

*Новиков Н.Б.*

*Институт психологии РАН*

*Россия, г. Москва*

*Novikov N.B.*

*Institute of Psychology RAS*

*Russia, Moscow*

## **СИЛА АНАЛОГИЙ. ТВОРЧЕСТВО РИЧАРДА ФЕЙНМАНА**

*Аннотация:* Ранним октябрьским утром 1965 года Р.Фейнман был разбужен телефонным звонком, поступившим из Шведского Нобелевского комитета. Американский ученый узнал, что ему присуждена Нобелевская премия – награда за фундаментальные работы по квантовой электродинамике. Р.Фейнман всерьез размышлял о том, чтобы отказаться от награды, но репортер журнала «Time» проинформировал его, что отказ от премии вызовет еще большую суматоху и сенсацию, чем ее присуждение и принятие. Студенты Калифорнийского технологического института, восхищенные своим профессором, вывесили на здании администрации плакат с надписью «Ричард Фейнман победил». В декабре 1965 г. Ричард его супруга, прибыв в Стокгольм, приняли участие в церемонии награждения. Примечательно, что, помимо квантовой электродинамики, Р.Фейнман внес существенный вклад и в другие области физической науки. Анализируя историю его идей, связанных с этим вкладом, рассмотрим роль аналогии в этой истории (в генезисе важных научных результатов Р.Фейнмана).

**Ключевые слова:** новые идеи, физические теории, обнаружение сходства, проведение аналогии.

**Abstract:** On an early October morning in 1965 R. Feynman was woken up by a phone call from the Swedish Nobel Committee. An American scientist learned that

*he had been awarded the Nobel Prize - an award for fundamental work in quantum electrodynamics. R. Feynman seriously considered giving up the award, but a Time magazine reporter informed him that the refusal of the award would cause even more turmoil and sensation than its award and acceptance. Caltech students, admiring their professor, hung a poster on the administration building that read "Richard Feynman won". In December 1965, Richard and his wife, having arrived in Stockholm, took part in the award ceremony. It is noteworthy that, in addition to quantum electrodynamics, R. Feynman made a significant contribution to other areas of physical science. Analyzing the history of his ideas related to this contribution, let us consider the role of analogy in this history (in the genesis of R. Feynman's important scientific results).*

***Key words:** new ideas, physical theories, discovery of similarities, drawing analogies.*

## **1. Аналогия первая: создание полуклассической теории взаимодействия заряженных частиц**

В 1935 г. Р.Фейнман поступил в Массачусетский технологический институт (МТИ) и спустя четыре года окончил его с дипломом бакалавра по физике. В МТИ он узнал, что наиболее важной проблемой того времени было неудовлетворительное состояние квантовой теории электричества и магнетизма (квантовой электродинамики). Данная теория изучает взаимодействия между элементарными частицами, а также между частицами и окружающим их электромагнитным полем. Ученые, использовавшие теорию, сталкивались с такими парадоксальными моментами, как бесконечная масса и бесконечный заряд электрона. Специалисты пришли к выводу, что источником этих бесконечностей является действие электрона (его поля) на самого себя, т.е. само-воздействие. С этой точкой зрения согласился и Р.Фейнман, который, поступив в 1939 г. в аспирантуру Принстонского

университета, приступил к поиску средств решения проблемы. Молодой ученый писал диссертацию под руководством Джона Арчибальда Уилера (1911-2008), который был всего на семь лет старше Р.Фейнмана. Д.Уилер сразу же предложил ему использовать в разрабатываемой модели опережающие и запаздывающие волны – электромагнитные волны, которыми обмениваются два электрона, разделенные определенным расстоянием.

В начале 1940-х годов Р.Фейнман доложил о своей работе по пространственно-временной электродинамике на одном из собраний Американского физического общества. На этом собрании, в частности, присутствовали Альберт Эйнштейн, Вольфганг Паули, Джон фон Нейман, Юджин Вигнер. Р.Фейнман сформулировал ряд принципов своей теории взаимодействия частиц:

1. Ускорение точечного заряда определяется только суммой его взаимодействий с другими заряженными частицами. Заряд не действует сам на себя.

2. Силу взаимодействия, с которой один заряд действует на другой, можно рассчитать по формуле силы Лоренца, в предположении, что поля создаются первым зарядом, в соответствии с уравнением Максвелла.

3. Фундаментальные уравнения инвариантны относительно изменения знака времени. Позже ученый уточнил этот принцип: фундаментальные (микроскопические) явления в природе симметричны (инвариантны) по отношению к чередованию прошлого и будущего.

В.Паули, несмотря на свой скептицизм, оценил важность третьего принципа. Он обратил внимание Р.Фейнмана и Д.Уилера на то, что еще Эйнштейн упоминал о симметрии прошлого и будущего в своей малоизвестной работе 1909 г. [1]. Эйнштейн, оценивая теорию Р.Фейнмана, не нашел в ней каких-либо серьезных изъянов (несстыковок), и отметил, что в 1909 г. он действительно допускал существование запаздывающих и опережающих волн.

Вариант теории, разработанный Р.Фейнманом в начале 1940-х годов, нельзя было назвать квантовой теорией. В нем использовались классические уравнения поля (уравнения Максвелла) без каких-либо квантово-механических поправок, которые, конечно, требовалось ввести в дальнейшем. Однако уже на этом этапе исследований один из параметров теории Р.Фейнмана приобрел исключительное значение. Ученый заметил, что результаты вычислений оказываются правильными, если использовать принцип наименьшего действия. Понять это обстоятельство удалось после многих «проб и ошибок». В результате Р.Фейнман склонился к заключению, что принцип наименьшего действия (впервые введенный в механику Пьером Мопертюи в 1744 г.) можно перенести в теорию взаимодействия частиц.

Отметим, что французский математик, астроном и геодезист Пьер Мопертюи (1698-1759) сформулировал данный принцип в механике по аналогии с принципом наименьшего времени, постулированным Пьером Ферма в 1662 г. в оптике. В свою очередь, П.Ферма открыл данный принцип, изучая работы Герона Александрийского, жившего в первом веке нашей эры. Для описания явления отражения света Герон ввел принцип кратчайшего пути, но П.Ферма заметил, что этот принцип непригоден для исследования явления преломления света. Это заставило его переформулировать принцип Герона, заявив, что движение света подчиняется правилу кратчайшего времени (времени, за которое световой луч проходит расстояние от точки А к точке В).

Джеймс Глик в книге «Гений» [1] говорит о теории Р.Фейнмана, разработанной в начале 1940-х годов: «...Один из параметров по мере развития теории приобрел исключительное значение. Оказалось, что можно вычислять взаимодействие между частицами, используя принцип наименьшего действия. <...> В соответствии с принципом наименьшего действия можно не вычислять траекторию летящего мяча в последовательные моменты времени, а исходить из утверждения, что мяч будет двигаться по

траектории, при которой действие, то есть разница между кинетической и потенциальной энергиями мяча, будет минимальным» [1].

Примечательно, что Р.Фейнман впервые познакомился с принципом наименьшего действия еще в средней школе, благодаря учителю физики Абраму Бадеру. Д.Гриббин и М.Гриббин в книге «Ричард Фейнман: жизнь в науке» [2] отмечают: «Еще в средней школе от Абрама Бадера Фейнман узнал, что в классической механике для нахождения полной траектории движения мяча, от руки до окна, можно использовать принцип наименьшего действия, который не требует вычисления изменений, происходящих со скоростью и другими физическими свойствами мяча в каждый момент времени его движения...» [2, с.86].

## **2. Аналогия вторая: переход от метода Гамильтона к методу Лагранжа**

В традиционной квантовой механике для перехода от настоящего к будущему необходимо решить дифференциальные уравнения, руководствуясь методом Гамильтона. В таких случаях физики говорят: требуется «найти Гамильтониан» системы. Если определить его удавалось, можно было двигаться дальше. Однако в теории взаимодействия частиц, предложенной Р.Фейнманом, использование метода Гамильтона исключалось. Это было связано с задержками во времени. Выяснилась недостаточность полного описания настоящего – координат, импульсов и других параметров. Привычные дифференциальные уравнения не работали, необходимо было применять другой метод. Р.Фейнман догадывался, что этим «другим методом» должен стать формализм Лагранжа, альтернативный формализму Гамильтона. Но ученый не знал, каков конкретный алгоритм, позволяющий ввести в квантовую механику формализм Лагранжа, а вместе с ним и принцип наименьшего действия.

Получить необходимую информацию удалось в 1941 г. при случайных обстоятельствах, во время встречи с немецким физиком Гербертом Джелом (Йеле). Искомый алгоритм «скрывался» в статье П.Дирака «Лагранжиан в квантовой механике» (1933). Как только Р.Фейнман ознакомился с этой публикацией, он понял, каким образом принцип Мопертюи (принцип наименьшего действия) переносится в квантовую механику. Неслучайно его диссертация, защищенная в 1942 г., имела название, отсылающее к данному постулату: «Принцип наименьшего действия в квантовой механике». Можно сказать, что Р.Фейнман обнаружил аналогию между теми идеями, в которых он нуждался для развития своей формулировки квантовой электродинамики, и тем формализмом, который был представлен в упомянутой статье П.Дирака.

О случайных обстоятельствах, при которых Р.Фейнман получил ключ к решению проблемы, пишет Мигель Сабадель в книге «Когда фотон встречается электрон» [3]: «Чтобы описать квантовую систему, физики искали «оператор Гамильтона» (математический объект, связанный с общей энергией системы). После его определения они могли переходить к расчетам. Данный метод не работал в мире временных задержек Уилера и Фейнмана. Успеха можно было добиться, только применив формализм Лагранжа и принцип наименьшего действия. Если бы у них это не получилось, то все их усилия были бы тщетны. Но как их применить? Ответ пришел во время пивного фестиваля в таверне «Нассау» в Принстоне. В этот день Фейнман, сидя рядом с Гербертом Йеле, бывшим студентом Шредингера, спросил его о том, знает ли он кого-то, кто уже применял принцип наименьшего действия в квантовой механике. Его лицо осветилось в тот момент, когда Йеле ответил, что Дирак, один из его кумиров, написал статью по этому поводу восемь лет назад» [3, с.63-64]. Автор поясняет: «Упомянутая статья называлась «Лагранжиан в квантовой механике». Дирак высказывал мысль, что данный метод мог быть очень продуктивным и показывать неплохие результаты, так как он использовал принцип наименьшего действия...» [3, с.64].

Столь же подробно этот эпизод описывает сам Р.Фейнман в своей Нобелевской лекции «Развитие пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики» [4]: «И вот однажды, когда я блуждал в темноте около этой проблемы, я пошел выпить пиво в Нассау-таверне в Принстоне. Там был один физик, только что приехавший из Европы (Герберт Джел). Он сел рядом со мной. Европейцы куда более серьезны, чем мы в Америке, потому что они считают, что такая вечеринка с пивом является подходящим местом для обсуждения головоломных вопросов. Итак, он сел около меня и спросил: «Что Вы делаете?» и т.д. Я ответил: «Пью пиво». Затем я понял, что он хотел узнать, чем я занимаюсь, и я рассказал ему о той задаче, которая меня увлекла. Наконец, я попросту повернулся к нему и спросил: «Слушайте, не знаете ли Вы какой-либо путь получения квантовой механики из принципа [наименьшего] действия, где интеграл, определяющий действие, непосредственно входил бы в квантовую механику?» «Нет, - ответил он, - но у Дирака была статья, в которой в квантовую механику, по крайней мере, вводится лагранжиан. Я покажу ее Вам завтра». На следующий день мы пошли в Принстонскую библиотеку. Там имеются маленькие комнатки, в которых можно вести любые дискуссии. Он показал мне эту статью» [4, с.38].

### **3. Аналогия третья: открытие метода интегрирования по путям (траекториям)**

Статья П.Дирака «Лагранжиан в квантовой механике» (1933) подсказывала не только способ введения формализма Лагранжа, но и некоторые аспекты метода интегрирования по путям (по траекториям), создание которого считается выдающейся заслугой Р.Фейнмана. Подчеркнем – некоторые аспекты указанного метода, но этого вполне достаточно, чтобы говорить о влиянии работы П.Дирака (1933) на разработку метода интегралов по траекториям.

Пол Халперн в книге «Квантовый лабиринт» [5] пишет о Фейнмане: «В статье Дирака он увидел, что методы с использованием лагранжиана идеальны для квантования разработанной им и Уилером теории поглощения. Формулируя гипотезу в терминах принципа наименьшего действия и определяя классическую траекторию как путь наименьшего действия, он мог очертить его как набор квантовых вероятностей» [5].

«Фейнман захотел убедиться, - продолжает автор, - что классическая траектория, в конечном итоге, всегда оказывается самой вероятной при использовании его теоретического метода, и для этого он взвесил каждую траекторию по ее вероятности, определенной обобщенными преобразующими функциями, **которые он нашел в статье Дирака**. Для каждой траектории, **следуя технике Дирака**, он задал динамические переменные для каждого момента времени, рассчитал соответствующие лагранжианы, применил преобразующие функции и перемножил их, чтобы представить цепь событий целиком. Затем, суммируя эти возможности и используя принцип наименьшего действия, он показал, что классический путь становится наиболее вероятным. Он окрестил это специальное квантовое добавление – «интеграл по траектории». Метод Фейнмана прекрасным образом соединил принцип наименьшего действия с принципом Ферма, оба они показывали, как свет путешествует по прямой линии, чтобы потратить на дорогу меньше времени» [5].

В методе интегрирования по траекториям используется континуальный интеграл (интеграл в функциональном пространстве), который также называется бесконечнократным интегралом. Б.В.Медведев и Д.В.Ширков в статье «П.А.М. Дирак и становление основных представлений квантовой теории поля» [6] пишут о влиянии работы П.Дирака (1933) на разработку Р.Фейнманом метода интегралов по траекториям: «Континуальный интеграл для формулировки квантовой динамики был введен Фейнманом (1948), который опирался на ту высказанную Дираком еще в 1933 г. идею, что

временную эволюцию квантовой системы за конечный интервал времени можно представить в виде композиции большого числа эволюции по малым временным интервалам. Функция конечного преобразования предстает при этом в форме многократного интеграла от произведения большого числа «элементарных» функций преобразования по возможным значениям динамических переменных в промежуточные моменты времени. Уменьшая размеры малых временных интервалов, и неограниченно увеличивая число промежуточных интегрирований, приходим к новому представлению квантовых амплитуд через бесконечнократные интегралы. В квантовой механике систем с малым числом степеней свободы эти интегралы известны как интегралы по путям, а в квантовой теории поля как функциональные интегралы» [6, с.84].

Об этом же сообщает Л.Краусс в книге «Почему мы существуем?» [7]: «...Дирак предложил способ расчета всех таких вероятностей (вероятностей траекторий частиц – Н.Н.Б.) и их суммирования для определения квантово-механических шансов на то, что частица, вылетающая из точки А, в конечном итоге окажется в точке В. Ричард Фейнман, в то время студент-старшекурсник, услышав о статье Дирака на пивной вечеринке, математически вывел конкретный пример, на котором продемонстрировал, что эта идея работает. Взяв посыл Дирака в качестве стартового момента, Фейнман получил результаты, идентичные тому, что можно было получить с использованием подходов Шредингера и Гейзенберга, по крайней мере, в простых случаях» [7, с.136]. Автор добавляет: «...Короткая статья Дирака 1933 г., где он предложил новый подход к квантовой механике, подтолкнула Фейнмана к работе, которая в итоге принесла ему Нобелевскую премию» [7, с.134].

Укажем, что Р.Фейнман не изобретал континуальный интеграл, нашедший применение в его методе интегрирования по путям. Этот интеграл, уже существовавший в математике, был использован Р.Фейнманом в квантовой механике в качестве полезного средства решения квантово-

механических задач. Континуальный (функциональный) интеграл появился в математике благодаря американскому математику, родоначальнику кибернетики Норберту Винеру (1894-1964), который использовал его для описания статистических свойств броуновского движения. Работа Н.Винера (1924) развивала математическое исследование броуновского движения, проведенное А.Эйнштейном (1905). Ж.Зинн-Жюстен в монографии «Континуальный интеграл в квантовой механике» [8] отмечает: «...Первым, кто предложил идею континуального интеграла, был Винер, который, будучи мотивирован известной работой Эйнштейна, использовал его в качестве инструмента для описания статистических свойств броуновского движения. Броуновское движение можно рассматривать как непрерывный предел марковского случайного блуждания с дискретными временными интервалами» [8, с.16].

Аналогичные сведения можно найти в статье Е.П.Жидкова и Ю.Ю.Лобанова «Метод приближенного континуального интегрирования в задачах математической физики» [9], где авторы констатируют: «Начало математически строгому изучению континуальных интегралов по счетно-аддитивным мерам было положено в работах Н.Винера [39], который ввел в пространстве непрерывных на отрезке функций меру континуального интегрирования, носящую теперь его имя. Следует отметить, что сам термин континуальный (или функциональный) интеграл следует применять именно к интегралам по определенной мере в заданном пространстве, хотя в русском языке он часто используется как синоним понятия интеграла по траекториям, при определенных условиях являющегося физической интерпретацией континуального интеграла в частном случае квантовой физики» [9, с.175].

Здесь [39] – работы Н.Винера 1923 и 1924 гг.

В руках Р.Фейнмана континуальный интеграл стал средством выражения (описания) амплитуды перехода квантовой системы из начального состояния в конечное.

Вернемся к самому алгоритму метода интегрирования по траекториям, разработанного Р.Фейнманом. Ключевой идеей, использующейся в этом методе, является представление о том, что квантовая частица одновременно движется по всем возможным траекториям (множеству мыслимых траекторий), а максимальная вероятность определенной траектории соответствует действительному пути, для которого вариация некой величины равна нулю. По мысли Р.Фейнмана, чтобы определить эту максимальную вероятность, нужно суммировать вклады всех возможных траекторий в полную амплитуду вероятности. Другими словами, Р.Фейнман постулировал, что амплитуда вероятности какого-либо события равна интегралу по траекториям, который берется по всем значениям потенциалов вдоль всех путей в каждой точке пространства-времени.

Как Р.Фейнман пришел к этой ключевой идее, лежащей в основе его метода интегрирования по траекториям? По аналогии с принципом Гюйгенса – Френеля. В 1678 г. Христиан Гюйгенс сформулировал принцип, согласно которому каждая точка фронта световой волны является источником вторичных (новых) световых сферических волн. В 1815 г. Огюстен Френель дополнил это утверждение Гюйгенса, введя представление о когерентности и интерференции элементарных волн. В результате принцип Гюйгенса, ныне называемый принципом Гюйгенса – Френеля, стал звучать следующим образом: каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией (суммированием фаз) этих волн. Рассуждая по аналогии, Р.Фейнман пришел к выводу, что максимальная вероятность траектории квантовой частицы определяется суммированием вкладов всех ее возможных траекторий. Отметим, что до Р.Фейнмана принцип Гюйгенса – Френеля использовал Эрвин Шредингер, автор знаменитого волнового уравнения Шредингера.

В.Э.Терехович в диссертации «Философско-методологические проблемы принципа наименьшего действия» [10] пишет: «После подсказки Дирака Ричард Фейнман в 1940-х годах в своей докторской диссертации [220] использовал ту же самую идею Гюйгенса, которая ранее помогла Шредингеру, и предложил новый подход к квантовой физике. Фейнман предположил, что квантовая частица одновременно движется по всем возможным траекториям, но волны вероятности гасятся в точке прибытия так, что максимальная вероятность падает на узкий пучок траекторий вокруг действительного пути, для которого вариация действия равна нулю» [10, с.49].

Этот же факт рассматривается в статье В.Э.Тереховича «Вероятностный и геометрический язык физики в контексте принципа наименьшего действия» [11]: «В 1942 г. Р.Фейнман [22] использовал идеи Х.Гюйгенса и О.Т.Френеля, ранее вдохновившие Э.Шредингера на его волновое уравнение, и предложил свою формулировку квантовой механики. Фейнман заменил классическое представление о движении тела по «одионочной» и уникальной траектории представлением о движении по бесконечному множеству мыслимых траекторий, что математически описывается функциональным интегралом по этим траекториям. Частица движется одновременно по всем возможным траекториям, но волны вероятности этих путей гасятся в конечной точке траектории так, что максимальная вероятность отвечает действительному пути, для которого вариация некой величины равна нулю» [11, с.84].

Исходные посылки процедуры интегрирования по путям известны также другим авторам. Так, В.Н.Мансуров в статье «О возможном релятивистском обобщении фейнмановского подхода к квантовой механике» [12] отмечает: «В 1948 г. Р.Фейнман предложил теперь хорошо известную третью формулировку квантовой механики [1]. Фейнмановская формулировка квантовой механики является, по существу, формулировкой принципа Гюйгенса на языке функционального интегрирования» [12, с.46].

Здесь [1] – оригинальная работа Р.Фейнмана, в которой он подробно изложил свой метод суммирования траекторий: Feynman R. Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics // Reviews of Modern Physics. – 1948. – Vol.20. – № 2. – P.367-387.

Кстати, в данной работе Р.Фейнман откровенно пишет о том, что он опирался на принцип Гюйгенса (мы приводим русский перевод фрагмента его статьи): «Принцип Гюйгенса в волновой оптике выглядит следующим образом: если амплитуда волны равна амплитуде, известной для данной поверхности, то амплитуду волны в близлежащей точке можно рассматривать как сумму вкладов всех точек поверхности». Далее в своей статье Р.Фейнман проводит аналогию между этой формулировкой принципа Гюйгенса и своей идеей об определении траектории квантовой частицы.

#### **4. Аналогия четвертая: упрощение метода диаграмм Фейнмана**

Известно, что важным этапом на пути создания общей теории относительности (теории гравитации) было открытие принципа эквивалентности. А.Эйнштейн открыл данный принцип в 1907 г., когда обнаружил аналогию между силами инерции и силами гравитации. Конкретно, А.Эйнштейн обратил внимание на сходство между двумя физическими процессами: движением в равномерно ускоренной системе координат и движением в однородном гравитационном поле. Принцип эквивалентности упрощал математические вычисления, производимые в рамках общей теории относительности (ОТО): стало ясно, что однородное гравитационное поле можно заменить равномерно ускоренной системой отсчета.

В исследованиях Р.Фейнмана, связанных с разработкой метода интегрирования по траекториям, который он дополнил графическим изображением траекторий частиц (диаграммами Фейнмана), также не обошлось без упрощений. В 1949 г. Джон Уилер, научный руководитель

Р.Фейнмана в период его пребывания в аспирантуре, ознакомил его со своей новой идеей, согласно которой все частицы эквивалентны электрону. Д.Уилер использовал теорию мировых линий немецкого математика Германа Минковского (1864-1909). Теория утверждала, что в четырехмерном пространстве-времени движение объектов должно описываться мировыми линиями, ввиду чего все процессы во Вселенной сводились к этим мировым линиям. Д.Уилер предположил, что мировая линия, соответствующая движению электрона в одном направлении, будет эквивалентна мировой линии, соответствующей движению позитрона (антиэлектрона) в другом направлении. По мысли Д.Уилера, позитрон можно рассматривать как электрон, который движется назад во времени (не из прошлого в будущее, а из будущего в прошлое).

Несмотря на экстравагантность этой идеи, она имела серьезные последствия. Р.Фейнман не согласился с мыслью Д.Уилера о том, что электроны являются основой всех частиц, но нашел продуктивным его предположение, постулирующее, что позитроны – это электроны, идущие из будущего в прошлое (если рассматривать сечения их мировых линий). Р.Фейнман догадался, что данное предположение позволяет упростить вычисления, производимые в его теории, призванной стать основой квантовой электродинамики.

Д.Гриббин и М.Гриббин в книге «Ричард Фейнман: жизнь в науке» [2] повествуют: «...В дерзкой идее Уилера содержался зачаток важной концепции, которую Фейнман впоследствии развил совсем в другом направлении. Это была мысль о том, что изменение направления движения электрона во времени эквивалентно изменению знака его заряда, так что электрон, который движется вперед во времени, - это позитрон, который движется назад во времени, и наоборот. Во всех квантово-механических вычислениях позитроны можно просто-напросто представить в виде электронов, которые движутся из прошлого в будущее, подобно

опережающим волнам в обычно пренебрегаемом решении уравнений Максвелла...» [2, с.85].

Сам Р.Фейнман в своей Нобелевской лекции [4] говорит об идеях своего научного руководителя: «Я не воспринял серьезно его идею о том, что все электроны эквивалентны. Однако я ухватился за его мысль о том, что позитроны можно представлять просто как электроны, идущие из будущего в прошедшее в обратном сечении их мировых линий. Вот это я и присвоил!» [4, с.36].

Таким образом, разрабатывая математический аппарат квантовой электродинамики, Р.Фейнман постулировал эквивалентность между электронами и позитронами (аналогию между этими частицами) точно так же, как А.Эйнштейн постулировал аналогию между силами инерции и силами гравитации в своей общей теории относительности. Еще раз подчеркнем, что эта аналогия была подсказана Р.Фейнману его научным руководителем Джоном Арчибальдом Уилером, который в дальнейшем займется астрофизической проблемой звезд, обладающих колоссальной массой, и введет понятие «черных дыр».

Анализируя последствия использования данной аналогии, известный отечественный ученый Ю.И.Манин в книге «Математика как метафора» [13] указывает: «Фантастическая мысль Уилера, что все электроны тождественны потому, что представляют собой мгновенные сечения запутанной в клубок мировой линии одного электрона, привела Фейнмана к изящному упрощению диаграммной техники вычислений в квантовой теории поля» [13, с.165].

## **5. Аналогия пятая: теоретическое описание полярона**

Р.Фейнман в монографии «Статистическая механика» [14] дает следующее определение полярона: «Электрон в ионном кристалле поляризует решетку в некоторой окрестности вокруг себя. Взаимодействие меняет

энергию электрона; кроме того, когда электрон движется, поляризационное состояние должно двигаться вместе с ним. Электрон, движущийся с сопутствующим ему искажением решетки, иногда называют поляроном. Его эффективная масса больше массы электрона. Наша задача состоит в вычислении энергии и эффективной массы такого электрона» [14, с.252].

По свидетельству Н.Н.Боголюбова – младшего [15], проблема полярона, то есть проблема электрона, движущегося вместе с упомянутым искажением решетки кристалла, представляла собой достаточно важную проблему физики твердого тела. «Она, - говорит автор, - стала своеобразной лабораторией, в которой создавались и опробовались новые методы квантовой физики перед тем, как они получили широкое применение в других ее областях. В качестве одного из наиболее ярких примеров можно привести метод функционального интегрирования, созданный Р.П.Фейнманом, испробованный на проблеме полярона и ставший впоследствии одним из основных методов квантовой теории поля и статистической механики» [15, с.60].

В 1955-1962 годах Р.Фейнман интенсивно занимался проблемой полярона и сумел вычислить энергетический спектр и эффективную массу полярона. Важным условием успешного решения проблемы явилось использование Р.Фейнманом техники континуального интегрирования (метода интегрирования по путям). Как же ученый догадался, что этот метод окажется полезным в физике твердого тела? Однажды он нашел статью Г.Фрелиха о поляронах в кристаллах галогенидов. Р.Фейнман обнаружил аналогию между электроном в поле фононов (колебаний кристаллической решетки) и частицей, взаимодействующей с полем мезонов – частиц, участвующих в сильном ядерном взаимодействии. На базе этой аналогии он решил: если я могу описать с помощью техники континуального интегрирования частицу, взаимодействующую с полем мезонов, то почему бы не применить ту же технику при исследовании электрона, взаимодействующего с колебаниями решетки?

Р.Р.Мухин в статье «Ричард Фейнман и Джулиан Швингер и физика конденсированных сред в Советском Союзе» [16] повествует: «По словам Фейнмана, он в конце октября 1954 года, сидя в библиотеке, случайно натолкнулся на статью Г.Фрелиха [106] о поляронах в кристаллах галогенидов. При этом Фрелих указывал, что решение проблемы поляронов сможет подсказать путь к разгадке проблемы сверхпроводимости, что заинтриговало Фейнмана, ведь эта нерешенная загадка тогда будоражила научное сообщество. **Фейнман увидел аналогию** между электроном в поле фононов и частицей, взаимодействующей с полем мезонов, и что здесь можно будет использовать развитую технику континуального интегрирования [82, р.404]. Для оценки континуальных интегралов Фейнман разработал вариационный принцип и применил его для вычисления энергетического спектра и эффективной массы полярона, отметим, при произвольной величине константы электрон-фононного взаимодействия [107]. Формализм Фейнмана имел определяющее значение для другой важной задачи – подвижности поляронов, которая была решена через несколько лет Фейнманом с соавторами в 1962 году [108]» [16, с.129].

Здесь [82] – Mechra J. *The Beat of a Different Drum*. – Oxford: Clarendon Press, 1994. – 637 p.

[107] – Feynman R.P. Slow electrons in a polar crystal // *Physical Review*. – 1955. – Vol.97. - № 3. – P.660-665.

[108] – Feynman R.P. et. al. Mobility of slow electrons in a polar crystal // *Physical Review*. – 1962. – Vol.127. - № 4. – P.1004-1017.

Далее мы переходим к описанию обстоятельств, при которых Р.Фейнман и его соотечественник Мюррей Гелл-Манн пришли к формулировке гипотезы о сохранении векторного тока в слабых взаимодействиях.

## 6. Аналогия шестая: открытие закона сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях

В статье [17] мы рассматривали вопрос о том, как Я.Б.Зельдович и С.С.Герштейн (1955) открыли закон сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях. Мы отмечали тот факт, что открытию данного закона помогла аналогия с электродинамикой. В частности, когда Я.Б.Зельдович и С.С.Герштейн обнаружили, что взаимодействие с пионом ( $\pi$ -мезоном) не меняет векторной константы  $\beta$ -распада нуклонов, они поняли, что здесь наблюдается аналогия с электрическим зарядом протона, который не изменяется, несмотря на взаимодействие с пионами. Отечественные ученые не могли пройти мимо этой аналогии, которая указывала на то, что эмпирически обнаруженный факт не является случайным, а имеет характер закономерности.

Примечательно, что Р.Фейнман и М.Гелл-Манн (1958) открыли закон сохранения векторного тока также благодаря аналогии, хотя и несколько другим путем. Этот путь подробно описывает С.С.Герштейн в статье «От бета-сил к универсальному взаимодействию» [18]: «Дело в том, что при  $\beta$ -распаде нейтрона последний в результате сильного взаимодействия оказывается окруженным «шубой» из  $\pi$ -мезонов, превращаясь, например, на короткое время в протон плюс отрицательно заряженный пион и обратно в нейтрон. Эти превращения, казалось бы, должны влиять на константу  $\beta$ -распада хотя бы потому, что нейтрон часть времени проводит в виде протона с  $\pi$ -мезоном. Но почему же она такая же, как для мюона, не обладающего сильным взаимодействием. Фейнман и Гелл-Манн высказали гипотезу, объясняющую этот факт. Они исходили из **аналогии** с электромагнитным взаимодействием. Почему электрический заряд протона, который часть времени проводит в виде нейтрона и положительно заряженного пиона, равен (по абсолютной величине) заряду электрона? Потому, что на это время протон передает свой

заряд пиону, и, таким образом, на расстояниях, значительно больших размеров протона с его пионной «шубой», заряд остается одним и тем же. Чтобы векторная константа  $\beta$ -распада не менялась под влиянием сильных взаимодействий, нужно было по **анalogии** с электрическим зарядом приписать пионам  $\beta$ -силы. Это сводилось к тому, что должен существовать с вполне определенной вероятностью  $\beta$ -распад заряженных пионов... Свое предположение Фейнман и Гелл-Манн назвали гипотезой сохранения векторного тока (Conserved Vector Current, CVC)» [18, с.11].

Об этом же сообщают Л.И.Липидус и Л.Б.Окунь в статье «Физика высоких энергий» [19]: «Известно, например, что из-за наличия так называемого виртуального облака  $\pi$ -мезонов, окружающего протон или нейтрон, изменяются магнитные свойства этих частиц, возникает аномальный магнитный момент. Однако не менее хорошо известно, что полный заряд протона или нейтрона при этом не меняется: у протона он равен заряду позитрона, который не обладает сильным взаимодействием, у нейтрона – нулю. Возникает вопрос: не обладает ли таким же свойством слабое взаимодействие, т.е. нет ли **анalogии** между  $\beta$ -распадным и электромагнитным взаимодействиями? Указание Фейнмана и Гелл-Манна на возможность существования такой **анalogии** было вызвано удивительной точностью, с которой совпадают константы распада  $\mu$ -мезона и векторного варианта  $\beta$ -распада. Это совпадение указывает на то, что константа векторного взаимодействия, подобно электрическому заряду, не меняется под действием сильного взаимодействия. На такую возможность еще в 1955 г. обратили внимание Герштейн и Зельдович. **Аналогия** между векторным  $\beta$ -распадным и электромагнитным взаимодействиями была использована Гелл-Манном для расчета поправок к разрешенным  $\beta$ -спектрам, возникающим за счет «слабого магнетизма» [19, с.652].

Весьма любопытно, что М.Гелл-Манн предложил схему эксперимента, предназначенного для проверки гипотезы о сохранении векторного тока, опять

же руководствуясь аналогией с электродинамикой. К.Нишиджима в книге «Фундаментальные частицы» [20] сообщает: «Исходя из аналогии между  $\beta$ -распадным взаимодействием и электродинамикой, Гелл-Манн [87] указал, что гипотезу о сохранении векторного тока можно проверить путем сравнения поправок первого порядка запрета к ферми-взаимодействию с такими поправками для электромагнитного взаимодействия...» [20, с.397].

## **7. Аналогия седьмая: от спиральности нейтрино к спиральности других элементарных частиц**

В 1956 г. американские физики Ц.Ли и Ч.Янг высказали гипотезу, что в слабых взаимодействиях может не сохраняться четность (симметрия, равноправие правого и левого). Они предложили провести эксперимент, с помощью которого можно было бы проверить эту гипотезу. Этот эксперимент провела в том же 1956 г. Ц.Ву – женщина, изучившая угловое распределение  $\beta$ -электронов от ядер поляризованного кобальта-60. В эксперименте, получившем название «опыт Ву», несохранение четности было установлено вполне однозначно, после чего в 1957 г. Ц.Ли и Ч.Янг получили Нобелевскую премию по физике.

Отечественный ученый Л.Д.Ландау, осмыслив эти результаты, указал на возможность существования двухкомпонентного (спирального) нейтрино, у которого спин направлен строго по импульсу или против импульса. Аналогичную идею сформулировали Ц.Ли и А.Салам (в дальнейшем А.Салам построит теорию, объединяющую электромагнитные и слабые взаимодействия, и также получит Нобелевскую премию).

Парадоксально, но еще в 1929 г. гипотеза спирального нейтрино выдвигалась Германом Вейлем (1885-1955), однако специалисты отнеслись к ней с большим недоверием. Ц.Ли в статье «Слабые взаимодействия и несохранение четности» [21] отмечает: «На возможность двухкомпонентной

релятивистской теории для частицы со спином  $\frac{1}{2}$  впервые указал Г.Вейль еще в 1929 г. Однако позже эта теория Вейля всегда отвергалась, так как в ней не сохранялась четность. В связи с последними открытиями такое возражение оказалось несостоятельным» [21, с.95].

Какие же последствия имела гипотеза спирального (двухкомпонентного) нейтрино, высказанная Л.Д.Ландау, Ц.Ли и А.Саламом? Она по аналогии навела Р.Фейнмана и М.Гелл-Манна на мысль о том, что и другие элементарные частицы, участвующие в слабом взаимодействии, являются спиральными. Р.Фейнман и М.Гелл-Манн предположили, что массивные частицы, участвующие в слабом взаимодействии, дают вклад в плотность энергии этого взаимодействия своими левыми спиральными компонентами, подобно тому, как нейтрино дают тот же вклад своими левыми спиральными компонентами. Эта аналогия помогла Р.Фейнману и М.Гелл-Манну найти универсальный закон слабого взаимодействия и установить, что это взаимодействие является суперпозицией векторного и аксиального токов (V-A-токов). Отметим, что Энрико Ферми, построивший в 1933 г. теорию бета-распада, полагал, что слабое взаимодействие представляет собой исключительно векторный ток.

С.С.Герштейн в статье «От бета-сил к универсальному взаимодействию» [18] пишет: «В 1956 г. Ли и Янг (отмеченные Нобелевской премией уже в 1957 г.) предположили, что в слабых взаимодействиях может нарушаться зеркальная симметрия. В связи с этим Л.Д.Ландау, а также независимо А.Салам и сами Ли с Янгом указали на возможность существования так называемого двухкомпонентного, или спирального, нейтрино, у которого спин направлен всегда строго по импульсу (или против импульса) частицы. Проведенные вскоре эксперименты подтвердили вторую возможность: спин нейтрона направлен против его импульса, т.е. нейтрино представляет собой левый «винт», в то время как антинейтрино – правый» [18, с.10].

«Гипотеза спирального нейтрино, - продолжает автор, - и стала той подсказкой, которая помогла найти универсальный закон слабого взаимодействия. Фейнман и Гелл-Манн предположили, что не только нейтрино (тогда считавшееся безмассовым), но и массивные частицы дают вклад в плотность энергии слабого взаимодействия своими левыми спиральными компонентами. В этом случае единственной возможностью для взаимодействия четырех фермионов остается произведение векторных токов, предложенное Ферми (1), за тем исключением, что входящие в них волновые функции заменяются их левыми спиральными проекциями. Такие произведения соответствуют суперпозиции векторного (V) и аксиального (A) токов, а сам закон получил название (V-A)-взаимодействия. По существу, похожие соображения привели к такому же закону Маршака и Сударшана, а также Сакураи» [18, с.10].

Об этой же аналогии Р.Фейнмана и М.Гелл-Манна сообщается в статье С.С.Герштейна «Великий универсал XX века» [22]: «Концепция спирального нейтрино казалась Ландау привлекательной еще и потому, что спиральное нейтрино должно было быть безмассовым. Это вроде бы согласовывалось с тем, что эксперименты по мере увеличения точности давали все более низкий верхний предел на массу нейтрино. Идея спирального нейтрино **подказала** Фейнману и Гелл-Манну гипотезу о том, что, может быть, и все другие частицы (с ненулевой массой) участвуют в слабом взаимодействии, как и нейтрино, своими левыми спиральными компонентами. (К тому времени было уже установлено, что нейтрино обладают левой спиральностью). Эта гипотеза привела Фейнмана и Гелл-Манна, а также Р.Маршака и Е.С.Г.Сударшана к открытию фундаментального (V-A) закона слабого взаимодействия, указавшего на аналогию слабых и электромагнитных взаимодействий и стимулировавшего открытие единой природы слабых и электромагнитных взаимодействий» [22, с.20-21].

## 8. Аналогия восьмая: попытка построить квантовую теорию гравитации

Летом 1948 г. Р.Фейнман отправился на личной машине в Альбукерке, взяв с собой Фримена Дайсона – британского ученого, которому суждено было доказать эквивалентность теоретических построений Р.Фейнмана и Дж.Швингера, содержащих перенормировку - способ устранения бесконечностей из квантовой электродинамики. После Альбукерке Ф.Дайсон намеревался добраться до Анн-Арбор (Мичиган), чтобы прослушать курс лекций Швингера, посвященных процедуре перенормировки. Во время путешествия ученые остановились в одном из отелей недалеко от Оклахома-Сити. Здесь, в отеле, Р.Фейнман рассказал коллеге о своих планах перенести технику континуального интегрирования из области электромагнетизма в область гравитации. Иначе говоря, Р.Фейнман считал возможным провести аналогию между электромагнитными и гравитационными взаимодействиями и проквантовать гравитацию так же, как он сделал это в квантовой электродинамике, применяя интегралы по траекториям.

П.Халперн в книге «Квантовый лабиринт» [5] пишет о беседе Р.Фейнмана с Ф.Дайсоном в упомянутом отеле: «...Их дискуссия повернула в сторону квантовой электродинамики, и Фейнман выразил надежду распространить свои методы на все известные силы, в конечном итоге достигнув единства, ускользнувшего от Эйнштейна. Если интеграл по траекториям работает для электромагнетизма, то почему бы не приложить его к ядерным взаимодействиям и гравитации? Ричард описал грандиозную перспективу, в которой набор диаграмм, отражающих все возможные траектории, позволит нанести на карту всё, что существует в природе» [5].

В 1957-1962 годах Р.Фейнман занимался разработкой квантовой теории гравитации, пытаясь описать взаимодействие безмассового поля гравитонов (квантов гравитационного поля, обладающих спином, равным 2) с тензором энергии-импульса вещества. Эти исследования Р.Фейнмана, по существу,

представляли собой реализацию плана распространить на гравитацию метод интегрирования по путям, который хорошо зарекомендовал себя в квантовой электродинамике. Того плана, с деталями которого ученый поделился с Ф.Дайсоном в 1948 г. в одном из отелей вблизи Оклахома-Сити.

Отметим, что понятие кванта гравитационного поля было введено советским физиком Матвеем Петровичем Бронштейном (1906-1938), который в 1935 г. проквантовал гравитационное поле по аналогии с методом квантования электромагнитного поля. Эти результаты были изложены в диссертации М.П.Бронштейна, защищенной 22 ноября 1935 г. (оппонентами во время защиты выступали И.Е.Тамм и В.А.Фок). Оценивая работу М.П.Бронштейна, В.А.Фок говорил: «Большой интерес имеет здесь аналогия между волнами гравитационными и электромагнитными. Эта аналогия дала возможность использовать аппарат электродинамики, но, помимо этого факта, она представляет интерес с физической стороны» [23, с.1102]. Когда присутствовавший на научном заседании В.К.Фредерикс задал диссертанту вопрос: «В чем может проявиться физический эффект испускания гравитационных волн?», М.П.Бронштейн ответил: «В изменении вращения двойной звезды» [23, с.1103].

Р.Фейнман, приступив к построению квантовой теории гравитации, не скрывал того, что он намерен построить ее по аналогии с квантовой электродинамикой, широко используя уже апробированный метод континуального интегрирования. Полученные им результаты отражены в лекциях по гравитации, прочитанных в течение 1962-1963 годов в Калифорнийском технологическом институте (Пасадена, США). Эти лекции аккуратно записаны его слушателями Ф.Б.Мориниго и У.Г.Вагнером, благодаря которым мы имеем сегодня замечательную книгу «Фейнмановские лекции по гравитации» [24].

Джон Прескилл и Кип Торн в предисловии к этой книге описывают аналогию Р.Фейнмана: «...Мы можем получить классическую

электродинамику Максвелла, исходя из того наблюдения, что фотон является безмассовой частицей спина 1. Вид квантовой теории безмассовой частицы со спином 1, взаимодействующей с заряженной материей, в большой степени ограничивается фундаментальными принципами, такими, как Лоренц-инвариантность и сохранение вероятности. Самосогласованная версия квантовой теории – квантовая электродинамика определяется в классическом пределе классическими полевыми уравнениями Максвелла. Ободренный этой **анalogией**, Фейнман рассматривает квантовую теорию гравитации «просто как другую квантовую теорию поля», такую, как квантовая электродинамика» [24, с.16-17].

Следующие высказывания Р.Фейнмана, содержащиеся в [24], со всей очевидностью демонстрируют способ (стратегию), посредством которой он собирался создавать теорию тяготения: «...Наша программа состоит в том, чтобы построить теорию со спином гравитона 2 по аналогии с другими теориями поля, которые у нас есть» [24, с.92]. «...Давайте продвинемся дальше и сделаем предположения о правильной теории по аналогии с электродинамикой» [24, с.92]. Учитывая, что спин фотона (кванта электромагнитного поля) равен единице, а гравитона – двойке, Р.Фейнман говорит: «Мы подходим к теории со спином 2, исходя из аналогий с теорией со спином 1; таким образом, мы без объяснений предполагаем существование гравитационных плоских волн; так как плоские волны фотона представляются полюсами пропагатора, и пропагатор гравитона также имеет полюсы...» [24, с.100-101]. Подводя некоторые итоги, ученый отмечает: «Мы достаточно преуспели в нашей задаче, которую мы поставили перед собой в самом начале, построить полевою теорию гравитации по **анalogии** с другими хорошо известными полевыми теориями...» [24, с.141].

К сожалению, Р.Фейнману не удалось достичь поставленной цели – разработать квантовую теорию гравитации, и эта задача остается нерешенной и в наше время (общая теория относительности А.Эйнштейна по-прежнему не

объединена с квантовой механикой). Обращая внимание на этот факт, итальянский физик, специалист в области теории гравитации, Карло Ровелли в книге «Нереальная реальность» [25] отмечает: «Фейнман пытался адаптировать к общей теории относительности приемы, которые он разработал для электронов и протонов, но безуспешно: электроны и протоны – это кванты в пространстве, а квантовая гравитация – это нечто иное: недостаточно описать «гравитоны», движущиеся в пространстве, квантоваться должно само пространство» [25].

Однако, несмотря на это, исследования Р.Фейнмана в данном направлении оказались весьма плодотворными и стимулирующими. После того, как Р.Фейнман (по совету М.Гелл-Манна) решил положить в основу теории гравитации взятую из совсем другой физической области калибровочную теорию Янга-Миллса и попытался проквантовать ее, намеченные им идеи и приемы дали замечательный эффект. В 1967 г. российские физики Л.Д.Фаддеев и В.Н.Попов (а также Брайс де Витт), основываясь на результатах Р.Фейнмана, нашли способ квантования полей Янга-Миллса. Они перенесли на произвольный петлевой порядок метод квантования полей Янга-Миллса, разработанный Р.Фейнманом для однопетлевого приближения. В свою очередь, математический аппарат, разработанный ими в этих исследованиях, позволил Герарду Хоофту математически строго доказать перенормируемость теории Вайнберга – Салама – Глэшоу (теории, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия). В 1999 г. Г.Хоофт был удостоен Нобелевской премии.

Д.Прескилл и К.Торн в предисловии к книге [24] говорят о влиянии идей Р.Фейнмана по гравитации на результаты Л.Д.Фаддеева и В.Н.Попова, связанные с обобщением метода квантования полей Янга-Миллса на произвольный петлевой порядок: «Стоит заметить, что собственная техника Фейнмана интегрирования по траекториям оказала (имела – Н.Н.Б.) решающее значение для получения этой общей формулировки и что наиболее полные

результаты Де Витта и Фаддеева – Попова явным образом были вызваны построением Фейнмана для однопетлевого приближения» [24, с.40-41].

## **9. Аналогия девятая: объяснение экспериментов по столкновению электронов с протонами в Стэнфордском линейном ускорителе**

В 1961 г. М.Гелл-Манн и – независимо от него – израильский физик-теоретик Ювал Неэман, используя средства математической теории групп, предложили классификацию (систематику) элементарных частиц, число которых к тому времени достигло значительной величины. Эта классификация напоминала периодическую таблицу Д.И.Менделеева, позволившую выявить скрытые закономерности в мире химических элементов, имеющих разные свойства. Тот факт, что частицы, взаимодействуя друг с другом, рождались и уничтожались, превращаясь в новые разновидности частиц, свидетельствовал о том, что на самом деле они не элементарны. В 1963 г. М.Гелл-Манн выдвинул предположение, что адроны состоят из кварков – частиц, обладающих дробными электрическими зарядами. Примерно в это же время, руководствуясь похожими соображениями (превращением одних частиц в другие), Р.Фейнман сформулировал эквивалентную гипотезу, назвав базовые частицы партонами.

В 1968 г. команда исследователей из МТИ и лаборатории Стэнфордского линейного ускорителя частиц (SLAC) изучала рассеяние электронов на протонах. Данную команду возглавляли Джером Фридман, Генри Кендалл и Ричард Тейлор. Они получили результаты, которые не могли объяснить. Когда Р.Фейнман посетил лабораторию SLAC и ознакомился с этими результатами, в том числе с графиками, натолкнувшись стэнфордского теоретика Джеймса Бьеркена на идею скейлинга (масштабной инвариантности), Р.Фейнман понял, как следует интерпретировать эти данные. Ученый вспомнил о своей гипотезе партонов и провел аналогию между этой гипотезой и экспериментальными

результатами, полученными Д.Фридманом, Г.Кендаллом и Р.Тейлором. Р.Фейнман заявил, что картина рассеяния электронов на массивных частицах протонах говорит о том, что эти частицы состоят из партонов, существование которых он предположил ранее (исходя из факта превращения одних частиц в другие).

Кроме того, Р.Фейнман провел аналогию между картиной, возникающей при облучении протонов электронами высоких энергий, и картиной, которая появляется на экране радиолокационных станций (радаров) при разрушении самолета или ракеты. В.С.Барашенков в книге [26] говорит об этой аналогии Р.Фейнмана: «...В радиолокации – при слежении за летящим самолетом отраженный луч приносит сведения о его размерах и скорости. Оператор на экране видит четкую светящуюся точку. В опыте с рассеянием очень жестких электронов получилось иначе – вместо четкой точки на экранах приборов было видно размытое пятно. Правда, в опыте использовались не светящиеся экраны, как это делал когда-то Резерфорд при просвечивании атома, а более сложные регистрирующие приборы, но все равно после обработки с помощью ЭВМ их показания в виде точек и пятен можно вывести на экран телевизора. И они получались не такими, как это должно быть для монолитного нуклона. В чем тут дело, первым понял американский физик Р.Фейнман» [26, с.66-67].

«Так вот, - продолжает В.С.Барашенков, - анализируя результаты новых опытов по рассеянию электронов, Фейнман использовал **анalogию** с радиолокацией. Когда самолет или ракета разваливаются на куски, к оператору следящей радиолокационной станции приходит отражение от каждого из них – целый набор отраженных лучей, и вместо яркой точки он видит на экране размазанное световое пятно. В своей статье Фейнман привел пример с роем пчел: близорукий человек видит его как единый темный ком, а наблюдатель с острым зрением различает множество снующих насекомых. Таким образом, сделал вывод ученый, нуклон тоже является роем каких-то очень мелких частичек. Из них состоит его «кern» и мезонная «шуба». Эти

частицы стали называть партонами – от английского слова «парт», то есть часть» [26, с.67-68].

## **10. Аналогия десятая: моделирование адронных струй с помощью фрактальных деревьев**

В 1970-х годы американский математик Бенуа Мандельброт возродил идеи и методы Гастона Жулиа и Пьера Фату, которые изучали сложные множества, ныне называемые фрактальными. Углубившись в эту математическую область, Б.Мандельброт нашел в арсенале «почти забытых» результатов такие вещи, как размерность Хаусдорфа, ковер Серпинского, множество Кантора, понятие самоподобия и т.д. Американский ученый выяснил, что аппарат фракталов пригоден для описания самых разных природных явлений и процессов: броуновского движения, тенденций на фондовой бирже, распределения галактик в космическом пространстве, математических функций, не имеющих производных. Парадоксально, но до исследований Б.Мандельброта никто из нас не предполагал, что живет во «фрактальном» мире.

По справедливому замечанию М.Шредера, автора книги «Фракталы, хаос, степенные законы» [27], «как выяснилось, все эти годы мы жили с фрактальными артериями неподалеку от фрактальных речных систем, собирающих влагу со склонов фрактальных гор под фрактальными облаками и катящих свои воды к фрактальным берегам морей и океанов. Но, как и мольерову мещанину во дворянстве, нам недоставало надлежащей прозы – существительного *фрактал* и прилагательного *фрактальный*, которые мы обрели благодаря Бенуа Мандельброту» [27, с.18-19].

Неудивительно, что, ознакомившись с концепцией Б.Мандельброта, Р.Фейнман (1979) нашел аналогию между фрактальными деревьями и адронными струями (ливнями), образующимися при столкновении частиц

высоких энергий. Независимо от него эту же аналогию обнаружил Г.Венециано, один из первооткрывателей теории струн, т.е. струнной трактовки элементарных частиц. В результате открылась возможность для переноса аппарата фрактальной математики в физику ядерных взаимодействий (физику адронов). Эти идеи Р.Фейнмана и Г.Венециано подхватил отечественный физик Игорь Михайлович Дремин, заведующий сектором физики высоких энергий отдела теоретической физики Физического института им. П.Н.Лебедева РАН.

Упоминание об аналогии Р.Фейнмана можно найти в знаменитой книге Б.Мандельброта «Фрактальная геометрия природы» [28]: «Фейнман пишет, что благодаря фрактальным деревьям он смог представить себе и смоделировать «струи», образующиеся при столкновениях частиц очень высоких энергий. Эту идею исследовал Дж.Венециано, о чем он сообщает в отчетах CERN» [28, с.221].

И.М.Дремин в статье «Множественное рождение частиц и квантовая хромодинамика» [29] приводит аргументы в пользу фрактального описания партонных ливней (адронных струй), изучавшихся Р.Фейнманом и не только им: «...Самоподобная структура партонного ливня должна приводить к определенной геометрической картине – фрактальному распределению частиц в доступном им фазовом пространстве [126]. Понятие о фрактальности позволяет приписать четкие количественные характеристики процессу, связанные с его фрактальными и мультифрактальными (Реньи) размерностями» [29, с.566].

Здесь [126] – Дремин И.М. // Письма в ЖЭТФ. – 1987. – Том 45. – С.505.

Сведения об истории проникновения идеи фрактальности в физику адронов можно также почерпнуть из работы А.В.Батунина «Фрактальный анализ и универсальность Фейгенбаума в физике адронов» [30].

## 11. Заключение

Можно ли найти в научном наследии Р.Фейнмана размышления о той мыслительной операции, которой он столь часто пользовался при формулировке своих идей, - операции аналогии? Да, Р.Фейнман прекрасно понимал значение этой интеллектуальной стратегии в научном мышлении и оставил следующее высказывание о ней, которое мы заимствуем из книги Ю.С.Салина [31]: «...Мы просто обязаны, мы вынуждены распространять всё, что мы уже знаем, на как можно более широкие области, выходить за пределы постигнутого. Опасно? Да. Ненадежно? Да. Но ведь это единственный путь прогресса. Хотя этот путь неясен, только на нем наука может оказаться плодотворной» [31, с.134].

Неутомимый генератор новых идей, Р.Фейнман оказал значительное влияние на формирование и развитие самых разных областей физики: от квантовой электродинамики и статистической физики до физики твердого тела, теории сверхпроводимости и теории сверхтекучести. Примечательно, что отечественный физик А.А.Абрикосов, награжденный в 2003 г. Нобелевской премией за создание теории сверхпроводников II рода, создал эту теорию еще в 1953 г., но смог опубликовать лишь в 1957. Задержка была связана с тем, что Л.Д.Ландау не одобрял идею А.А.Абрикосова о том, что магнитное поле проникает в сверхпроводник II рода в виде квантованных вихревых нитей. Молодой ученый получил одобрение Л.Д.Ландау лишь после того, как вышла статья Р.Фейнмана, постулирующая существование квантованных вихрей в сверхтекучем жидком гелии.

В своей Нобелевской лекции «Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка» [32] А.А.Абрикосов говорит: «Результаты по существованию вихревой решетки я получил в 1953 г., но их публикация была отложена из-за несогласия Ландау с самой идеей моей работы. Лишь после того, как Р.Фейнман опубликовал свою статью по вихрям в сверхтекучем гелии [9], и

Ландау принял идею вихрей и согласился с моим выводом, я опубликовал свою статью в 1957 г.» [32, с.1238]. Таким образом, Р.Фейнман (невольно) способствовал публикации работы А.А.Абрикосова, которая принесла ему Нобелевскую премию по физике.

Знаменитые диаграммы Р.Фейнмана и его метод интегралов по траекториям сыграли неожиданную роль в разработке советской термоядерной (водородной) бомбы. В 1946 г. И.И.Гуревич, Я.Б.Зельдович, И.Я.Померанчук и Ю.Б.Харитон предложили проект термоядерной бомбы, получивший название «труба». В этом проекте длинный цилиндр наполнялся дейтерием (D). На одном конце трубы помещался тритиевый запал, который зажигался тем или иным способом и создавал очень высокую температуру. Далее по трубе распространялась взрывная волна реакции  $D + D$ . Научная группа Л.Д.Ландау провела сложный математический расчет (расчет коэффициента комптонизации), показавший реализуемость «трубы». В частности, данная группа установила, что в «трубе» баланс энергии будет положительным, то есть энергия, возникающая за счет ядерных реакций, будет превосходить энергию, вылетающую из системы.

Однако молодые ученые Б.Л.Иоффе и А.П.Рудик, проверяя расчет группы Л.Д.Ландау, обнаружили, что он неверен и, следовательно, создать бомбу на основе «трубы» невозможно. Именно после этого А.Д.Сахаров предложил свою «слойку», выступавшую в качестве альтернативы «трубе». Интересно, что Б.Л.Иоффе и А.П.Рудик установили ошибочность вычислений упомянутой научной группы благодаря тому, что они (Иоффе и Рудик) использовали диаграммную технику Р.Фейнмана.

Б.Л.Иоффе в статье «Кое-что из истории атомного проекта в СССР» [33] вспоминает: «...Работать начали мы с Рудиком. Сначала нам надо было проверить отчет Ландау, Лифшица, Халатникова и Дьякова, в котором было вычислено сечение комптоновского рассеяния на электроны в плазме. Проверая его, мы обнаружили, что расчет неверен. Нам помогло то, что мы

работали ковариантно, в фейнмановской технике и вычисляли сразу сечение рассеяния на движущемся электроны, тогда как Ландау и другие получали его лоренц-преобразованием из сечения на покоящемся электроны и при этом ошиблись» [33, с.72]. Автор добавляет: «...Мы были одной из немногих групп (если не единственной) в нашей стране, которые в то время владели фейнмановской техникой, а она была очень полезна для вычисления коэффициента комптонизации» [33, с.71].

### Литература:

1. Глик Дж. Гений. Жизнь и наука Ричарда Фейнмана. – М.: изд-во «Манн, Иванов и Фербер», 2018. – 592 с.
2. Гриббин Д., Гриббин М. Ричард Фейнман: жизнь в науке. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 288 с.
3. Сабадель М. Когда фотон встречает электрон. Фейнман. Квантовая электродинамика. – М.: изд-во «Де Агостини», 2015. – 176 с.
4. Фейнман Р. Развитие пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики // Успехи физических наук. – 1967. – Том 91. - № 1. – С.29-48.
5. Халперн П. Квантовый лабиринт. Как Ричард Фейнман и Джон Уилер изменили время и реальность. – М.: «Эксмо», 2017. – 352 с.
6. Медведев Б.В., Ширков Д.В. П.А.М. Дирак и становление основных представлений квантовой теории поля // Успехи физических наук. – 1987. - Том 153. - № 1. - С.59-104.
7. Краусс Л. Почему мы существуем? – М.: «Альпина нон-фикшн», 2019. – 420 с.
8. Зинн-Жюстен Ж. Континуальный интеграл в квантовой механике. – М.: «Физматлит», 2010. – 360 с.

9. Жидков Е.П., Лобанов Ю.Ю. Метод приближенного континуального интегрирования в задачах математической физики // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1996. – Том 27. - № 1. – С.173-242.
10. Терехович В.Э. Философско-методологические проблемы принципа наименьшего действия // диссертация на соискание ученой степени кандидата философских наук. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2013. – 224 с.
11. Терехович В.Э. Вероятностный и геометрический язык физики в контексте принципа наименьшего действия // Философия науки. – 2013. - № 1 (56). – С.80-92.
12. Мансуров В.Н. О возможном релятивистском обобщении фейнмановского подхода к квантовой механике // Вестник Московского университета. – 1968. - № 6. – С.46-53.
13. Манин Ю.И. Математика как метафора. – М.: МЦНМО, 2008. – 400 с.
14. Фейнман Р. Статистическая механика. – М.: «Мир», 1975. – 407 с.
15. Боголюбов Н.Н. (младший). Проблемы квантовой теории поля в трудах академика Н.Н.Боголюбова и его последователей // сборник «Воспоминания об академике Н.Н.Боголюбове». – М.: МИАН, 2009. – С.52-64.
16. Мухин Р.Р. Ричард Фейнман и Джулиан Швингер и физика конденсированных сред в Советском Союзе // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Том 26. - № 5. – С.113-141.
17. Новиков Н.Б. Я.Б.Зельдович – творец удивительных аналогий // Аллея науки. – 2022. – Том 1. - № 2 (65). – С.351-374.
18. Герштейн С.С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа. – 2010. - № 1. – С.3-14.
19. Лapidус Л.И., Окунь Л.Б. Физика высоких энергий // Атомная энергия. - 1959. – Том 6. - № 6. – С.648-656.
20. Нишиджима К. Фундаментальные частицы. – М.: «Мир», 1965. – 462 с.
21. Ли Ц. Слабые взаимодействия и несохранение четности // Успехи физических наук. – 1958. – Том 66. - № 1. – С.89-97.

22. Герштейн С.С. Великий универсал XX века // Природа. – 2008. - № 1. – С.15-33.
23. Горелик Г.Е. Матвей Бронштейн и квантовая гравитация. К 70-летию нерешенной проблемы // Успехи физических наук. – 2005. – Том 175. - № 10. – С.1093-1108.
24. Фейнман Р.Ф., Мориниго Ф.Б., Вагнер У.Г. Фейнмановские лекции по гравитации. – М.: «Янус-К», 2000. – 296 с.
25. Ровелли К. Нереальная реальность. Путешествие по квантовой петле. - Санкт-Петербург: изд-во «Питер», 2020. – 304 с.
26. Барашенков В.С. Вселенная в электроде. – М.: «Детгиз», 1988. – 287 с.
27. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
28. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
29. Дремин И.М. Множественное рождение частиц и квантовая хромодинамика // Успехи физических наук. – 2002. - Том 172. - № 5. - С.551-571.
30. Батунин А.В. Фрактальный анализ и универсальность Фейгенбаума в физике адронов // Успехи физических наук. – 1995. – Том 165. - № 6. – С.645-660.
31. Салин Ю.С. К истокам геологии. – Хабаровск: Хабаровское книжное издательство, 1989. – 304 с.
32. Абрикосов А.А. Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка // Успехи физических наук. – 2004. – Том 174. - № 11. – С.1234-1239.
33. Иоффе Б.Л. Кое-что из истории атомного проекта в СССР // Сибирский физический журнал. – 1995. - № 2. – С.67-87.