

ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВАЯ ПАРАДИГМА В ФИЗИКЕ

DOI: 10.22363/2224-7580-2020-3-39-56

МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ИСТОРИЯ ЕЕ СОЗДАНИЯ

Вл.П. Визгин

*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН
Российская Федерация, 103012, Москва, Старопанский проезд, 1/5*

*Памяти Г.А. Соколика,
И.Ю. Кобзарева и Н.Ф. Овчинникова
посвящается эта статья*

Аннотация. В статье исследуются метафизические аспекты стандартной модели (СМ), лежащей в основе современной теории элементарных частиц. Кратко рассматривается история создания СМ от основополагающей работы Ч. Янга и Р. Миллса (1954) до завершения электрослабой теории и квантовой хромодинамики в начале 1970-х годов. Выделены и обсуждаются три блока взаимосвязанных между собой метафизических аспектов СМ: локально-калибровочная структура теории, проблема истины и реальности, а также роль метафизических факторов в разработке теории. Подчеркнут научно-реалистический характер метафизических воззрений творцов СМ. Для изучения способов включения метафизических факторов в процесс формирования СМ предложены три модели: эйнштейновская схема построения теории (с так называемой «дугой Эйнштейна»); трехслойная модель строения и развития теории, в которой определяющую роль играют принципы симметрии (Ю. Вигнер), а также «ошибочностная» концепция развития научного знания С.И. Вавилова.

Ключевые слова: стандартная модель (СМ), метафизические аспекты, локально-калибровочная структура теории, научный реализм, принципы симметрии, эйнштейновская схема построения теории, «ошибочностная» концепция развития научного знания С.И. Вавилова.

...Физика весь XX век была не только лидером естествознания, но и объектом совместных метафизических дебатов о ее фундаментальных принципах – от принципа симметрии до принципа причинности, от соответствия между различными теоретическими построениями до обсуждения возможностей и границ физического знания.

А.П. Огурцов [1. С. 27]

Законы физики, как мы пытаемся их формулировать, имеют фундаментальный характер, который отражает наше понимание реальности на глубочайшем философском уровне.

Р. Миллс [2. Р. 493]

Введение

Стандартная модель (СМ) – это ядро современной теории элементарных частиц, сложившееся к началу–середине 1970-х годов. Прошедшие почти полвека мало что добавили к этому ядру. Все частицы, предсказанные ею, были найдены; никаких экспериментальных свидетельств, противоречащих ей, до сих пор не получено. А Нобелевской премии (только в XXI в.) за создание СМ было удостоено не менее десяти физиков. Именно поэтому СМ называют шедевром теоретической физики, «одной из величайших побед человеческой мысли» [3. С. 301] и т.п. Фактически также – это единая квантово-полевая теория трех фундаментальных взаимодействий, господствующих в микромире: электромагнитного, слабого и сильного. Правда, четвертое – гравитационное – взаимодействие ею не охватывается; оно описывается неквантовой геометро-полевой теорией, а именно общей теорией относительности (ОТО), устроенной, впрочем, похожим образом. СМ состоит из двух частей, относительно независимых, но связанных между собой: единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий (электрослабой теории) и квантовой хромодинамики (КХД), являющейся теорией сильных взаимодействий. Обе части – это неабелевы калибровочные теории, в основе которых лежат соответственно неабелевы (то есть некоммутативные) группы внутренних симметрий $SU(2) \times U(1)$ и $SU(3)$, локализация которых приводит к калибровочным полям, описывающим соответственно электрослабые и сильные взаимодействия.

Основные сведения по истории формирования СМ можно найти в монографии участника событий и замечательного историка современной физики А. Пайса [4], а также в работе автора [5]. Начало этого процесса было положено статьей Ч. Янга и Р. Миллса 1954 г., в которой авторы предложили калибровочную теорию сильного взаимодействия, основанную на локализации

группы изотопических преобразований $SU(2)$ [6]. Но по ряду причин их концепция поначалу была сочтена нереалистической, и большинство теоретиков примкнули к более феноменологической S -матричной программе, связанной с отказом от полевого подхода. Потребовалось без малого два десятилетия напряженных исследований, содержащих как прозрения и прорывы, так и ошибочные ходы, чтобы преодолеть возникшие трудности и, вернувшись к янг-миллсовской концепции, завершить построение СМ.

Изучение оснований СМ и ее истории приводит нас к метафизической проблематике. В этом отношении СМ является достойной преемницей теорий относительности и квантовой механики, создание которых привело к «метафизическим дебатам» вокруг основных принципов и структуры новых теорий (см. первый эпиграф; о нашем понимании метафизики – см. [7]). Ниже мы рассмотрим три блока метафизических аспектов СМ:

1) проблему структуры теории, или «логической структуры калибровочных теорий» (Р. Миллс), которую он же назвал «калибровочной философией»;

2) проблему истины и реальности, то есть в какой степени СМ отображает физическую реальность и является истинной теорией;

3) роль метафизических факторов в процессе формирования основ теории. При этом наш подход будет носить квазиэмпирический характер, то есть мы будем опираться главным образом на взгляды самих физиков, творцов СМ.

1. «Логическая структура калибровочных теорий» и «калибровочная философия»

Ключевой теоретической основой СМ является концепция локальной калибровочной симметрии, позволяющая с единой точки зрения описать электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия, а также (с известными оговорками) еще и гравитационные. Эта концепция была развита в середине 1950-х годов Ч. Янгом и Р. Миллсом, а также Р. Утиямой [6; 7]. Они исходили из того, что теории фундаментальных взаимодействий, так же как и механика, электродинамика, спецрелятивистские теории и ОТО, имеют «нетерову структуру», то есть опираются на теорему Нётер, связывающую воедино симметрии, лежащие в основе теории, динамический закон (формулируемый на языке лагранжианов) и законы сохранения [9]. Переход к калибровочным теориям связан, в первую очередь, с расширением нетеровой структуры за счет локализации глобальных внутренних симметрий, приводящей к введению еще и фундаментальных взаимодействий.

Комментируя это расширение, подчеркнем следующее. Прежде всего, идея локально-симметричной природы фундаментальных взаимодействий («симметрия – ergo динамика») восходит к Эйнштейну и ОТО (локализация спецрелятивистской симметрии порождает гравитацию). Похожим образом, как было показано Г. Вейлем [9; 10], локализация глобальной (абелевой)

калибровочной симметрии (связанной с законом сохранения электрического заряда) приводит к введению электромагнитного поля. Распространение этой идеи на внутренние, изоспиновые или зарядовые, симметрии, открытые при изучении слабых и сильных взаимодействий, позволяет говорить о калибровочном векторном характере этих полей. Метафизика здесь заключается в существовании единой (универсальной) структуры фундаментальных сил, а именно расширенной нетеровой структуры. Полевой, близкодействующий характер взаимодействия не только сохраняется, но даже усиливается.

При этом на калибровочные поля распространяется квантовая теория и такие проблемы КТП, как появляющиеся там расходимости (бесконечности или нули) при вычислении ряда физических величин. В КЭД эта проблема была решена на основе теории перенормировок. Поэтому сразу же после появления калибровочной идеологии в отношении сильных и слабых взаимодействий встал вопрос не только об их квантовании, но и их перенормируемости. Кроме того, калибровочное поле в КЭД и, соответственно, фотоны были безмассовыми. Казалось, что и калибровочные частицы неабелевых полей могут оказаться безмассовыми, что вызывало большие сомнения из-за существования массивных мезонов. Эта проблема, в первую очередь, препятствовала принятию простой и глубокой калибровочной концепции. Обе эти проблемы (перенормируемости и массы калибровочных частиц) привели к почти 15-20-летней задержке в создании СМ на основе калибровочной концепции, развитой в середине 1950-х годов.

Их решение было достигнуто на пути объединения слабого и электромагнитного взаимодействия и введения понятия спонтанного нарушения симметрии и построения квантово-полевой теории кварков и глюонов на основе концепции асимптотической свободы, а также доказательства перенормируемости обеих теорий.

Теперь дадим слово самим физикам, прежде всего Ч. Янгу, Р. Миллсу, а также советским теоретикам Г.А. Соколику и Н.П. Коноплевой, которые уже в середине 1960-х годов высоко оценили калибровочно-полевую концепцию и ее философское значение в плане структурно-теоретической базы для построения единой теории четырех фундаментальных взаимодействий.

Ч. Янг спустя 25 лет писал о том, что калибровочная концепция восходит к Эйнштейну: «Мы можем утверждать, что именно Эйнштейн ввел в обращение принцип: взаимодействия диктуются симметрией... Эйнштейн глубоко осознавал необходимость в геометрической структуре, приводящей к нелинейным уравнениям... Оказалось, что структурой, которую искал Эйнштейн, является калибровочное поле...» [12. С. 169–175].

Соавтор Янга Р. Миллс через 35 лет после публикации их знаменитой статьи 1954 года говорил о философском значении калибровочной концепции и так комментировал свою трехэлементную схему расширенной нетеровой структуры: «Законы физики, как мы пытаемся формулировать, имеют фундаментальный характер, который отражает наше понимание природы реально-

сти на глубочайшем философском уровне... Это ирония судьбы, что в течение последних 30 лет (фактически начиная за год до кончины Эйнштейна) была развита концепция калибровочной инвариантности, которая неожиданно стала обобщением эйнштейновской ОТО и преуспела в описании всех сил природы» [2. Р. 493]. И далее: «Калибровочная философия заключается в локальной симметрии... Идея, лежащая в основе калибровочной теории, это принцип локальной симметрии: Каждая непрерывная симметрия природы является локальной симметрией... Мы теперь покажем, как постулирование локальной симметрии может привести к физической теории и как она может определить характер этой теории. Во всяком случае, можно утверждать, что существует характерная логическая модель, связывающая воедино сохраняющиеся величины, симметрии природы и калибровочные поля» [2. Р. 496].

Г.А. Соколик в своей монографии 1965 года, когда до завершения СМ было еще далеко и большинство теоретиков (особенно в СССР) не принимало калибровочно-полевою концепцию всерьез, считал эту концепцию перспективной и говорил о ее важном структурно-теоретическом и философском значении: «Теория компенсирующих полей (так поначалу именовалась теория калибровочных полей в СССР, поскольку калибровочное поле компенсировало нарушение внутренней симметрии, вызванное ее локализацией. – В.В.) возникла как результат обобщения теоремы Нетер на случай локальных групп Ли, то есть конечно-параметрических групп Ли с параметрами, зависящими от координат пространства-времени. Такая формулировка теоремы Нетер позволяет сопоставить инвариантам группы не только законы сохранения, как в случае нелокализованной группы Ли, но так же и взаимодействия» [13. С. 144]. И дальше: «В теории компенсирующих полей каждое взаимодействие вводится для восстановления инвариантности, нарушенной некоторым локальным принципом относительности. Если исходить из существования фундаментальной группы, то есть из Эрлангенской программы Ф. Клейна, то приходим к иерархии вложенных друг в друга локальных групп и тем самым к иерархии взаимодействий...» [Там же. С. 154]. Об Эрлангенской программе Ф. Клейна и ее значении для теоретической физики – см. [14].

В 1972 году в журнале «Вопросы философии» появилась статья Соколика и его ученицы Н.П. Коноплевой, которая в том же году вместе с В.Н. Поповым выпустила первую отечественную книгу по теории калибровочных полей. В этой статье локализация симметрии рассматривается как усиление принципа близкодействия, позволяющее распространить эйнштейновскую идею о том, что геометрия определяется взаимодействием физических тел, с гравитации на три остальных фундаментальных взаимодействия: «Стремление удалить дальное действие из теории поля с помощью локализации симметрии побудило в свое 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 задается априори, а определяется взаимодействием физических тел. В этом подходе как “внутренние”, так и “внешние” свойства симметрии элементарных частиц удастся связать с геометрическими свойствами пространства, обобщающего риманово пространство» [15. С. 125]).

2. Проблема истины и реальности в СМ

Это вообще одна из центральных метафизических проблем физики (научного познания, натурфилософии) со времен Платона. Кстати говоря, в упомянутой выше книге Н.П. Коноплевой и В.Н. Попова «Калибровочные поля» фигурирует образ «платоновой пещеры» как раз в связи с проблемой истины и реальности в калибровочной физике элементарных частиц: «...Исследователь, имеющий дело с современной теорией элементарных частиц, напоминает тех, кто сидит в платоновой пещере спиной к огню и пытается по пляскам теней на стене определить, что происходит с предметами, движущимися у него за спиной и отбрасывающими эти тени. Мы не знаем, что представляет собой “внутренний мир” элементарных частиц, какова природа внутренних симметрий. Тем не менее по отражениям этих внутренних свойств, улавливаемых нашими приборами, макроскопическими и трехмерными, мы пытаемся восстановить происходящее в этом загадочном и недоступном мире... Но если мы не можем “обернуться” и “увидеть сущность”, то можно попробовать понять, как получается “тень” и что такое “огонь”. Видя отображение и зная, как оно получается, мы могли бы “построить сущность”» [15. С. 22].

В физике элементарных частиц (и, соответственно, теории фундаментальных взаимодействий) эта проблема обостряется по трем причинам. Во-первых, мир элементарных частиц, в целом очень зыбкий и эфемерный, «невидим», почти полностью скрыт от непосредственного наблюдения. Он наполнен чрезвычайно короткоживущими частицами, некоторые из них (кварки и глюоны), как выяснилось, не существуют в свободном состоянии. К тому же эти частицы являются квантами физических полей, а вакуумное состояние этих полей, вакуум, не является пустым, а заполнен «виртуальными» частицами, существование которых обусловлено квантово-механическим соотношением неопределенностей.

Во-вторых, область сверхвысоких энергий, превышающих энергию БАКа в сотни и тысячи раз (эта энергия порядка 14 ТэВ, что соответствует расстояниям 10^{-18} м), фактически недоступна для нас. Дальнейшее заметное увеличение энергии ускорителей очень обременительно для человечества, если вообще не находится за пределами его возможностей. Точно так же физики говорят о космологии ранней Вселенной, о временах, абсолютно не достижимых для наблюдения и эксперимента. В результате возникает так называемая проблема «эмпирической невесомости» теории, связанная с отрывом теории от эксперимента [17].

И, в-третьих, современное развитие философии науки в своих радикальных вариантах инструментализма (и антиреализма), в том числе концепции социальной сконструированности научных понятий и объектов, ставит под сомнение уверенность физиков в реальности их теорий и их движения ко все большей истинности этих теорий. Конечно, далеко не все физики склонны к обсуждению таких, метафизических по своему существу, проблем.

Однако среди выдающихся теоретиков, внесших существенный вклад в разработку СМ, такого рода теоретики были и есть. Мы приведем несколько высказываний нобелевских лауреатов (получивших эти премии именно за создание СМ), а именно С. Вайнберга, Ф. Вильчека и Г. т' Хоофта.

Так, С. Вайнберг подчеркивает, что «у каждого физика есть какая-то рабочая философия. Для большинства из нас – это грубый, прямолинейный реализм, то есть убежденность в объективной реальности понятий, используемых в наших теориях. Однако эта убежденность достигается в процессе научных исследований, а не в результате изучения философских трудов» [17. С. 132]. Философия, ставящая под сомнение эту убежденность (а это философия как раз антиреалистического толка), по мнению Вайнберга, оказывается крайне неэффективной, что позволяет ему говорить, особенно учитывая определенную изощренность соответствующих философских построений, о «непостижимой неэффективности философии» в современной физике [Там же. С. 133]. Конечно, позитивизм и конкретно философия Э. Маха сыграли важную роль при создании теории относительности и квантовой механики. Позитивизм также сыграл «ключевую роль в борьбе против квантовой теории поля» в связи с возрождением S-матричного подхода в середине 1950-х – 1960-е годы. Но калибровочные теории к началу 1970-х годов взяли реванш и привели к «самому драматическому отрицанию принципов позитивизма, связанному с развитием современной теории кварков» [Там же. С. 142]. Особенно резко возражал Вайнберг против идеи социальной сконструированности научного знания: «Переход от очевидного наблюдения, что наука является социальным явлением, к выводу, что окончательный продукт науки – наши теории – такие, какие они есть, из-за воздействия общественных или исторических сил, представляется просто логической ошибкой» [Там же. С. 147]. И далее: «Я определенно чувствую, что мы обнаруживаем в физике что-то реальное, нечто, существующее независимо от тех социальных и исторических условий, которые позволили нам это открыть».

Другой нобелевский лауреат Ф. Вильчек при обсуждении проблемы реальности в СМ вводит понятие «реальность-кандидат». Вот как он говорит об этом: «К счастью ...не обязательно вникать в подробности, чтобы понять главный философский смысл (СМ, в данном случае КХД. – В.В.), который заключается в следующем. Чтобы получить локальную симметрию, мы должны ввести глюонные поля. И мы должны обеспечить способы взаимодействия этих глюонных полей с кварками и друг с другом. *Идея* – локальная симметрия – производит конкретный набор уравнений. Другими словами, реализация идеи ведет к реальности-кандидату. Реальность – кандидат,

содержащая цветные глюоны, воплощает в себе идею локальной симметрии. Новые составляющие – цветные глюонные поля – являются частью рецепта для мира-кандидата. Существуют ли они в нашем мире? Как мы уже обсуждали и даже видели на фотографиях, они на самом деле существуют. Реальность-кандидат, родившаяся из идей, – это наша собственная реальность» [18. С. 101–102].

И еще один теоретик, Г.'т Хоофт, удостоенный Нобелевской премии за доказательство перенормируемости СМ, в своей лекции 1998 г. так описал соотношение СМ и реальности, природы, «настоящего мира»: «Теперь мы обрели настоящую уверенность в том, что понимаем основные силы, действующие в природе. Сочетая электрослабую модель с КХД, мы можем получить точное описание природы, так называемую Стандартную модель. Действительно, до сих пор мы видели в наших моделях лишь упрощенные карикатуры настоящего мира, сейчас мы впервые можем рассматривать полученную комбинацию как *теорию*, уже не только как модель. Стандартная модель верна с очень высокой точностью. Ее следовало бы назвать Стандартной теорией» [19. С. 27].

Эти высказывания говорят о том, что физики-теоретики, работающие в области физики элементарных частиц, в том числе и создатели СМ, – в большинстве своем приверженцы той или иной формы научного реализма. Остановимся вкратце на более утонченной (по сравнению с грубым и прямолинейным реализмом, о котором говорил Вайнберг) форме научного реализма, а именно структурном реализме. Он получил развитие в 1990–2000-е годы как раз в связи с обострением полемики между реализмом и инструментализмом в физике элементарных частиц. Наиболее разработанной представляется конструктивный структурный реализм Т. Цао. В нем структура, модель, теория, скажем КХД, кварк-глюонная модель, первична, ее элементы, то есть кварки и глюоны, возникшие как теоретические конструкции, вторичны. «Конструкция ненаблюдаемых сущностей в рамках структурного знания, – резюмирует Цао одну из своих работ, – хотя и надежна, но подвержена ошибкам и подлежит пересмотру. Таким образом, объективное знание относительно лежащей в его основе онтологии может быть достигнуто только путем исторического переговорного процесса между эмпирическими исследователями, теоретическими резонерами и метафизическими интерпретаторами» [21. С. 156]. При этом эти три группы ученых находятся в тесной взаимосвязи, а роль метафизических интерпретаторов берут на себя, чаще всего, сами теоретики, такие как, скажем, Ч. Янг, М. Гелл-Манн, С. Вайнберг, Ф. Вильчек и др. (О структурном реализме см. также монографии [22; 23]).

Конечно, и в период создания СМ, когда теоретико-полевая концепция, в том числе и в ее локально калибровочном варианте, столкнулась с серьезными трудностями, многие теоретики обратились к старому, доброму позитивизму или феноменологизму. Мы имеем в виду отказ от полевого подхода, особенно в теории сильного взаимодействия, в пользу теории *S*-матрицы [5]. Тогда даже такой «антиметафизически» настроенный теоретик, как

Л.Д. Ландау, прибегал к метафизическим аргументам. Правда, В. Берестецкий заметил по этому поводу: «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 крупные успехи КЭД в вычислении радиационных поправок. На самом деле Ландау не мог работать вне атмосферы идейной ясности... Он действительно не любил дискуссий на темы об обосновании наук, но лишь тех, основы которых считал для себя ясными... Совершенно иначе он вел себя в отношении тех областей, в которых ясности нет» [23. С. 234–235]. Вот как сам Ландау мотивировал отказ от полевого подхода, ссылаясь по существу на позитивистский по своему духу принцип наблюдаемости: «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» [24. С. 423].

Некоторые теоретики и математические физики, верящие в реальное существование абстрактных математических структур, склонны к той или иной форме платонизма. Их привела к этому вигнеровская «непостижимая эффективность математики» в физике. Крайней формой такого платонизма является концепция «математической Вселенной» физика М. Тегмарка, согласно которой «наша внешняя физическая реальность является математической структурой» [25. С. 356]. Однако эта экзотическая гипотеза не объясняет, почему именно калибровочная структура и соответствующая ей геометрия расслоенных пространств реализуется в нашей Вселенной, хотя она и объясняет эффективность математики в физике.

3. Роль метафизики в разработке калибровочных теорий и СМ

Для историка науки именно эта функция метафизики представляет особый интерес. И хотя С. Вайнберг говорил о «непостижимой неэффективности философии в физике», мы все-таки, учитывая метафизический опыт квантово-релятивистской революции и используя различные модели научно-познавательного процесса в физике (прежде всего схему с «дугой Эйнштейна», трехслойную схему Вигнера и «ошибочностную концепцию» С.И. Вавилова), попытаемся выявить метафизические факторы в процессе создания калибровочных теорий и СМ.

Начнем с обсуждения вопроса о том, было ли создание СМ научной революцией, сравнимой с квантово-релятивистской революцией первой трети XX века? С одной стороны, это была несомненно масштабная научная революция (см. нашу статью [6]. Например, так считал А.М. Балдин по свидетельству П.С. Исаева [26. С. 257]), потому что была впервые создана единая теория фундаментальных физических взаимодействий (впрочем с некоторыми

оговорками). Это удалось сделать с помощью серии крупных прорывов, связанных с неабелевыми полями Янга–Миллса, открытиями симметрий, лежащих в основе слабых и сильных взаимодействий, введения достаточно «сумасшедших» частиц – кварков и глюонов, а также таких необычных понятий, как «асимптотическая свобода» и «спонтанное нарушение симметрии». Создание СМ справедливо сравнивалось по своему масштабу с максвелловской революцией в электродинамике и созданием ОТО. Вместе с тем СМ – это квантово-релятивистская теория поля, подобная КЭД. Все более радикальные концепции, предлагавшиеся в этот период в качестве альтернативы калибровочно-полевому подходу (нелинейные и нелокальные теории поля, S -матричный и дисперсионный подходы, бутстрап), не выдержали конкуренции с полевой СМ и сошли на нет. Поэтому калибровочная революция до некоторой степени была консервативной (см. статью Е.Л. Фейнберга 1986 г. [27]).

Впрочем, по мнению И.Ю. Кобзарева, создание СМ, несмотря на всю ее значительность, все-таки не дотягивает до полноценной научной революции: «Я считаю... что, несмотря на все успехи КЭД и СМ... ситуация на самом деле такая же, как в эпоху между Максвеллом и появлением частной теории относительности: то есть так же, как тогда считали несомненным существование эфира, так же и сейчас многое из того, что сообщество физиков считает “существующим”, может исчезнуть». И далее, после перечисления ряда проблем и трудностей СМ и космологии: «Все это заставляет меня думать, что следующая революция парадигмы... приведет к устранению из теории многих “реальностей” современной физики. Для этого потребуются какая-то новая математика» [28. С. 201].

В другом месте И.Ю. Кобзарев говорил о том, что при создании СМ произошла не столько смена квантово-релятивистской полевой парадигмы, сколько ее расширение: «Та линия развития, которую я... пытался наметить, часто на многие годы почти исчезала из виду, а на поверхности шумно пробовали разыграть совсем другие сценарии (S -матричные, нелокальные и прочие. – В.В.). Расширение парадигмы на новую область безболезненно никогда не проходит, неизбежно возникают противоречия, кризисы, да и сама парадигма перестраивается и меняется» [3. С. 27].

С.В. Илларионов (вместе с М.Д. Ахундовым) использовали для описания калибровочной революции (они пришли к выводу, что таковая свершилась) методологию исследовательских программ И. Лакатоса. Исследовательскую программу, лежащую в основе СМ, они квалифицировали как существенно новую, «поскольку она возникла в результате нетривиального синтеза “классической” квантовой теории поля с идеями симметрии, локальной калибровочности ряда симметрий, их спонтанного нарушения и подхода к перенормировкам не просто как к прагматическому рецепту, а как к фундаментальному ограничению на возможную математическую структуру теорий (из рецепта “защитного пояса” старой исследовательской программы перенормировка превратилась в принцип “ядра” новой программы)» [29. С. 427].

Трудно согласиться с оценкой стиля СМ и самой СМ как проявления прагматизма и своего рода «прикладнизации» физики (точка зрения Л. Смолина и присоединившейся к нему Е.А. Мамчур): «В современной физике господствует идеология прагматизма и инструментализма. Мы являемся свидетелями процесса, аналогичного... процессу прикладнизации... Этот стиль, говорит Смолин, хорошо работал при создании стандартной модели физики элементарных частиц и начал с 1940-х годов господствовать в физическом познании». В этой «прикладнизации» Мамчур видит реальный кризис не только в физике элементарных частиц, но и в физике и даже научном знании в целом. «Но, думается, – заключает она цитированную статью, – такой кризис – явление временное, он преодолим, его можно “излечить”, сменив инструменталистскую стратегию научного исследования в физике на стратегию периодического погружения в сферы “сверхсущего”, в область метафизики» [30. С. 217–219]. Но в героический период создания СМ одержала верх над позитивистской (инструменталистской) стратегией как раз научно-реалистическая (калибровочно-полевая) исследовательская программа. Об этом мы говорили выше, цитируя С. Вайнберга, Т. Цао, С.В. Илларионова и др.

Рассматривая создание СМ с позиций эйнштейновской схемы построения физической теории (с так называемой «дугой Эйнштейна», символизирующей не-логический (но, по-нашему мнению, все-таки конструктивный путь) от эмпирико-экспериментального слоя и предшествующих теорий к основным аксиомам и принципам новой теории (рис. 1), обратим внимание на факторы метафизического характера, определяющие эту «дугу» (аналогичный подход мы использовали при изучении истории создания теории относительности, прежде всего ОТО – см. нашу статью [31. С. 108–125]).

В обоих случаях действовали близкие по своему смыслу факторы, прежде всего методологические (или метафизические) принципы физики, то есть, по Н.Ф. Овчинникову, принципы теоретизации научного знания. Это, в первую очередь, – принципы симметрии, сохранения, соответствия, простоты, единства научного знания и др. [32]. При этом принцип симметрии расширялся в локально-калибровочном смысле, а также в плане особого рода нарушений симметрии. Конечно, как и при создании квантовых и релятивистских теорий, сохранили свое значение две «непостижимые эффективности» математики и аналитической механики (точнее вариационных принципов). Именно вариационные принципы (лагранжианы!) в сочетании с локально-калибровочными симметриями приводили к представлению о расширенной нетеровой структуре, оказавшейся структурной основой СМ. Что касается влияния собственно философских, или метафизических, концепций, то физики, будучи «философскими оппортунистами» по Эйнштейну, использовали так или иначе разные философские концепции от Платона, Лейбница и Канта (Тегмарк, Вильчек, Соколик, Коноплева и др.) до различных форм феноменализма (позитивизма) и структурного реализма (Гейзенберг, Чу, даже Ландау,

а также Вайнберг, Цао и др.). Хотя, пожалуй, можно согласиться с С. Вайнбергом, что в целом чисто философские концепции при формировании СМ заметной роли не сыграли.

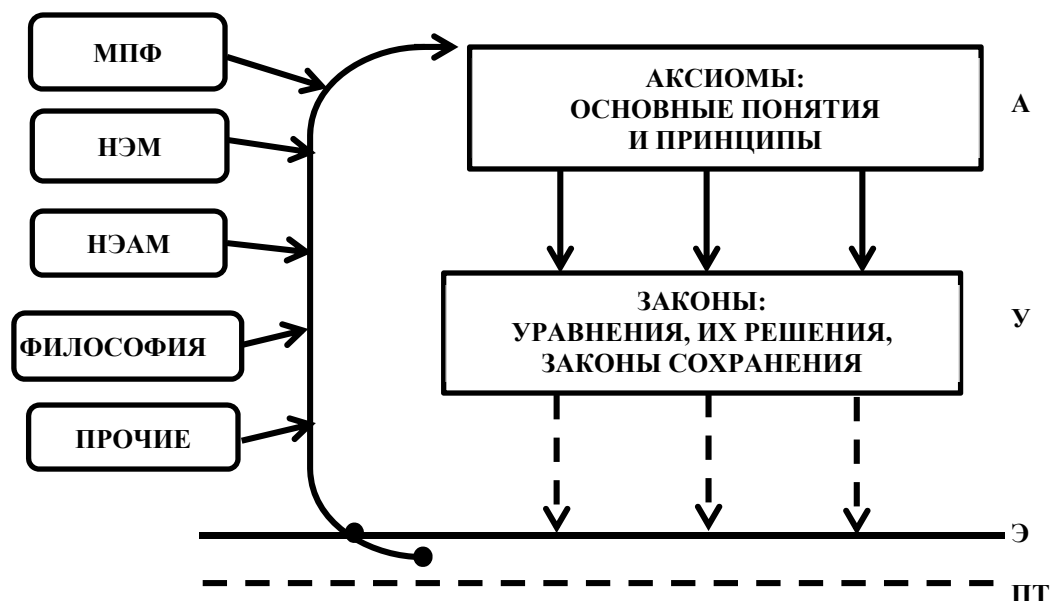


Рис. 1. Дуга Эйнштейна:

МПФ – методологические (метафизические) принципы физики (симметрии, сохранения, соответствия, причинности, наблюдаемости, простоты и др.);
 НЭМ – непостижимая эффективность математики в физике;
 НЭАМ – непостижимая эффективность аналитической механики;
 ПТ – предшествующие теории

Упомянем еще об одной квазиметафизической схеме научного познания в физике, а именно пансимметрической трехслойной схеме классика симметричного подхода Ю. Вигнера [33] (рис. 2). Средний слой в ней – это законы природы, именно они управляют явлениями или событиями, образующими нижний, эмпирический слой. Верхний же слой – это принципы симметрии, определяющие форму и структуру законов природы. С точки зрения вигнеровской схемы форма четырех фундаментальных сил природы и соответствующие уравнения полей Янга–Миллса целиком или почти целиком определяются локально-калибровочными симметриями.

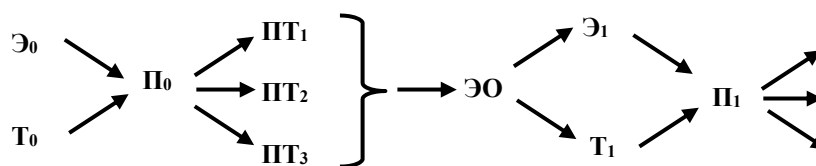


Рис. 2. Схема физического познания по Ю. Вигнеру

История создания СМ от пророческой статьи Янга и Миллса 1954 года до доказательства перенормируемости электрослабой теории и КХД и введения понятий «асимптотической свободы» в начале 1970-х годов становится более понятной в свете «ошибочностной» концепции развития научного знания С.И. Вавилова – К. Поппера, которая схематично изображена на рис. 3. (см. нашу работу в ИИФМ-2016-2018 [34]). В истории создания СМ калибровочно-полевая концепция в течение ряда лет, несмотря на свою красоту, считалась ошибочной. Более правильной и успешной казалась S-матричная феноменологическая (не локально-полевая) программа, которая сама после разрешения ряда главных трудностей калибровочной стратегии была признана если и не ошибочной, то бесперспективной. Правда, некоторые аспекты этой феноменологической программы оказались важными и эвристичными при утверждении калибровочной идеологии (в частности, при обосновании понятия асимптотической свободы в КХД). Об этой, «ошибочностной», по существу, динамике формирования СМ говорится в блистательных «Диалогах физика и математика» И.Ю. Кобзарева и Ю.И. Манина: «История того, как это все (то есть СМ. – В.В.) открылось, больше похожа на комедию ошибок, чем на порядочный индуктивный процесс по Стюарту Миллю (это говорит Математик. – В.В.). Конечно (отвечает Теоретик, то есть Физик. – В.В.), но в основе догадок, приведших к современным теориям, лежит простое заключение по аналогии... В догадках, которые привели к группе цвета и слабой группе, также все время сочетались элементы угаданной истины и ошибочных отождествлений, предубеждений. В конце концов, заблуждения приходили в противоречие с фактами и отпадали, а фрагменты истины сливались в согласованную картину». На последующее замечание Математика, что «дорога от КЭД к теориям полей Янга–Миллса не была такой торной, как у вас получилось», последовало уточняющее согласие Физика-теоретика: «Конечно. Та линия развития, (то есть путь от теории Янга-Миллса к СМ. – В.В.)... часто на многие годы почти исчезала из виду, а на поверхности шумно пробовали разыграть совсем другие сценарии. Расширение парадигмы на новую область безболезненно никогда не проходит и сама парадигма перестраивается и меняется» [3. С. 26–27]. В нашей статье «У истоков СМ» процесс формирования СМ мы пытались представить как последовательность поворотных моментов, некоторые из них были фактически «скрытыми» (таковым был поворотный момент, связанный с концепцией локально-калибровочной природы сильного и слабого взаимодействий). «Скрытость» означала то, что соответствующая концепция по ряду причин поначалу была отвергнута большинством физиков, но спустя некоторое время была возрождена и получила развитие.

В заключение следует сделать несколько замечаний.

Во-первых, мы видим, насколько сложным оказывается вопрос о метафизических (или философских) аспектах современных фундаментальных физических теорий и их формирования. При этом речь идет о физике второй половины XX века, история которой изучена явно недостаточно.



**Рис. 3. «Ошибочностная» схема развития научного знания
С.И. Вавилова – К. Поппера:**

Т – теории; Э – экспериментально-эмпирическая база;
П – проблема (проблемная ситуация); ПТ – пробные теории; ЭО – элиминация ошибок

Во-вторых, при известной разногласии мнений напрашивается выделение трех блоков проблем, которые на самом деле оказываются тесно переплетенными друг с другом. Расширенная нетерова структура калибровочных теорий и вообще вопросы структуры теории связаны, в частности, с проблемой реальности (в плане концепции структурного реализма). Со структурными проблемами, как и с проблемой реальности, связаны во многих отношениях метафизические аспекты формирования СМ.

В-третьих, «метафизический» взгляд на историю создания СМ позволяет глубже осмыслить и саму эту историю и увидеть разнообразие соответствующих позиций физиков и философов. Наконец, мы видим, насколько тесно переплетены между собой физические, метафизические и исторические стороны современной теории элементарных частиц (и, соответственно, теории фундаментальных взаимодействий).

Стоит сказать несколько слов об отечественном вкладе в физику и метафизику СМ. Что касается физики, то об этом – см. нашу работу «У истоков СМ» [5]. В ней говорится о противоречивой роли проблемы нуль-заряда и авторитета Ландау – Померанчука, о работах Фаддеева, Попова, Славнова и др. по квантованию калибровочных полей, а также об отечественном вкладе в концепцию спонтанного нарушения симметрии – Боголюбова, Ландау и Гинзбурга, Ларкина и Вакса и др. Метафизическая часть проблемы глубоко и нетривиально обсуждалась Г.А. Соколиком и Н.П. Коноплевой. Не прошли мимо этой части и наши философы науки, которых мы цитировали, – С.В. Илларионова, М.Д. Ахундова, Е.А. Мамчур и др.

Литература

1. Огурцов А.П. Философия науки: двадцатый век. Концепции и проблемы: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: Мир, 2011.
2. Mills R. Gauge fields // Am. J. of Phys. 1989. № 57 (6). P. 493–507.
3. Кобзарев И.Ю., Манин Ю.И. Элементарные частицы. Диалоги физика и математика. М.: ФАЗИС, 1997. VIII+ 208 с.
4. Вильчек Ф. Красота физики: Постигая устройство природы. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 604 с.
5. Визгин В.П. У истоков стандартной модели (рукопись).
6. Янг Ч., Миллс Р. Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность // Элементарные частицы и компенсирующие поля: сборник статей / под ред. Д.Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. С. 28–38.

7. Утияма Р. Инвариантная теория взаимодействия // Элементарные частицы и компенсирующие поля: сборник статей / под ред. Д.Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. С. 250–273.
8. Визгин В.П. Нетерова структура физических теорий: исторические и философско-научные аспекты (К столетию теоремы Нетер о связи принципов симметрии с законами сохранения) // Метафизика. 2018. № 4 (30). С. 81–112.
9. Weyl H. Electron und Gravitation (1929) // H. Weyl. Gesammelte Abhandlungen. Bd. 3. Berlinetc.: Springer, 1968. S. 245–267.
10. Визгин В.П. Единые теории поля в квантово-релятивистской революции. М.: КомКнига, 2006. 312 с.
11. Pais A. Inward bound. Of matter and forces in the physical world. Oxford: Oxford University Press, 1986. XI+666 p.
12. Янг Ч. Эйнштейн и физика второй половины XX века // УФН. 1980. Т. 132. Вып. 9. С. 169–175.
13. Соколик Г.А. Теоретико-групповое введение в физику элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1965.
14. Коноплева Н.П., Соколик Г.А. Симметрия и типы физических теорий // Вопросы философии. 1972. № 1. С. 118–127.
15. Коноплева Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. М.: Атомиздат, 1980. 239 с.
16. Павленко А.Н. Принцип наблюдаемости, «стадия эмпирической невесомости» и «конструктивный эмпиризм» // Вестник РУДН (Философия). 2011. № 3. С. 8–21.
17. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: УРСС, 2004. 256 с.
18. Вильчек Ф. Тонкая физика. СПб.: Питер, 2018. 336 с.
19. Хоофт Г. 'т. Перенормировка калибровочных теорий // Г. 'т Хоофт. Избранные лекции по математической физике. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ин-т компьютерных исследований, 2008. С. 6–31.
20. Цао Т.Ю. Структурный реализм и концептуальные вопросы квантовой хромодинамики // Эпистемология и философия науки. 2008. Т. 17. № 3. С. 143–156.
21. Cao T.Yu. Conceptual development of the 20-th century field theories. Cambridge: CambridgeUniversityPress, 1997. XX+ 433 p.
22. Фурсов А.А. Проблема статуса теоретического знания науки в полемике между реализмом и антиреализмом. М.: Изд. Воробьев А.В., 2013. 240 с.
23. Берестецкий В.Б. Нуль-заряд и асимптотическая свобода (1976) // В.Б. Берестецкий. Проблемы физики элементарных частиц. М.: Наука, 1979. С. 231–259.
24. Ландау Л.Д. О фундаментальных проблемах (1960) // Л.Д. Ландау. Собрание трудов. Т. 2. М.: Наука, 1969. С. 421–424.
25. Тегмарк М. Наша математическая Вселенная. В поисках фундаментальной природы реальности. М.: АСТ; CORPUS, 2017. 592 с.
26. Исаев П.С. Обыкновенные, странные, очарованные, прекрасные...: Об истории развития теоретических идей в физике элементарных частиц. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
27. 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.
28. Кобзарев И.Ю. Присутствуем ли мы при кризисе базисной парадигмы современной теоретической физики? // Философские проблемы физики элементарных частиц (30 лет спустя). М.: ИФРАН, 1994. С. 124–128.
29. Илларионов С.В., Ахундов М.Д. Методология научных революций и развитие физики // С.В. Илларионов. Теория познания и философия науки. М.: РОССПЭН, 2007. С. 415–427.

30. Мамчур Е.А. Есть ли основания говорить о кризисе в естественных науках? // Наука и социальная картина мира. К 80-летию академика В.С. Степина / под ред. В.И. Аршинова, И.Т. Касавина. М.: Альфа-М, 2014. С. 205–219.
31. Визгин В.П. Метафизические аспекты «дуги Эйнштейна» // Метафизика. 2013. № 1 (7). С. 108–125.
32. Овчинников Н.Ф. Принципы теоретизации знания. М.: Агро-принт, 1996. 215 с.
33. Вигнер Ю. Явления, законы природы и принципы инвариантности (1964) // Е. Вигнер. Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971. С. 47–58.
34. 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.

Годы жизни некоторых главных действующих лиц

Берестецкий В.Б. (1913–1977)	Окунь Л.Б. (1929–2015)
Боголюбов Н.Н. (1909–1992)	Пайс А. (1918–2000)
Вавилов С.И. (1891–1950)	Паули В. (1900–1960)
Вайнберг С. (р. 1933)	Померанчук И.Я. (1913–1966)
Вейль Г. (1885–1955)	Сакураи Дж. (1933–1982)
Вигнер Ю. (1902–1995)	Салам А. (1926–1996)
Вильчек Ф. (р. 1951)	Соколик Г.А. (1929–1982)
Гейзенберг В. (1901–1976)	Тамм И.Е. (1895–1971)
Гелл-Манн М. (1929–2019)	Утияма Р. (1916–1990)
Глэшоу Ш. (р. 1932)	Фаддеев Л.Д. (1934–2017)
Гросс Д. (р. 1941)	Фейнберг Е.Л. (1912–2005)
Иваненко Д.Д. (1904–1994)	Фейнман Р. (1918–1988)
Илларионов С.В. (1938–2000)	Фрадкин Е.С. (1924–1999)
Иоффе Б.Л. (р. 1926)	Халатников И.М. (р. 1919)
Киржниц Д.А. (1912–1998)	Хоофт Г.'т (р. 1946)
Кобзарев И.Ю. (1932–1991)	Цао Т.Ю. (р. 1941)
Коноплева Н.П. (р. 1941)	Хриплович И.Б. (р. 1937)
Ландау Л.Д. (1908–1968)	Хиггс Р. (р. 1925)
Миллс Р. (р. 1927)	Ширков Д.В. (1928–2016)
Овчинников Н.Ф. (1915–2010)	Янг Ч. (р. 1922)
Огурцов А.П. (1936–2014)	

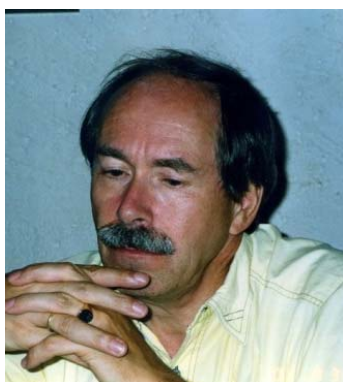
Портреты некоторых «действующих лиц»



Ч. Янг (р. 1922) и Р. Миллс (р. 1927)



Ф. Вильчек (р. 1951)



Г.'т Хоофт (р. 1946)



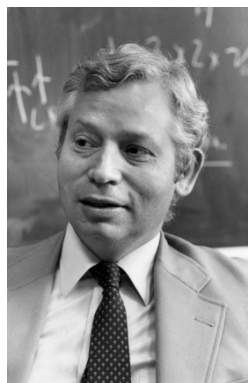
С.В. Илларионов (1938–2000)



Н.Ф. Овчинников (1915–2010)



Ю. Вигнер (1902–1995)



С. Вайнберг (р. 1933)



И.Ю. Кобзарев (1932–1991)



Г.А. Соколик (1929–1982)

METAPHYSICAL ASPECTS OF THE STANDARD MODEL OF THE ELEMENTARY PARTICLES PHYSICS AND THE HISTORY OF ITS CREATION

VI. P. Vizgin

*Vavilov's Institute for the History of Science and Technology of the RAS
1/5, Staropanslij Per., Moscow, 103012, Russian Federation*

Abstract. Metaphysical aspects of the standard model (SM) of the modern elementary particles theory are considered. This article briefly views a history of the formation of the SM (from fundamental paper of C. Yang and R. Mills (1954) to the completion of electroweak theory and quantum chromodynamics in the early 1970s). Three groups of the interrelated metaphysical aspects are discussed: local gauge symmetry's structure of the theory, problem of the truth and reality and the role of the metaphysical factors in the construction of the theory. Scientific-realistic nature of the SM creator's metaphysical views are emphasized. A. Einstein's model of the theory's construction (with "Einstein's arc"), E. Wigner's three layer scheme of the structure and the development of the scientific knowledge (with the symmetry principles as a main layer) and S.I. Vavilov's "mistakability" conception of the scientific knowledge development are proposed for the study of the metaphysical factors and their role in the formation of the SM.

Keywords: Standard model (SM), metaphysical aspects, local gauge symmetry's structure of the theory, scientific realism, principles of the symmetry, Einstein's model of the theory's construction, S.I. Vavilov's "mistakability" conception of the scientific knowledge development.