
К ИСТОРИИ ИДЕЙ В ФИЗИКЕ И МЕТАФИЗИКЕ

DOI: 10.22363/2224-7580-2021-2-105-124

ФЕНОМЕН УПУЩЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В НАУЧНЫХ РЕВОЛЮЦИЯХ В ФИЗИКЕ XX ВЕКА

Вл.П. Визгин

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

Аннотация. Исследуется феномен упущенных возможностей в процессе двух научных революций в фундаментальной физике: в квантово-релятивистской революции первой трети XX в. и в калибровочной революции, приведшей к созданию стандартной модели в физике элементарных частиц (1954-1974 гг.). На материале первой революции рассмотрено два случая упущенных возможностей, относящихся к А. Пуанкаре и его роли в истории создания специальной теории относительности (СТО). Рассмотрены также два случая упущенных возможностей, касающихся А. Эйнштейна, в связи с теорией расширяющейся Вселенной и неудавшимися попытками построения единой теории поля на основе геометрической полевой программы. Показано, что в этих случаях причинами «упущений» во многом были эпистемологические и метафизические установки ученых. Имеются в виду конвенционализм Пуанкаре, а также вера Эйнштейна в стационарность Вселенной и невероятную мощь математики как единственного творческого начала при построении теорий. На материале второй революции исследовано два подобных сюжета. Первый сюжет относится к ключевой для создания стандартной модели концепции калибровочных полей Янга–Миллса. К ней очень близко подошли несколько теоретиков, и прежде всего В. Паули, которые по разным причинам не сделали решающего шага и упустили возможности связать свое имя с теорией калибровочных полей. Паули считал, что, несмотря на теоретическую привлекательность, она не способна преодолеть экспериментально-эмпирические трудности. Второй сюжет связан с отказом в 1950–1960-е гг. большинства теоретиков от квантово-полевой программы в пользу феноменологической S-матричной программы. В результате многие теоретики упустили свои возможности внести вклад в создание стандартной модели. И это «упущение» было отчасти мотивировано позитивистским тезисом о том, что в теории должны фигурировать только принципиально наблюдаемые величины. Подчеркнуто, что изучение феномена упущенных возможностей открывает путь для альтернативной истории науки.

Ключевые слова: Научные революции, упущенные возможности, исследовательские программы, квантово-релятивистская революция, специальная теория относительности, теория расширяющейся Вселенной, единые теории поля, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский, А.А. Фридман, калибровочная революция, стандартная модель, теория Янга–Миллса, В. Паули

Введение

Обычно считается, что в XX в. была одна великая революция в фундаментальной физике и в физике вообще: это квантово-релятивистская революция в 1-й трети XX в. [1–3]. Решающие события в ней приходятся на 1910–1920-е гг., как и главные события в коперниканской, галилей-кеплеровской фазе революции XVII в. и «французской» фазе революции, связанной с созданием классической физики XIX в. [4]. И в самом деле, с тех пор прошло более столетия, теоретические основы физики, ее фундамент остаются все теми же: «кванты» (квантовая механика и квантовая теория поля) и специальная теория относительности (СТО) – в микромире и общая теория относительности (ОТО) – в мегамире. Однако при более внимательном изучении «общественного мнения» физиков выясняется, что оно склонно относить к настоящей научной революции создание стандартной модели (СМ) в физике элементарных частиц, являющейся калибровочно-полевой теорией фундаментальных взаимодействий (по крайней мере, трех – электромагнитного, слабого и сильного – из четырех) [5; 6]. Эту революцию можно очень четко датировать. Она начинается со знаменитой статьи Ч. Янга и Р. Миллса 1954 г. по калибровочной теории сильных взаимодействий и завершается в 1973–1974 гг. после доказательства перенормируемости электрослабой теории и введения понятия асимптотической свободы, позволившего завершить создание калибровочной теории сильного взаимодействия, а именно теории кварков и глюонов, получившей название квантовой хромодинамики (КХД). С тех пор основы СМ остались незыблемыми, несмотря на ожидания серьезных перемен, связанных как с экспериментами на коллайдерах (прежде всего большом адронном коллайдере, БАКе), так и с такими теоретическими проектами, как теория струн или теория суперсимметрии [4].

История физики содержит немало ситуаций, когда физик очень близок к открытию, но в решающий момент делает ошибочный выбор и тем самым упускает это открытие. Ф. Дайсон ввел для подобного рода ситуаций вполне естественное именование – «упущенные возможности» [7]. Правда, он имел в виду в основном упущения физиков-теоретиков и математиков, связанные с их недостаточным вниманием друг к другу, точнее к их теориям и конструкциям. Но, конечно, упущения могут быть и иного рода, и они особенно драматичны, если относятся к масштабным открытиям революционного характера. Мы рассмотрим несколько таких случаев, имевших место в двух упомянутых революциях в физике. Четыре случая касаются релятивистской революции: открытия СТО и четырехмерного мира СТО (А. Пуанкаре –

А. Эйнштейн и тот же Пуанкаре – Г. Минковский), возможности использования концепции Минковского на начальном этапе создания ОТО (А. Эйнштейн), теории расширяющейся Вселенной (Эйнштейн и А.А. Фридман) и беспрецедентной приверженности Эйнштейна геометрической полевой программе, противостоящей бурно прогрессирующей квантово-теоретической программе. И два случая касаются калибровочной революции в физике фундаментальных взаимодействий. Первый относится к открытию неабелевых калибровочных полей, полей Янга–Миллса, теория которых легла в основу СМ. К этому открытию были очень близки В. Паули и Р. Утияма (а также некоторые другие теоретики), которые упустили свои возможности. Второй случай относится к отказу ряда теоретиков в 1950–1960-е гг. от квантово-полевого подхода к проблеме фундаментальных взаимодействий и, соответственно, к упущенной возможности внести более значительный вклад в создание СМ, по сравнению с тем, который был ими реально внесен.

Прежде всего, возникает вопрос о причинах упущения тех или иных перспективных возможностей, особенно таких, которые сыграли важную роль в научной революции. Если представить революционный процесс как последовательность поворотных моментов, то одни исследователи в эти моменты делают правильный выбор, а другие ошибочный. Конечно, правильность или ошибочность выбора фиксируется только после завершения процесса. Но часто, хотя и не всегда, упущенная возможность связана с ошибкой, ошибочным выбором. В процессе развития научной революции, как правило, конкурируют две или более крупных исследовательских программ. И тогда примкнувшие к проигравшей программе оказываются в числе упустивших возможность, а эта проигравшая программа будет признана впоследствии ошибочной. Но бывает и так, что исследователь идет в правильном направлении, но сделать завершающий правильный шаг мешают некоторые присущие ему качества, например, недостаточная научная смелость, чрезмерная самоуверенность или вера в общепризнанные авторитеты или концепции, недооценка математического аспекта при разработке теории и др. Сделать правильный выбор ученому могут помешать и его философские предпочтения. В этих случаях для анализа причин упущения перспективных возможностей может оказаться полезной эпистемология интеллектуальных добродетелей и пороков [8; 9]. Однако не следует забывать, что, как заметил С.И. Вавилов, именно «на ошибках вырастает наука» и можно даже говорить об «ошибочной» концепции развития научного знания [10].

Таким образом, ошибки даже у выдающихся ученых неизбежны, а значит, неизбежны и упущенные возможности. И поэтому можно говорить о важной историко-научной закономерности, а именно о феномене упущенных возможностей. Задача историка науки – выявить причины упущений в каждом конкретном случае. Кроме того, особого внимания заслуживают и драматические последствия некоторых упущений, особенно в тех случаях, когда эти упущения так или иначе сказались на научной судьбе ученого. Далее мы рассмотрим несколько разного рода упущений, относящихся к периоду

квантово-релятивистской революции и так или иначе связанных с созданием СТО и ОТО и фигурой Эйнштейна. А затем обсудим пару упущений, имевших место в калибровочной революции 1950–1970-х гг. О всех этих упущенных возможностях вкратце было сказано выше.

Квантово-релятивистская революция первой трети XX века

В этом разделе мы будем в основном говорить о возможностях, упущенных Эйнштейном (хотя и не только им). На первый взгляд, это выглядит странно, поскольку он больше, чем кто-либо другой, сделал для этой революции. Обе теории относительности связаны, главным образом, с его именем. Весьма значителен и его вклад в квантовую теорию. Он также первым применил ОТО к проблеме устройства Вселенной.

1. *Две возможности, упущенные А. Пуанкаре при создании СТО.* Но начнем мы не с него, а с А. Пуанкаре, который сделал очень много для создания СТО, но все-таки дважды упустил возможности, которые реализовали Эйнштейн и Минковский. Хорошо известен многократно обсуждавшийся вопрос о сравнительном вкладе А. Пуанкаре и А. Эйнштейна в создание СТО [11–19]. Мы ограничимся несколькими выводами и высказываниями самого Пуанкаре, далее Л. де Бройля, затем В.Л. Гинзбурга и, наконец, Т. Дамура, известного французского теоретика, автора замечательной книги об Эйнштейне, из которых будут вполне ясны причины упущенной им возможности стать главным создателем СТО.

Начнем с весьма обширного фрагмента речи Л. де Бройля, произнесенной в связи со столетием со дня рождения Пуанкаре: «Еще немного и Анри Пуанкаре, а не Альберт Эйнштейн первым построил бы теорию относительности во всей ее общности, доставив французской науке честь этого открытия... Однако Пуанкаре так и не сделал решающего шага и предоставил Эйнштейну честь разглядеть все следствия из принципа относительности и, в частности, путем глубокого анализа измерений длины и времени выяснить подлинную физическую природу связи, устанавливаемой принципом относительности между пространством и временем. Почему Пуанкаре не дошел до конца в своих выводах?.. Пуанкаре как ученый был прежде всего чистым математиком... Пуанкаре занимал по отношению к физическим теориям несколько скептическую позицию, считая, что вообще существует бесконечно много логически эквивалентных точек зрения и картин действительности, из которых ученый, руководствуясь исключительно соображениями удобства, выбирает какую-то одну. Вероятно, такой номинализм иной раз мешал ему признать тот факт, что среди логически возможных теорий есть такие, которые ближе к физической реальности, во всяком случае, лучше согласуются с интуицией физика, и тем самым больше могут помочь ему» [12. С. 706–707]. Близкую позицию по этой проблеме занимал В.Л. Гинзбург, хотя с некоторыми существенными уточнениями: «...Если судить по опубликованным материалам, Пуанкаре был, по-видимому, довольно близок к созданию СТО, но до конца не дошел. Почему так произошло, можно только

гадать. Возможно, главная причина в том, что Пуанкаре был все же в первую очередь математиком и в этой связи ему особенно трудно подняться (или опуститься?) до четкого понимания столь важных для физики сторон проблемы, как достаточно определенное уточнение смысла всех вводимых величин и понятий. Другая, хотя и близкая, гипотеза такова: Пуанкаре помешала его приверженность к конвенционализму, то есть течению, подчеркивающему (и переоценивающему) роль условных элементов и определений в физике... Переоценка конвенционального элемента в познании может помешать уточнению понятий... Должен подчеркнуть, однако, что подобные гипотезы, в данном случае касающиеся Пуанкаре, не только произвольны, но и вообще незаконны, неправомочны. Пуанкаре, несомненно, принял активное участие в создании СТО, его вклад бесспорен. Спрашивать же, почему он еще не выполнил и работу Эйнштейна, можно не с большим основанием, чем в отношении всех физиков того времени, – великие работы потому и называются великими, что сделать их крайне трудно» [16. С. 130–131]. В.Л. Гинзбург, как будто, сначала присоединяется к выводам де Бройля («математическое отношение» к физической реальности и конвенционалистская эпистемология), а затем готов тут же эти выводы поставить под сомнение.

Все-таки вопрос о том, почему Пуанкаре, так много сделавший для открытия СТО, так и не сделал последнего решающего шага, представляется вполне правомерным. И соотечественник Пуанкаре, и современный теоретик Т. Дамур в своей недавно вышедшей книге «Мир по Эйнштейну...» также детально обсуждает этот вопрос и в общем соглашается с точкой зрения де Бройля и Гинзбурга (за исключением последнего скептического замечания). Причину «упущения» Пуанкаре он видит в «бесплодности научной философии Пуанкаре, сводящейся к абсолютной “условности”». Правда, он к конвенционализму Пуанкаре добавляет еще его некоторые философские предпочтения и психологические особенности: «Возможно, этот слишком критический подход Пуанкаре в сочетании с его скептическим идеализмом, консерватизмом и математическим видением физической реальности помешал ему сначала серьезно отнестись, а затем физически развить понятие структуры пространства-времени, которое ему удалось первым обнаружить» [19. С. 75].

Дамур для подтверждения своего вывода приводит обширное высказывание Пуанкаре из его лондонской лекции «Пространство и время», прочитанной в мае 1912 г. и опубликованной в «Последних мыслях» Пуанкаре (1913): «Какова будет наша позиция в отношении этих новых концепций? Будем ли мы вынуждены изменить свои выводы [относительно имеющейся у нас свободы для принятия тех или иных соглашений, которые нам кажутся приемлемыми]? Конечно, нет: мы приняли соглашение только потому, что оно казалось нам удобным, и мы сказали, что ничто не может заставить нас отказаться от него. Сегодня некоторые физики хотят принять новое соглашение. И не потому, что они вынуждены. Просто они считают это новое соглашение более удобным, вот и все; и те, кто не разделяет нового мнения, вправе сохранять старый порядок и не нарушать старые привычки. И, между нами, я думаю, это то, что они будут делать долго» (цит. по [19. С. 75]). Подчеркивая

то обстоятельство, что Пуанкаре удалось первым обнаружить или, точнее, ввести понятие структуры пространства-времени, Дамур также имеет в виду и, так сказать, второе его «упущение», а именно открытие четырехмерного «мира», которое мы связываем с именем Г. Минковского.

Многие полагали, в том числе поначалу и сам Эйнштейн, что Минковский разработал просто новый математический формализм СТО. Но два доклада Минковского (геттингенский, 1907 г., и кельнский, 1908 г.) начинаются торжественно и концептуально, что говорит о его отношении к четырехмерной формулировке теории как к открытию структуры пространства и времени физической реальности. Это подчеркивается и введением нового, скорее физического, понятия, понятия *мира*, физического и даже онтологического эквивалента понятия четырехмерного пространственно-временного многообразия (более подробное рассмотрение этого открытия Минковского – см. [20–22]). Минковский при этом ссылается на главные «спецрелятивистские» работы Пуанкаре 1905–1906 гг., в которых уже использовался четырехмерный подход, правда, только как специфический математический прием для вычисления инвариантов при попытке создать лоренц-ковариантное обобщение ньютоновского закона всемирного тяготения. Пуанкаре и здесь был очень близок к открытию четырехмерного мира как фундаментальной физической реальности, но упустил эту возможность, которая была реализована Минковским. И здесь, очевидно, негативную роль сыграл его конвенционализм. Заслуживает внимания при этом то обстоятельство, что Минковский был прежде всего математиком, как и Пуанкаре, но, насколько известно, конвенционалистская философия не была ему близка. Скорее, в этой истории проявилась своеобразная, близкая к физической интуиция выделения таких математических структур физики, которые допускают эффективную онтологизацию. С точки зрения эпистемологии добродетели (см. об этом направлении философии науки – [8]) можно считать присущий Пуанкаре конвенционализм своего рода эпистемическим пороком, который дважды помешал ему при создании СТО и ее четырехмерной теоретико-инвариантной концепции.

2. Не упустил ли Эйнштейн возможность создать тензорно-геометрическую концепцию гравитации на несколько лет раньше, недооценив четырехмерный подход Минковского?

Как мы знаем, важнейшим шагом на пути к созданию ОТО была разработка Эйнштейном совместно с М. Гроссманом тензорно-геометрической концепции гравитации (1913), согласно которой потенциал гравитационного поля отождествлялся с метрическим тензором искривленного четырехмерного пространства-времени. Само это отождествление стало возможным благодаря соединению принципа эквивалентности, открытого Эйнштейном в 1907 г. («счастливейшая мысль в моей жизни», по его словам), с четырехмерной концепцией Минковского (1907–1908), которую Эйнштейн поначалу серьезно не принимал и по достоинству оценил только спустя примерно четыре или пять лет [20; 22]. «В первое время, – вспоминал впоследствии М. Борн, – примерно к 1909 г., когда я познакомился с Эйнштейном, он... видел в работе Минковского не более, чем излишний математический труд» [23. С. 88].

И только в начале 1911 г. его отношение к четырехмерному меняется: «Наконец, еще несколько слов о чрезвычайно интересном математическом направлении, которым теория обязана главным образом математику Минковскому... Дальнейшее применение этого равноправия (то есть равноправия временной и пространственных координат. – В.В.) ...привело к чрезвычайно ясному изложению теории относительности, существенно облегчающему ее приложения» [24. С. 186]. Уравнения движения материальной точки в СТО Минковский записывал с помощью вариационного принципа в метрической форме. Эйнштейн, пытаясь распространить принцип эквивалентности на статические неоднородные гравитационные поля и используя эту вариационно-метрическую форму уравнений движения в таких полях, приходит к выводу о том, что псевдоевклидова метрика становится псевдоримановой и компоненты метрического тензора приобретают смысл гравитационных потенциалов. Рассказывая об этом в «Автобиографических набросках», посвященных памяти М. Гроссмана, он подчеркнул: «Важным здесь оказался анализ Г. Минковским формальных основ специальной теории относительности. Его можно сконцентрировать в следующем предложении: четырехмерное пространство имеет... псевдо-евклидову метрику... Принцип эквивалентности позволяет нам ввести нелинейные преобразования координат...», что и приводит нас к римановой (точнее, псевдоримановой) геометрии [25. С. 353].

Еще более высокая оценка четырехмерной концепции и идей Минковского была дана Эйнштейном в его первой научно-популярной книге по теории относительности, где он писал, что без этого открытия Минковского «общая теория относительности... быть может, оставалась бы в зачаточном состоянии» [26. С. 559]. Естественно возникает вопрос, не упустил ли Эйнштейн возможность открыть тензорно-геометрическую концепцию гравитации на несколько (четыре или пять) лет раньше, если бы четырехмерную геометрическую конструкцию СТО оценил по достоинству не в 1911–1912 гг., а уже в 1907–1908 гг., когда были выдвинуты и принцип эквивалентности, и четырехмерная формулировка СТО? Вопрос правомерен, но однозначный ответ на него, по выражению А. Пайса, «лежит за гранью истории» [17. С. 158]. С одной стороны, все выглядит так, что и здесь у нас ситуация «упущенной возможности». Однако кинематизация, а при четырехмерном подходе и геометризация физического взаимодействия (в данном случае – гравитационного) была настолько радикальной и неожиданной, что первые попытки построения релятивистской теории тяготения пошли по пути сначала лоренц-ковариантного обобщения ньютоновского закона, затем аналогичного обобщения скалярного уравнения Пуассона. К тому же, вообще говоря, Эйнштейн все-таки использовал возможность, о которой идет речь, хотя и с небольшим запаздыванием.

3. Эйнштейн упускает возможность стать основоположником теории расширяющейся Вселенной, а А.А. Фридман становится им.

Через год после создания ОТО Эйнштейн заложил основы релятивистской космологии. Он попытался найти такие решения уравнений гравитации, которые бы, удовлетворяя требованиям однородности и изотропности

Вселенной, были бы еще и статическими, поскольку астрономические данные в отношении крупномасштабной структуры Вселенной говорили, скорее, в пользу статичности. Не найдя таких решений, Эйнштейн, тем не менее, нашел способ так модифицировать уравнения гравитации, чтобы они, оставаясь общековариантными, допускали статические решения. Для этого он ввел в уравнения дополнительный член с новой так называемой космологической постоянной λ , который обеспечивал антигравитационный эффект, в результате чего появлялось статическое решение, которое можно было интерпретировать как пространственно замкнутую модель Вселенной с постоянной положительной кривизной. Через пять лет русский математик и механик А.А. Фридман нашел ряд нестатических (или нестационарных) решений космологических уравнений гравитации как с космологическим членом, так и без него. Эйнштейн результаты Фридмана счел ошибочными, поскольку был абсолютно уверен в правильности своей статической и замкнутой модели Вселенной и даже как будто обнаружил ошибку в его вычислениях. После полемики с Эйнштейном, которая с помощью Ю.А. Круткова (он лично встречался с творцом теории относительности по просьбе Фридмана), закончилась в мае 1923 г. в пользу русского ученого, Эйнштейн признал свою неправоту. Впрочем, он еще в течение восьми лет верил в свою статическую модель, до тех пор, пока наблюдения Э. Хаббла и теоретические работы Ж. Леметра не подтвердили фридмановскую модель «расширяющейся Вселенной». Красочные обстоятельства открытия Фридмана и признания его правоты Эйнштейном, явно упустившим возможность стать еще и творцом «расширяющейся Вселенной», описаны в книге о Фридмане [27].

Главной причиной этого упущения, судя по всему, была не вызывающая сомнений вера Эйнштейна в собственную физическую интуицию, которая привела его к элегантно и, казалось, лучше согласующейся с наблюдениями статической модели мира. Причем достичь этой статичности ему удалось дорогой ценой: ему пришлось усложнить простые и совершенные уравнения гравитации введением дополнительного слагаемого с новой постоянной, названной впоследствии космологической константой. «По иронии судьбы, – заметил по этому поводу американский космолог М. Тегмарк, – даже Эйнштейн, один из самых изобретательных ученых всех времен, чей принцип состоял в том, чтобы подвергать сомнению самые несомненные допущения и авторитеты, не решился усомниться в собственном авторитете и собственной уверенности в том, что мы живем в вечной, неизменной Вселенной» [28. С. 67].

Вторая причина, проявившаяся уже после знакомства с работой Фридмана, состояла в определенной небрежности мэтра по отношению к работе мало кому известного исследователя из советской России. Эту работу он *ошибочно признал ошибочной!* Фридману стоило немалых усилий убедить Эйнштейна в своей правоте, и Эйнштейн признал, что вычисления его оппонента были правильны, хотя все равно продолжал верить в свою статическую модель. В 1930-е и последующие годы Эйнштейн, конечно, признал правильность теории Фридмана, а своей самой большой ошибкой считал введение

космологической постоянной. Но парадоксы исторического развития таковы, что даже ошибки таких корифеев науки, как Эйнштейн, неожиданно могут в новой ситуации как бы исправиться: так, ускоренное расширение Вселенной, открытое на рубеже XX и XXI вв., удалось объяснить возвращением космологического члена в уравнения гравитации (на этот раз интерпретированного в форме антигравитирующей «темной энергии»).

Что же касается А.А. Фридмана, признанного «отца теории расширяющейся Вселенной», то Тегмарк отметил две его главные черты, которые ему позволили реализовать возможность, упущенную Эйнштейном (научную смелость и веру в математическую мощь уравнений Эйнштейна): «Человеком, которому... хватило смелости и способностей, чтобы довериться уравнениям Эйнштейна, оказался русский физик и математик Александр Фридман. Он решил их... и обнаружил нечто шокирующее: большинство решений не было статическими, а изменялись во времени! ...Для меня Фридман – один из величайших, но, увы, недооцененных героев космологии» [28. С. 67, 69].

4. *Правомерно ли утверждать, что Эйнштейн упустил возможность внести вклад в квантовую механику и квантовую теорию поля, отдав предпочтение геометрической полевой программе?*

Последние тридцать лет своей жизни Эйнштейн посвятил поиску единой геометрической теории гравитационного и электромагнитного полей, которая, как предполагалось, должна была содержать частицеподобные решения полевых уравнений, решения, которые бы обладали еще и квантовыми свойствами. Эти поиски сопровождались критикой концептуальных оснований бурно прогрессирующей в 1920–1930-е и последующие годы квантовой механики и квантово-теоретической программы (КТП) синтеза физики в целом. История соответствующих исследований и дискуссий представлена в ряде работ, в том числе и наших, [7; 9; 10; 29–31]. В отличие от геометрической полевой программы (ГПП), возникшей в 1921 г., лидером которой вскоре стал Эйнштейн, КТП сначала выглядела эклектично и теоретически более ущербно, по сравнению с ГПП. Но после возникновения квантовой механики в 1925–1927 гг. КТП обрела теоретическую мощь и стала энергично развиваться, привлекая внимание ведущих теоретиков и талантливой молодежи. В конце 1920-х гг. на ее основе П. Дирак, В. Гейзенберг, В. Паули и др. создают квантовую электродинамику и квантовую теорию поля. В середине 1930-х гг. советский теоретик М.П. Бронштейн разрабатывает даже квантовую теорию гравитационного поля. ГПП же испытывает явный регресс, Эйнштейн остается почти единственным ее приверженцем. Проекты единых теорий поля, отличающиеся разными вариантами четырехмерных и пятимерных римановых и неримановых геометрий, почти ежегодно сменяли друг друга, не достигая цели. Неудовлетворенность Эйнштейна копенгагенской и вероятностной интерпретацией квантовой механики вовсе не означала отрицание или недооценку им этой замечательной теории. Как известно, он был одним из тех, кто номинировал Гейзенберга и Э. Шредингера на Нобелевскую премию за создание квантовой механики. Но он считал, что вероятностную феноменологию следует вывести из фундаментальных уравнений теории.

И у него был свой проект этого выведения, как раз и связанный с ГПП. Беспрецедентное упорство Эйнштейна в отношении этих двух позиций (ГПП и неприятие общепринятой интерпретации квантовой механики) и уже в 1930-е гг., и позже рассматривалось многими как ошибочное [10; 17–19; 30]. А затянувшееся пребывание великого генератора теорий на ошибочных путях познания создает предпосылки для множества упущенных им возможностей.

Можно сказать, что Эйнштейн вполне мог оказаться в числе творцов квантовой механики или внести вклад в релятивистскую квантовую механику, или активно включиться в разработку квантовой теории поля. Ведь он сделал очень много для развития квантовой теории света и концепции корпускулярно-волнового дуализма. Однако став «пленником собственного успеха» (выражение С. Вайнберга), связанного с созданием ОТО и, соответственно, с геометризацией гравитационного поля, и погрузившись в пучины ГПП, он фактически упустил целый ряд возможностей значительно увеличить свой вклад в квантовую теорию. Но и в этом случае ошибочный выбор Эйнштейна, связанный с критическим отношением к основаниям квантовой механики, сыграл важную позитивную роль в ее развитии. Речь, прежде всего, идет о знаменитой дискуссии Эйнштейна с Н. Бором и М. Борном, способствовавшей прояснению этих оснований.

Пророческой также оказалась его работа 1935 г., написанная совместно с Б. Подольским и Н. Розеном и вошедшая в историю квантовой физики как работа о парадоксе Эйнштейна, Подольского, Розена (ЭПР-парадоксе). Именно эта работа, которую иногда считают самым главным вкладом Эйнштейна в квантовую теорию, открыла новое направление в ее развитии, связанное с понятием квантовой запутанности. Таким образом, не так просто однозначно ответить на вопрос о том, упустил ли Эйнштейн здесь возможности внести более значительный вклад в квантовую механику и квантовую теорию поля. С одной стороны, вроде бы, упустил, а с другой – именно его критическая позиция существенно повлияла на выяснение оснований квантовой теории, и значит, не так уж и упустил! Кроме того, нельзя требовать от одного человека, каким бы гениальным он ни был, чтобы он создал не только СТО и ОТО, а также немало сделал в области квантовой теории света (вспомним, кстати говоря, что Нобелевская премия была вручена ему не за теории относительности, а как раз за кванты!), стал бы еще и одним из основоположников квантовой механики, наряду с Бором, Гейзенбергом, Л. де Бройлем, Шредингером, Борном, Дираком и Паули.

Калибровочная революция в физике фундаментальных взаимодействий (вторая половина XX в.)

То, что во второй половине XX в., с середины 1950-х и примерно до середины 1970-х гг., в физике элементарных частиц и одновременно в физике фундаментальных взаимодействий произошла научная революция, не вызывает сомнения. Начало ее можно датировать работой Ч. Янга и Р. Миллса

1954 г., в которой была сделана попытка описать сильные взаимодействия посредством неабелевых калибровочных полей (называемых также полями Янга–Миллса). А завершение ее относится к началу – середине 1970-х гг., когда были созданы основы стандартной модели (СМ), являющейся в определенном смысле единой квантово-полевой калибровочной и перенормируемой теорией слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий. С тех пор прошло немногим менее полувека, и пока крупных, как экспериментальных, так и теоретических отклонений от СМ, не произошло. Выяснение единой калибровочной природы трех фундаментальных взаимодействий привело и к более или менее общепринятому именованию этой революции как калибровочной [4–6]. В этой истории, насыщенной драматическими ситуациями, встречаются и такие, которые связаны с феноменом упущенных возможностей. Ниже мы рассмотрим две такие ситуации, о которых говорилось во Введении.

Первая – можно сказать, классический пример этого феномена, относящийся к открытию полей Янга–Миллса, к которому были очень близки несколько теоретиков, но по разным причинам либо не успели, либо не решились сделать решающий шаг [32].

Вторая ситуация более сложна и носит, так сказать, программный или парадигмальный характер: ряд физиков из-за определенных трудностей квантово-полевого описания фундаментальных взаимодействий пришли к выводу о неизбежности отказа от полевой программы (включающей и калибровочный подход) в пользу феноменологической программы, основанной на теории S-матрицы. В этой ситуации оказалось большинство отечественных теоретиков, поскольку вывод об упомянутом отказе во многом был инициирован работами лидеров авторитетных советских научных школ теоретической физики Л.Д. Ландау, И.Я. Померанчука и их сотрудников (см. об этом [33]). В результате отечественный вклад в создание СМ оказался существенно меньшим, чем в том случае, если бы большинство советских физиков продолжало оставаться на позициях полевой программы.

1. Как и почему В. Паули, Р. Утияма и др. упустили возможность связать свои имена с теорией неабелевых калибровочных полей?

К началу 1954 г. Ч. Янг и Р. Миллс закончили свою работу, в которой предложили калибровочную теорию сильных взаимодействий на основе локализации неабелевой группы изоспина $SU(2)$. Они опирались на аналогию с открытым в конце 1920-х гг. Г. Вейлем локально-калибровочным механизмом введения электромагнитного взаимодействия. Но там речь шла о локализации абелевой однопараметрической группы калибровочных преобразований, приводящей к безмассовым фотонам, обеспечивающим электромагнитное взаимодействие. А калибровочные частицы, реализующие короткодействующие сильные взаимодействия, предполагались массивными (такowymi были, в частности, пи-мезоны). В феврале Янг докладывал эту работу в Принстоне на семинаре Р. Оппенгеймера, на котором присутствовал также В. Паули. Реакция Паули, по воспоминаниям Янга и одного из участников семинара А. Пайса, была негативной и критической, поскольку калибровочные частицы и в этом случае, подобно фотонам, должны были быть

безмассовыми. Оказывается, как это следует из воспоминаний Пайса, Паули еще в 1953 г. думал о локально-калибровочном механизме описания сильных взаимодействий, но из-за проблемы с массой калибровочных частиц он отверг эту возможность. После доклада Пайса на одной из конференций в Лейдене в июне 1953 г. (посвященной проблемам физики элементарных частиц, на ней присутствовали Паули и Гейзенберг, а доклад Пайса был посвящен возможному расширению группы изоспина) Паули задал докладчику весьма примечательный вопрос: «...А нельзя ли, подобно калибровочной группе электромагнитного поля, расширить группу преобразований с постоянными фазами таким образом, что мезон-нуклонное взаимодействие будет связано с этой расширенной группой?» «Так я впервые услышал, – вспоминал далее Пайс, – об идее, из которой вырос новый фундаментальный раздел теоретической физики: неабелевы калибровочные теории» [34. С. 307].

Вскоре, как вспоминал далее Пайс, Паули прислал ему набросок теории, близкий к теории Янга–Миллса. Но к концу 1953 г. «его энтузиазм по этому поводу стал угасать» из-за того, что векторные мезоны получались безмассовыми [34. С. 308]. В результате, не поверив в реалистичность локально-калибровочного подхода к теории сильных взаимодействий, Паули упустил возможность открыть поля Янга–Миллса, которые могли бы теперь называться полями Паули или Паули – Янга–Миллса. Пайс считал, что Паули не хватило научной смелости: «Если бы в 1953 г. у него была смелость опубликовать свою работу, его бы запомнили в связи с самым важным послевоенным вкладом в физику, как одного из основателей современной калибровочной теории...» [Там же. С. 309]. Впрочем, может быть, дело было не столько в недостатке научной смелости, сколько в неверии в реализуемость калибровочной концепции при кажущемся ее расхождении с экспериментально-эмпирическими данными. Судя по всему, и сам Пайс был тогда же близок к этому открытию, но либо он так же, как и Паули, считал калибровочную концепцию нереалистичной, либо полагал, что выдвинувший первым эту идею мэтр должен развить ее и довести до публикации. Так что можно считать, что и Пайс упустил ту же возможность, что и Паули.

Изучение некоторых текстов таких выдающихся теоретиков-«симметристов», как Ю. Вигнер и Ю. Швингер, относящихся к концу 1940-х – началу 1950-х гг., говорит о том, что и они были концептуально близки к теории Янга–Миллса. Так что, как говорят в таких случаях, калибровочные идеи носились в воздухе. Еще по крайней мере два молодых исследователя явно упустили возможность вовремя опубликовать выполненные ими исследования, близкие тому, что сделали Янг и Миллс, – это японский теоретик Р. Утияма и аспирант А. Салама в Кембридже Р. Шоу. Примерно тогда же, когда Янг и Миллс закончили свою знаменитую работу по калибровочной теории сильных взаимодействий, аналогичная работа по теории неабелевых калибровочных полей была сделана в Японии Р. Утиямой. Как он сам вспоминал впоследствии, он искал такой «сильный руководящий принцип, при помощи которого удалось бы вывести форму взаимодействий элементарных частиц так же, как это делается в случае гравитационного поля с веществом и электромагнитного поля с электрически заряженными

частицами» [35. С. 202]. Этим принципом и стала локальная калибровочная инвариантность, то есть локализация групп внутренней симметрии ядерных взаимодействий определяла форму этих взаимодействий. Как раз в это время Утияма готовился к отъезду на стажировку в Принстон, откуда он получил приглашение. Им было принято решение именно там опубликовать свою работу (как бы в порядке отчета о стажировке в США). Перед отъездом (в мае или июне 1954 г.) он доложил ее на семинаре в Токийском университете, но особого одобрения не получил. Это, впрочем, укрепило его в мысли, «что разработкой теории, подобной моей, ... вряд ли во всем мире займется кто-либо, кроме меня самого». Но приехав в сентябре 1954 г. в Принстон, он узнал от работавшего там своего бывшего учителя в университете в Осаке, которому он показал подготовленную статью, что похожую статью недавно опубликовали Янг и Миллс. «... Я внезапно получил столь сокрушительный удар, что мое изумление и упадок духа трудно выразить словами или описать пером» [35. С. 205]. Он отказался от публикации, хотя позже (в 1956 г.) все-таки опубликовал ее, так как она, в отличие от статьи Янга и Миллса, содержала общую теорию калибровочных полей, включая ее применение к гравитации (русский перевод обеих статей вышел в 1964 г. в сборнике «Элементарные частицы и компенсирующие поля» под редакцией Д.Д. Иваненко [36].

Вот как Утияма закончил описание истории об упущенной им возможности: «В настоящее время термин “поля Янга–Миллса”, которым увековечены имена этих авторов, употребляется в качестве синонима для обобщенных калибровочных полей. Для меня, совершенно независимо создавшего теорию таких полей, этот факт крайне огорчителен. Но я сам во всем виноват... Я должен был сразу после завершения статьи в конце марта 1954 г. опубликовать ее в японском научном журнале, но не сделал этого; так что причина моего теперешнего злополучия – слишком высокое мнение о своей рукописи, которым было переполнено в то время все мое существо» [35. С. 206]. Что касается Р. Шоу, то он описал теорию калибровочных полей в неопубликованной диссертации 1954 г. (в Кембридже, под руководством А. Салама). Соавтор Янга Р. Миллс впоследствии достаточно высоко оценил эту работу: «Неопубликованная докторская диссертация Шоу (1954) “Проблема типов частиц и другие аспекты теории элементарных частиц” включает раздел “Инвариантность относительно общих изоспиновых преобразований”, который является близким и независимым изложением нашей с Янгом статьи 1954 г. и содержит те же основные уравнения неабелевой калибровочной теории» [37. Р. 496]. В этом случае причина «упущения» могла заключаться в том, что и сам аспирант, и даже его руководитель не сумели оценить важность полученного результата. Так, Янг впоследствии вспоминал, что важность своей совместной с Миллсом статьи он осознал только в 1960-х гг.

2. Как отказ от квантово-полевой программы в 1950-е и 1960-е гг. (особенно в СССР) помешал отказавшимся внести существенный вклад в создание калибровочно-полевой стандартной модели?

Безмассовость калибровочных бозонов встала главным, но не единственным тормозом на пути развития калибровочно-полевой программы построения теории фундаментальных взаимодействий. В том же, 1954 г., когда

стартовала программа полей Янга–Милса, возникло еще одно препятствие, касающееся, правда, вообще квантово-полевых теорий (сначала оно относилось к квантовой электродинамике): оказалось, что поляризация квантово-полевого вакуума на весьма малых расстояниях от точечной заряженной частицы (например, электрона) приводит к полной экранировке ее заряда, в результате чего физический заряд (и, соответственно, само взаимодействие) обращается в нуль.

Этот результат почти одновременно был получен несколькими исследователями: прежде всего, лидером выдающейся советской научной школы теоретиков Л.Д. Ландау вместе со своими учениками А.А. Абрикосовым и И.М. Халатниковым (вскоре к ним примкнул руководитель еще одной теоретической школы И.Я. Померанчук), затем представителем третьей теоретической школы, руководимой И.Е. Таммом, Е.С. Фрадкиным, а также американскими теоретиками М. Гелл-Манном и Ф. Лоу. Сначала этот результат воспринимался как парадокс, который рано или поздно будет разрешен. Но вскоре, в первую очередь в школах Ландау и Померанчука, он стал рассматриваться как решающий аргумент в пользу отказа от квантово-полевой парадигмы (или программы) в физике элементарных частиц. Этот парадокс, или проблему, «нуль-заряда» чаще стали именовать как парадокс (или проблему) «московского нуля» [38; 39].

Спустя почти полвека после описываемых событий американский теоретик Д. Гросс, удостоенный в 2004 г. вместе с Ф. Вильчеком и Х.Д. Политцером Нобелевской премии за открытие асимптотической свободы в сильных взаимодействиях, так вспоминал обо всем этом: «На начало 1960-х гг., когда я поступил в аспирантуру Беркли, пришелся период величия эксперимента и *бессилия теории* (здесь и далее курсив наш. – В.В.) ... Теория поля была в опале; теория S-матрицы была в самом расцвете ... В США причиной отказа от применения теории поля к сильным взаимодействиям стала невозможность вычислений... Квантовая теория поля не могла быть практическим инструментом для объяснения вихря экспериментальных открытий... В СССР теория поля подвергалась даже более сильным нападкам, правда, по несколько другим причинам. Ландау с соавторами в конце 1950-х гг. ... исследовали связь между физическим электрическим зарядом и затравочным электрическим зарядом, наблюдаемым на бесконечно малых расстояниях. Тот факт, что электрический заряд в квантовой электродинамике зависит от расстояния, на котором мы его измеряем, является следствием “поляризации вакуума”... Ландау с коллегами заключили, что этот эффект так силен, что физический заряд, измеряемый на любом конечном расстоянии, должен исчезать для любого значения вакуумного заряда. Они утверждали: “Мы пришли к выводу, что в пределах формальной электродинамики точечное взаимодействие любой интенсивности эквивалентно отсутствию взаимодействия вообще”. Это – знаменитая проблема нулевого заряда, поразительный результат, который означал для Ландау, что “электродинамика в случае слабой связи – теория логически неполная, начиная с основ”... Ландау верил, что это явление носит более общий характер и должно существовать во всех

теориях поля... Поэтому они предположили, что проблема нулевого заряда возникнет и в теории поля для сильного взаимодействия, а это было катастрофично. В Советском Союзе это было расценено как непреодолимая причина ошибочности теории поля и ее полной непригодности в случае сильного взаимодействия... Под влиянием Ландау и Померанчука поколению физиков было запрещено работать над теорией поля» [40. С. 727–731]. Картина, представленная участником событий, очевидно, основательно вникавшим в работы Ландау с соавторами по проблеме «нуль-заряда» и наблюдавшим ситуацию кризиса квантово-полевой программы в теории частиц и перехода на рельсы S-матричной феноменологической программы, вполне правдоподобна.

Однако два уточнения все-таки сделать необходимо. Во-первых, естественно, никаких запретов «работать над теорией поля» в СССР не было. Хотя влияние теоретических школ Ландау и Померанчука в советской (и не только советской) физике было настолько сильным, что негативное отношение к полевой программе вплоть до отказа от нее, сложившееся в них и отчасти распространившееся и на другие школы теоретической физики – И.Е. Тамма, Н.Н. Боголюбова и др., во многом определяло выбор как исследовательской тематики, так и исследовательской программы. Конечно, это, в первую очередь, касалось нового поколения советских теоретиков.

Во-вторых, несмотря на то, что кризис полевой программы был общемировым, достаточно много западных теоретиков продолжали ее разработку в конце 1950-х и в 1960-е гг. (среди них такие крупные физики, как Ю. Швингер, А. Салам, М. Гелл-Манн, Ш. Глэшоу, японские теоретики Дж. Сакураи, Р. Утияма, Ё. Намбу и др.). В результате этого уже в начале 1960-х гг. локально-калибровочное направление полевой программы стало прогрессировать и приносить новые важные результаты. Сохранились и свидетельства происходящего со стороны советских участников событий: А.Д. Сахарова, Я.Б. Зельдовича, Б.Л. Иоффе, Д.В. Ширкова, Е.Л. Фейнберга, Л.Д. Фаддеева и др. В них, так или иначе, говорится о тех возможностях, которые были упущены отечественными физиками из-за их отказа от полевой программы под влиянием лидеров советской теоретической физики (более подробно см. об этом [32; 33]). А.Д. Сахаров вспоминал, как в 1955 г. на новогоднем банкете в Кремле по поводу успешного испытания водородной бомбы он встретил Ландау, который «с очень озабоченным, даже удрученным видом сказал: «Мы все оказались в тупике, что делать – совершенно непонятно». «К этому времени, – продолжал Сахаров, – относятся слова Ландау: «Лагранжиан мертв...». Ландау, однако, ошибался. Лагранжиан не был мертв. Многие годы трудность «московского нуля» (то есть проблемы «нуль-заряда». – В.В.) рассматривалась как указание на необходимость отказа в физике высоких энергий от квантовой теории поля, делались попытки найти другие пути построения теории элементарных частиц, оказавшиеся неэффективными» [41. С. 125].

Еще более определенно об упущенных возможностях советских теоретиков в связи с негативным отношением Ландау и Померанчука к полевой

концепции говорил в своих воспоминаниях представитель школы Н.Н. Боголюбова Д.В. Ширков: «Заключение Л.Д. Ландау было пессимистическим: забудьте о локальной квантовой теории поля и лагранжиане. Именно такой тезис защищал в запомнившемся разговоре со мной соавтор Дау по нуль-заряду И.Я. Померанчук. Во имя этого он даже закрыл свой семинар в ИТЭФе по квантовой теории поля, порекомендовав молодым коллегам сместить область теоретической физики... Как известно, спустя 10-15 лет локальная лагранжева теория поля полностью вернула себе статус основного метода в теории частиц. Однако категоричность заключения знаменитого теоретика существенно затормозила развитие теории и привела к развитию некоторых тупиковых направлений типа теории “бутстрапа”» [42. С. 160–164]. На эти «неэффективные» и «тупиковые» пути вступало большинство советских теоретиков, упуская возможности включиться в разработку калибровочно-полевой программы, которая в начале-середине 1970-х гг. привела к завершению калибровочной революции и созданию стандартной модели в физике элементарных частиц. Е.Л. Фейнберг рассматривал этот случай упущенных возможностей как подлинную драму не только идей, но и людей: «Вся эта драматическая история показывает, как может быть ошибочна “всеобщая” точка зрения (имеется в виду отказ от полевой концепции, связанный с “московским нулем”. – В.В.), как может быть она губительна и для науки, и для принявших ее ученых... Можно вспомнить множество имен, прогремевших, а ныне забытых» [39. С. 338].

И хотя следует признать ошибочность тогдашнего отказа от полевой концепции, приведшего к масштабным упущенным возможностям, стоит вспомнить о том, что, как заметил С.И. Вавилов, «на ошибках вырастает наука».

Оказывается, Д. Гросс, Ф. Вильчек и Х.Д. Политцер внесли решающий вклад в создание квантовой хромодинамики, открыв понятие асимптотической свободы для неабелевых калибровочных полей на основе антиэкранированного варианта рассуждений Ландау и других открывателей проблемы «нуль-заряда» (более подробно см. об этом [32; 33; 38]).

Заключительные замечания

Судя по всему, упущенные возможности – весьма распространенное явление в истории науки. Оно, как и феномен «одновременного открытия» (например, закона сохранения энергии Р. Майером, Дж. Джоулем и Г. Гельмгольцем), свидетельствует о, так сказать, «назрелости» открытия. Но при этом вносит в реальную историю настоящий драматизм, в смысле не только «драмы идей», но и «драмы людей» [39]. Этот драматизм особенно возрастает в тех случаях, когда упускаются возможности стать автором или соавтором открытия, лежащего в основе той или иной научной революции. Именно такие случаи были нами рассмотрены. Кстати говоря, их исследование подводит нас к весьма рискованному направлению, которое можно назвать «альтернативной историей науки».

В связи с обсуждаемыми нами случаями упущенных возможностей перед нами возникают вопросы о возможных альтернативах исторического

развития. Как бы развернулся процесс разработки СТО, если бы Пуанкаре не был склонен к конвенционализму и не упустил тех возможностей, которые реализовали Эйнштейн и Минковский? Смог бы Эйнштейн примерно на пять лет раньше открыть ОТО, если бы сразу и по достоинству понял важность четырехмерного мира Минковского? Что было бы, если бы Эйнштейн уже в 1917 г. нашел нестационарные решения уравнений гравитации в космологическом приближении и введения космологической постоянной не понадобилось? Но и без выхода за грань реальной истории (выражение А. Пайса) изучение феномена упущенных возможностей открывает важное направление, связанное с выявлением причин тех или иных «упущений». В рассмотренных нами случаях мы пытались выявить и описать эти причины.

В основном они сводились к двум группам. Поскольку в процессе научной революции нередко появляются противостоящие друг другу и конкурирующие между собой исследовательские программы, одна из которых в конце концов побеждает, а другие признаются ошибочными, то исследователи, прикнувшие к ошибочным программам, оказываются среди упустивших свои возможности. Так было, например, с теми физиками, которые вслед за Ландау, Померанчуком и др. во второй половине 1950-х – 1960-е гг. отказались от полевой программы, включающей и калибровочный подход, в пользу феноменологической программы S-матрицы. Это первый тип причин «упущения».

Второй тип причин кроется в особенностях творческой личности исследователя. Один верит в абсолютную мощь математики, а этого порой недостаточно, другому недостает научной смелости, третий слишком привязан к эксперименту, на четвертого влияют существенно его философские взгляды и т.д. Если прибегнуть к тому направлению философии науки, которую именуют «эпистемологией добродетелей» [8; 9], причины «упущений» в этих случаях можно рассматривать как следствия «эпистемических пороков», которые, в отличие от «эпистемических добродетелей», способствующих познанию истины, препятствуют ему.

Большая распространенность явления упущенных возможностей говорит о том, что ученые часто делают ошибочный выбор, что процесс развития научного знания носит, так сказать, «ошибочностный» характер [10]. Если сравнить характер упущенных возможностей в двух описанных научных революциях в физике, разделенных примерно полувековым интервалом, то бросаются в глаза их следующие отличия.

В первой революции «упущения» совершались немногими корифеями науки, такими как Пуанкаре, Гильберт, Эйнштейн и др. Нередко они были следствием присущих им эпистемологических установок; особенно большую роль в этих «упущениях» играла либо переоценка, либо недооценка математического аспекта физики.

Во второй революции нередко «упущения» касались многих исследователей, порой связанных с несколькими научными школами; эпистемологические установки тоже играли некоторую роль, хотя и меньшую, чем в первой революции; значительно большую роль играло сравнение теоретических

построений с экспериментом. В обоих случаях изучение феномена упущенных возможностей раскрывает новые грани концепции научных революций, а также приводит к своего рода «урокам истории» для современных исследователей.

Литература

1. *Визгин В.П.* Математика в квантово-релятивистской революции // Физика XIX–XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XX века и ее связь с другими разделами естествознания. М.: Янус-К, 1997. С. 7–30.
2. Дискуссия о проблемах научных революций в точном естествознании // Историко-астрономические исследования. Вып. 28. М.: Физматлит, 2003. С. 85–154.
3. *Визгин В.П.* О проблеме научных революций и их типологии // Человек. Наука. Цивилизация. К семидесятилетию академика В.С. Степина / отв. ред. и сост. И.Т. Касавин. М.: Канон+, 2004. С. 179–195.
4. *Визгин В.П.* Революционные 10-е–20-е годы: физика от Коперника до современности с высоты птичьего полета // Вопросы истории естествознания и техники. 2021. Т. 42. № 1. С. 46–70.
5. *Визгин В.П.* Метафизические аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории ее создания // Метафизика. 2020. № 3 (37). С. 39–56.
6. *Визгин В.П.* Социокультурные аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории // Эпистемология и философия науки. 2020. Т. 57. № 3. С. 160–175.
7. *Дэйсон Ф.* Упущенные возможности // Успехи математических наук. 1980. Т. 35. Вып. 1 (211). С. 171–191.
8. *Каримов А.Р.* Эпистемология добродетелей. М.: Алетейя, 2019. 428 с.
9. *Визгин В.П.* Эпистемологические добродетели и пороки А. Эйнштейна // Эпистемология и философия науки. 2021 (в печати).
10. *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.
11. *Паули В.* Теория относительности. М.-Л.: ГТТИ, 1947. 300 с.
12. *Де Бройль Л.А.* Пуанкаре и физические теории // Пуанкаре А. Избранные труды. Т. III. М.: Наука, 1974. С. 703–713.
13. Принцип относительности: сборник работ по специальной теории относительности / сост. А.А. Тяпкин. М.: Атомиздат, 1973. 322 с.
14. *Кобзарев И.Ю.* Доклад А. Пуанкаре и теоретическая физика накануне создания теории относительности // Успехи физических наук. 1974. Т. 113. С. 679–694.
15. *Кобзарев И.Ю.* О принципе относительности // Успехи физических наук. 1975. Т. 115. С. 545–549.
16. *Гинзбург В.Л.* О теории относительности. М.: Наука, 1979. 239 с.
17. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989. 568 с.
18. *Фок К.С., Кеэк А.* Einstein: A to Z. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2004. X+310 p.
19. *Дамур Т.* Мир по Эйнштейну: От теории относительности до теории струн. М.: Альпина нон-фикшн. 2016. 268 с.
20. *Визгин В.П.* Концептуальные истоки общей теории относительности (к столетию принципа эквивалентности А. Эйнштейна и четырехмерного мира Г. Минковского) // Исследования по истории физики и механики. 2007. М.: Наука, 2008. С. 253–281.
21. *Визгин В.П.* Эрлангенская программа и физика. М.: Наука, 1975. 112 с.
22. *Визгин В.П.* Релятивистская теория (истоки и формирование, 1900–1915 гг.). М.: Наука, 1981. 352 с.

23. Борн М. Воспоминания о Германе Минковском // Борн М. Размышления и воспоминания физика. М.: Наука, 1977. С. 79–90.
24. Эйнштейн А. Теория относительности // Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965. С. 175–186.
25. Эйнштейн А. Автобиографические наброски (1955) // Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV. М.: Наука, 1967. С. 350–356.
26. Эйнштейн А. О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение) // Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. I. М.: Наука, 1965. С. 530–600.
27. Тропп Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д. Александр Александрович Фридман. Жизнь и деятельность. М.: Наука, 1988. 304 с.
28. Тегмарк М. Наша математическая Вселенная. В поисках фундаментальной природы реальности. М.: АСТ: CORPUS, 2017. 592 с.
29. Визгин В.П. Единые теории поля в 1-й трети XX в. М.: Наука, 1985. 304 с.
30. Weinberg S. Einstein mistakes // Physics Today. 2005. № 58 (10). P. 31–35.
31. Визгин В.П. Эйнштейн и математики (к 100-летию создания общей теории относительности) // Метафизика. 2015. № 3 (17). С. 135–156.
32. Визгин В.П. У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // Исследования по истории физики и механики. 2019–2020 (в печати).
33. Визгин В.П. И «Комедия ошибок», и «драма людей»: об отечественном вкладе в создание стандартной модели в физике элементарных частиц // Управление наукой: теория и практика. 2020. Т. 2. № 3. С. 196–224.
34. Пайс А. Гении науки. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 448 с.
35. Утияма Р. К чему пришла физика (От теории относительности к теории калибровочных полей). М.: Знание, 1986. 224 с.
36. Элементарные частицы и компенсирующие поля: сборник статей / под ред. Д.Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. 300 с.
37. Mills R. Gauge fields // American Journal of Physics. 1989. V. 57. № 6. P. 493–507.
38. Берестецкий В.Б. Нуль-заряд и асимптотическая свобода // Берестецкий В.Б. Проблемы физики элементарных частиц. М.: Наука, 1979. С. 231–254.
39. 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.
40. Гросс Д. Открытие асимптотической свободы и появление квантовой хромодинамики. Нобелевская лекция (2004) // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; М.: Редакция журнала «УФН», 2009. С. 727–752.
41. Сахаров А.Д. Воспоминания: в 2 т. Т. 1. М.: Изд. «Права человека», 1996. 912 с.
42. Ширков Д.В. Вспоминая Н.Н. Боголюбова // Воспоминания об академике Н.Н. Боголюбове. К столетию со дня рождения / под ред. В.С. Владимирова и И.В. Воловича. М.: МИАН, 2009. С. 143–172.

PHENOMEN OF THE SCIENTIFIC REVOLUTIONS MISSED OPPORTUNITIES IN THE FUNDAMENTAL PHYSICS OF THE XXth CENTURY

V.P. Vizgin

*Institute for the History of Natural Science and Technology
of the Russian Academy of Sciences
14 Baltic St, Moscow, 125315, Russian Federation*

Abstract. The phenomenon of missed opportunities in the course of two scientific revolutions in fundamental physics is investigated: in the quantum relativistic revolution of the first third of the 20th century and in the gauge revolution that led to the creation of a standard model in elementary particle physics (1954–1974). Two cases of missed opportunities related to H. Poincare and his role in the history of the creation of the special theory of relativity are examined on the material of the first revolution. Two other cases of missed opportunities concerning A. Einstein in connection with the theory of the expanding Universe and with failed attempts to build a unified field theory based on a geometric field program are also considered. It is shown that in these cases epistemological and metaphysical outlooks of scientists were in many respects the causes of the «omissions». We mean the conventionalism of Poincare, as well as Einstein’s belief in the stationarity of the Universe and in the incredible power of mathematics as the only creative beginning in the construction of the physical theories. Two similar plots are explored on the material of the second revolution. The first story refers to the Young–Mills’ concept of the gauge fields, which played a key role in the creation of standard model. Several theorists came very close to this concept and, above all, V. Pauli, who for various reasons did not make a decisive step and missed opportunities to associate their names with the theory of gauge fields. Pauli believed that, despite its theoretical attraction, it could not overcome experimentally – empirical difficulties. The second story is related to the quantum field program being rejected in 1950–1960s by most theorists in favor of the phenomenological S-matrix program. As a result, many theorists have missed their opportunities to contribute to the creation of a standard model. And this “omission” was partly motivated by the positivist thesis that in theory only fundamentally observable values should appear. It is emphasized also that the phenomenon of missed opportunities opens the way for the study of the problem of alternative history of science.

Keywords: scientific revolutions, research programs, missed opportunities, quantum relativistic revolution, special theory of relativity, theory of the expanding Universe, unified field theories, H. Poincare’, A. Einstein, H. Minkowski, A.A. Friedmann, gauge revolution, standard model, Yang–Mills theory, W. Pauli