

К ИСТОРИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ МИРА

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-4-149-169

ДАЛЬНИЙ И БЛИЖНИЙ ИСТОКИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ (к 150-летию Эрлангенской программы Ф. Клейна и к 100-летию со дня рождения Ч. Янга)

В.П. Визгин

*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН
Российская Федерация, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14*

Аннотация. В связи со 150-летием Эрлангенской программы Ф. Клейна в геометрии и 100-летием со дня рождения Ч. Янга, главного творца концепции неабелевых калибровочных полей, исследуются дальний и ближний истоки стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий. Дальним истоком является Эрлангенская программа и ее последующее введение в специальную теорию относительности и классическую физику. На этом материале обсуждается феномен «непостижимой эффективности математики в естественных науках» (Ю. Вигнер), который становится более ясным на основе «эстафетной модели» взаимодействия математики и физики, предложенной Д. Гильбертом. Рассматривается дополнение эрлангенского подхода, относящееся к теоремам Нетер о связи законов сохранения с симметриями, а также применение эрлангенского подхода к истории физики. Показано, как распространение этого подхода на локальные калибровочные симметрии привело Ч. Янга и Р. Миллса к теории неабелевых калибровочных полей (1954), ставшей ближним истоком на пути к стандартной модели и завершенной в 1973–1974 годы.

Ключевые слова: стандартная модель, локально-калибровочная симметрия, теория Янга и Миллса, Эрлангенская программа Ф. Клейна, специальная теория относительности, введение Эрлангенской программы в физику, эстафетная модель взаимодействия физики и математики Д. Гильберта, теоремы Нетер, эрлангенский подход к истории физики

Esisteine Mannigfaltigkeit und derselbeneine Transformationsgruppe gegeben. Man entwickle die auf die Gruppebezieugliche Invarianten theorie. Dies ist das allgemeine Problem, welches die gewoenliche Geometrienichtnur, sondern namentlich auch

hier zu nennenden neueren geometrischen Methoden und die verschiedenen Behandlungsweisen beliebig ausgedehnter Mannigfaltigkeiten unter sich begreift.

F. Klein [1. S. 35]

В основе программы Клейна лежит наиболее общая формулировка принципа относительности, который необходимо положить в основу всякой математической теории.

Г.А. Соколик [2. С. 6]

Возвращаясь к общей концепции Эрлангенской программы, видим, что эволюция физической картины мира состоит в расширении фундаментальной группы, то есть в переходе к группам с большим числом инвариантов.

Г.А. Соколик [2. С. 1]

В теории компенсирующих (то есть калибровочных. – *В.В.*) полей каждое взаимодействие вводится для восстановления инвариантности, нарушенной некоторым локальным принципом относительности. Если исходить из существования фундаментальной группы, то есть из Эрлангенской программы, то приходим к иерархии вложенных друг в друга локальных групп и тем самым к иерархии взаимодействующих полей.

Г.А. Соколик [2. С. 154]

Я вновь встретился с Паули в июне 1953 года, на этот раз в Лейдене... На этой встрече Паули поднял и технический вопрос относительно моей работы: «...А нельзя ли, подобно калибровочной группе электромагнитного поля, группу преобразований с постоянными фазами таким образом, что мезон-нуклонное взаимодействие будет связано с этой расширенной группой?». Так я впервые услышал об идее, из которой вырос новый фундаментальный раздел теоретической физики: неабелевы калибровочные теории... Если бы в 1953 году, у него хватило смелости опубликовать свою работу, его бы запомнили... как одного из основателей современной калибровочной теории...

А. Пайс [3. С. 306–309]

...Работа Янга и Миллса по праву занимает место среди самых глубоких вкладов в теоретическую физику двадцатого века. Сам Янг... не сразу осознал значение своей работы. Когда в 1990 году его спросили о том, понимал ли он огромную важность этой работы в 1954 году, он ответил: «Нет.

В 1950-х годах мы признавали красоту своей работы. Ее важность я осознал в 1960-х, а ее огромное значение для физики – в 1970-х годах».

А. Пайс [3. С. 227]

Введение

Стандартная модель в физике элементарных частиц, созданная в процессе локально-калибровочной революции (с 1954 по 1974 г.), является признанным теоретическим шедевром, вполне сравнимым с квантово-релятивистскими теориями первой трети XX века. Ее ближний исток – это знаменитая ныне статья Ч. Янга и Р. Миллса «Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность» (1954) [4], положившая начало неабелевым калибровочным теориям электрослабого и сильного взаимодействий. В первом эпитафии А. Пайса говорится о том, насколько близок к этому открытию был В. Паули, упустивший возможность опередить Янга и Миллса.

Как следует из воспоминаний Миллса [5], основная локально-калибровочная концепция была развита китайским и американским физиком Янг Чженьнином, удостоенным Нобелевской премии за открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях (вместе с Ли Цзундао). В этом году Ч. Янгу исполняется 100 лет, что дает дополнительный повод обратиться к истории одного из его главных научных достижений. Из второго эпитафия Пайса следует, что вначале Янг и Миллс не осознавали огромного значения своей работы; к тому же она не согласовывалась с экспериментом, но авторы, оценив красоту своей концепции, решили ее опубликовать, в отличие от великого Паули. В результате локально-калибровочная революция стартовала (в 1954 г.) и, пройдя очень сложный путь, завершилась в 1972–1974 годы созданием $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ – симметричной теории сильных и электрослабых взаимодействий. Именно о такой теории думал в 1960-е годы советский теоретик Г.А. Соколик (см. его третий эпитаграф) и именно о таком расширении Эрлангенской программы думал он.

Фактически стандартная модель – это теория инвариантов названной унитарной изотопической группы и, при переходе к квантовому языку, – это теория представлений этой группы. Но причем тут Эрлангенская программа? А при том, что, согласно этой геометрической программе, которой в этом году исполняется 150 лет, геометрии рассматривались как теории инвариантов лежащих в их основе фундаментальных групп. Программа была выдвинута Ф. Клейном при вступлении его в должность профессора Эрлангенского университета в 1872 году. Но после создания специальной теории относительности (СТО) А. Эйнштейном и ее четырехмерной теоретико-инвариантной формулировки Г. Минковским, геометрической по существу, Ф. Клейн увидел возможность введения своей геометрической программы в физику: СТО оказалась теорией инвариантов группы Пуанкаре, а классическая механика (и физика) – теорией инвариантов группы Галилея – Ньютона, в которую

переходит релятивистская группа в пределе малых скоростей. На основе физического аналога Эрлангенской программы можно было предсказать различные варианты расширения группы Пуанкаре до 15-параметрической конформной группы, а также до групп движения с пространствами постоянной положительной и отрицательной кривизны, которые были использованы в релятивистской космологии Эйнштейном, В. де Ситтером и А.А. Фридманом.

В дальнейшем эта линия развития расщепилась на четыре следующих направления.

Во-первых, переход к теории представлений групп в квантовых теориях (прежде всего группы Пуанкаре, линия Г. Вейля и Ю. Вигнера).

Во-вторых, к локализации группы Пуанкаре, которая в сочетании с принципом общей ковариантности вела к теории гравитации в рамках общей теории относительности (ОТО) и единым геометрическим теориям гравитационного и электромагнитного полей (линия Эйнштейна).

И, в-третьих, прообраз локально-калибровочной концепции, связанный с переходом от глобальных калибровочных симметрий, соответствующих абелевым преобразованиям с постоянными фазами и приводящих к зарядовым законам сохранения (прежде всего, закону сохранения электрического заряда), к локальным симметриям с фазами, являющимися функциями пространства-времени (еще одна линия, связанная и именем Г. Вейля).

Наконец, четвертое направление – это открытие изотопической симметрии ядерных взаимодействий, важнейшей внутренней симметрии, описываемых неабелевыми группами унитарных преобразований, сначала группой $SU(2)$ (линия В. Гейзенберга – Ю. Вигнера). Именно эту группу локализовали в 1954 году Ч. Янг и Р. Миллс, построив первый вариант теории неабелевых калибровочных полей, в котором сильные взаимодействия рассматривались как результат локализации симметрии. Правда, Янг всегда отмечал, что идея «локализация симметрии порождает взаимодействие» восходит к Эйнштейну, связавшему гравитацию с локализацией группы Пуанкаре. В результате Эрлангенская программа в геометрии (1872 г.) действительно оказалась реальным дальним истоком локально-калибровочной концепции Янга и Миллса (1954), которая является настоящим близким истоком стандартной модели, то есть $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ – инвариантной теории сильных (квантовая хромодинамика) и электрослабых (теория С. Вайнберга – А. Салама) взаимодействий (1971–1974).

Концепция инвариантности, относительности, симметрии, наведя в форме Эрлангенской программы порядок в геометрии, транслировались затем в теорию относительности, а впоследствии и в квантовую механику и теорию элементарных частиц, сыграв решающую роль в создании стандартной модели. Можно, таким образом, говорить о триумфальном и плодотворном столетнем пути этой концепции (Эрлангенской программы) с 1872 по 1954 год и затем до начала 1970-х годов. В дальнейшем движение несколько замедлилось. Прошло еще 50 лет, а заметных прорывов на этом пути, несмотря на появление ряда перспективных симметрических идей (суперсимметрия, теория струн), пока так и не произошло [6; 7].

1. Эрлангенская программа Ф. Клейна в геометрии (1872)

Феликс Клейн (1849–1925) был учеником ректора Геттингенского университета А. Клебша, который рекомендовал его в качестве профессора в Эрлангенском университете. В связи со вступлением двадцатитрехлетнего профессора в должность последний должен был прочесть в октябре 1872 года лекцию, в которой ему полагалось рассказать о своих идеях и взглядах на науку. Эта лекция, называвшаяся «Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований» и получившая впоследствии подзаголовок «Эрлангенская программа», была посвящена развитию единого подхода к различным геометрическим системам, которых к этому времени появилось слишком много и которые, казалось, не были связаны между собой. Это единый подход заключался в том, что каждую геометрическую систему, фактически каждую геометрию (элементарную, или евклидову, линейчатую, шаровую, неевклидову, проективную и др.) предлагалось рассматривать как теории инвариантов соответствующих групп непрерывных преобразований. Чеканную формулировку Клейна мы привели в первом эпиграфе в оригинале. Вот ее русский перевод, выполненный в 1895 году известным русским геометром Д.М. Синцовым: «Дано многообразие и в нем группа преобразований. Требуется развить теорию инвариантов этой группы (курсив Клейна. – В.В.). Это – общая задача, заключающая в себе не только обыкновенную геометрию, но и новейшие геометрические методы, которые будут далее именованы, и различные приемы исследования многообразий любого числа измерений» [8. С. 402–403].

Приведем еще одно пространное высказывание о программе Клейна, принадлежащее выдающемуся французскому геометру Эли Картану (оно относится к 1927 г.), в котором разъясняется ее сущность: «...Основная идея Клейна может быть связана с самыми древними понятиями науки. Элементарная геометрия изучает свойства фигур, которые не зависят от их частного положения в пространстве. Прошло немало столетий, прежде чем эта несколько неопределенная формулировка была переведена на точный язык: свойства, изучаемые элементарной геометрией, являются теми, которые остаются инвариантными относительно некоторой совокупности преобразований, образующей группу движения... Проективная геометрия, являвшаяся сначала одной из глав элементарной геометрии и превратившаяся при дальнейшем развитии в самостоятельную научную дисциплину, с точки зрения Клейна, есть изучение свойств фигур, инвариантных относительно... совокупности проективных преобразований, образующих группу. Вообще всякая группа непрерывных преобразований определяет самостоятельную геометрию. Эта геометрия, если рассматривать переменные, образуемые группой, как величины, определяющие точку пространства соответствующего числа измерений, изучает свойства фигур, инвариантные относительно преобразований группы G , причем эти последние играют такую же роль, как движения в евклидовой геометрии или проективные преобразования в геометрии проективной. Группа G называется фундаментальной группой данной геометрии,

Таким образом получают аффинная геометрия, конформная... геометрия, геометрия Лагерра, эрмитова и т.д.» [9. С. 486]. Об истории создания Эрлангенской программы можно прочитать в работах немецкого историка математика Г. Вусинга [10] и автора настоящей статьи [11]. Здесь же мы только остановимся на одном очень важном и принципиальном аспекте развиваемого Клейном подхода к геометриям, а именно на его теоретико-познавательном обосновании, связанном с требованием определенной «подвижности», или «однородности», соответствующих этим геометриям пространств. Этот почти философский аспект прекрасно понимал и сам Клейн, и спустя более чем 50 лет уточнил Э. Картан. Вот как об этом говорил Ф. Клейн: «...Представим себе пространство на мгновение неподвижным, застывшим многообразием; тогда каждая фигура имеет индивидуальный интерес; из свойств, которыми она обладает как индивидуум, только те суть собственно геометрические, которые остаются неизменными при всех преобразованиях главной группы» [8. С. 402]. Э. Картан сформулировал эту мысль более четко и близко к физическому аналогу этого подхода: «В пространстве, не обладающем однородностью, то есть фундаментальная группа которого приводится к тождественному преобразованию, невозможно в смысле „Эрлангенской программы“ построение общих положений: вся геометрия сводилась бы к частным фактам без связи одних с другими» [9. С. 487].

2. СТО как теория инвариантов группы Пуанкаре: введение Эрлангенской программы в физику, 1910 год (от А. Пуанкаре и Г. Минковского к Ф. Клейну)

Главную роль в создании СТО, как известно, сыграл Эйнштейн, но ее теоретико-инвариантную (четырёхмерную) формулировку впервые дал математик Г. Минковский, коллега Ф. Клейна по Геттингену (1907–1908). Весьма близок к этому был А. Пуанкаре, который открыл четырёхмерный формализм СТО в 1905–1906 годы, но использовал его только для вычисления инвариантных выражений при разработке релятивистской теории тяготения. Минковский же с самого начала строит СТО на основе четырёхмерной симметрии: «Я хочу здесь эту симметрию ввести с самого начала, чего названными авторами (Х.А. Лоренцем, Эйнштейном и др. – *B.B.*), даже Пуанкаре, сделано не было» [12. S. 928]. Он вводит новое фундаментальное понятие – «мир» событий, представляющий собой «четырёхмерное неевклидово многообразие» [Ibid.], точнее псевдоевклидово пространство с неоднородной группой Лоренца (или группой Пуанкаре) в качестве фундаментальной симметрии. В результате, как говорит Минковский, «трехмерная геометрия становится главой четырехмерной физики, ...пространство и время должны стать фикциями, и только мир должен сохранить свое существование» [13. С. 187]. Фактически он при этом рассуждает как физик, в духе Эйнштейна, насыщая глубоким физическим содержанием четырёхмерные геометрические абстракции. И хотя Эйнштейн дал физическое обоснование преобразований Лоренца и СТО с помощью измерительных процедур со световыми сигналами, часами

и линейками и тем самым создал необходимую предпосылку для принятия группы Пуанкаре в качестве фундаментальной группы СТО, решающего шага в отношении теоретико-инвариантной четырехмерной сути этой теории он не сделал, оставив этот важный прорыв Минковскому. Более того, Эйнштейн, уже с 1907 года начавший разрабатывать релятивистскую теорию тяготения, достаточно долго недооценивал формулировку Минковского, принятие которой в 1912–1913 годы привело его к тензорно-геометрической концепции гравитации и затем к общей теории относительности (ОТО). Впоследствии во 2-й части «Лекций о развитии математики в XIX в.» Ф. Клейн заметил, что во всех случаях, когда устанавливается инвариантность уравнений той или иной теории относительно некоторой группы преобразований, имеются как бы две ступени: «а) использование преобразований с целью получения из известных уже соотношений новых соотношений; б) развитие привычного способа мышления до степени абстракции, чтобы принимать во внимание только то, что остается инвариантным относительно соответствующей группы преобразований». И далее: «В точности обе ступени... были пройдены лоренцевой группой. Первоначально – самим Лоренцем, Лармором и другими – группа Лоренца использовалась лишь как вспомогательное средство в смысле а), затем благодаря Пуанкаре и особенно Эйнштейну и Минковскому она превратилась в основу нового, отвечающего точке зрения б) «мировоззрения» [14. S. 95; 15. С. 116].

Примерно через год после внезапной кончины Г. Минковского Ф. Клейн в Геттингенском математическом обществе сделал доклад «О геометрических основаниях лоренцевой группы» (1910), в котором он явным образом ввел СТО в четырехмерной теоретико-инвариантной форме Минковского в схему своей программы 1872 года [16]. Из этого доклада следует, что Клейн обсуждал с Минковским связь идей последнего со своей Эрлангенской программой и обещал ему «изложить подробнее эту сторону дела... в своих лекциях по проективной геометрии» [16. С. 144]. В докладе рассматривается не только группа Пуанкаре, но группа Галилея – Ньютона, фундаментальная группа классической механики и физики, в которую переходит первая в пределе малых скоростей. Она естественным образом включаются в цепочку подгрупп группы проективных преобразований и тем самым в схему Эрлангенской программы.

В результате «старая и новая механика одинаково введены в схему проективного мероопределения для переменных x, y, z, t » [16. С. 170]. Как уже ранее говорилось, введение этих групп в эрлангенскую схему наводило на мысль о возможном расширении группы Пуанкаре либо до 15-параметрической группы конформных преобразований, либо до различных вариантов групп неевклидовых геометрий с постоянной положительной или отрицательной кривизной пространства. Кстати говоря, конформная симметрия уравнений Максвелла была независимо открыта Г. Бейтменом и Э. Каннингхемом в 1910 году, а к космологическим симметриям в 1917 году на основе ОТО пришел Эйнштейн, а затем В. де Ситтер и в 1922 году А.А. Фридман

[11]. Так что эвристические возможности введения Эрлангенской программы в физику в 1910-е годы использованы не были.

Эйнштейн при разработке релятивистской теории тяготения натолкнулся на принцип эквивалентности, который вводил в рассмотрение равноускоренные системы отсчета. Это наводило на мысль о том или ином расширении группы Пуанкаре. Но оказалось, что адекватным является такое радикальное расширение, которое вело к произвольным непрерывным преобразованиям координат, означавшим требование общей ковариантности. Фактически это можно было интерпретировать как переход от псевдоевклидовой геометрии Минковского к псевдоримановой искривленной геометрии, в которой первая реализовалась лишь локально. Это вело к принципиально новой форме эрлангенского подхода, к своего рода локализации фундаментальных групп симметрии. Данная форма окажется впоследствии очень важной, когда физики займутся построением теорий открытых в 1930–1940-х годах сильных и слабых взаимодействий элементарных частиц. Вместе с тем создание в середине и второй половине 1920-х годов квантовой механики и основ квантовой теории поля также породило своеобразную модификацию эрлангенского подхода, в которой пришлось от изучения инвариантов фундаментальных групп симметрии перейти к теории неприводимых представлений этих групп. В результате была развита теория неприводимых представлений группы Пуанкаре. Но это было в конце 1920-х – начале 1950-х годов. Несмотря на общерелятивистскую и квантово-теоретическую модификации концепций симметрии, предшествующие революции в физике (галилей-ньютоновскую, эйнштейновскую и квантовую), можно было интерпретировать как последовательные расширения пространственно-временных групп симметрий, лежащих в основе доклассики, классики и релятивизма. Может быть, единственный, кто эту мысль вполне определенно сформулировал, был советский теоретик 1950–1960-х годов Г.А. Соколик (см. три эпиграфа, взятые из его монографии 1965 г. [2]).

Закончим этот раздел еще одним высказыванием из этой книги Соколика, относящимся к распространению эрлангенского подхода на квантовую теорию: «...Принципы Эрлангенской программы можно распространить и на квантовую теорию. В отличие... от систем классической механики, включающей также и релятивистскую, в квантовой механике классификация состояний системы проводится по весовым числам, которые задают неприводимые представления данной группы, а не по инвариантам самой группы, как в классическом случае... Для групповой формулировки квантовой теории существенно знать, каким образом изменяется пси-функция (то есть волновая функция, фигурирующая в уравнениях Шредингера или Дирака. – *В.В.*) при преобразованиях координат, то есть представления фундаментальной группы» [2. С. 11]. На некоторое время вернемся к первоначальной программе Клейна, чтобы обсудить на ее примере одну из важнейших проблем взаимосвязи физики и математики XX века, а именно проблему «предустановленной гармонии между физикой и математикой», или, как часто ее именуют физики,

следуя Ю. Вигнеру, проблему «непостижимой эффективности математики» в физике.

3. Введение Эрлангенской программы в физику как пример «непостижимой эффективности математики» в естественных науках: о физических корнях программы и «эстафетной модели» взаимосвязи математики и физики Д. Гильберта

Суть феномена «непостижимой эффективности математики» в естественных науках (так называлась лекция, посвященная Р. Куранту, которую Ю. Вигнер прочитал в мае 1959 года в Университете Нью-Йорка [17]) заключается в своеобразном опережении математикой структур физических теорий, когда эти теории оказываются неожиданно реализацией уже существующих математических структур или идей.

Феномен этот стал особенно характерен для физики XX века, прежде всего при построении квантово-релятивистских теорий первой трети XX века. Так, риманова геометрия предшествовала ОТО, теория линейных самосопряженных операторов – квантовой механике, а Эрлангенская программа Ф. Клейна – теоретико-инвариантному подходу в физике. В Геттингене в 1900–1920-х годах этот феномен назывался в духе Лейбница «предустановленной гармонией» между математикой и физикой [18]. Замечательно, что он в Геттингене как бы предощущался даже тогда, когда физики были еще только на пути к революционным теоретическим сдвигам. И не только предощущался, но даже получал определенное обоснование. Мы имеем в виду предложенную еще одним геттингенцем (коллегой Клейна и Минковского) Д. Гильбертом концепцию взаимодействия математики и физики (или точного естествознания), которую он набросал в своем знаменитом докладе «Математические проблемы» на II Международном конгрессе математиков в Париже в марте 1900 года.

Приведем несколько достаточно объемистых и взаимосвязанных высказываний, в которых смысл этой концепции становится совершенно прозрачным. Фактически речь идет о своеобразной «эстафетной» модели взаимодействия математики и естествознания: «Обратимся к вопросу о том, из какого источника математика черпает свои проблемы. Несомненно, что первые и самые старые проблемы каждой математической области знания возникли из опыта и поставлены нам миром внешних явлений...». В подтверждение этих слов Гильберт приводит множество примеров, которые привели к важным проблемам «теории численных уравнений, теории кривых, дифференциального и интегрального исчисления, вариационного исчисления, теории рядов Фурье и теории потенциала, не говоря уже о всем богатстве проблем собственно механики и физики». «При дальнейшем развитии какой-либо математической дисциплины, – продолжает он, – человеческий ум, оснащенный удачами, проявляет уже самостоятельность; он сам ставит новые и плодотворные проблемы, часто без заметного влияния внешнего мира, с помощью только логического сопоставления, обобщения, специализирования, удачного

расчленения и группировки понятий и выступает затем на первый план как постановщик задач... А между тем во время действия созидательной силы чистого мышления внешний мир снова настаивает на своих правах: он навязывает нам своими реальными фактами новые вопросы и открывает нам новые области математического знания. И в процессе включения этих новых областей знания в царство чистой мысли мы часто находим ответы на старые нерешенные проблемы и таким путем наилучшим образом продвигаем вперед старые теории. *На этой постоянно повторяющейся и сменяющейся игре между мышлением и опытом, мне кажется, и основаны те многочисленные и поражающие аналогии и та кажущаяся предустановленная гармония, которые математик так часто обнаруживает в задачах, методах и понятиях различных областей знания* (курсив наш. – В.В.)» [19. С. 403].

Таким образом, согласно этой историко-научной в сущности гипотезе Гильберта, таинственность предустановленной гармонии между математикой и физикой, или загадочная эффективность математики в физике, становятся более понятными, если выявить естественнонаучные корни соответствующих математических концепций. Возвращаясь к Эрлангенской программе, заметим, что ее фундаментальное значение и теоретическая эффективность в физике коренятся в ее естественнонаучных предпосылках, которые можно установить при внимательном изучении истории ее создания [11]. «Внешний мир», «опыт» в генезисе программы Клейна – это и идея К. Жордана о классификации кристаллов по конечным группам (Клейн и С. Ли изучали теорию групп в Париже по трактату Жордана). Это и знаменитая лекция Б. Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», опубликованная в 1868 году и включающая в себя не только неевклидовы пространства постоянной кривизны, но и множество физических и методологических идей, в частности идею связи той или иной геометрии с мерой «подвижности», соответствующих пространств. Это и работа Г. Гельмгольца «О фактах, лежащих в основании геометрии» (1868), в которой тип геометрии автор связывает с классом допустимых в ней движений (твердых тел или систем точек). Выросшая во многом на физической почве, Эрлангенская программа какое-то время развивалась в рамках чистой математики, став основой геометрии. И затем, спустя 35 лет после ее выдвижения Клейном, вернула свой долг физике в виде введения теоретико-инвариантного способа мышления как в СТО, так и классическую физику. Замечательно, что это было сделано самим патриархом Геттингена, который в четырехмерной инвариантной формулировке СТО Минковским увидел физическую реализацию своей программы.

4. Эрлангенская программа и теорема Нетер

Со времени Ж.-Л. Лагранжа известные законы сохранения импульса, момента импульса и энергии получили статус первых интегралов фундаментальных уравнений движения механики, то есть констант движения, остающихся неизменными во времени. Затем, особенно в механике У.Р. Гамиль-

тона, К.Г. Якоби, С. Ли и др., обнаружилась их связь с симметриями классической механики. А в 1918 году дочь математика М. Нетера, давнего друга Ф. Клейна, Э. Нетер (1882–1935) доказала две общие теоремы о связи законов сохранения с симметриями фундаментальных групп физических теорий (история взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения и теоремы Нетер рассмотрены в монографии автора [20]).

Первая теорема Нетер давала алгоритм для получения законов сохранения (или первых интегралов уравнений движения физической системы, выводимых из вариационного принципа, известного как принцип Гамильтона) на основе непрерывных симметрий фундаментальной группы, являющейся конечнопараметрической группой Ли. Именно такими группами являются группы Галилея – Ньютона, Пуанкаре и открытые позже внутренние группы симметрии сильных и слабых взаимодействий $SU(2)$, $SU(3)$ и др. В частности, законы сохранения импульса и энергии оказываются связанными с однородностью пространства и времени, закон сохранения момента импульса с изотропностью пространства. По существу, теорема Нетер оказалась дальнейшим важным шагом на пути развития физического аналога Эрлангенской программы, позволяющим к тому же фиксировать структуру фундаментальных теорий. Эта структура связывает воедино симметрию теории, или ее фундаментальную группу, динамику теории в виде принципа наименьшего действия (принципа Гамильтона) и совокупность законов сохранения, к которым можно свести главные физические соотношения и конкретные законы. Эту важную взаимосвязь теоремы Нетер с Эрлангенской программой ясно сформулировал в цитированной книге Г.А. Соколик: «В теореме Нетер принципы Эрлангенской программы применяются к классификации законов сохранения, в терминах которых можно выразить все физические закономерности, по группам Ли» [2. С. 8]. Но бесконечная группа Ли, зависящая не от конечного числа параметров, а от конечного числа функций пространства-времени, подобная группе общей ковариантности в ОТО, приводит не к законам сохранения, а к соответствующему числу некоторых тождеств, сокращающих число независимых уравнений движения, получаемых из вариационного принципа.

Обе эти теоремы внесли ясность в проблему законов сохранения энергии и импульса в ОТО, для чего Э. Нетер, имевшая репутацию специалиста по алгебраической теории инвариантов, и была приглашена Гильбертом в Геттинген. Гильберт уже в 1914–1915 годы увлекся проблемами релятивистской теории тяготения и построения единой полевой теории материи на основе объединения тензорно-геометрической теории гравитации Эйнштейна и нелинейной электродинамики Г. Ми. Вскоре к этим исследованиям подключились и Ф. Клейн, и Э. Нетер, появившаяся в Геттингене в апреле 1915 года. Из переписки Клейна и Гильберта видно, что Э. Нетер интенсивно занималась проблемами ОТО с 1916 года, но только в 1918 году опубликовала свои результаты, которые вошли в золотой фонд фундаментальной теоретической физики. Теоремы Нетер, являясь своеобразной кульминацией физического аналога Эрлангенской программы, легли и в основу локально-калибровочной

революции в физике элементарных частиц и соответственно в создание стандартной модели. Как заметил один из ее создателей Ф. Вильчек, «на переднем крае современной физики теорема Нетер (имеется в виду прежде всего первая теорема Нетер. – В.В.) стала важнейшим инструментом для совершения открытий» [21. С. 339]. Речь фактически идет о следующей цепочке рассуждений. Очень часто в экспериментах с частицами обнаруживаются своего рода новые сохраняющиеся величины, например, изотопический спин, барионный и лептонный заряды, странность и др. Наличие таких законов сохранения говорит о том, что в теории им должны соответствовать определенные симметрии (так же, как сохранению электрического заряда отвечает фазовая симметрия, или калибровочная симметрия с постоянной фазой). По таким симметриям можно сконструировать действие или лагранжиан теории, что позволяет затем получить соответствующие уравнения поля, а также провести квантование теории и продемонстрировать ее перенормируемость. Именно это имел в виду Вильчек, подчеркивая эвристическое значение теоремы Нетер.

5. Эрлангенский подход к истории физики: принцип симметрии как методологический принцип физики

Введение Эрлангенской программы в физику и формулировка классики как теории инвариантов группы Галилея – Ньютон (G), а релятивистских (в смысле СТО) теорий как теорий инвариантов группы Пуанкаре (P) открывает возможность интерпретировать релятивистскую революцию как расширение группы G до группы P . Этот тип расширения оказался связанным не с введением новых параметров, а с введением новой фундаментальной постоянной (в данном случае – со скоростью света), при стремлении которой к бесконечности P переходит в G . Конечно, это – достаточно презентистская интерпретация релятивистской революции, но довольно точно соответствующая реальному положению вещей. Галилей-Ньютоновскую же революцию XVII века можно аналогичным образом истолковывать как переход от доклассических (аристотелевых) представлений о пространстве и времени к группе G . Симметрию же аристотелевой динамики можно связать с группой, отвечающей наличию в теории принципа инерции покоя, и тогда классическое расширение означает введение трех преобразований Галилея, соответствующих галилеевскому принципу инерции прямолинейного и равномерного движения. Такое истолкование – гораздо более корректное, потому что в XVII веке не было еще понятия группы, да и аристотелевы представления о пространстве и времени вовсе не сводились к евклидовой геометрии пространства, дополненной требованием однородности времени.

Об идее применения Эрлангенской программы к истории фундаментальной физики я впервые узнал из книги Соколика (см. третий эпиграф): «...Эволюция физической картины мира состоит в расширении фундаментальной группы...» [2. С. 11]. В статье, опубликованной в «Эйнштейновском сборнике» совместно с Н.П. Коноплевой, эрлангенский подход к истории физики

сформулирован более полно и философично: «...Формулировка принципа соответствия, основанная на иерархии вложенных друг в друга структур... в известном смысле приводит к пониманию „Эрлангенской программы“ как исторического метода в науке, поскольку мы... понимаем иерархию симметрий как „слепок“ эволюции данной теории, так как каждая подгруппа фундаментальной группы представляет определенный уровень различия, а значит, определенный уровень развития теории» [22. С. 355–356]. При таком понимании программы Клейна можно было надеяться на то, что следующие масштабные сдвиги в пространственно-временной эволюции физики должны привести к новым фундаментальным группам, включающим группу Пуанкаре как подгруппу.

Таковыми группами, как уже говорилось, были 15-параметрическая конформная группа, которая была открыта в 1908 году Г. Бейтменом и Каннингхемом как группа симметрии свободных уравнений Максвелла, и открытые позже на основе ОТО космологические группы пространств с постоянной кривизной. Но развитие фундаментальной физики пошло по иным путям. Симметрии продолжали играть очень важную роль и в определенной степени это развитие проходило в духе расширения предшествующей фундаментальной симметрии, хотя и выходя при этом за рамки описанной пространственно-временной формы эрлангенского подхода. Прежде всего, создание ОТО и последующая программа построения единых геометрических теорий гравитационного и электромагнитного полей были связаны с локализацией фундаментальных симметрий (ОТО – с локализацией группы Пуанкаре, единые теории – с локализацией ее возможных расширений). Эйнштейн отдал этой программе последние 30 лет своей жизни, но, несмотря на некоторые важные и интересные результаты, в целом она не привела к успеху.

Второй масштабный прорыв в истории физики – это создание квантовой механики. И здесь, на первый взгляд, дело было не в расширении фундаментальной симметрии. Однако вскоре выяснилось, что значение симметрий сохранилось за счет перехода от теории инвариантов групп к теории представлений этих групп, а также в связи с переходом от конечномерного фазового пространства состояний классической механики к бесконечномерному гильбертову пространству квантовой механики. Еще одна форма модификации симметрии и, соответственно, первоначального эрлангенского подхода появляется в 1930–1940-е и последующие годы, когда ряд закономерностей ядерной физики и физики элементарных частиц был истолкован на языке законов сохранения, а благодаря теореме Нетер и на языке непространственно-временных симметрий, названных внутренними. Так, например, появились изотопические симметрии, описывающие явления зарядовой независимости ядерных взаимодействий, а также абелевы калибровочные симметрии, связанные с законами сохранения барионного и лептонного зарядов и т.д. При создании стандартной модели сработало соединение неабелевых внутренних симметрий с идеей их локализации, что впервые было сделано Ч. Янгом и Р. Миллсом в 1954 году, правда, вначале в качестве внутренней симметрии

сильного взаимодействия была ошибочно выбрана изотопическая симметрия, описываемая унитарной унимодулярной группой $SU(2)$.

Таким образом, эрлангенский подход, ассоциируемый с концепцией, или принципом, симметрии, существенно видоизменяясь и приспособляясь к новым открытиям не только в теоретической, но и в экспериментальной физике, сохранил и даже усилил свою эвристическую и методологическую роль в построении физических теорий. Согласно концепции методологических принципов Н.Ф. Овчинникова [23], понимаемых как принципы теоретизации физического знания, принцип симметрии занимает в ней одно из ключевых мест, органически соединяясь с другими такими принципами, прежде всего, через посредство теоремы Нетер с принципом сохранения, а через понимание фундаментальной группы как «слепок» эволюции предшествующих теорий – с принципом соответствия [24]. Симметрия же является ключом к пониманию еще целой связки методологических принципов физики: простоты (и красоты теории, правда, Овчинников не включал последний в число основных), единства и математизации физического знания. Эрлангенский подход естественным образом приводит к определению математической структуры теории и, конечно, на его основе достигается тот или иной уровень объединения знания. После поразительных примеров на редкость эффективного взаимодействия математики и физики в области теории относительности и квантовой теории в первой трети XX века, начиная с 1930-х вплоть до середины и даже 1970-х годов, многим стало казаться, что это взаимодействие либо прекратилось, либо утратило свою эффективность. Об этом говорил в 1980-е годы М. Атья, один из видных математиков, внесший важный вклад и в математическую физику. Но в заключение он заметил, что благодаря появлению локально-калибровочной теории эффективное взаимодействие математики и физики восстановилось: «В последние годы наблюдается возрождение взаимного влияния геометрии и физики. После длительного перерыва, во время которого и математик, и физик явно шли своими независимыми путями, мы наблюдаем сейчас поразительное сближение их интересов. Оказалось, что в прошлом в математике и физике изучались близкие задачи, но для них отсутствовали общие подходы и общий язык. Теперь это исправлено с помощью калибровочной теории...» [25. С. 8]. Под калибровочной теорией М. Атья понимает стандартную модель в физике элементарных частиц, начало построения которой относится к созданию первой неабелевой теории калибровочных полей Ч. Янга и Р. Миллса 1954 года. Эта теория стала вместе с тем и новой формой эрлангенского подхода, о которой говорил Г.А. Соколик в нашем четвертом эпиграфе (в СССР калибровочные поля в 1960-е годы называли компенсирующими).

6. О связи локально-калибровочной концепции Янга и Миллса с Эрлангенской программой. О 100-летнем юбилее Ч. Янга

Основным и сравнительно ближним истоком стандартной модели стала первая теория неабелевых калибровочных полей, предложенная Ч. Янгом и

Р. Миллсом для описаний сильных взаимодействий [4]. Ближе к открытию этой теории подошли В. Паули, а также Р. Утияма и аспирант А. Салама Р. Шоу, но они либо сочли ее противоречащей эксперименту и отказались от опубликования (Паули), либо отложили публикацию (Утияма), либо не успели это сделать (Шоу). В недавней работе мы подробно обсуждали эту ситуацию [26], как, впрочем, и обстоятельства открытия Янга и Миллса. Об этом открытии кратко и точно сказано также в двух последних эпитафиях, взятых из книги А. Пайса. Конечно, как об этом говорил и сам Ч. Янг, он и Миллс, понимали, что их теория ошибочна, но они ее все равно решились опубликовать, поскольку считали теорию красивой. Анализ истории построения стандартной модели приводит к выводу, что создание теории Янга и Миллса, стало настоящим поворотным событием в этой истории. Однако поворотность эта оказалась скрытой и проявилась существенно позже, а именно когда удалось решить проблему массы калибровочных частиц (применительно к слабым взаимодействиям, 1967–1971 гг.) и объяснить безмассовость этих частиц в случае сильных взаимодействий (1971–1973 гг.). Суть теории Янга и Миллса кратко, точно и достаточно доступно сформулирована авторами в аннотации к статье: «...Обычный принцип инвариантности относительно вращений изотопического спина не совместим с концепцией локализованных полей. В связи с этим исследуется возможность инвариантности относительно локальных вращений изотопического спина. Это приводит к формулировке принципа изотопической калибровочной инвариантности и существованию некоторого поля \mathbf{b} , которое находится в такой же связи с изотопическим спином, как электромагнитное поле связано с электрическим зарядом. Поле \mathbf{b} удовлетворяет нелинейным дифференциальным уравнениям. Квантами поля \mathbf{b} являются частицы со спином 1 и электрическим зарядом плюс минус e или 0» [4. С. 28].

Переход от обычной, глобальной, формы принципа изотопической инвариантности и, соответственно, эрлангенского подхода к его локализованной форме авторы обосновывают в духе концепции близкодействия: «Как только сделан выбор, что называть протоном, а что нейтроном в одной точке пространства-времени, свобода выбора в других пространственно-временных точках пропадает. Как нам представляется, такое положение не совместимо с концепцией локализованного поля, лежащей в основе обычных физических теорий. В настоящей работе исследуется возможность ввести требование, чтобы все взаимодействия были инвариантны относительно независимых вращений изотопического спина во всех точках пространства-времени...» [Там же. С. 29].

В четвертом эпитафее (из книги Г.А. Соколика) эта локализация непосредственно связывается с расширением обычной Эрлангенской программы и связанной с ней теоремы Нетер, которое приводит к введению компенсирующих, или калибровочных, полей. В янг-миллсовской теории сильных взаимодействий 1954 года это векторное безмассовое поле \mathbf{b} . В другом месте Г.А. Соколик заметил, что теория калибровочных полей «возникла как результат обобщения теоремы Нетер на случай локализованных групп Ли»

[Там же. С. 144]. Соавтор Янга в статье «Калибровочные поля» (1989) назвал развитую ими концепцию «калибровочной философией», сводящейся к требованию, что «каждая непрерывная симметрия является локальной симметрией» [5. С. 496]. Пояснив это положение на примерах гравитационного и электромагнитного полей, он далее говорит о целой исследовательской программе, основанной на нем: «Тот факт, что существуют хорошо известные примеры локальной симметрии (приводящей к гравитации и электромагнетизму. – *В.В.*) является весомым аргументом в пользу предположения, что локальная симметрия является общим принципом и что мы должны исследовать другие наблюдаемые симметрии природы и те следствия, к которым они приводят» [Там же]. Эту программу он дополняет следующей наглядной схемой «логической модели калибровочной теории»:

Теорема Нетер

Сохраняющаяся \leftarrow ----- \rightarrow Симметрия величина \vee

Взаимодействие \vee Локальная симметрия

\vee Калибровочное поле

Именно по этой «логической модели» глобальная изотопическая симметрия, связанная, в соответствии с теоремой Нетер, с законом сохранения изоспина, будучи локализованной, порождает калибровочное поле (сильного взаимодействия). Об этом же говорил в 1979 году в связи со 100-летием со дня рождения Эйнштейна и сам Ч. Янг: «Мы можем утверждать, что именно Эйнштейн ввел в обращение принцип: взаимодействия диктуются симметрией... Оказалось, что структурой, которую искал Эйнштейн (в своих попытках построения единой теории поля. – *В.В.*), является калибровочное поле» [27. С. 169, 175]. Р. Миллс в цитированной статье рассказывает и о своем соавторе, который разработал эту «калибровочную философию» и привлек его к совместной работе. По его словам, молодой китайский теоретик еще до приезда в США в 1944–1945 годы «находился под впечатлением взаимосвязи между законом сохранения электрического заряда и калибровочной инвариантностью, в особенности того факта, что вся структура электродинамики однозначно определяется калибровочной инвариантностью... Приехав в США, ...он стал пытаться обобщить калибровочную инвариантность и применить ее к другим законам сохранения, прежде всего к закону сохранения изоспина» [5. С. 495]. В конце 1953 года Янг приехал в Брукхейвен, где начал свою работу новый большой ускоритель частиц и где работал Р. Миллс. «...Он, – продолжает Миллс, – рассказал мне об идее обобщения калибровочной инвариантности. Имея некоторый запас знаний в области квантовой электродинамики, я мог внести определенный вклад в разработку этой идеи, особенно в отношении процедур квантования и развитие формализма; однако ключевые идеи принадлежали именно Янгу» [Там же]. Рассказанное Миллсом подтверждается самим Янгом в комментариях к статьям в «Избранных трудах» и в статье А. Пайса о Янге и Ли Цзундао, получивших в 1957 году Нобелевскую премию за открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях [3; 28]. И здесь самое время вспомнить о том, что в сентябре 2022 года

создателю «калибровочной философии» исполняется 100 лет. Википедия рассказывает нам, что сейчас он живет в Китае! Славный юбилей выдающегося теоретика, распространившего концепцию Эрлангенской программы на локализованные непрерывные группы, а связанную с этой программой теорему Нетер на фундаментальные взаимодействия и создавшего тем самым предпосылки для построения стандартной модели, являющейся современной теорией элементарных частиц. Так, неожиданно соединяются между собой дальний и ближний истоки стандартной модели, а также два достопримечательных юбилея: 150-летие Эрлангенской программы Ф. Клейна, выдвинувшего ее в возрасте 23 лет, и 100-летие одного из корифеев фундаментальной физики XX века Ч. Янга, который в этом же возрасте оказался под впечатлением калибровочной концепции Эйнштейна и Г. Вейля и примерно через 10 лет вместе с Р. Миллсом применил ее к сильному взаимодействию и опубликовал.

Заключительные замечания. О двадцатилетнем пути от Янга и Миллса к стандартной модели. Симметрия и красота: не завели ли они физику в тупик? Научно-автобиографический экскурс

Вопросы, которых мы хотим коснуться в заключение, обозначены в названии раздела. Путь к стандартной модели после поворотного 1954 года оказался весьма тернистым. Концепция Янга – Миллса при всей ее красоте большинством теоретиков достаточно долго считалась ошибочной. Но постепенно шаг за шагом, с начала 1960-х годов, обнаруженные в сильных и слабых взаимодействиях глобальные и янг-миллсовские симметрии приводят к относительным успехам и все больше выдвигаются на передний план. В 1960–1961 годах Дж. Сакураи, а вслед за ним М. Гелл-Манн и Ю. Неэман открывают $SU(3)$ – симметричную теорию сильных взаимодействий, а затем (в 1964 г.) Гелл-Манн и Дж. Цвейг предсказывают на основе этой симметрии кварки. Примерно тогда же П. Хиггс и др. открывают возможность наделения массой калибровочных частиц с помощью нетривиальной модификации симметрии, а именно – ее спонтанного нарушения (механизм Хиггса). В 1967 году Ш. Глэшоу, С. Вайнберг и А. Салам, используя этот механизм, разрабатывают $U(1) \times SU(2)$ – симметричную единую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий. В 1972–1973 годы Гелл-Манн с сотрудниками, а также Д. Гросс, Ф. Вильчек и Х.Д. Политцер на основе понятий «цвета» и «асимптотической свободы» создают калибровочную $SU(3)$ – симметричную теорию кварков и глюонов (названную квантовой хромодинамикой). Мы видим, как разнообразные модификации симметрии, а значит, и Эрлангенской программы помогли завершить построение стандартной модели. Но стоит добавить, что при этом было два важных промежуточных шага. В 1969 году в экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов нуклонами были открыты точечные составляющие нуклонов (партоны Р. Фейнмана), интерпретированные затем как кварки и глюоны. А в 1971 году Г. 'т Хоофт на основе работ М. Вельтмана, а также Л.Д. Фаддеева

и В.Н. Попова доказал перенормируемость безмассовых полей Янга – Миллса и массивных калибровочных полей со спонтанно нарушенной симметрией.

Вспомним, что Янг и Миллс опубликовали свою великую работу в 1954 году, руководствуясь уверенностью прежде всего в ее красоте. «Сам Янг, – писал А. Пайс в статье о Янге и Ли Цзундао, – тоже не сразу осознал значение своей работы (то есть совместной с Миллсом статьи 1954 г. – *В.В.*). Когда в 1990 году его спросили о том, понимал ли он огромную важность этой работы в 1954 году, он ответил: «Нет. В 1950-х годах мы признавали красоту своей работы. Ее важность я осознал в 1960-х, а ее огромное значение для физики – в 1970-х годах» [3. С. 227]. И другие творцы стандартной модели, прежде всего Ф. Вильчек и С. Вайнберг [21; 29; 30], подчеркивали важность эстетических аргументов при построении фундаментальных теорий, в том числе и стандартной модели. При этом красота теорий, как правило, ассоциируется с принципами симметрии и новыми математическими структурами. Однако в последние десятилетия принципы симметрии (а где симметрия, там и красота) и изощренная математичность как будто стали утрачивать свою эффективность. Конечно, в первую очередь, имеются в виду концепция суперсимметрии и теория струн, на которые давно возлагались надежды, которые так и не оправдались [6; 7; 30]. Стали высказываться крамольные мысли о том, что золотые годы принципов красоты, симметрии (а значит, и Эрлангенской программы) закончились [7; 31]. Но история физики XX века, особенно фундаментальной физики от Эйнштейна до Ч. Янга и М. Гелл-Манна, показывает такую невероятную живучесть концепции симметрии и своего рода ее способность к модификации (о подобных модификациях мы говорили ранее), что есть резонные основания рассчитывать на возрождение этой концепции, которое приведет к объяснению «струнно-суперсимметричных проблем».

И самое последнее. Хотелось бы сделать замечание научно-автобиографического рода. С «симметрично-эрлангенской проблематикой» связано начало моей историко-научной работы. Поступив в 1965 году в аспирантуру ИИЕТ РАН, я под руководством Л.С. Полака занялся историей развития взаимосвязи принципов симметрии с законами сохранения, предшествующей доказательству Э. Нетер ее знаменитых теорем, и нашел там немало нового и интересного (моя кандидатская диссертация). При этом пришлось пересмотреть и историю принципов симметрии, а значит, заняться генезисом теоретико-инвариантного (эрлангенского, по существу) подхода. Полак вывел меня на Г.А. Соколика, у которого в 1965 году вышла книга, в которой немало говорилось об «Эрлангенской программе» как «симметрической программе» построения современной теории элементарных частиц и как своеобразном историческом методе истории фундаментальной физики в целом (см. эпиграфы и саму книгу [2]).

О введении «Эрлангенской программы» в физику и об «эрлангенском подходе к истории физики» мною сделан доклад на конференции аспирантов и м.н.с. ИИЕТ РАН впервые в 1969 году, а затем на XIII Международном конгрессе по истории науки в Москве (1971). После того как вышла моя книга о

предыстории теоремы Нетер (1972, [20]), я основательно занялся историей Эрлангенской программы и ее введения в физику и после защиты диссертации в 1968 году был зачислен в Институт. В начале 1970-х годов в секторе истории физики появился Н.Ф. Овчинников и его группа, которая занималась методологическими принципами физики, по существу, принципами теоретизации физического знания. Овчинников знал о моих работах по принципам симметрии и попросил меня написать о принципе симметрии как методологическом принципе физики. В 1975 году вышли и моя вторая монография «Эрлангенская программа и физика» [11], и овчинниковские «Методологические принципы физики» с моей большой главой «Принцип симметрии» [23; 24]. Эти две первые мои книги сравнительно недавно были переизданы (в 2016 и 2019 гг.) издательством «УРСС», почти через 45 лет после их первого выпуска. И это говорит о том, что они не устарели и определенную актуальность, как ни странно, сохранили. Следует еще раз подчеркнуть, что в концептуальном плане я в них существенно опирался на идеи и работы Л.С. Полака, Г.А. Соколика и Н.Ф. Овчинникова, которым я очень признателен. И в дальнейшем, занимаясь разными историко-научными проблемами (создание ОТО и единых теорий поля, социальная история отечественной физики, советский атомный проект, историографические концепции историков физики и др.), я периодически возвращался к симметрично-эрлангенской тематике и связанным с ней вопросами взаимосвязи физики и математики, методологических принципов физики. Первая и четвертая главы моей докторской диссертации «Релятивистские теории в 1-й трети XX века (истоки, формирование и развитие)», защищенной в 1993 году, относились как раз к этой тематике [32]. И наконец, последние несколько лет я вернулся к теоретико-инвариантной концепции (а значит, и к Эрлангенской программе, которой в этом году исполняется 150 лет) в связи с калибровочной революцией 1954–1974 годов, приведшей к созданию стандартной модели [26]. Начало этой революции было положено Ч. Янгом, столетний юбилей которого мы отмечаем в этом году.

Литература

1. Klein F. Das Erlanger Programm. Vergleichende Betrachtungenueberneuere geometrische Forschungen // Verantwort. Hrsg. H. Wussing. Leipzig: Akadem. Verl., 1974. 84 s.
2. Соколик Г. А. Групповые методы в теории элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1965. 175 с.
3. Пайс А. Гении науки. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 448 с.
4. Янг Ч., Миллс Р. Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность // Элементарные частицы и компенсирующие поля: сборник статей / под ред. Д. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. С. 28–38.
5. Mills R. Gauge fields // Amer. J. Phys. 1989. Vol. 57, no. 6. P. 493–507.
6. Визгин В.П. Революционные 10–20-е гг.: физика от Коперника до современности с высоты птичьего полета // Вопросы истории естествознания и техники. 2021. Т. 42, № 1. С. 46–70.

7. *Андреев А.В., Визгин В.П.* Превратности принципа красоты в новейшей истории физики // Вопросы истории естествознания и техники. 2022. Т. 43, № 1. С. 154–169.
8. *Клейн Ф.* Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований («Эрлангенская программа») // Об основаниях геометрии: сборник классических работ по геометрии Лобачевского и развитию ее / ред. и вступ. статья А.П. Нордена. М.: ГИТТЛ, 1956. С. 399–434.
9. *Картан Э.* Теория групп и геометрия // Об основаниях геометрии: сборник классических работ по геометрии Лобачевского и развитию ее / ред. и вступ. статья А.П. Нордена. М.: ГИТТЛ, 1956. С. 485–510.
10. *Wussing H.* Zur Entstehungsgeschichte des Erlanger Programms // Verantwort. Hrsg. H. Wussing. Leipzig: Akadem. Verl., 1974. 12–28.
11. *Визгин В. П.* «Эрлангенская программа» и физика. М.: Наука, 1975. 111 с. (см. также: «Эрлангенская программа» и физика. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2019. 120 с.)
12. *Minkowsky H.* Das Relativitaets prinzip (1907) // Ann. Phys. 1915. Bd. 47. S. 927–938.
13. *Минковский Г.* Пространство и время // Принцип относительности: сборник работ релятивизма / под ред. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко. М.-Л.: ОНТИ, 1935. С. 181–203.
14. *Klein F.* Vorlesungenueberdie Entwicklung der Mathematikim 19. Jahrhundert. Т. II. Berlin: Springer, 1927.
15. *Клейн Ф.* Лекции о развитии математики в XIX столетии. Т. 2. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 240 с.
16. *Клейн Ф.* О геометрических основаниях лоренцевой группы // Новые идеи в математике. Сборник № 5. Принцип относительности в математике. СПб.: Изд. «Образование», 1914. С. 144–174.
17. *Вигнер Е.* Непостижимая эффективность математики в естественных науках // Вигнер Е. Этюды о симметрии. М.: Наука, 1971. С. 181–198.
18. *Визгин В. П.* «Предустановленная гармония между чистой математикой и физикой» (к 150-летию со дня рождения Г. Минковского и 100-летию тензорно-геометрической концепции гравитации) // Математика и реальность: труды Московского семинара по философии математики / под ред. В. А. Бажанова и А. Н. Кричевца. М.: Изд. МГУ, 2014. С. 99–120.
19. *Гильберт Д.* Математические проблемы // Гильберт Д. Избранные труды. Т. 2. М.: Факториал, 1998. С. 401–436.
20. *Визгин В. П.* Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике. М.: Наука, 1972. 240 с. (см. также 2-е издание в изд. «ЛЕНАНД», 2016).
21. *Вильчек Ф.* Красота физики. Постигая устройство природы. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 604 с.
22. *Коноплева Н. П., Соколик Г. А.* Проблема тождества и принцип относительности // Эйнштейновский сборник. М.: Наука, 1967. С. 348–370.
23. *Методологические принципы физики // История и современность / отв. ред. Б. М. Кедров и Н. Ф. Овчинников. М.: Наука, 1975. 511 с.*
24. *Визгин В.П.* Принцип симметрии (глава шестая) // История и современность / отв. ред. Б. М. Кедров и Н. Ф. Овчинников. М.: Наука, 1975. 268–342.
25. *Атья М.* Геометрия и физика узлов. М.: Мир, 1995. 192 с.
26. *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.
27. *Янг Ч.* Эйнштейн и физика второй половины XX века // УФН, 1980. Т. 132, вып. 1. С. 169–175.

28. *Yang Ch. N. Selected Papers (1945–1980). With Commentary.* New Jerseyetc. World Scientific, 2005. 603 p.
29. *Вайнберг С. Объясняя мир: Истоки современной науки.* М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 474 с.
30. *Вайнберг С. Все еще неизвестная Вселенная. Мысли о физике, искусстве и кризисе в науке.* М.: Альпина нон-фикшн, 2020. 330 с.
31. *Хоссенфельдер С. Уродливая Вселенная: как поиски красоты заводят физиков в тупик.* М.: Эксмо, 2021. 304 с.
32. *Визгин В.П. Релятивистские теории в 1-й трети XX в. (истоки, формирование и развитие): дис. ... д-ра ф.-м. н. (в форме научного доклада).* М.: ИИЕТ РАН, 1993. 50 с.

**FAR AND NEAR ORIGINS OF THE STANDARD MODEL
IN PHYSICS OF FUNDAMENTAL INTERACTIONS
(to the 150th anniversary of F. Klein's erlangen program
and to the 100th anniversary of the birth of C. Yang)**

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. In connection with the 150th anniversary of F. Klein's Erlangen program in geometry and the 100th anniversary of the birth of C. Yang, the main creator, non-Abelian gauge fields are discovered, the far and near sources of the standard in the physics of fundamental models of interactions are concluded. A distant source is the Erlangen program and its subsequent introduction of reaction to relative and classical physics. This material discusses the phenomenon of "inconceivable effectiveness of mathematics in special sciences" (J. Wigner), which becomes clearer on the basis of the "relay model" of the interaction between mathematics and physics proposed by D. Hilbert. The approximation of the Erlangen observation, which is applied to Noether's observations on the connection between meetings and meetings, is considered, as well as the application of the Erlangen observation to the history of physics. It is shown how the extension of this domain to local gauge domains is carried out by C. Yang and R. Millsakoch theories of non-Abelian field gauges (1954), which became a near source on the way to the standard and completed model in 1973–1974.

Keywords: standard model, sequential gauge set, Yang and Mills theory, F. Klein's Erlangen program, special relativity, introduction of the Erlangen program into physics, D. Hilbert's relay-race model of interaction between physics and mathematics, Noether's income, Erlangen approach to the history of physics