

БАЛДИНСКАЯ ОСЕНЬ В МОЕЙ ЖИЗНИ

Н. П. Коноплева *

Москва

Обсуждается ситуация, сложившаяся в СССР в 60-е–70-е гг. XX в. в области релятивистской теории элементарных частиц, общей теории относительности и теоретической физики в целом вплоть до настоящего времени, а также вклад серии конференций, получивших общее название «Балдинская осень», в организацию научных исследований в этих областях знания.

The situation in relativistic theory of elementary particles, General Relativity and theoretical physics on the whole, which was in the 1960s–1970s in the USSR and up to now, is under discussion. The author tells about the development of gauge field theory and General Relativity, his works and the Baldin autumn conferences contribution to scientific research organization in the above-mentioned fields.

PACS: 01.65.+g; 11.15.-q; 04.20.-q

Посвящается В. В. Бурову

ВВЕДЕНИЕ

Мне очень приятно присутствовать на этой юбилейной конференции из серии, носящей такое красивое название — «Балдинская осень». С некоторого времени вся моя научная жизнь была связана с тематикой и организаторами этой конференции.

Ровно 54 года назад в этой же аудитории открывалось пленарное заседание Международного семинара по векторным мезонам и электромагнитным взаимодействиям. Он был организован академиком М. А. Марковым и профессором А. М. Балдиным. Впоследствии он породил серию конференций, получивших общее название «Балдинская осень». На первом пленарном заседании этой конференции были заслушаны доклады старшего научного сотрудника Ленинградского отделения МИАН им. В. А. Стеклова Л. Д. Фаддеева и младшего научного сотрудника ВНИИОФИ (Москва) Н. П. Коноплевой. Они были посвящены квантованию и геометрическому описанию калибровочных полей [1].

В то время единственной теорией поля, имевшей геометрическую формулировку, была теория тяготения Эйнштейна [2]. У нее не было прочного экспериментального фундамента подобно механике Ньютона

* E-mail: nelly@theor.jinr.ru

или электродинамике Максвелла. Она была нелинейной и не годилась для квантования. В микрообластях пространства-времени искривленное пространство приближается к плоскому. Какое отношение теория гравитации может иметь к микромиру элементарных частиц? Но организаторы конференции смотрели далеко вперед и интересовались общими принципами построения физической науки, а не только конкретными экспериментальными данными, приносящими быстрый успех. Так, А. М. Балдин придавал большое значение универсальности взаимодействий векторных мезонов со всеми частицами, обладающими одним и тем же типом заряда. В теории тяготения сила притяжения действует универсально на все массивные частицы. Поэтому массу можно считать неким аналогом заряда. Вопрос о физическом смысле массы как параметра взаимодействия элементарных частиц не решен до сих пор, а в те годы он был крайне актуален для построения квантовой теории калибровочных полей и процедуры перенормировки этих полей. Некоторые считали невозможным построить квантовую теорию калибровочных полей в обозримом будущем из-за нелинейности теории (как в теории тяготения) и массивности переносчиков взаимодействия (гравитоны, по-видимому, безмассовые).

Математикам было известно, что, как показал Р. Фейнман, перенос на нелинейные теории тех процедур квантования, которые были приняты в электродинамике (метод Ферми), приводит к противоречиям с вероятностной трактовкой и теоремами аксиоматической квантовой теории поля (нарушается условие унитарности) [3, 4]. В 1948 г. Фейнман предложил новую процедуру квантования с помощью малоизвестного даже среди математиков метода континуального интегрирования. На его основе он разработал диаграммную технику, позволявшую делать вычисления. Но открытие нелинейных взаимодействий, осуществляемых посредством векторных полей (названных калибровочными), породило новые проблемы с вычислениями. Эти проблемы напомнили о нелинейном гравитационном взаимодействии. Можно сказать, что в квантовой теории поля царил хаос. Математики и физики шли к его преодолению разными путями.

Л. Д. Фаддеев и В. Н. Попов усовершенствовали метод квантования, предложенный Р. Фейнманом [5], посредством добавления в процедуру вычислений континуальных интегралов неких вспомогательных объектов, названных «духами Фаддеева и Попова» [6]. Интегралы по путям физики не изучали (хотя некоторым специалистам по статистической физике они были известны). В. Н. Попов в процессе работы над своим дипломом самостоятельно изучил континуальное интегрирование и работы Р. Фейнмана, успешно защитил дипломную работу на физфаке ЛГУ, но не был принят в аспирантуру ЛГУ. Как мне рассказывал профессор Ю. В. Новожилов (руководитель В. Н. Попова по дипломной работе), В. Н. Попов проявил слишком большую самостоятельность в процессе работы над дипломом. Поскольку сам профессор Ю. В. Новожилов не со-

бирался заниматься континуальными интегралами, он решил «подарить» В. Н. Попова Л. Д. Фаддееву. Так возник этот замечательный тандем. В результате калибровочные поля были успешно проквантованы. Оставалось понять, как их можно перенормировать. Процедура перенормировки для безмассовых калибровочных полей была предложена в 1970 г. Дж. К. Тейлором [7] и в 1971 г. — А. Д. Славновым [8] из МИАН. Массивные калибровочные поля были перенормированы Г. 'т Хоофтом [9] в 1971 г. Тем самым открывалась дорога к сопоставлению теории и экспериментальных наблюдений.

В 1999 г. Г. 'т Хоофт (совместно с М. Велтманом) получил Нобелевскую премию по физике за объяснение квантовой структуры электро-слабых взаимодействий [10]. В 1976 г. лауреатом Нобелевской премии по физике стал С. Тинг [11]. Одновременно с Б. Рихтером [12] он экспериментально открыл тяжелую элементарную частицу нового типа — j -частицу. С. Тинг был участником первой конференции из серии «Балдинская осень», а новая открытая им частица оказалась одним из тех векторных бозонов, которые интересовали А. М. Балдина [13].

Появление в квантовой физике протяженных, а следовательно, классических объектов было встречено в штыки некоторыми школами. Квантовать нужно так, как написано в учебнике Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, и никак иначе. «Классической теории поля не существует как самостоятельной науки. Все можно получить из квантовой физики!» — такие слова мне доводилось слышать в ФИАН даже в 80-е гг. XX в. Игнорировался и замечательный *принцип дополнительности* Бора, который гласит: «*Contraria non contrarictoria sed complementa sunt*»*. Такую надпись оставил Нильс Бор на стене кафедры теоретической физики физфака МГУ, когда он посетил ее по приглашению профессора Д. Д. Иваненко во время праздника «День Архимеда» в 1961 г. Из принципа дополнительности следует, что если некое утверждение является абсолютной истиной, то противоположное ему тоже может быть абсолютной истиной [14].

Но в жизни все меняется. В 1968 г. Л. Д. Ландау не стало. В 1976 г. Л. Д. Фаддеев был избран действительным членом АН СССР и в 1992 г. стал наследником академика Н. Н. Боголюбова на посту академика-секретаря Отделения математики АН СССР (впоследствии — РАН). На мой взгляд, появление такой необычной конференции, как балдинская, было обязано большому авторитету и широкой эрудиции академика-секретаря Физического отделения АН СССР академика М. А. Маркова. Он интересовался структурой пространства-времени на сверхмалых расстояниях и допускал возможность рассматривать элементарные частицы как своего рода замкнутые вселенные. В 1965 г. он выдвинул гипотезу о существовании частиц предельно большой массы (порядка 10^{-5} г) — так называе-

* «Противоположности — не противоречия, а дополнения».

мых «максимонов». Такая масса возникала из гипотезы о существовании новой физической константы — элементарной длины. Довольно много работ было выполнено теоретиками в этом направлении (в том числе В. Г. Кадышевским), но, к сожалению, мне неизвестно состояние проблемы в настоящее время. Во всяком случае, этот подход радикально отличается от «матрешечной» схемы «состоит из» и предлагает подумать о том, что на разных уровнях малости вещество может оказаться устроенным по-разному.

1. ОТ ДОКЛАДА ДО КНИГИ

Меня пригласили выступить в Дубне после того, как в апреле 1969 г. в ФИАН я защитила кандидатскую диссертацию на тему «Геометрическое описание калибровочных полей». Я не была в аспирантуре, защищалась как соискатель без отрыва от производства. На ученом совете мою работу представлял теоретический отдел ФИАН. Моя диссертация до защиты два года «стояла в очереди» (пока ее изучали специалисты ФИАН). Еще бы! Такой тематикой никто в СССР тогда не занимался. Теоретический отдел ФИАН в то время возглавлял академик И. Е. Тамм. Он интересовался геометрическими методами в связи с проблемой устранения расходимостей в квантовой теории поля. В своих работах он рассматривал искривленное импульсное пространство как способ устранения таких расходимостей. В ФИАН о своих работах я рассказывала также на семинаре, которым руководили М. А. Марков и А. М. Балдин. Они были также членами ученого совета, на котором я защищалась. После первого моего выступления на семинаре М. А. Марков сказал: «Когда ребенок рождается, трудно сказать, что из него вырастет. Но здесь, как мне кажется, вырастет что-то очень интересное». Рассмотрев мою диссертацию, ученый совет ФИАН рекомендовал ее к опубликованию в открытой печати (чтобы начать обсуждение нового подхода).

После дубненской конференции в декабре 1969 г. в научных институтах страны составлялись планы работ на следующую пятилетку. Во ВНИИОФИ, где я тогда работала, тоже составляли такой план. Тематика, связанная с теорией калибровочных полей, была выброшена как неперспективная. В феврале 1970 г. я сменила место работы и вернулась во ВНИИЭМ. В этот институт я была направлена в 1964 г. по распределению после окончания физфака МГУ. Кафедрой, на которой я училась, руководил Н. Н. Боголюбов. Во ВНИИЭМ я подготовила к печати рукопись книги «Калибровочные поля». Она состояла из материалов моей диссертации и расширенной обзорной главы. Рукопись была представлена в «Атомиздат» весной 1970 г. Рекомендацию для ее опубликования написал М. А. Марков. Рецензентом выступил А. М. Балдин. Но на заседании редколлегии выступил известный теоретик Я. А. Смородинский. Он сказал: «Это ее результаты, это неинтересно». Я пришла в отчаяние. К счастью, один из учеников Я. А. Смородинского, узнав о случившемся,

рассмеялся и сказал: «Яков Абрамович всегда так себя ведет, если книга ему понравилась. Просто он тоже хочет быть ее автором». Поскольку Я. А. Смородинский не занимался калибровочными полями, его «хотелки» меня возмутили. Я написала Л. Д. Фаддееву о том, что готовится выход книги, и предложила ему стать моим соавтором при условии, что он напишет для нее главу о квантовании калибровочных полей. Л. Д. Фаддеев ответил, что сейчас он занят своей книгой о проблеме трех тел, но у него есть ученик, который все знает так же хорошо, как и он, кроме того, он собирается защищать докторскую на эту тему и у него есть готовый текст. Если я не возражаю, то можно передать мое предложение ему. Я согласилась. В. Н. Попов прочел мою рукопись и тоже согласился участвовать в издании книги. Он быстро прислал мне свою часть. Я заменила титульный лист и оглавление, добавила главу о квантовании и повторно представила рукопись в издательство. При повторном рассмотрении рукопись была принята в печать без замечаний. Я. А. Смородинский при встрече сказал мне: «Вы придумали хороший способ дать мне возможность отступить, сохранив лицо. Фаддееву я мешать не буду». Таким образом, мы с В. Н. Поповым стали соавторами, не будучи знакомыми друг с другом. Л. Д. Фаддеев познакомил нас на Рочестерской конференции в Киеве в 1970 г., когда рукопись была уже в типографии [15]. Позже, в 1976 г. В. Н. Попов повторил издание своей диссертации в расширенном виде уже без меня и классической части теории калибровочных полей (в том числе геометрической) [16]. В 1978 г. Л. Д. Фаддеев и А. Д. Славнов опубликовали процедуру перенормировки квантовой теории [17].

Наша с В. Н. Поповым книга [15] стала первой в мире монографией, содержащей полностью как классическую, так и квантовую теорию калибровочных полей (без перенормировок). Эта теория была построена из первых принципов до накопления экспериментального материала. В этом тоже заключается ее сходство с общей теорией относительности Эйнштейна. Книга имела три издания (в 1972, 1981, 2000 гг.) на русском языке, и в 1980 г. вышло английское издание [18] в Америке.

После выхода книги в марте 1972 г. во ВНИИЭМ была создана лаборатория теоретической физики и мне было поручено ею руководить. Она просуществовала до 1998 г. Ликвидирована из-за отсутствия в институте денег на финансирование физических исследований.

Наша лаборатория, будучи составлена из физиков-теоретиков, работала, конечно, в основном на институт, поэтому находить выход из очень сложных, почти безвыходных ситуаций. Здесь нам очень помогало наше знание законов физики. Почти всегда анализ аварийных ситуаций показывал, что не были учтены какие-то фундаментальные физические законы, которым инженеров не учили. Наука сама по себе не финансировалась, и мы занимались ею по личной инициативе. Часть сотрудников была прикомандирована к ФИАН, другая часть — к МИАН. Ежедне-

дельно я проводила семинар лаборатории, на который могли прийти все желающие. Приглашались также докладчики со стороны.

В 1990-е гг. заниматься наукой стало не просто непрестижно, но могло вызвать подозрение в неблагонадежности.

В 1977 г. нам удалось выпустить в издательстве «Мир» сборник очень важных переводов оригинальных статей иностранных авторов [4]. Он назывался «Квантовая теория калибровочных полей» и был посвящен спонтанному нарушению калибровочных симметрий, механизму Хиггса, технике перенормировок и строительству моделей элементарных частиц на основе теории калибровочных полей.

Компьютеров у нас не было. Переход на электронные средства общения и управления мог бы закончиться для нас катастрофой, если бы не было возможности поддерживать научные контакты с боголюбовской Лабораторией теоретической физики. Овладеть работой на компьютере и участвовать в научных конференциях в новых условиях я смогла благодаря поддержке профессора В. В. Бурова и его учеников. К сожалению, сейчас ликвидирован институт прикомандирования научных сотрудников из отраслевых институтов к ведущим академическим, учебным и научным организациям. Подавляющее число изобретений и открытий в СССР делалось именно в отраслевых институтах. Мне удалось сохранить свои научные связи в трудные 1990-е гг. Я благодарна судьбе за возможность общаться с людьми не только талантливыми, но и искренне преданными науке, бескорыстными и благородными в своих поступках. В условиях рыночной экономики такие люди будут становиться все большей редкостью. Мне бы хотелось обратиться к дирекции ОИЯИ с просьбой: берегите своих сотрудников и традиции, заложенные отцами-основателями. Это золотой фонд науки.

2. НЕМНОГО ИСТОРИИ

XX в. был временем великих потрясений как в мире материальных, так и в мире духовных ценностей. Несколько мировых и гражданских войн, революции, перевороты, образование СССР и его распад породили ощущение вседозволенности и близости конца света. Научное мировоззрение, приобретшее устойчивость благодаря Ньютону, тоже стало разрушаться.

Началось все в XIX в. с математики, а именно с геометрии. Ко второй половине XIX в. было построено столько разных геометрий, что стало непонятно, что именно представляет собой геометрия как наука*. Но в Норвегии родился великий математик Софус Ли (1842–1899). Он создал теорию непрерывных групп преобразований, которая не только поз-

* Примерно такое же состояние физики элементарных частиц было отмечено на упоминавшейся выше Рочестерской конференции в Киеве в 1970 г.

волила немецкому математику Феликсу Клейну (1849–1925) в 1872 г.* классифицировать все имевшиеся в то время подходы к геометрии как к науке, но и стала языком теоретической физики, когда она в начале XX в. пришла на смену физике Ньютона. Это в равной мере относится как к классической, так и к квантовой физике.

С. Ли построил свою теорию на основе анализа операций, используемых в реальных измерительных процедурах, а также свойств приборов, применяемых в этих операциях. Инварианты построенных Ли групп преобразований стали теми математическими объектами, в терминах которых оказалось возможным формулировать результаты проведенных опытов. С этой точки зрения геометрию Евклида можно рассматривать как простейшую физику. «Эрлангенская программа» Ф. Клейна [19] рассматривала всякую геометрическую систему с точки зрения свойств той непрерывной группы преобразований, на которую она опирается. Изыскание инвариантов этой группы, по мнению Клейна, составляет математическую проблему соответствующей геометрии.

В аналитической механике инварианты, характеризующие движение твердого тела, получаются с помощью законов сохранения. Законы сохранения бывают дифференциальными и интегральными. Интегральные получаются посредством интегрирования дифференциальных законов по интересующей нас области пространства. Законы движения твердых тел в механике Ньютона определяются уравнениями движения. Но при сопоставлении наблюдаемых движений и решений рассматриваемых уравнений движения нужно помнить, что решениям этих уравнений соответствует движение только *одной точки тела*. Эта точка называется *центром масс тела*. Строгое определение центра масс не так тривиально, как кажется на первый взгляд. При переходе к релятивистской механике уже могут возникнуть проблемы. Обычно интегральные законы сохранения получаются из дифференциальных при интегрировании по области пространства, занимаемой телом. Энергия или импульс тела, полученные таким образом, будут относиться к телам конечных размеров, т. е. к островному распределению материи. А если распределение другое? Как правильно поставить задачу?

* В 1870–1871 гг. С. Ли и Ф. Клейн работали вместе в Берлине, в 1872 г. С. Ли вернулся в Норвегию и до 1886 г. преподавал математику в Университете Кристиании (ныне — Осло), в 1886 г. Ли занял университетскую кафедру в Лейпциге, где до него преподавал Клейн. В 1886 г. Ф. Клейн переехал в Геттинген, где создал свою школу математиков и физиков-теоретиков. Из СССР в Геттингене проходил стажировку В. А. Фок. С. Ли опубликовал свою теорию групп в 3 томах на немецком языке в 1888–1893 гг. Эта работа в 1898 г. была удостоена премии им. Лобачевского по представлению Казанского физико-математического общества. Это было первое присуждение премии. Отзыв написал Ф. Клейн. Этот отзыв был удостоен золотой медали.

В аналитической механике тот факт, что тело имеет конечные размеры, учитывается с помощью понятия конфигурационного пространства. Все точки, из которых состоит тело, рассматриваются как динамическая система со связями. Иными словами, предполагается, что внутри тела все составляющие его точки связаны между собой некими силами связи. Эти связи учитываются путем перехода к некому многомерному конфигурационному пространству, в котором движение всей динамической системы можно представить как движение *одной точки* по геодезической линии в этом пространстве. Такой подход рассматривался как *геометризация механического движения* динамической системы [20]. Именно он был предшественником современного геометрического подхода в физике. Именно он породил корпускулярно-волновые аналогии.

В 1828 г. У. Гамильтон нашел такую формулировку корпускулярной теории света, которая позволяла представить процесс распространения света через неоднородную, но изотропную среду как частный случай обычной механической задачи о движении материальной точки [20]. В 1891 г. Ф. Клейн заметил, что в пространствах высших размерностей любая механическая задача может быть сведена к проблеме определения пути светового луча через соответствующую среду [21].

Релятивистская механика объединяет механику и электродинамику. Лучи света уже не представишь в виде островного распределения материи. Распространение электромагнитных сигналов описывается уравнениями Максвелла. Они не похожи на уравнения Ньютона, но получаются из тех же самых вариационных процедур, что и уравнения Ньютона. Законы сохранения строятся по одним и тем же правилам в механике и электродинамике. Эти теории различаются выбором полевых переменных для описания изучаемых объектов и группами симметрии теории, т. е. тех непрерывных групп преобразований Ли, которым объекты будут подвергаться в реальных условиях. Для описания экспериментов нам придется использовать систему из уравнений обоих типов: и Ньютона, и Максвелла. Решения такой системы уравнений будут описывать великое множество различных физических явлений и совершенно непохожих друг на друга систем. Оптика, электрические и магнитные явления, науки о которых возникали и развивались вначале независимо друг от друга, оказались разделами одной науки — электродинамики.

Следует обратить внимание на принципиальное различие в описании двух сущностей: вещества и поля. Вещество, как правило, представляется в виде весомой материи и в уравнения входит в качестве источников поля. Поля (как гравитационное, так и электромагнитное) считаются невесомой материей и в уравнениях представлены разного рода потенциалами и их производными. Такова структура уравнений поля.

Движение материальных тел описывается уравнениями движения, которые часто являются геодезическими линиями какого-то пространства (и тем самым определяют геометрию этого пространства).

В классической теории калибровочных полей нет принципиального различия между веществом и полем, а источниками поля могут служить не только материальные частицы, но и разного рода дефекты в непрерывной структуре поля (сингулярности, дырки, топологические дефекты). Уравнения движения источников поля можно получить из закона сохранения тензора энергии-импульса системы.

3. УРАВНЕНИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ

В конце 1915 г. Д. Гильберт и А. Эйнштейн практически одновременно опубликовали свои уравнения гравитационного поля. Гильберт сделал это на две недели раньше Эйнштейна. Поэтому иногда эти уравнения называют уравнениями Гильберта–Эйнштейна. Удивительно в их появлении то, что авторы при поиске новых уравнений гравитационного поля, которые должны были заменить собой уравнения Ньютона, шли разными путями, а в итоге уравнения совпали. Поводом для поиска новых уравнений послужило очень малое расхождение между предсказаниями теории Ньютона и реально наблюдавшимся эффектом смещения перигелия Меркурия. Гильберт решил строить новую физическую теорию аксиоматически подобно тому, как строится геометрия. Теперь это называется «строить из первых принципов». Эйнштейн же, выбрав, как и Гильберт, метрический тензор в качестве полевой переменной для описания гравитации, стал подбирать различные комбинации метрики и ее производных таким образом, чтобы получить правильную величину смещения перигелия. После длительных и упорных поисков он пришел к тому же уравнению, что и Гильберт. Только тензор энергии-импульса источников гравитационного поля стоял у него в другой части уравнения (что несущественно). В качестве группы симметрии теории оба автора использовали произвольные непрерывные преобразования координат пространства-времени. Как известно, величина смещения перигелия, вычисленная Эйнштейном с помощью новых уравнений, совпала с измерениями астрономов и привлекла внимание к новой теории. Особый энтузиазм по отношению к теории Эйнштейна вызвало экспериментальное открытие нового физического эффекта, предсказанного Эйнштейном. В 1919 г. во время солнечного затмения удалось измерить отклонение луча света при его прохождении вблизи поверхности Солнца. Результат совпал с вычислениями Эйнштейна, хотя точность измерений была невысокой. В Англии портрет ученого начали печатать даже на фантиках конфет. Казалось бы, полный успех? Но...

В 1917 г. Феликс Клейн попробовал построить закон сохранения энергии для теории Эйнштейна и обнаружил, что его нет! Без закона сохранения энергии теория не может быть признана физической и полезной для описания экспериментов. В 1918 г. Эмми Нётер, ученица Гильберта, доказала две теоремы о свойствах интегралов действия, ин-

вариантных относительно групп симметрии Ли [22]. Первая теорема относится к случаю, когда интеграл действия инвариантен относительно группы, преобразования которой зависят от конечного числа параметров. Такие группы Ли назвал *конечными непрерывными группами*. Группа Галилея, преобразующая координаты абсолютного пространства Ньютона, группы Лоренца и Пуанкаре, используемые в релятивистской физике, относятся именно к такому типу групп. Закон сохранения энергии в этих теориях возникает при преобразованиях координаты времени. Поскольку в теории Ньютона временная координата отделена от пространственных координат, закон сохранения энергии имеет самостоятельное и важное значение. В релятивистской физике группы симметрии теории перепутывают пространственные и временные координаты. Поэтому вместо закона сохранения энергии получается закон сохранения энергии-импульса рассматриваемой системы. Это значит, что энергия и компоненты импульса могут превращаться друг в друга. Но в теории Эйнштейна не получалось ни того, ни другого. Более того, из второй теоремы Нётер следовало, что и быть такого закона не может. Почему?

Теория групп Ли состоит из двух частей: групп преобразований с конечным числом параметров, которые Ли назвал конечными непрерывными группами, и непрерывных групп, преобразования которых зависят от *функций координат и их производных*. Он сделал это в надежде на возможность с их помощью изучить пространства с римановой геометрией.

Построенная С. Ли совместно с Ф. Клейном классификация геометрий относилась к пространствам, обладавшим в целом некой симметрией, иначе говоря, симметричным глобально. Такие пространства называются также однородными или клейновскими пространствами. Риманово пространство может в целом не обладать никакой симметрией. Поэтому кажется невозможным построить какую-либо систему инвариантов, пригодную для реализации новой классификации.

Геттингенские математики, принявшие с энтузиазмом теорию групп Ли с числовыми параметрами, не поддержали новое увлечение С. Ли. Но теперь очевидно, что теория локальных групп симметрии, которые называются *локальными калибровочными группами симметрии*, является частным случаем теории бесконечных непрерывных групп Ли. Именно он ввел обобщенные ковариантные производные, содержащие некое новое поле. К сожалению, современные математики называют бесконечными группами некие другие конструкции, но, по-моему, из уважения к С. Ли и его приоритету в данном вопросе следует сохранить названия, приданные им.

Эмми Нётер [22] рассмотрела также случай инвариантности интеграла действия относительно группы преобразований, зависящих от точки (вторая теорема Нётер). Оказалось, что такие конструкции, которые порождают знакомые нам законы сохранения, связанные с первой теоремой, в данном случае не возникают. В законе сохранения тензора энер-

гии-импульса гравитационного поля появляется некий дополнительный член, называемый псевдотензором, физический смысл которого неясен и вызывает острые дискуссии. Считается, что наличие псевдотензора препятствует интегрированию дифференциального закона сохранения энергии, вытекающего из уравнений поля, и получению интегральных величин, являющихся интегралами движения.

Но на самом деле в римановом пространстве меняются операции дифференцирования и интегрирования. Поэтому оказывается возможным построить интегральные законы сохранения, но их число и структура будут зависеть от свойств симметрии того пространства, в котором движется рассматриваемое тело. Например, 4-мерное риманово пространство постоянной кривизны имеет 10-параметрическую группу симметрии, как и пространство Минковского. Но если в плоском пространстве Минковского три компоненты интегрально сохраняющегося импульса и интеграл энергии объединяются в один 4-компонентный мультиплет сохраняющихся величин, называемый 4-импульсом системы, то в искривленном пространстве постоянной кривизны интегральные сохраняющиеся величины объединяются в 5-импульс системы. Это значит, что не только компоненты энергии и импульса могут переходить друг в друга, но и момент вращения может участвовать в таких преобразованиях. Значит, знаменитая формула Эйнштейна $E = mc^2$ не всегда будет верна.

Теория калибровочных полей показала, что форма уравнений поля всегда определяется двумя постулатами: выбором полевой переменной и выбором группы симметрии теории. Поскольку А. Эйнштейн и Д. Гильберт в этих пунктах сделали одинаковый выбор, полученные ими уравнения совпали, несмотря на разницу в их рассуждениях. Поэтому можно классифицировать типы взаимодействий (= полей) по группам симметрии и построить иерархию взаимодействий, снабдив их соответствующими константами связи.

В теории калибровочных полей подобная иерархия выглядит следующим образом:

- а) электродинамика: калибровочная группа $U(1)$, полевая переменная — вектор-потенциал $A_\mu(x)$;
- б) слабые взаимодействия (поля Янга–Миллса): калибровочная группа $U(2)$, полевая переменная — мультиплет векторных потенциалов $A_\nu^a(x)$, $a = 1, 2$;
- в) сильные взаимодействия (хромодинамика): калибровочная группа $U(3)$, полевая переменная — мультиплет векторных потенциалов $A_\mu^a(x)$, $a = 1, 2, 3$;
- г) ... новые неизвестные силы.

Структура уравнений поля во всех случаях одинакова и подобна максвелловской, но дополнительно содержит нелинейные члены. Объединяя группы симметрии, можно получать объединение типов взаимодействий. Так, объединение электромагнитного и слабого взаимодействий позволило построить перенормированную теорию объединенного электрослабого

взаимодействия (нобелевский результат Г. 'т Хоофта), несмотря на то, что теория слабого взаимодействия, рассматриваемого отдельно, остается неперенормированной.

Очень хочется поставить в качестве сил пункта г) гравитацию, но она имеет более слабую константу связи, чем предыдущие взаимодействия, а не более сильную, как того требует логика иерархии. Кроме того, уравнения Эйнштейна не похожи на уравнения Янга–Миллса. Где же ее место? Некоторые авторы предлагали рассмотреть возможность существования «сильной» гравитации, но эта идея не получила дальнейшего развития.

Если мы вслед за А. Эйнштейном и Д. Гильбертом выберем в качестве полевой переменной метрический тензор $g_{\mu\nu}$ и в качестве группы симметрии теории группу непрерывных преобразований координат 4-мерного пространства-времени V_4 , то, выполнив вариационные процедуры, общие для всех калибровочных полей, получим уравнения Эйнштейна и уже знакомый нам закон сохранения с псевдотензором. Но в рамках нового подхода становится ясной математическая природа псевдотензора, а также пути преодоления трудностей с построением интегралов движения. Ответ оказался простым: теорема Гаусса, которая всегда используется при нахождении этих интегралов, неприменима для симметричных тензоров. В плоском пространстве-времени этот дефект практически незаметен. Но в римановом V_4 процедура интегрирования должна быть изменена [23]. Кроме того, нужно изменить математическую трактовку всех вектор-потенциалов калибровочных полей и метрического тензора. Их следует рассматривать как представления бесконечных непрерывных групп Ли $G_{\infty r}$. При отсутствии производных в преобразованиях бесконечной непрерывной группы мы получим непрерывную группу преобразований G_r с конечным числом параметров r . Она по терминологии Ли и Нётер является конечной непрерывной группой Ли и в то же время подгруппой бесконечной группы Ли $G_{\infty r}$.

Таким образом, разница между ситуациями, обсуждаемыми в первой и второй теоремах Нётер, состоит в том, что в первом случае преобразования симметрии действуют глобально, во всех точках пространства сразу, а во втором они сосредоточены в некоторой области пространства. На всё пространство действие локальных преобразований распространяется шаг за шагом. Присутствие производных в преобразованиях отражает именно этот процесс.

Источником появления нелинейностей в уравнениях поля являются производные от координат V_4 , которые, согласно Ли, присутствуют в преобразованиях бесконечных групп симметрии. Они приводят к изменению процедур дифференцирования и интегрирования. Обычные производные «удлиняются» и становятся ковариантными производными, а процедура интегрирования становится неоднозначной. В частности, в римановом V_4 компоненты тензора энергии-импульса следует интегрировать только вдоль векторов Киллинга группы движения этого V_4 . Следовательно,

данное V_4 должно обладать в целом некими свойствами симметрии. В каких случаях это возможно, определяет классификация пространств Эйнштейна, построенная А.З.Петровым в 60-е гг. XX в. [24]. Становится ясно, что динамические константы в римановом V_4 существуют не всегда. В некоторых случаях выражение для энергии получить не удастся.

Но, следуя идеологии теории калибровочных полей, нетрудно убедиться, что уравнения Эйнштейна имеют точно такую же алгебраическую структуру, что и уравнения Янга–Миллса. Поэтому их действительно нужно поместить в пункт г) несмотря на то, что вектор-потенциал здесь тензорный, а не векторный. В данном случае это вопрос интерпретации. Таким образом, имеется единый подход ко всем видам фундаментальных взаимодействий.

Закон сохранения энергии был установлен в 1847 г. Г.Гельмгольцем. Говоря более точно, Гельмгольц продемонстрировал физический смысл этого закона в различных физических и химических процессах и доказал его универсальность и большое значение. Он также продемонстрировал универсальность и глубокий смысл принципа наименьшего действия. Гельмгольц впервые доказал применимость принципа наименьшего действия к тепловым, электромагнитным и оптическим явлениям [25].

Вопрос о физическом смысле энергии был предложен философским факультетом Геттингенского университета в качестве темы для получения премии за 1887 г. Работа, представленная М.Планком, получила вторую премию (первая не была присуждена никому). Эта премия позволила Планку стать экстраординарным профессором теоретической физики в университете Киля. Планк был счастлив. В то время теоретическая физика еще не считалась самостоятельной дисциплиной. Можно считать, что она возникла благодаря Планку (как и квантовая физика). Таким образом, первым в мире профессором теоретической физики был М.Планк, а годом рождения этой науки можно считать 1887 г.

4. СУЩНОСТЬ ТЕОРИИ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ

В течение долгого времени точки зрения на геометрию Ли–Клейна и Римана считались несовместимыми друг с другом. Можно считать, что первая концепция отражает ньютоновское представление о пространстве как об арене событий, не влияющей на их протекание. Риман же представлял себе пространство как сплошную среду, через которую происходит взаимодействие тел. Учитель Планка Гельмгольц создал свою геометрию, похожую на римановскую [26]. Эйнштейн использовал геометрию Римана при построении общей теории относительности. Планк и Эйнштейн были друзьями.

Но специальная теория относительности, которой Эйнштейн тоже занимался, опиралась на однородное 4D пространство-время, обладающее глобальной симметрией клейновского типа. Вейль [27] и Дирак [28]

использовали эту же концепцию геометрии в квантовой механике. Так являются ли данные концепции, действительно, несовместимыми друг с другом? Обе они подтверждены экспериментально.

В 1925 г. Картану удалось объединить оба подхода к геометрии. Он предложил строить неоднородное риманово пространство шаг за шагом из бесконечно малых однородных пространств клейновского типа [29]. В этом случае группы симметрии клейновского пространства становятся локальными симметриями. Они сохраняют свою структуру, но действие их преобразований становится локальным (в пределах одного бесконечно малого однородного пространства). Для того чтобы из бесконечно малых локальных пространств собрать целое большое пространство, нужно ввести новые объекты, позволяющие переходить от одного локального пространства к другому. Эти объекты придумал Т. Леви-Чивита. Они были названы связностями. Теория таких объектов успешно развивается до сих пор. Производные параметров преобразования, которые появляются в бесконечных группах Ли, указывают на то, что здесь мы имеем дело со связностями. В римановом пространстве роль связностей обычно выполняют символы Кристоффеля, но, вообще говоря, можно вводить и другие связности в зависимости от поставленной задачи. Классификацию связностей риманова пространства осуществили И. А. Схоутен и Д. Дж. Стройк в 1939 г. [30]. Как показал Э. Картан [31], сама конечная группа Ли тоже может рассматриваться как пространство и на ней можно вводить связности. С. Ли и Э. Картан были знакомы друг с другом.

Благодаря Картану риманово пространство общей теории относительности Эйнштейна стали строить из локальных плоских пространств специальной теории относительности, считая их касательными к риманову. Таким образом, законы квантовой механики следует считать действующими локально, в пределах данного касательного пространства, и искать связь между результатами экспериментальных измерений, выполненных в разных точках пространства и времени, через добавление связности на V_4 в уравнения движения. Именно так поступили В. А. Фок и Д. Д. Иваненко в 1929 г., когда им удалось найти правильное уравнение движения для электрона, движущегося во внешнем гравитационном поле [32]. В качестве связности они использовали коэффициенты Риччи. В физической литературе получившаяся конструкция называется коэффициентами Фока-Иваненко.

Вспомним вопрос о форме Земли: плоская она или круглая? Правильный ответ требует дополнительной информации. Всё зависит от наших требований к условиям эксперимента. В пределах комнаты при низкой точности измерений Земля может считаться плоской. Но космонавты своими глазами видят, что она круглая, благодаря тому, что область наблюдений и точность измерений совершенно другие. Однако для бытовых целей не нужна такая точность, как у космонавтов. В конце концов, все наши описания внешнего мира — это лишь модели.

Эйнштейн считал, что сущность общей теории относительности состоит в принципе эквивалентности. «Согласно принципу эквивалентности метрические соотношения евклидовой геометрии остаются справедливыми относительно декартовой системы координат бесконечно малого размера, находящейся в соответствующем состоянии движения (свободное падение без вращения)... и для систем координат, покоящихся относительно избранной нами системы» [2, с. 68]

Эти слова Эйнштейна обычно трактуются как возможность заменить в малой окрестности одной точки силы гравитации силами инерции. Отсюда вытекает следствие, широко используемое в процессе тренировок космонавтов. Считается, что упражнения в падающем самолете позволяют подготовить организм к будущей невесомости во время полета. Разница в физической природе сил инерции и гравитации не обсуждается. Важно, что в малой окрестности одной точки внешние силы, действующие на тело, заменяются силами инерции. Это позволяет локально получить свободное, т. е. инерциальное, движение. Связав начало декартовых координат с центром масс тела, мы можем изучать это движение как происходящее по инерции в евклидовом пространстве. Такое движение не зависит от вещества тела и его массы. В состоянии инерциального движения все тела ведут себя одинаково.

Великий Ньютон, используя образ бесконечного абсолютного пространства, понимал, что это понятие не отражает реальных условий эксперимента, поскольку у нас нет бесконечно длинных и жестких линеек. Но пока не существует такого математического аппарата, который мог бы описать ситуацию, при которой в каждой точке пространства в каждый момент времени находится экспериментатор и проводит свои опыты независимо от других таких же экспериментаторов, придется пользоваться этим понятием. Таким образом, Ньютон сам определил степень приближенности утверждений своей теории.

К счастью, в наше время был создан математический аппарат, о котором мечтал Ньютон. Он возник как обобщение метода внешних форм Э. Картана [34]. Это геометрия расслоенных пространств [35]. Мне удалось не только с ней познакомиться, но и применить этот аппарат в моей кандидатской диссертации 1969 г., посвященной теории калибровочных полей.

Обобщениями метода внешних форм Картана в 60-е гг. XX в. занимались несколько групп математиков в разных странах мира. На механико-математическом факультете МГУ на кафедре профессора П. К. Рашевского этой проблемой занималась группа сотрудников под руководством профессора Г. Ф. Лаптева [36, 37]. Кроме того, доцент Л. Е. Евтушик [38] читал спецкурс по данной теме, который я прослушала. Будучи внештатным референтом ВИНТИ, я получала копии соответствующих статей для их реферирования. Все группы авторов пользовались разной терминологией и стремились к разным целям. Нелегко было догадаться, что они решают одну и ту же проблему построения геометрии рассло-

енных пространств. Но я, на самом деле, тоже об этом думала. У меня перед глазами были эйнштейновские лифты, падающие в каждой точке пространства и времени, в которых благодаря принципу эквивалентности исчезает гравитация. Каждый лифт я представляла себе как самостоятельное пространство, и нужно было придумать способ связать все лифты в единую конструкцию — пространство, составленное из пространств. Об этом я написала в своей дипломной работе, опубликованной в 1965 г. в «Вестнике МГУ» [39]. Поняв, что математики идут в том же направлении, что и я, я стала ездить на геометрические конференции и рассказывать математикам о своих результатах. Во всяком случае геометрию расслоенных пространств мне строить не пришлось. Оказалось достаточным изучить работы профессионалов и понять, как правильно их использовать. Так, вектор-потенциалы калибровочных полей стали коэффициентами связности расслоенного пространства с базой в виде риманова пространства-времени V_4 и слоем в виде калибровочной группы $U(N)$. Дальнейшее применение принципа эквивалентности показало, что нет принципиальной разницы в описании процесса взаимодействия в плоском и искривленном V_4 . При аксиоматическом построении теории уравнения выглядят одинаково. Но физическая интерпретация отдельных членов уравнения может зависеть от выбора системы координат и тела отсчета. Переход от системы Птолемея к системе Коперника с точки зрения математики означает лишь перенос начала отсчета системы координат на другое тело отсчета. А для человечества такой перенос означает революцию в мировоззрении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Из всех наук математика пользуется особым уважением, потому что ее теоремы абсолютно верны и неоспоримы, тогда как законы других наук в известной степени спорны и всегда существует опасность их опровержения новыми открытиями. Однако исследователю, работающему в какой-либо другой области науки, не приходится завидовать математику, так как положения математики покоятся не на реальных объектах, а исключительно на объектах нашего воображения» [33].

После открытия j/ψ -частицы начался парад побед калибровочных моделей элементарных частиц. Открытия и нобелевские премии следовали друг за другом. Теоретики предсказывали события, экспериментаторы их осуществляли. Результаты оказывались именно такими, какими они вытекали из теории. Так продолжалось почти 20 лет, и, наконец, возникла новая классификация элементарных частиц, получившая название *Стандартная модель*. Она включала в себя переносчиков всех видов фундаментальных взаимодействий и опиралась на теорию калибровочных полей. Термин *стандартная* в англоязычных странах означает «самая лучшая», та, на которую нужно равняться.

И тут случилось нечто удивительное. Экспериментаторы ЦЕРН подняли бунт. Они решили, что такой ход событий унижает их экспериментаторское достоинство. Они привыкли считать, что им можно делать опыты по своему усмотрению, а теоретики должны догадываться, почему получилось то, а не другое. А тут всё наоборот: они, творческие люди, превратились как бы в обслуживающий персонал для теоретиков. Возникло движение «Beyond the Standard Model», объединившее всех желающих свергнуть Стандартную модель, а заодно и теорию калибровочных полей в ее исходной формулировке с сияющего пьедестала. Началась гонка за поиском отклонений от Стандартной модели и предложения альтернативных теорий. Главное направление такого рода — суперсимметричные калибровочные теории и модели. Они возникли под лозунгом обобщения исходной формулировки теории калибровочных полей. Действительно, если главное в теории — группа симметрии, почему бы не попробовать другие группы? Тем более что теория групп суперсимметрии лишь незадолго до этих событий была сформулирована математиком Ф. Березиным, а первые попытки использовать их в физике появились в 1971 г. Первым, кто в ОИЯИ обратил внимание на суперсимметрию, был В. И. Огиевский. Однако на этот раз теоретиков ждало разочарование. В течение более 50 лет ни одно из предсказаний суперсимметричных моделей не подтвердилось экспериментально.

Стандартная модель опирается на такую формулировку теории калибровочных полей, которая имеет фундаментальный физический смысл. Поэтому она входит в число надежно установленных теорий.

Другие фундаментальные физические теории (механика Ньютона, электродинамика Максвелла, специальная и общая теории относительности Эйнштейна) содержат внутри себя анализ экспериментальных ситуаций, предназначенных для проверки их предсказаний. Ничего подобного в суперсимметричных моделях нет, и даже не определено, какие реальные объекты описывают эти модели.

Фундаментальные теории получили свое признание благодаря тому, что нашли правильную реализацию своих математических образов в реальных телах и физических процессах. Поэтому они смогли войти в повседневную жизнь человечества в виде множества инженерных решений в самых разных ее областях. Ценность научных достижений состоит в том, что они порождают технические и технологические достижения, обеспечивая тем самым прогресс цивилизации.

В настоящее время имеется не много мест в мире, где могут работать вместе ученые самых разных направлений: математики, физики, химики, биологи, представители прикладных наук, инженеры и профессионалы-экспериментаторы. В Дубне есть великолепное оборудование, прекрасный ускоритель. Вдохновляющая история открытий, выполненных сотрудниками ОИЯИ, и диапазон этих открытий позволяют надеяться, что новые поколения ученых не сдадут позиций, завоеванных героическими

усилиями предшественников, и сохраняют высокий уровень научных исследований института.

Умная и добрая «Балдинская осень» в течение полувека украшала жизнь нашего поколения и служила нравственным ориентиром в бурных событиях этого времени. Я бесконечно благодарна организаторам этих конференций за предоставленную мне возможность быть их постоянным участником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труды Междунар. семинара «Векторные мезоны и электромагнитные взаимодействия». Дубна: ОИЯИ, 1969.
2. *Эйнштейн А.* Собр. науч. тр. М.: Наука, 1966.
3. Элементарные частицы и компенсирующие поля / Под ред. Д. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964.
4. Квантовая теория калибровочных полей / Под ред. Н. П. Коноплевой. М.: Мир, 1977.
5. *Feynman R. P.* // Rev. Mod. Phys. 1948. V. 20, No. 2. P. 367–387.
6. *Faddeev L. D., Popov V. N.* // Phys. Lett. B. 1967. V. 25. P. 29–30.
7. *Taylor J. C.* // Nucl. Phys. B. 1971. V. 33. P. 435.
8. *Славнов А. Д.* // ТМФ. 1972. V. 13. P. 174.
9. *'t Hooft G.* // Nucl. Phys. B. 1971. V. 35. P. 173.
10. *'t Hooft G.* // Nucl. Phys. B. 1974. V. 79. P. 276.
11. *Тинг С.* Открытие J -частицы (личные впечатления) // УФН. 1978. Т. 125. С. 227–250.
12. *Рихтер Б.* От ψ к очарованию // Там же. С. 201–226.
13. Электромагнитные взаимодействия и структура элементарных частиц: Пер. с англ. / Под ред. А. М. Балдина. М.: Наука, 1969.
14. Нильс Бор и наука XX века // Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1988. С. 42.
15. *Коноплева Н. П., Попов В. Н.* Калибровочные поля. М.: Атомиздат, 1972.
16. *Попов В. Н.* Континуальные интегралы в квантовой теории поля и статистической физике. М.: Атомиздат, 1976.
17. *Славнов А. Д., Фаддеев Л. Д.* Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1978.
18. *Konopleva N. P., Popov V. N.* Gauge Fields. Chur; London; New York: Harwood Acad. Publ., 1980.
19. *Klein F.* Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen. Erlangen, 1872.
20. *Полак Л. С.* Вариационные принципы механики, их развитие и применение в физике. М.: Физматгиз, 1960.
21. *Клейн Ф.* О новых английских работах по механике // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959. С. 513.
22. *Нётер Э.* // Там же. С. 611.
23. *Коноплева Н. П.* Об интегральных законах сохранения в общей теории относительности // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190, № 5. С. 107–1073.
24. *Петров А. З.* Новые методы в общей теории относительности. М.: Наука, 1966.

25. *Гельмгольц Г.* О физическом значении принципа наименьшего действия // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959. С. 430.
26. *Гельмгольц Г.* О фактах, лежащих в основаниях геометрии // Об основаниях геометрии / Под ред. А. П. Нордена. М.: Гостехтеоретиздат, 1956. С. 367.
27. *Вейль Г.* Математическое мышление. М.: Наука, 1989.
28. *Дирак П. А. М.* Принципы квантовой механики. М.: Физматгиз, 1960.
29. *Картан Е.* Группы голономии обобщенных пространств, теория групп и геометрия, метрические пространства, основанные на понятии площади // VIII Междунар. конкурс на соискание премии им. Н. И. Лобачевского. Казань: Казан. гос. ун-т, 1940. С. 59–194.
30. *Схоутен И. А., Стройк Д. Дж.* Введение в новые методы дифференциальной геометрии: Пер. с англ. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1939. Т. 1.
31. *Картан Э.* Геометрия групп Ли и симметрические пространства: Пер. с фр. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
32. *Fock V. A., Ivanenko V. A.* // Phys. Z. 1929. V. 30. P. 648; Compt. Rend. 1929. V. 188. P. 1470.
33. *Эйнштейн А.* Геометрия и опыт // Собр. науч. тр. М.: Наука, 1966. Т. 2. С. 83.
34. *Де Рам Ж.* Дифференцируемые многообразия: Пер. с фр. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
35. *Лихнерович А.* Теория связностей в целом и группы голономии: Пер. с фр. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
36. *Лантев Г. Ф.* Дифференциальная геометрия погруженных многообразий // Тр. Моск. мат. о-ва. 1953. Т. 2. С. 275.
37. *Лантев Г. Ф.* Дифференциальная геометрия погруженных многообразий // Тр. XIII Мат. съезда. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 3. С. 409.
38. *Евтушик Л. Е.* // Изв. вузов. Сер. мат. 1969. Т. 81, № 2. С. 32.
39. *Коноплева Н. П.* // Вестн. МГУ. Сер. физ. 1965. № 3. С. 73–80.