсказки. И, кроме того, её приходится определённым образом модифицировать – или локализовать, или нарушать специфическим образом, – чтобы получать физически значи-

мые результаты. Далее, надо ценить простоту и элегантность теоретических конструкций, подобных симметрично-калибровочной концепции, и не отказываться от них при их столкновении с теоретическими и экспериментальными трудностями, которые могут оказаться мнимыми или так или иначе преодолимыми. И всё-таки теоретик – не математик (и даже не математический физик), он всё время должен улавливать сигналы, подсказки, наводки, идущие от эксперимента.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Одной из главных задач, стоящих перед современной теоретической физикой, является построение единой теории всех четырёх фундаментальных взаимодействий, включая гравитационное. Это, по-видимому, было бы и решением создания квантовой теории гравитации. На основе двух рассмотренных в статье программ физики пытались решить по существу ту же задачу. Образцовой теорией для первой программы была теория гравитационного взаимодействия, созданная Эйнштейном в 1915 г., известная как общая теория относительности (ОТО). Вторая программа, названная нами симметрично-калибровочной, была принципиально квантовополевой, поскольку на её основе физики решали проблему построения единой теории трёх фундаментальных взаимодействий, определяющих взаимодействия элементарных частиц. Релятивистская космология расширяющейся Вселенной приводит к необходимости единообразного учёта на самых ранних стадиях её развития всех четырёх взаимодействий. Иначе говоря, каким-то образом рассмотренные нами программы нужно будет объединять.

Сравним эти программы и особенности истории их реализации. Их общность или родство заключается, во-первых, в нацеленности на построение единой физической теории на основе понятия поля, а во-вторых, в использовании в качестве главной концепции при построении теории принципа Эйнштейна–Вейля–Швингера–Янга–Миллса–Сакураи, кратко сформулированного последним так: «симметрия *ergo* динамика», хотя и Швингер, и Сакураи имели в виду только внутренние симметрии. Общим был и нелинейный характер уравнений фундаментальных взаимодействий. Различия же между ними, определившие неудачу одной и триумф другой, сводились главным образом к тому, как в каждой из программ понималось поле. В ГПП это было классическое поле типа электромагнитного поля Максвелла, которое в дальнейшем предлагалось геометризовать, подобно тому, как было геометризовано гравитационное поле в ОТО. В симметрично-калибровочной программе (СКП) поле рассматривалось так, как оно трактуется в квантовой теории поля, т. е. как квантовое или квантованное поле. Принципиальной была и разница в структуре пространства–времени в этих программах. В ГПП это были четырёх- или пятимерные геометрии искривлённых пространств (римановых или пространств аффинной связности), а в СКП – это была псевдоевклидова геометрия плоского пространства–времени Минковского, связанного со спецрелятивистской группой Пуанкаре.

Было ещё одно важное различие: в ГПП фундаментальными и первичными считались только два – гравитационное и электромагнитное; но уже в 1930-е гг. возникли первые представления о ещё двух взаимодействиях, не сводимых к первым двум: слабом и сильном. Немногочисленные приверженцы ГПП игнорировали эти взаимодействия или молчаливо предполагали, что они, как и все частицеподобное и квантовое, как-то получатся из нелинейных уравнений единого поля. В СКП слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия рассматривались как в равной степени фундаментальные взаимодействия, господствующие в микромире, в котором гравитация не играет заметной роли в виду её крайней малости. Ещё одно различие бросается в глаза при сравнении этих программ: ГПП на протяжении тридцати лет не испытывала какой-либо поддержки со стороны эксперимента, а СКП развивалась в тесной связи с экспериментами в области физики элементарных частиц как на ускорителях, так и в наблюдениях космических лучей. ГПП только в течение первых пяти – от силы десяти первых лет, начиная со времени своего возникновения в 1921 г., рассматривалась как перспективная программа. А затем почти в течение тридцати лет держалась только благодаря авторитету Эйнштейна и отчасти Шрёдингера, который в 1940-е гг. вступил на рельсы ГПП. С кончиной Эйнштейна она фактически полностью рухнула. А как раз за год до этого появилась теория Янга–Миллса, приведшая в начале 1960-х гг. к формированию симметрично-калибровочной программы, на базе которой сначала работали десятки, а к началу 1970-х гг. уже сотни специалистов. Так что эти программы даже не успели вступить в конкуренцию между собой. Более того, с некоторой натяжкой можно сказать, учитывая сказанное об их общности или родстве, что СКП приняла эстафету от ГПП в решении проблемы синтеза фундаментальной физики. В середине 1970-х гг. СКП привела к созданию стандартной модели, признанному шедевру теоретико-физической мысли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюкас Э. Альберт Эйнштейн как человек / Э. Дюкас, Б. Хофман // Вопросы философии. 1991. № 1. С. 61–100.
2. Дамур Т. Мир по Эйнштейну: От теории относительности до теории струн / Пер. с фр. В. Белавина. М. : Альпина нон-фикшн, 2016. 268 с.
3. Вайнберг С. На пути к окончательным физическим законам // Р. Фейнман, С. Вайнберг. Элементарные частицы и законы физики. М. : Мир, 2000. С. 80–137.
4. Вильчек Ф. Красота физики: Постигая устройство природы / Пер. с англ. М. Тарховой. М. : Альпина нон-фикшн, 2016. 604 с.
5. Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века. М. : Наука, 1985. 304 с.
6. Визгин В. П. Эйнштейн и математики (к 100-летию создания общей теории относительности) // Метафизика. 2015. № 3 (17). С. 135–156.
7. Визгин В. П. У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // Исследования по истории физики и механики. 2019–2020 (в печати).
8. Визгин В. П. Метафизические аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Метафизика. 2020. № 3 (37). С. 39–56.

9. *Визгин В. П.* Социокультурные аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Эпистемология и философия науки. 2020. Т. 57, № 3. С. 160–175.
10. *Глазков Н. И.* Избранное. М. : Художественная литература, 1989. 541 с.
11. *Вейль Г.* Пространство. Время. Материя : Лекции по общей теории относительности. Изд. 2-е, испр. М. : УРСС, 2004. 456 с.
12. *Эйнштейн А.* Добавление: (к статье Г. Вейля «Гравитация и электричество») // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М. : Мир, 1979. С. 525–526.
13. *Эйнштейн А.* Доказательство несуществования всюду регулярного центрально-симметричного решения в теории поля Т. Калуцы / А. Эйнштейн, Я. Громмер // А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. Т. 2. М. : Наука, 1966. С. 130–133.
14. *Эйнштейн А.* Основные идеи и проблемы теории относительности // А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. Т. 2. М. : Наука, 1966. С. 120–129.
15. Переписка А. Эйнштейна и М. Борна // Эйнштейновский сборник. 1972. М. : Наука, 1974. С. 7–103.
16. Из переписки Зоммерфельда с Эйнштейном // А. Зоммерфельд. Пути познания в физике. М. : Наука, 1973. С. 191–246.
17. *Иоффе А. Ф.* Альберт Эйнштейн // А. Ф. Иоффе. О физике и физиках. Л. : Наука, 1977. С. 224–229.
18. *Эйнштейн А.* О методе теоретической физики // А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. Т. 4. М. : Наука, 1967. С. 181–186.
19. Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо // Эйнштейновский сборник. 1975–1976. М. : Наука, 1978. С. 5–42.
20. *Эйнштейн А.* Механика Ньютона и её влияние на формирование теоретической физики // А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. Т. 4. М. : Наука, 1967. С. 82–88.
21. *Бор Н.* Дискуссия с Эйнштейном по проблеме теории познания в атомной физике // Н. Бор. Избранные научные труды в 2-х томах. Т. 2. М. : Наука, 1971. С. 359–433.
22. *Иванов М. Г.* Как понимать квантовую механику. М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. 516 с.
23. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М. : Наука, 1989. 568 с.
24. *Беркович Е. М.* Трагедия Эйнштейна, или счастливый Сизиф // Исследования по истории физики и механики. 2019–2020 (в печати).
25. Элементарные частицы и компенсирующие поля. Сборник статей / Под ред. Д. Д. Иваненко. М. : Мир, 1964. 300 с.
26. *Пайс А.* Гении науки. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 448 с.
27. *Визгин В. П.* Научные революции и упущенные возможности в фундаментальной физике XX в. // Метафизика. 2021 (в печати)
28. *Гросс Д. Дж.* Открытие асимптотической свободы и появление КХД // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика; Редакция журнала «Успехи физических наук», 2009. С. 727–752.
29. *Сакураи Дж.* Теория сильных взаимодействий // Элементарные частицы и компенсирующие поля. Сборник статей / Под ред. Д. Д. Иваненко. М. : Мир, 1964. С. 42–104.
30. *Глэшоу Ш.* На пути к объединённой теории – нити в гобелене // На пути к единой теории поля (сборник переводных статей). М. : Знание, 1980. С. 51–64.
31. *Зи Э.* Квантовая теория поля в двух словах. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 632 с.

32. *Pais A.* Inward bound: of matter and forces in the physical world. Oxford, New York : Clarendon Press, Oxford University Press, 1986. 666 p.
33. Symmetries in physics (1600–1980). Proc. of the 1st Intern. Meeting in the history of scientific ideas. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. Sept. 20–26, 1983 / Ed. by M. Doncel. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 1987. 678 p.
34. 50 years of Yang-Mills theory / Ed. by G. 't Hooft. New Jersey etc.: World Scientific, 2005. 487 p.
35. 60 years of Yang-Mills gauge field theories / Ed. by L. Brink, K. K. Phua. New Jersey etc. : World Scientific, 2016. 521 p.
36. *Gross D. J.* Twenty five years of asymptotic freedom // arXiv: hep-th/9809060v1. 1998. September 10. Pp. 1–35.
37. *Cao T. Y.* Conceptual developments of 20th century field theories. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 433 pp.
38. *Mills R.* Gauge fields // American Journal of Physics. 1989. Vol. 57, № 6. Pp. 493–507.
39. *Cheng T. P.* Resource Letter Gi -1: Gauge invariance / T. P. Cheng., L.-F. Li // American Journal of Physics. 1988. Vol. 56, № 7. Pp. 587–600.
40. *Kronfeld A. S.* Resource Letter QCD -1: Quantum chromodynamics / A. S. Kronfeld, Ch. Quigg // American Journal of Physics. 2010. Vol. 78, № 11. Pp. 1081–1116.

Статья поступила в редакцию 11.04.2021. Принята к печати 19.05.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Визгин Владимир Павлович vlvizgin@gmail.com

Доктор физико-математических наук, зав. сектором, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, Москва, Россия

AuthorID РИНЦ: 73232

Web of Science ResearcherID: G-4223-2016

ON THE TWO SYNTHETIC PROGRAMS OF THE FUNDAMENTAL PHYSICS IN THE XXth CENTURY: to the centenary of the geometric field program and 60th anniversary of the discovery of standard model symmetry in the elementary particles physics

DOI: 10.19181/sntp.2021.3.2.8

Vladimir P. Vizgin¹

¹ S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is dedicated to the 100th anniversary of the geometric field program (GFP) and the 60th anniversary of the discovery of standard model symmetry in elementary particle physics. These events are related to two large-scale programs of building a unified field theory of fundamental interactions. The GFP originated on the basis of the general theory of relativity and the first unified geometric theories of the gravitational and electromagnetic fields of H. Weyl and T. Kaluza (1921). Soon its leader was A. Einstein, whose intense 30-year efforts never led to success, despite the mathematical depth of this program. Particles and their quantum properties within the GFP were to be obtained as solutions to non-linear equations of the unified field. This has also led to a critical Einstein's relationship to the Copenhagen probabilistic interpretation of quantum mechanics. Despite its defeat, the GFP and the associated Einsteinian critique of the foundations of quantum mechanics had an important heuristic significance for theoretical physics. The discovery of symmetries of strong, weak and electromagnetic interactions, made in 1961 by M. Gell-Mann, Y. Ne'eman, S. Glashow and A. Salam, together with the concept of gauge fields proposed earlier by C. Yang and R. Mills (1954), formed the basis of the symmetry gauge quantum field program of building a unified theory of the three fundamental interactions in the elementary particles physics. It was within this program that all theoretical and experimental difficulties were overcome and triumphantly completed by the mid-1970s the construction of electroweak theory and quantum chromodynamics, in other words, the standard model. A firm belief in the beauty and power of the symmetry gauge program was the key to its success. The impact of the GFP on symmetry gauge program has been noted, in particular in relation of the «symmetry ergo dynamics» principle.

Keywords: General theory of relativity, unified field theories, geometric field program, Einstein, criticism of the quantum mechanics foundations, symmetries in the elementary particles physics, symmetry gauge program, electroweak theory, quantum chromodynamics, standard model, gauge conception of Yang-Mills.

For citation: Vizgin, V. P. (2021). On the Two Synthetic Programs of the Fundamental Physics in the XXth Century: to the Centenary of the Geometric Field Program and 60th Anniversary of the Discovery of Standard Model Symmetry in the Elementary Particles Physics. *Science Management: Theory and Practice*. Vol. 3, No. 2. Pp.: 185–210.

DOI: 10.19181/smtp.2021.3.2.8

REFERENCES

1. Dukas, H. and Hoffmann, B. (1991). Albert Einstein: the Human Side. *Voprosy Filosofii*. No. 1. Pp. 61–100. (In Russ.).
2. Damour, T. (2016). Si Einstein m'était conte. De la relativité à la théorie des cordes [Russ. ed.: Mir po Einshteinu: Ot teorii otnositel'nosti do teorii strun]. Moscow: Alpina non-fiction publ. 268 p. (In Russ.).
3. Weinberg, S. (2000). Na puti k okonchatel'nym fizicheskim zakonom [On the way to the final physical laws]. In: R. P. Feynman, S. Weinberg. *Elementary Particles and the Laws of Physics*. Moscow: Mir publ. Pp. 80–137. (In Russ.).

4. Wilczek, F. (2016). *A Beautiful Question Finding Nature's Deep Design* [Russ. ed.: *Krasota fiziki: Postigaya ustroistvo prirody*]. Moscow: Alpina non-fiction publ. 604 p. (In Russ.).
5. Vizgin, V. P. (1994). *Unified field theories in the first third of the 20th century*. Basel etc.: Birkhauser, 1994. 335 p.
6. Vizgin, V. P. (2015). Einstein and mathematicians (for the 100th anniversary of the creation of the general theory of relativity). *Metafizika*. No. 3 (17). Pp. 135–156. (In Russ.).
7. 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. 2019–2020* [Studies in the history of physics and mechanics. 2019–2020] (in print). (In Russ.).
8. Vizgin, V. P. (2020). Metaphysical aspects of the standard model of the elementary particles physics and the history of its creation. *Metafizika*. No. 3 (37). Pp. 39–56. (In Russ.).
9. Vizgin, V. P. (2020). Socio-cultural aspects of the standard model in elementary particles physics and the history of its creation. *Epistemology & Philosophy of Science*. Vol. 57, No. 3. Pp. 160–175. (In Russ.).
10. Glazkov, N. I. (1989). *Izbrannoe* [Selected works]. Moscow: Khudozhestvennaya literature publ. 541 p. (In Russ.).
11. Weyl, H. (2004). *Prostranstvo. Vremya. Materiya: Lektsii po obshchei teorii otnositel'nosti* [Space. Time. Matter: Lectures on General Relativity]. 2th ed. Moscow: URSS. 456 p. (In Russ.).
12. Einstein, A. (1979). Dobavlenie (k stat'e G. Veilya «Gravitatsiya i elektrichestvo») [Appendix (to the article by G. Weyl "Gravity and electricity")]. In: *Al'bert Eynshteyn i teoriya gravitatsii* [Albert Einstein and the theory of gravity]. Moscow: Mir publ. Pp. 525–526. (In Russ.).
13. Einstein, A. and Grommer, J. (1966). Dokazatel'stvo nesushchestvovaniya vsyudu regul'yarnogo tsentral'no-simmetrichnogo resheniya v teorii polya T. Kalutsy [Proof of the non-existence of a regular central symmetric solution everywhere in the field theory of T. Kaluza]. In: A. Einstein. *Sobranie nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Moscow: Nauka publ. Pp. 130–133. (In Russ.).
14. Einstein, A. (1966). Osnovnye idei i problemy teorii otnositel'nosti [The main ideas and problems of the theory of relativity]. In: A. Einstein. *Sobranie nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Vol. 2. Moscow: Nauka publ. Pp. 120–129. (In Russ.).
15. Perepiska A. Eynshteyna i M. Borna [Correspondence between A. Einstein and M. Born]. (1974). In: *Eynshteynovskii sbornik. 1972* [Einstein's collection. 1972]. Moscow: Nauka publ. Pp. 7–103. (In Russ.).
16. Iz perepiski Zommerfel'da s Eynshteynom [From Sommerfeld's correspondence with Einstein]. (1973). In: A. Zommerfel'd. *Puti poznaniya v fizike* [Ways of knowledge in physics]. Moscow: Nauka publ. Pp. 191–246. (In Russ.).
17. Ioffe, A. F. (1977). Albert Einstein. In: A. F. Ioffe. *O fizike i fizikakh* [About physics and physicists]. Leningrad: Nauka publ. Pp. 224–229. (In Russ.).
18. Einstein, A. (1967). O metode teoreticheskoi fiziki [About the method of theoretical physics]. In: A. Einstein. *Sobranie nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Vol. 4. Moscow: Nauka publ. Pp. 181–186. (In Russ.).
19. Perepiska A. Eynshteyna i M. Besso [Correspondence between A. Einstein and M. Besso] (1978). In: *Eynshteynovskii sbornik. 1975–1976* [Einstein's collection. 1975–1976]. Moscow: Nauka publ. Pp. 5–42. (In Russ.).
20. Einstein, A. Mekhanika N'yutona i ee vliyanie na formirovanie teoreticheskoi fiziki [Newtonian mechanics and its influence on the formation of theoretical physics]. (1967). In:

A. Einstein. *Sobranie nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Vol. 4. Moscow: Nauka publ. Pp. 82–88. (In Russ.).

21. Bor, N. (1971). Diskussiya s Einshteinom po probleme teorii poznaniya v atomnoi fizike [Discussion with Einstein on the problem of the theory of knowledge in atomic physics]. In: N. Bor. *Izbrannye nauchnye trudy*. In 2 t. [Selected scientific works. In 2 vol]. Vol. 2. Moscow: Nauka publ. Pp. 359–433. (In Russ.).

22. Ivanov, M. G. (2012). *Kak ponimat' kvantovuyu mekhaniku* [How to understand quantum mechanics]. Moskva-Izhevsk: NITs Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika. 516 p. (In Russ.).

23. Pais, A. (1989). *Nauchnaya deyatelnost' i zhizn' Al'berta Einshteina* [Scientific activity and life of Albert Einstein]. Moscow: Nauka publ. 568 p. (In Russ.).

24. Berkovich E. M. Tragediya Einshteina, ili schastlivyi Sizif [The tragedy of Einstein, or the happy Sisyphus]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki. 2019–2020* (in print). (In Russ.).

25. *Elementarnye chastitsy i kompensiruyushchie polya. Sbornik statei* [Elementary particles and compensating fields. Collection of articles]. (1964). Ed. by D. D. Ivanenko. Moscow: Mir publ. 300 p. (In Russ.).

26. Pais, A. (2002). *Genii nauki* [Geniuses of science]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy publ. 448 p. (In Russ.).

27. Vizgin, V. P. (2021). Nauchnye revolyutsii i upushchennye vozmozhnosti v fundamental'noi fizike XX v. [Scientific revolutions and missed opportunities in fundamental physics of the twentieth century]. *Metafizika*. (in print). (In Russ.).

28. Gross, D. D. (2009). Otkrytie asimptoticheskoi svobody i poyavlenie KHD [The discovery of asymptotic freedom and the emergence of QCD]. In: *Nobelevskie lektsii po fizike. 1995–2004* [Nobel lectures in physics. 1995–2004]. Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy; NITs Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika; Redaktsiya zhurnala Uspekhi fizicheskikh nauk. Pp. 727–752. (In Russ.).

29. Sakurai, J. (1964). Teoriya sil'nykh vzaimodeistvii [Theory of strong interactions]. In: *Elementarnye chastitsy i kompensiruyushchie polya. Sbornik statei* [Elementary particles and compensating fields. Collection of articles]. Ed. by D. D. Ivanenko. Moscow: Mir publ. Pp. 42–104. (In Russ.).

30. Glashow, Sh. (1980). Na puti k ob'edinennoi teorii – niti v gobelene [Towards a unified theory-threads in a tapestry]. In: *Na puti k edinoi teorii polya (sbornik perevodnykh statei)* [On the way to a unified field theory (collection of translated articles)]. Moscow: Znanie publ. Pp. 51–64. (In Russ.).

31. Zi, E. (2009). Kvantovaya teoriya polya v dvukh slovakh [Quantum field theory in a nutshell]. Moscow-Izhevsk: NITs Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika publ. 632 p. (In Russ.).

32. Pais, A. (1986). *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. Oxford, New York: Clarendon Press, Oxford University Press. 666 p.

33. *Symmetries in physics (1600–1980). Proc. of the 1st Intern. Meeting in the history of scientific ideas*. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. Sept. 20–26, 1983 (1987). Ed. by M. Doncel. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. 678 p.

34. *50 years of Yang-Mills theory* (2005). Ed. by G.'t Hooft. New Jersey etc.: World Scientific. 487 p.

35. *60 years of Yang-Mills gauge field theories* (2016). Ed. by L. Brink, K. K. Phua. New Jersey etc.: World Scientific. 521 p.

36. Gross, D. J. (1998). Twenty five years of asymptotic freedom. arXiv: hep-th/9809060v1. September 10. Pp. 1–35.

37. Cao, T. Y. (1997). *Conceptual developments of 20th century field theories*. Cambridge: Cambridge University Press. 433 p.

38. Mills, R. (1989). Gauge fields. *American Journal of Physics*. Vol. 57, No. 6. Pp. 493–507.

39. Cheng, T. P. and Li L.-F.. (1988). Resource Letter Gi -1: Gauge invariance. *American Journal of Physics*. Vol. 56, No. 7. Pp. 587–600.

40. Kronfeld, A. S. and Quigg Ch. (2010). Resource Letter QCD -1: Quantum chromodynamics. *American Journal of Physics*. Vol. 78, No. 11. Pp. 1081–1116.

The article was submitted on 11.04.2021. Accepted on 19.05.2021.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Vizgin Vladimir vlvizgin@gmail.com

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, head of sector, S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the RAS, Moscow, Russian Federation

AuthorID RSCI: 73232

Web of Science ResearcherID: G-4223-2016