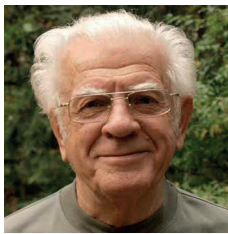




DOI: 10.19181/smtp.2023.5.3.12

EDN: AQZIIZ

ОБ «ИСТОРИКО-НАУЧНЫХ ФЕНОМЕНАХ» В ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ КВАРКОВ



**Визгин
Владимир Павлович¹**

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

Для цитирования: *Визгин В. П.* Об «историко-научных феноменах» в истории открытия кварков // Управление наукой: теория и практика. 2023. Т. 5, № 3. С. 185–202. DOI 10.19181/smtp.2023.5.3.12. EDN AQZIIZ.

АННОТАЦИЯ

На материале открытия кварков, рассматриваемого в контексте истории создания стандартной модели в физике элементарных частиц 1950–1970-х гг., исследуются особенности соответствующих исторических процессов, которые именуются «историко-научными феноменами». Эти феномены являются квазиэмпирическими обобщениями, которые фиксируются посредством «исторического (или историко-научного) наблюдения». В результате оказалось возможным выявить следующие связанные между собой «историко-научные феномены»: «одновременное и независимое» открытие, наличие одного лидера (в данном случае это М. Гелл-Манн), упущенные возможности, рост исследовательской программы меньшинства, скрытые поворотные моменты, тесно связанный с ним феномен «спящей красавицы», «ошибочностный» характер развития научного знания, «переплетение физики и метафизики». Ставится вопрос об универсальности этих феноменов и утверждается, что внесение теоретизма в историю науки возможно только при их учёте. Кроме того, понимаемые как особенности современной теории элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий между ними, они могут рассматриваться как уроки истории, которые могут оказаться полезными в дальнейшем её развитии этой теории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

элементарные частицы, кварки, стандартная модель (СМ), квантовая хромодинамика (КХД), калибровочные поля, М. Гелл-Манн, «историко-научные феномены»,

«историческое наблюдение», упущенные возможности, феномен «спящей красавицы», скрытые поворотные моменты, «переплетение физики и метафизики»

История вообще с трудом поддаётся наблюдению...

А. В. Иличевский [1, с. 323]

Для меня важно не только поместить научные идеи в контекст эпохи, но и попытаться понять, как был связан ход мыслей исследователей с решениями, признанным и верными сейчас, разобраться в том, насколько близко они подошли к нам или почему упустили их.

М. Гелл-Манн (Из мемуарного текста «От S-матрицы к кваркам» [2, р. 497]

В новейшей истории фундаментальной физики ни о чём нельзя сказать «только Гелл-Манн», но зато о многом «Гелл-Манн и коллеги». Не так уж удивительно для человека, который на четверть века оседлал гребень волны второй физической революции XX столетия.

А. Е. Левин [3]

ВВЕДЕНИЕ

Об открытии кварков [4, 5]. Кварки в теории элементарных частиц появились в 1963–1964 гг., прежде всего в работах М. Гелл-Манна и Дж. Цвейга, на основе трёхмерного неприводимого представления обнаруженной в 1961 г. М. Гелл-Манном и Ю. Нееманом группы $SU(3)$ (в обоих случаях, как говорят обычно, «независимо и почти одновременно»). Несколько более ранним предвестием открытия кварков была работа Ю. Неемана и Х. Гольдберга (1962–1963), которые не решились связать также рассмотренное ими трёхмерное представление с дробно-заряженными частицами. Открытию же симметрии сильных взаимодействий (8-мерная группа $SU(3)$, названная М. Гелл-Манном «восьмеричным путём») предшествовала история, восходящая к статье Ч. Янга и Р. Миллса по первой калибровочно-полевой теории сильных взаимодействий, основанной на локализации трёхмерной группы $SU(2)$ (1954). Таким образом, история (или, точнее, предыстория) открытия кварков как бы продлевается сначала к 1961 г., а затем даже к 1954 г. Однако в середине 1960-х гг. кварковая модель большинством специалистов не принималась всерьёз из-за ряда трудностей, возникших на её пути, главным образом из-за странного представления о реальности кварков, которые как будто не могли существовать в свободном виде. Поворотными моментами на пути их признания стали введение нового квантового числа, названного цветом (1965), а затем результаты экспериментов по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах, приведшие к обнаружению точечных образований внутри них, которые были названы Р. Фейнманом партнами и вскоре были отождествлены с кварками (1968–1969). Полное завершение модели кварков произошло в 1973 гг., когда эта модель стала кварк-глюонной, опирающейся на локализацию точной цветной $SU(3)$ -симметрии и введённые физические понятия асимптотической свобо-

ды и конфайнмента. Это было сделано М. Гелл-Манном с сотрудниками, а также Д. Гроссом, Ф. Вильчеком и Х. Д. Политцером (последние трое вслед за Гелл-Манном были в 2004 г. удостоены Нобелевской премии). Таким образом, процесс открытия кварков от их введения в теорию в 1963–1964 гг. расширяется на 10 лет назад (к Янгу и Миллсу) и на 10 лет вперёд к завершению кварк-глюонной калибровочной теории сильных взаимодействий, получившей название квантовой хромодинамики (КХД), составившей наряду с завершённой к этому времени единой теорией электромагнитного и слабого взаимодействий современную теорию элементарных частиц, называемую стандартной моделью (СМ).

Об «историко-научных феноменах». Уже из этого краткого наброска истории открытия и развития кварковой модели видны некоторые особенности этого процесса, своего рода регулярности, которые можно назвать *историко-научными феноменами*. Ранее я писал о подобных феноменах как важных квазиэмпирических обобщениях в истории теоретической физики XIX–XX вв. или истории атомного проекта, которые мне удалось выявить в этой истории и которые, в частности, я назвал «французской революцией в физике», «непостижимой эффективностью аналитической механики в физике», «ядерным культом», «ядерно-академическим союзом» и т. д. [6; 7]. В истории открытия кварков уже из нашего краткого обзора отчётливо выделяются такие историко-научные феномены, как «независимое и почти одновременное открытие» при существовании всё-таки «первого среди равных», как наличие поворотных и скрытых поворотных моментов, как «взаимопроникновение физики и метафизики (или философии)» и некоторые другие, на которые обращали внимание и сами физики, как первооткрыватели, так и их последователи, и давали им иногда подходящие метафорические названия, например, феномен «спящей красавицы» [8; 9]. Несколько слов об эпитафиях. Первый говорит о трудности «исторического (или историко-научного) наблюдения», с помощью которого фиксируются феномены, оно связано с обстоятельным историко-научным исследованием. Во втором эпитафии один из первооткрывателей кварков, так удачно нашедший для этих странных частиц название, говорит об одном из способов отыскания историко-научных феноменов и даже называет один из них, а именно феномен «упущенных возможностей». Наконец, в третьем эпитафии речь идёт об «одновременных и независимых открытиях» в истории кварков и при этом среди нескольких первооткрывателей выделяется одна ключевая фигура, а именно М. Гелл-Манн («первый среди равных»). К рассмотрению и анализу этих и других феноменов мы и переходим.

«ОДНОВРЕМЕННО И НЕЗАВИСИМО» [4; 5]

Феномен «одновременных и независимых открытий» в истории кварков проявился столь же убедительно, как и в других случаях создания СМ. Так, начало, первый поворотный момент в процессе создания СМ – это локально-калибровочная концепция фундаментальных взаимодействий, предложенная в 1954 г. Ч. Янгом и Р. Миллсом. Они предложили рассматривать сильное

взаимодействие как следствие локализации присущей этому взаимодействию изоспиновой симметрии $SU(2)$, подобно тому как электромагнитное взаимодействие интерпретировалось в квантовой электродинамике как результат перехода от глобальной калибровочной симметрии, связанной с законом сохранения электрического заряда, к её локальному варианту, когда параметр группы становится функцией пространства–времени. Но на пути этой концепции возникли определённые трудности, и теория Янга–Миллса поначалу не была воспринята сообществом теоретиков. Тем не менее, по крайней мере, ещё два специалиста получили аналогичные результаты («одновременно и независимо») – это японский теоретик Р. Утияма, приехавший в 1954 г. в США, и Р. Шоу – аспирант известного физика из Пакистана, работавшего в Англии, А. Салама. Но они не успели опубликовать свои работы. Более того, к концепции Янга–Миллса пришёл почти тогда же (или даже несколько раньше) В. Паули, который отказался её принять, т. к. считал, что она противоречит эксперименту. В этом случае «независимого и одновременно открытия» виден «феномен упущенных возможностей». Утияма, Шоу и даже великий Паули по разным причинам упустили теоретический шедевр, ставший одной из основ СМ.

Второй сюжет обсуждаемого феномена непосредственно предшествует открытию кварков и относится к одновременному и независимому открытию в 1961 г. глобальной приближенной симметрии сильного взаимодействия, а именно восьмимерной группы $SU(3)$, американцем М. Гелл-Манном и израильянином Ю. Нееманом [4; 5]. Гелл-Манн назвал основанную на этой восьмимерной симметрии модель сильных взаимодействий «восьмеричным путём», используя буддистское выражение о восьмеричном пути к достижению вечного блаженства (нирваны): правильные взгляды, правильные намерения, правильные речи, правильные действия и т. д. Он имел в виду то обстоятельство, что известные к тому времени адроны особенно хорошо укладывались в октеты. К открытию этой симметрии подходили вплотную и другие физики, прежде всего, представители японской школы С. Сакаматы на основе идеи о трёх первичных частицах, а также японский теоретик Дж. Сакураи, работавший в США, и А. Салам (вместе с Дж. Уордом). Кроме октетов, предсказывался и декуплет с несуществующей частицей, которая была открыта в 1964 г., что подтвердило правильность «восьмеричного пути» и сыграло важную роль в третьем, основном сюжете одновременного и независимого открытия, а именно открытия кварков как трёх первичных, подлинно элементарных частиц, которые были дробно заряжены (1964). Здесь можно говорить о двух главных сооткрывателях: опять-таки о Гелл-Манне, который ввёл термин «кварки», привившееся название этих частиц, и о менее известном тогда физике Дж. Цвейге, работавшем в Калтехе и ЦЕРНе, который называл дробно-заряженные первичные частицы «тузами» («aces»). Несколько раньше (1963) к открытию таких частиц очень близко подошёл Ю. Нееман (вместе с Х. Гольдбергом), но они, обнаружившие, так же как Гелл-Манн и Цвейг, триплетное представление группы симметрии $SU(3)$, не поверили в реальность загадочных частиц. Тем самым и здесь мы снова встречаемся с феноменом упущенных возможностей. Просматривается и важный канал, ведущий к кваркам от составных моделей в духе С. Сакаматы, в которых рассматривались

в качестве первичного триплета с целочисленными зарядами оба нуклона и лямбда-частица, но философские взгляды мешали японским теоретикам признать возможность существования дробно заряженных первочастиц. И в этом случае можно говорить об упущенных возможностях. Замечательно, что в истории создания СМ почти о всех важных поворотных моментах так или иначе проявляется феномен «одновременных и независимых открытий», иногда сопряжённый с феноменом «упущенных возможностей». Это относится и к электрослабой теории, известной как теория Вайнберга–Салама (американский теоретик С. Вайнберг и А. Салам независимо разработали эту теорию в 1967 г., симметрия которой была установлена ранее американцем Ш. Глэшоу). Теория была основана на спонтанном нарушении симметрии и связанном с ней механизмом возникновения массы у калибровочных частиц, открытых в 1964 г. опять-таки независимо и практически одновременно тремя группами теоретиков: П. Хиггсом (Великобритания), Ф. Энглером и Р. Броутом (Бельгия), а также англо-американской тройкой Д. Гуральником, Т. Кибблом и Р. Хагеном. Возвращаясь к теории сильных взаимодействий, которая теперь именуется квантовой хромодинамикой (КХД), мы снова попадаем в ситуацию отчасти одновременного и независимого открытия этой теории как калибровочной кварк-глюонной теории $SU(3)$ – группы, являющейся точной «цветной» симметрией, обладающей свойствами асимптотической свободы и конфайнмента, связанными с необычным поведением кварков внутри адронов. В 1972–1973 гг., отчасти независимо и почти одновременно, в определённой степени дополняя друг друга, эта теория (КХД) была развита двумя группами: опять-таки М. Гелл-Манном и Х. Фричем с сотрудниками и тройкой американских физиков, получивших впоследствии Нобелевскую премию за открытие упомянутого явления асимптотической свободы, Д. Гроссом, Х. Политцером и Ф. Вильчеком (и в этой последней тройке просматривается феномен одновременного и независимого открытия).

«УПУЩЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ»

Одним из первых об «упущенных возможностях» в развитии физико-математических наук говорил выдающийся американский теоретик Ф. Дайсон. Он обсуждал такие случаи, «когда математики и физики упустили открытия из-за пренебрежения к взаимным обсуждениям» [10, с. 171]. Так, по его мнению, математики явно недооценили математическую глубину уравнений Максвелла и тем самым упустили возможности ещё в XIX в. открыть теорию топологических групп и их представлений, многие важные результаты теории гиперболических уравнений и функционального анализа. Возвращаясь к истории СМ и кварковой модели, подчеркнём, что при рассмотрении ряда ситуаций одновременного и независимого открытий мы фактически уже затрагивали и феномен упущенных возможностей, о котором говорил в своих воспоминаниях и один из главных героев истории открытия кварков и СМ в целом (см. второй эпиграф). Так, мы кратко останавливались на том, как по разным причинам Р. Утияма, Р. Шоу и даже классик современной кван-

товой теории В. Паули упустили возможность построить теорию калибровочных полей, носящую имена Ч. Янга и Р. Миллса. В некотором смысле упустившим возможность открыть кварки следует признать и сооткрывателя «восьмеричного пути» Ю. Неемана (вместе с его соавтором Х. Гольдбергом). В определённом смысле можно говорить и о своеобразном упущении Сакаматы и его сотрудников, развивавших составные модели, которые приблизились к открытию и «восьмеричного пути», и кварков, но не сделали решающего шага в значительной мере из-за философских предубеждений. Более проблематичны другие случаи, например, открытие нового квантового числа кварков, называемого «цветом», которое могло привести независимо его нашедших в 1964–1965 гг. теоретиков Ё. Намбу и М. Хана с одной стороны и советских теоретиков из ОИЯИ (Дубна) Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского и А. Н. Тавхелидзе с другой – к более значительному их вкладу в КХД, соизмеримому с тем, что сделали Гелл-Манн с сотрудниками или открыватели асимптотической свободы. Едва ли можно говорить об упущенной возможности тех физиков (а их было большинство), которые с середины 1950-х гг. вплоть до начала 1970-х гг. считали теоретико-полевой подход, включавший и калибровочную концепцию Янга–Миллса, и кварковую модель, менее перспективным, чем феноменологический подход, основанный на теории S-матрицы и связанных с ней концепциях дисперсионных соотношений, полюсов, Редже и «бутстрапа». Кстати, в это большинство входили и многие советские физики, прежде всего, относящиеся к теоретическим школам Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука. Их позиция во многом опиралась на обнаруженный лидерами этих школ парадокс квантовой электродинамики, распространённый на квантовую теорию поля в целом, связанный с так называемой проблемой «нуль-заряда» (физическое взаимодействие при строгом его вычислении обращалось в нуль). И это, как можно предположить, привело к не столь крупному вкладу советских физиков в создание СМ [5]. Следует заметить, на что обратили впоследствии открыватели асимптотической свободы, Гросс и Вильчек, метод, использованный Ландау и его сотрудниками при вычислении «нуль заряда», применённый к неабелевым калибровочным полям, мог привести теоретиков, в том числе и советских, к открытию явления асимптотической свободы. «Почему проблема нулевого заряда, – озадачивался вопросом Д. Гросс, – не вдохновила на поиски асимптотически свободных теорий, лишённых этого недостатка?» [11, с. 731]. Так что вопрос об упущенных возможностях иногда осложняется: вроде бы теоретик упускает возможность встать на более перспективный путь, но иногда оказывается, что и менее правильный путь может привести к правильным решениям.

«ПЕРВЫЙ СРЕДИ РАВНЫХ»

Кратко остановимся на особенности, которую явно напрашивается сформулировать после рассмотрения первых двух феноменов. Фактически она уже кратко сформулирована в третьем эпиграфе, принадлежащем А. Е. Левину,

из которого видно, что среди множества корифеев (многие из них были удостоены Нобелевской премии), внёсших значительный вклад в создание как теории кварков, так и стандартной модели в целом, одна фигура стоит особняком – это М. Гелл-Манн. Почти все его достижения в теории элементарных частиц были сделаны в ситуации «независимо и одновременно», как мы видели и как об этом красочно высказался Левин (см. также [12]). Приведём ещё авторитетное высказывание Ё. Намбу из его книги о кварках: «Не будет преувеличением сказать, что Гелл-Манн – один из главных лидеров послевоенного развития теории элементарных частиц... Среди огромного множества первоклассных научных работ Гелл-Манна можно выделить как особые достижения: ренорм-групповое уравнение Гелл-Манна–Лоу (сыгравшее ключевую роль в работах по асимптотической свободе. – В. В.), теорию V-A – взаимодействия Фейнмана и Гелл-Манна (лежащую в основе электрослабой теории. – В. В.), теорию восьмеричного пути, предложенную независимо и одновременно Гелл-Манном и Нееманом, гипотезу кварков (одновременно и независимо с Цвейгом)...» [13, с. 104]. Гелл-Манн был удостоен Нобелевской премии в 1969 г. «за открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий» во всей их совокупности, но сделанных в 1950–1960-е гг. Поэтому блестящие достижения работы его коллег Неемана и Цвейга, также сделавших независимо работы нобелевского уровня, остались без Нобелевских премий (каждый из них мог получить эту премию только вместе с Гелл-Манном, уже получившим эту премию). Один из вариантов научно-биографического подхода в истории науки, предлагавшийся С. И. Вавиловым, заключается в поиске таких научных лидеров, которых можно рассматривать как своего рода «персонификаторов» определённых этапов развития национальной или мировой науки [14]. Вавилов считал, например, что значительный период развития физико-математических наук в эпоху Великой французской революции «персонифицируется» личностью Г. Монжа. Точно так же калибровочно-кварковую революцию, завершившуюся в начале–середине 1970-х гг. созданием стандартной модели, можно персонифицировать фигурой Гелл-Манна.

«НА ОШИБКАХ ВЫРАСТАЕТ НАУКА»

С Вавиловым связана и другая концепция развития научного знания, которая сформулирована им в одной кратчайшей и парадоксальной фразе: «На ошибках вырастает наука» [15, с. 287]. История кварковой модели и СМ в целом во многом подтверждает эту концепцию. Об этом говорили в своих блистательных «Диалогах физика и математика» отечественные участники и очевидцы рассматриваемой истории И. Ю. Кобзарев и Ю. И. Манин: «В догадках, которые привели к группе цвета (калибровочной симметрии КХД. – В. В.) и слабой группе (точнее, калибровочной симметрии электрослабой теории. – В. В.), также всё 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» [16, с. 26]. Напомним, что локально-калибровочная теория Янга–Миллса, ставшая теоретическим ядром СМ, будучи первоначально применённой к изоспиновой симметрии сильных взаимодействий ($SU(2)$ -группе), была безусловно ошибочной. К тому же большинство теоретиков считали её ошибочной и потому, что она приводила к безмассовым калибровочным частицам, что как будто противоречило опыту. Составные модели в теории сильных взаимодействий типа модели С. Сакаты, несмотря на свою ошибочность, также сыграли позитивную роль в открытии и восьмеричного пути, и кварков [17]. Дробно-заряженные кварки, реальное существование которых казалось немислимим, в течение 5 или даже 10 лет рассматривались большинством теоретиков как результат ошибочной теории. Потребовалась поддержка в виде результатов экспериментов на ускорителях по глубоко неупругому рассеянию электронов на протонах в 1968–1969 гг., выявивших квазиточечные образования внутри протонов и названные Р. Фейнманом партонами (именно они затем были отождествлены с кварками и связывающими их глюонами), а также двойной теоретический прорыв 1972–1973 гг. (Гелл-Манна с сотрудниками – к «цветной» калибровочной $SU(3)$ -симметричной теории кварков и глюонов и Гросса, Вильчека и Политцера – к осмыслению реального существования кварков внутри адронов на основе явления «асимптотической свободы»), чтобы признать реальность кварков и правильность СМ в целом. Безусловно, ошибочным после завершения СМ был признан отказ большинства теоретиков от квантополе-вой программы (или парадигмы) в теории элементарных частиц в пользу феноменологического S-матричного подхода (с использованием дисперсионных соотношений, полюсов Редже и концепции бутстрапа). Ошибочными были и попытки локализации открытой в 1961 г. ароматической приближенной $SU(3)$ -симметрии сильного взаимодействия, исправленные благодаря введению «цвета» кварков и переходу к точной «цветной» калибровочной $SU(3)$ -симметрии. Так что, поистине теория кварков и СМ выросли на ошибках. Правда, «ошибочностный» характер развития научного знания (своего рода «драма идей», по выражению Эйнштейна) нередко приводит и к «драмам людей», что имело место и в рассматриваемой истории. Об этом с горечью сказал Е. Л. Фейнберг: «Помнят победивших (вовремя признавших и исправивших ошибки. – В. В.), вышедших из вызывающего лихорадку тумана на подлинный свет и выведших из него других. Но сколько талантливых и трудолюбивых ошиблось, заблудилось, завязло в болоте, которое засосало так, что о них и памяти не осталось!» [18, с. 324–325]. Часто – это драмы «упустивших возможности» внести заметный вклад в науку, а иногда даже ещё более драматичные ситуации.

«СКРЫТЫЕ ПОВОРОТНЫЕ МОМЕНТЫ»

Всматриваясь в хронологию событий той или иной области науки, например, теории относительности или двадцатилетней истории создания СМ, или только теории кварков, мы находим или выделяем, как правило, некоторые

наиболее важные моменты, которые можно назвать поворотными (это один из способов «исторического, или историко-научного, наблюдения»). В истории СМ – это теория Янга–Миллса (1954), затем – обнаружение симметрий сильного и электрослабого взаимодействий (1961), затем – модель кварков и механизм Хиггса (1964), далее – основы квантовой теории калибровочных полей и теория Вайнберга–Салама (1967) и т. д., вплоть до 1973 г., когда была создана КХД и понята физическая природа кварков на основе понятия асимптотической свободы [5]. При дальнейшем анализе выясняется, что поворотный характер некоторых из этих моментов поначалу не признавался большинством участников и становился достаточно очевидным только впоследствии. Такие поворотные моменты можно назвать «скрытыми». Рассмотрим некоторые из них. Локально-калибровочный характер фундаментальных взаимодействий, предложенный Янгом и Миллсом в 1954 г., по ряду причин, о которых говорилось ранее, большинством не признавался вплоть до начала 1970-х гг., тем более что в это время вообще квантовополевой подход уступал лидерство S-матричной феноменологии. Открытие кварков, сделанное на основе обнаруженного несколько ранее восьмеричного пути, также вызывало большие сомнения не только из-за их крайней нереалистичности, но и потому что оно было связано с полевой программой и явно противоречило модной тогда концепции бутстрапа (или «ядерной демократии»). Таким образом, и открытие кварков в 1964 г. имело скрыто-поворотный характер. Создание электрослабой теории Вайнберга–Салама в 1967 г., соавторы которой были впоследствии удостоены вместе Ш. Глэшоу Нобелевской премии, было бесспорно поворотным моментом в рассматриваемой истории. Но теория большинству казалась сомнительной до тех пор, пока нидерландский теоретик Г. 'т Хоофт не доказал в 1971 г. её перенормируемость. Сам С. Вайнберг писал впоследствии: «Хотя всё ещё не существовало ни малейших экспериментальных свидетельств в пользу электрослабой теории, но именно после работы 'т Хоофта она стала частью рабочего аппарата физики» [19, с. 96]. Таким образом, и этот поворотный момент был, по существу, скрытым. Но 'т Хоофт в своём доказательстве существенно опирался на разработанную в 1967 г. советскими математическими физиками Л. Д. Фаддеевым и В. Н. Поповым квантовую теорию калибровочных полей, которая тоже была своеобразным скрытым поворотным моментом на протяжении нескольких лет, пока 'т Хоофт не продемонстрировал её возможности для доказательства перенормируемости калибровочных теорий и прежде всего электрослабой теории Вайнберга–Салама.

ФЕНОМЕН РОСТА

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ МЕНЬШИНСТВА

Как мы видели, в истории СМ конкурировали между собой различные исследовательские программы, прежде всего квантовополевая программа, включающая в себя концепцию калибровочных полей для описания фундаментальных взаимодействий, и феноменологическая S-матричная программа, которая отрицала их полевой характер [5]. Обоснованность первой

программы, на основе которой Ч. Янгом и Р. Миллсом была разработана локально-калибровочная теория сильного взаимодействия (1954), была подорвана её противоречием с экспериментом, что было сразу же отмечено, В. Паули, а также обнаруженным рядом теоретиков (и, в первую очередь, Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчуком) парадокса «нуль-заряда» (1954–1955). Большинство физиков вплоть до начала 1970-х гг. разделяли установки второй («бесполевой») программы, но немногие сторонники полевой программы и концепции Янга–Миллса продолжали свои исследования. Приведём несколько беглых замечаний Нобелевского лауреата Д. Гросса, характеризующих противостояние полевой программы, связанной с концепцией Янга–Миллса и кварками, «программы меньшинства», и феноменологической S-матричной «программы большинства»: «Теория поля (в начале 1960-х гг. – В. В.) была в опале; теория S-матрицы была в самом расцвете... Теория Янга–Миллса, появившаяся в середине 1950-х гг., не принималась всерьёз... Под влиянием Ландау и Померанчука поколению физиков было запрещено работать над теорией поля... До 1973 г. считалось неприличным использовать теорию поля без извинений... Кварки (введённые в 1964 г. Гелл-Манном и Цвейгом. – В. В.) не существовали как реальные частицы... Можно было «выводить» свойства кварков из некоторой модели, но не разрешалось верить в их существование и принимать эту модель всерьёз» [11, с. 727–734]. Успехи «бесполевой» программы большинства для построения теории фундаментальных взаимодействий были весьма ограничены, в то время как полевая программа меньшинства прогрессировала: в 1961 г. были открыты важные приближенные симметрии сильных и слабых взаимодействий (точнее, слабых, объединённых с электромагнитными взаимодействиями), в 1964 г. были открыты кварки и найден способ наделить массой калибровочные частицы слабых сил, в 1967 г. построена квантовая теория калибровочных полей и создана теория электрослабых взаимодействий и т. д. В начале 1970-х гг., благодаря работам 'т Хоофта, Гелл-Манна и цитированного Гросса (вместе с Вильчеком и Политцером), полевая программа взяла верх и сама стала программой большинства, быстро вытеснив бесполевую программу. Использование понятия «исследовательская программа» наводит на возможность рассмотрения истории создания СМ, включающей в качестве ключевого фрагмента концепцию кварков, в терминах методологии исследовательских программ И. Лакатоса [20].

ФЕНОМЕН «СПЯЩЕЙ КРАСАВИЦЫ»

Этот историко-научный феномен близок к ситуации «скрытых поворотных моментов». Некоторые открытия, концепции, гипотезы, теории и т. п., признанные впоследствии поворотными, какое-то время находятся в латентном состоянии, являясь как бы «спящими красавицами». Особенно интересен здесь механизм их пробуждения, ассоциируемый с «поцелуями некоторых принцев». Эту метафору, насколько мне известно, одним из первых применительно к истории СМ использовал советский теоретик Д. А. Киржниц:

«Оказалось, ...что квантовая теория поля не умерла (столкнувшись с парадоксом «нуль-заряда», безмассовостью калибровочных частиц в теории Янга-Миллса и другими проблемами. – В. В.), а пребывала, как Спящая Красавица, в состоянии летаргии. Чтобы её разбудить, понадобилось, конечно, нечто большее, чем поцелуй сказочного принца. Здесь сказалось воздействие многих факторов, среди которых не последнюю роль сыграло привлечение физических идей, заимствованных из теории многих тел и, в частности, из теории сверхпроводимости» [8, с. 170]. Речь здесь в первую очередь идёт о явлении спонтанного нарушения симметрии, открытого сначала в физике твёрдого тела и теории сверхпроводимости и затем успешно применённого в физике элементарных частиц. Это явление заключается в том, что существуют симметрии уравнений теории, которым не удовлетворяют решения этих уравнений, точнее эти нарушения возникают спонтанно в их решениях. В 1964 г. Хиггс, Энглер с Браутом, а также Гуральник, Хаген и Киббл использовали это явление, чтобы наделить массой калибровочные слабые частицы. Правда, при этом приходилось вводить некоторое скалярное поле, названное впоследствии частицей Хиггса. Опираясь на эти достижения, Вайнберг и Салам в 1967 г. построили единую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий (теорию Вайнберга–Салама). Ещё в 1961 г. Ш. Глэшоу открыл правильную симметрию электрослабых сил, но калибровочные слабые частицы оставались безмассовыми, что явно противоречило эксперименту. И проект электрослабой теории, подобно спящей красавице, ждал примерно шесть лет, пока идея спонтанного нарушения симметрии и связанный с ней механизм Хиггса, не разбудили красавицу, т. е. пока упомянутый проект не превратился в настоящую теорию. Впоследствии С. Вайнберг очень высоко оценивал эту нарушенную симметрию вместе с механизмом Хиггса: «Открытие этого явления, сначала в физике твёрдого тела, а затем и в физике частиц, стало одним из великих достижений науки XX в.» [19, с. 151]. Есть определённое пересечение феномена «скрытых поворотных моментов» с феноменом «спящей красавицы». Так, концепция Янга–Миллса может также рассматриваться, как «спящая красавица», которая в полной мере «пробудилась» лишь после завершения построения КХД и открытия асимптотической свободы. Точно так же во многом и кварковая модель 1964 г. была «спящей красавицей» вплоть до её превращения в кварк-глюонную модель и уяснения реальности кварков, благодаря понятию асимптотической свободы. О распространённости феномена спящей красавицы в истории современной математики сравнительно недавно писал А. Н. Паршин [21]. Использовались и другие метафоры для характеристики скрытой красоты теоретических открытий или гипотез в истории создания СМ, обретающих статус полноценных теорий с появлением дополнительных теоретических прорывов или уяснения возможности их экспериментального подтверждения. Например, метафора о превращении лягушки (или лягушонка) в прекрасного принца. В Нобелевской лекции А. Салам, подчёркивая важность работы Г. 'т Хоофта 1971 г. по перенормируемости калибровочных полей говорил: «Как красноречиво сказал Колеман (известный теоретик С. Коулмен. – В. В.): «Работа 'т Хоофта превратила вайнберг-саламовскую лягушку в прекрасного принца»

[22, с. 18]. Таким образом, электрослабая теория была «спящей красавицей» до 1967 г., когда идеи Хиггса и др. её разбудили, но всё же и после этого она оставалась в некотором смысле ещё спящей, пока её окончательно не разбудило доказательство её перенормируемости в 1971 г.

ПЕРЕПЛЕТЕНИЕ ФИЗИКИ И МЕТАФИЗИКИ

Этот феномен связан, прежде всего, с философскими (или метафизическими) аспектами стандартной модели и истории её создания. Но его название как бы указывает и на обратный канал: воздействие физики на метафизику. Далеко не всякая физика подвержена философскому влиянию и ещё реже встречается такая физика, которая влияет на философию. В истории современной физики это переплетение имело место в теории относительности и квантовой механике, но в физике второй половины XX в., казалось, отмеченная взаимосвязь перестала быть существенной. Однако в истории создания СМ, особенно в связи с открытием кварков, как показывает анализ, мы снова встречаемся с «переплетением физики и метафизики» (в некоторых предыдущих работах мы более подробно касались этой проблемы [23–25]). Здесь только бегло отметим причины этого переплетения именно в СМ и теории кварков, а также бегло перечислим некоторые конкретные философские воздействия на развитие СМ. Главная причина заключается именно в кварках, потому что с самого начала встал вопрос о реальности этих частиц [4]. Неeman и Гольдберг в их реальность не верили и полагали, что кварки – математико-модельные объекты, позволяющие только объяснить группировки наблюдаемых частиц [26]. Другой крайней позиции придерживался Цвейг, считавший, что кварки мало чем отличаются от обычных частиц и веривший в их реальное существование даже в свободном виде [26; 27]. Ближе к истине, как выяснилось в дальнейшем, был Гелл-Манн, который считал их реально существующими и даже наблюдаемыми только внутри сильновзаимодействующих частиц (адронов) [2; 26]. Так, вместе с кварками в физику элементарных частиц и взаимодействий вошла метафизика с явно относящейся к ней проблемой реальности.

Что же касается конкретных философских импульсов, повлиявших на формирование СМ (и теории кварков), то это были такие в некотором смысле противоречащие друг другу концепции, как платонизм и позитивизм, а также противостоящие обеим этим течениям разные формы научного реализма и диалектического материализма [23; 25]. Одни, особенно приверженцы абстрактной математики в физике, верили в духе поздних Эйнштейна и Гейзенберга в реальность и творческую мощь математических структур, привлечённых к разработке СМ, связанной с неабелевыми калибровочными полями. Другие, столкнувшись с проблемами теории поля (включая калибровочные поля), ссылались на позитивистские принципы и были склонны отказаться от полевого подхода в пользу феноменологической теории S-матрицы, успехи которой были весьма ограничены. В философии науки в это время модными становятся идеи философского релятивизма и социальной сконструированности научных понятий, подрывающие их объектив-

ность и истинность, но подавляющее большинство физиков, будучи, скорее, «грубыми, прямолинейными реалистами», были убеждены «в объективной реальности понятий, используемых в наших научных теориях» [19, с. 132], что позволило С. Вайнбергу говорить о «непостижимой неэффективности философии» в физике [там же, с. 133]. Особого внимания заслуживает противоречивая оценка роли диалектического материализма в развитии физики элементарных частиц в 1950–1960-е гг. в Японии, прежде всего, в группе исследователей под руководством С. Сакаты, выдвинувшего в 1956 г. составную модель (из двух нуклонов и лямбда-частицы), которая предвосхищала и восьмеричный путь, и в какой-то степени кварковую модель. Его соотечественник Ё. Намбу, переехавший в США и удостоенный в 2008 г. Нобелевской премии за вклад в создание СМ, весьма положительно оценивал влияние философского фактора на исследования Сакаты и его учеников: «Искусно применяя материалистическую диалектику, Саката пропагандировал свои взгляды в лекциях и монографиях; он оказал большое влияние на молодое поколение японских исследователей. В частности, утверждение Сакаты о неограниченности числа уровней организации элементарных частиц способствовало снятию у научной молодёжи психологического барьера, препятствовавшего смелому введению в теорию новых частиц» [13, с. 97–98]. Гелл-Манн, посетивший Японию вскоре после открытия кварков, вспоминал впоследствии: «Все эти люди (т. е. японские теоретики. – В. В.) были резко против моего абстрактного подхода, который, по их мнению, был сродни “буржуазному или ревизионистскому идеализму”... Они настаивали на том, что, если базовые адроны существуют, то они должны быть целочисленно заряженными и наблюдаемыми... Интересно было видеть, как эти вполне разумные теоретические физики, работающие над разумно поставленными проблемами и применяющие адекватные математические методы, упускали правильные решения из-за определённых философских взглядов» [2, р. 494].

Не менее важным здесь было и явное вторжение физики в метафизику. Кварки оказались материальными объектами нового типа, реальностью не встречавшейся ранее природы. С. Вайнберг подчёркивал, что открытие кварков нанесло мощный удар, по позитивистским концепциям: «...Самое драматическое отрицание принципов позитивизма связано с современным развитием теории кварков» [19, с. 142]. Гелл-Манн же, как мы видели, считал, что кварки плохо согласуются с материалистической диалектикой, которая была популярна среди японских теоретиков. Но всё-таки главным свидетельством вторжения физики кварков в метафизику было осознание того, что они радикально изменяют наши представления о материи и реальности. Именно об этом говорил в 1965 г., т. е. сразу после открытия кварков, один из ведущих советских теоретиков Я. Б. Зельдович, подчеркнувший, что кварки являются «совершенно новой фундаментальной материей», представляя «атомизм нового типа». «Такие открытия, – продолжал он, – свидетелями которых мы являемся в последние два-три года, как правило, полностью перестраивают все наши представления о природе» [28, с. 312]. Таким образом, открытие кварков вместе с созданием СМ приравнивалось к событиям масштаба квантово-релятивистской революции, которые также «полностью перестраивали наши представления о природе» и тем самым вносили выда-

ющий вклад не только в физику, но и в современную метафизику. В этом смысле следует понимать выражение А. Иличевского: «Метафизика и есть физика» [1, с. 316].

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

История создания стандартной модели, включающая, по словам одного из участников этой истории Р. Утиямы, «два великих шедевра», а именно «теорию кварков и калибровочную теорию» [29, с. 208], оказалась настолько сложной и богатой, что соответствующее «историческое наблюдение» позволило выявить целый ряд взаимосвязанных историко-научных феноменов, которые можно считать квазиэмпирическими обобщениями. Предпринимаемые попытки внести теоретизм в осмысление развивающейся науки, т. е. истории науки, так или иначе должны опираться на рассмотренные нами историко-научные феномены, образующие своего рода эмпирический базис. Вместе с тем и для дальнейшего развития фундаментальной физики выявление этих феноменов, являющихся своеобразными «уроками истории», может оказаться также небесполезным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иличевский А.* Воображение мира: эссе. СПб. : ИД Ивана Лимбаха, 2019. 236 с.
2. *Gell-Mann M.* Particle theory from S-matrix to quarks // *Symmetries in physics (1600–1980). Proceedings of the 1st Intern. Meeting on the History of scientific ideas* / Ed. by M. Doncel, A. Hermann, L. Michel, A. Pais. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 1987. P. 473–497.
3. *Левин А. Е.* Восьмеричный путь Вселенной // N + 1 : [сайт]. 2019. 29 мая. URL: <https://nplus1.ru/material/2019/05/29/rip-murray-gell-mann?ysclid=lkv4kqzm7z854573285> (дата обращения: 03.08.2023).
4. *Визгин В. П.* Как в теории элементарных частиц появились кварки (к 60-летию великого открытия) // *Вопросы истории естествознания и техники.* 2023. Т. 44, № 4 (в печати).
5. *Визгин В. П.* У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // *Исследования по истории физики и механики.* 2019–2020. М. : Янус-К, 2021. С. 249–293.
6. *Визгин В. П.* Проблема истины в историко-научных исследованиях // *Вопросы истории естествознания и техники.* 2007. Т. 28, № 1. С. 3–20. EDN HZFAPR.
7. *Визгин В. П.* «Пока предмет не назван, он непонятен нам»: об именовании историко-научных феноменов // *Вопросы истории естествознания и техники.* 2017. Т. 38, № 1. С. 9–25. EDN YKSJGR.
8. *Киржниц Д. А.* Сверхпроводимость и элементарные частицы // *Успехи физических наук.* 1978. Т. 125. С. 169–194. 9. *Визгин В. П.* Калибровочная революция в физике элементарных частиц сквозь призму метафор // *Исследования по истории науки, литературы, общества. Сборник статей / Отв. ред. П. Полян. Издательские решения,* 2021. С. 60–70.
10. *Дайсон Ф.* Упущенные возможности // *Успехи математических наук.* 1980. Т. 35. Вып. 1 (211). С. 171–191. 11. *Гросс Д.* Открытие асимптотической свободы и появление КХД. Нобелевская лекция // *Нобелевские лекции по физике.* 1995–2004. М. : Институт

компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. С. 727–752.

12. *Fritsch H.* (Ed.) Gell-Mann and physics of quarks. Basel, Boston, Berlin : Birkhauser, 2015. 174 p.

13. *Намбу Ё.* Кварки. М. : Мир, 1984. 225 с.

14. *Визгин В. П.* История науки как «история редкостных флуктуаций мысли и научной работы...вроде Архимеда и Ньютона» // Управление наукой: теория и практика, 2021. Т. 3, № 4. С. 207–226. DOI 10.19181/smtp.2021.3.4.19. EDN XVZXLW.

15. *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.

16. *Кобзарев И. Ю.* Элементарные частицы. Диалоги физика и математика / И. Ю. Кобзарев, Ю. И. Манин. М. : ФАЗИС, 1997. 208 с.

17. *Okun L. B.* On the way from Sacatons to quarks // 50 years of quarks / Ed. by H. Fritsch, V. Gell-Mann. Singapore : World Scientific, 2015. P. 57–94.

18. *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.

19. *Вайнберг С.* Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М. : УРСС, 2004. 256 с.

20. *Визгин В. П.* Методологические принципы и исследовательские программы // Методологические проблемы историко-научных исследований / Отв. ред. И. С. Тимофеев. М. : Наука, 1982. С. 172–197.

21. *Паршин А. Н.* Судьба науки (Несколько замечаний к несостоявшимся лекциям Ф. Дайсона и И. Р. Шафаревича) // Вопросы философии. 2019. № 9. С. 98–107. DOI 10.31857/S004287440006322-9. EDN NDRAVP.

22. *Салам А.* Калибровочное объединение фундаментальных сил. Нобелевская лекция // На пути к единой теории поля. М. : Знание, 1980. С. 5–36

23. *Визгин В. П.* Метафизические аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Метафизика. 2020. № 3 (37). С. 39–56. DOI 10.22363/2224-7580-2020-3-39-56. EDN PECCPK.

24. *Визгин В. П.* Социокультурные аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Эпистемология и философия науки. 2020. Т. 57, № 3. С.160–175. DOI 10.5840/eps202057348. EDN RGSNSJ.

25. *Визгин В. П.* Проблема реальности кварков и философские аспекты их открытия (1963–1964гг.) // XXIX Годичная конференция Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. М., 2023 (в печати)

26. *Neeman Yu.* Hadron symmetry, classification and compositeness // Symmetries in physics (1600–1980). Proceedings of the 1st Intern. Meeting on the History of scientific ideas / Ed. by M. Doncel a.o. Bellaterra, Barcelona, 1987. P. 499–540.

27. *Zweig G.* Concrete quark // 50 years of quarks / Ed. by H. Fritsch, V. Gell-Mann. Singapore : World Scientific, 2015. P. 25–56.

28. *Зельдович Я. Б.* Классификация элементарных частиц и кварки в изложении для пешеходов // Успехи физических наук. 1965. Т. 86, № 2. С. 303–314.

29. *Утияма Р.* К чему пришла физика (От теории относительности к теории калибровочных полей) М. : Знание, 1983. 224 с.

Статья поступила в редакцию 09.07.2023. Одобрена после рецензирования 10.08.2023. Принята к публикации 25.08.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Павлович Визгин vlvizgin@gmail.com

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, Москва, Россия

AuthorID РИНЦ: 73232

Web of Science ResearchID: G-4223-2016

DOI: 10.19181/smtp.2023.5.3.12

ON “HISTORICAL AND SCIENTIFIC PHENOMENA” IN THE HISTORY OF THE DISCOVERY OF QUARKS

Vladimir P. Vizgin¹

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

For citation: Vizgin, V. P. (2023). On “Historical and Scientific Phenomena” in the History of the Discovery of Quarks. *Science Management: Theory and Practice*. Vol. 5, no. 3. P. 185–202. DOI 10.19181/smtp.2023.5.3.12.

Abstract. Based on the material of the discovery of quarks, considered in the context of the history of the creation of the standard model in elementary particle physics of the 1950s–1970s, the features of the corresponding historical processes, which are called “historical and scientific phenomena”, are investigated. These phenomena are quasi-empirical generalizations that are fixed through “historical (or historical-scientific) observation”. As a result, it turned out to be possible to identify the following related “historical and scientific phenomena”: a “simultaneous and independent” discovery, the presence of one leader (in this case, M. Gell-Mann), missed opportunities, the growth of a minority research program, hidden turning points, the closely related phenomenon of “sleeping beauty”, the “mistakeability” nature of development of scientific knowledge”, “the interweaving of physics and metaphysics”. The question of the universality of these phenomena is raised and it is argued that the introduction of theorism into the history of science is possible only if they are taken into account. In addition, understood as features of the evolution of the modern theory of elementary particles and the fundamental interactions between them, they can be considered as lessons of history that may be useful in its further development of this theory.

Keywords: elementary particles, quarks, standard model (SM), quantum chromodynamics (QCD), gauge fields, M. Gell-Mann, “historical and scientific phenomena”, “historical observation”, missed opportunities, the phenomenon of “sleeping beauty”, hidden turning points, “interweaving of physics and metaphysics”

REFERENCES

1. Ilichevskii, A. (2019). *Voobrazhenie mira: esse* [Imagining the World: An essay]. St.-Petersburg: Ivan Limbakh publ. 236 p. (In Russ.).

2. Gell-Mann, M. (1987). Particle theory from S-matrix to quarks. In: *Symmetries in physics (1600–1980). Proceedings of the 1st Intern. Meeting on the History of scientific ideas*. Ed. by M. Doncel, A. Hermann, L. Michel, A. Pais. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. P. 473–497.
3. Levin, A. E. (2019). Vos'merichnyi put' Vselennoi [The Eightfold path of the universe]. *N+1*. May 29. URL: <https://nplus1.ru/material/2019/05/29/rip-murray-gell-mann?ysclid=lkv4kqzm7z854573285> (accessed: 03.08.2023). (In Russ.).
4. Vizgin, V. P. (2023). Kak v teorii elementarnykh chastits poyavilis' kvarki (k 60-letiyu velikogo otkrytiya) [How quarks appeared in the theory of elementary particles (on the 60th anniversary of the great discovery)]. *Studies in the History of Science and Technology*. Vol. 44, no. 4 (In print). (In Russ.).
5. Vizgin, V. P. (2021). U istokov standartnoi modeli v fizike fundamental'nykh vzaimodeistvii [At the origins of the standard model in the physics of fundamental interactions]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki. 2019–2020* [Research on the history of physics and mechanics. 2019–2020]. Moscow: Janus-K publ. P. 249–293. (In Russ.).
6. Vizgin, V. P. (2007). The problem of truth in the history of science. *Studies in the History of Science and Technology*. Vol. 28, no. 1. P. 3–20. (In Russ.).
7. Vizgin, V. P. (2017). “Until named, the object is unknown to us”: naming the history of science phenomena. *Studies in the History of Science and Technology*. Vol. 38, no. 1. P. 9–25. (In Russ.).
8. Kirzhnits, D. A. (1978). Sverkhprovodimost' i elementarnye chastitsy [Superconductivity and elementary particles]. *Physics-Uspokhi*. Vol. 125. P. 169–194. (In Russ.).
9. Vizgin, V. P. (2021). Kalibrovchnaya revolyutsiya v fizike elementarnykh chastits skvoz' prizmu metafor [The Calibration Revolution in particle Physics through the prism of metaphors]. *Issledovaniya po istorii nauki, literatury, obshchestva. Sbornik statei*. Ed. by P. Polan. Izdatel'skie resheniya. P. 60–70.
10. Daison, F. (1980). Upushchennye vozmozhnosti [Missed opportunities]. *Russian Mathematical Surveys*. Vol. 35, no. 1 (211). P. 171–191.
11. Gross, D. (2009). Otkrytie asimptoticheskoi svobody i poyavlenie KKHD [The discovery of asymptotic freedom and the emergence of QCD]. In: *Nobelevskie lektsii po fizike. 1995–2004*. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika. P. 727–752. (In Russ.).
12. Fritsch H. (Ed.) (2015). Gell-Mann and physics of quarks. Basel, Boston, Berlin: Birkhauser. 174 p.
13. Nambu, Jo. (1984). *Kvarki* [Quarks]. Moscow: Mir. 225 p. (In Russ.).
14. Vizgin, V. P. (2021). The History of Science as “the History of Rare Fluctuations of Thought and Scientific Work like Archimedes and Newton”. *Science Management: Theory and Practice*. Vol. 3, no. 4. P. 207–226. DOI 10.19181/sntp.2021.3.4.19.
15. Vizgin, V. P. (2019). S. I. Vavilov: «...na oshibkakh vyrastaet nauka» [S.I. Vavilov: “... science grows on mistakes”]. *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki. 2016–2018* [Research on the history of physics and mechanics. 2016–2018]. Moscow: Janus. P. 287–318. (In Russ.).
16. Kobzarev, I. Ju. and Manin Ju. I. (1997). *Ehlementarnye chastitsy. Dialogi fizika i matematika* [Elementary particle. Conversations in physics and mathematics]. Moscow: FAZIS. 208 p. (In Russ.).
17. Okun, L. B. On the way from Sacatons to quarks. In: 50 years of quarks. Ed. by H. Fritsch, V. Gell-Mann. Singapore: World Scientific, 2015. P. 57–94.
18. Feinberg, E. L. (2008). Kak vazhno inogda byt' konservativnym [How important it is to be conservative sometimes]. In: *Feinberg Evgenii Lvovich: lichnost' skvoz' prizmu pamyati*. Ed. by V. L. Ginzburg. Moscow: Fizmatlit publ. P. 324–338. (In Russ.).

9. Vainberg, S. (2004). *Mechty ob okonchatel'noi teorii: Fizika v poiskakh samykh fundamental'nykh zakonov prirody* [Dreams of the Ultimate Theory: Physics in Search of the Most Fundamental Laws of Nature]. Moscow: URSS. 256 p. (In Russ.).
20. Vizgin, V. P. (1982). Metodologicheskie printsipy i issledovatel'skie programmy [Methodological principles and research programs]. In: *Metodologicheskie problemy istoriko-nauchnykh issledovaniy* [Methodological problems of historical and scientific research]. P. 172–197. (In Russ.).
21. Parshin, A. N. (2019). The fate of science (several remarks to abolished lectures by F. Dyson and I. R. Shafarevich). *Voprosy filosofii*. No. 9. P. 98–107. DOI 10.31857/S004287440006322-9. (In Russ.).
22. Salam, A. (1980). Kalibrovochnoe ob"edinenie fundamental'nykh sil. Nobelevskaya lektsiya [Calibration unification of fundamental forces. Nobel Lecture]. In: *Na puti k edinoi teorii polya* [On the way to a unified field theory]. Moscow: Znanie. P. 5–36. (In Russ.).
23. Vizgin, V. P. (2020). Metaphysical aspects of the standard model of the elementary particles physics and the history of its creation. *Metafizika*. No. 3 (37). P. 39–56. DOI 10.22363/2224-7580-2020-3-39-56. (In Russ.).
24. Vizgin, V. P. (2020). Socio-cultural aspects of the standard model in elementary particles physics and the history of its creation. *Epistemology & Philosophy of Science*. Vol. 57, no. 3. P. 160–175. DOI 10.5840/eps202057348. (In Russ.).
25. Vizgin, V. P. (2023). Problema real'nosti kvarkov i filosofskie aspekty ikh otkrytiya (1963–1964 gg.) [The problem of the reality of quarks and philosophical aspects of their discovery (1963–1964)]. In: *XXIX Godichnaya konferentsiya Instituta istorii estestvoznaniya i tekhniki im. S. I. Vavilova RAN* [XXIX Annual Conference of the S. I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences]. Moscow. (In print). (In Russ.).
26. Neeman, Yu. (1987). Hadron symmetry, classification and compositeness. In: *Symmetries in physics (1600–1980)*. Proceedings of the 1st Intern. Meeting on the History of scientific ideas. Ed. by M. Doncel. Bellaterra, Barcelona. P. 499–540.
27. Zweig, G. (2015). Concrete quark. In: *50 years of quarks*. Ed. by H. Fritzsch, V. Gell-Mann. Singapore: World Scientific. P. 25–56.
28. Zel'dovich, Ya. B. (1965). Klassifikatsiya elementarnykh chastits i kvarki v izlozhenii dlya peshekhodov [Classification of elementary particles and quarks in the presentation for pedestrians]. *Physics-USpekhi*. Vol. 86, no. 2. P. 303–314. (In Russ.).
29. Utijama, R. (1986). K chemu prishla fizika. Ot teorii otnositel'nosti k teorii kalibrovochnykh polei [What physics has come to. From the theory of relativity to the theory of gauge fields]. Moscow: Znanie publ. 224 p. (In Russ.).

The article was submitted on 09.07.2023.

Approved after reviewing 10.08.2023. Accepted for publication 25.08.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vizgin Vladimir *vlvizgin@gmail.com*

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the RAS, Moscow, Russia

AuthorID RSCI: 73232

Web of Science ResearcherID: G-4223-2016