

**Российская Академия Наук
Институт философии**

**ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
(тридцать лет спустя)**

Москва, 1995

ББК 22.382

Ф 56

Ответственный редактор
доктор филос. наук *Ю.Б.Молчанов*

Рецензенты:
доктора филос.наук *Э.П.Андреев, В.А.Смирнов*

Ф-56 **Философские проблемы физики элементарных частиц (тридцать лет спустя). - М., 1995. - 217с.**

Статьи данного труда касаются различных аспектов мировоззренческих и методологических проблем современной физики элементарных частиц.

Рассматривается эволюция представлений о структуре микрообъектов, о закономерностях их взаимодействий и логико-гносеологическая проблематика. Дается оценка перспективы научно-методологических подходов к рассмотрению соотношения геометрии и физики в концептуальных системах А.Эйнштейна, А.Пуанкаре и современных исследователей.

Анализируются различные аспекты пространственно-временных отношений, связанные с фактором неопределенности, симметрией и обобщениями различных концепций пространственно-временного допланковского уровня и с развитием идей теории суперструн.

Проведен анализ принципа причинности в физике микромира в свете проблематики ЭПР-парадокса и теоремы Белла.

ISBN 5-201-01868-8

©ИФРАН, 1995

Предисловие

Физика элементарных частиц находится на переднем крае фронта исследований структуры материи. Современное движение познания в более глубокую сущность вещей, к новому уровню строения материи связано с ломкой прежних физических представлений и развитием новых взглядов на сущность, структуру и закономерность как взаимодействий физических объектов на новом уровне, так и самих физических теорий.

Более тридцати лет назад сектором философских вопросов естествознания Института философии АН СССР была подготовлена и опубликована книга "Философские проблемы физики элементарных частиц" (Изд-во АН СССР, М., 1963). Редакторами книги являлись известные советские философы И.В.Кузнецов и М.Э.Омельяновский. В ней рассматривались мировоззренческие и методологические проблемы, поставленные на повестку дня развитием физики высоких энергий или, иначе говоря, физики элементарных частиц. Участие в создании книги приняли многие советские физики и философы. Книга получила положительные отзывы в нашей стране и за рубежом. В частности, она была в 1965 г. переведена и опубликована в США.

Коллектив авторов представляемой вниманию читателей книги, продолжая развивать это направление исследований, стремился сделать новый шаг вперед в этом направлении, поскольку за истекшие годы проблематика в этой области частично изменилась, а там, где она осталась в относительно неизменном виде, значительно обогатилась по своему содержанию, что настоятельно требует повторного возвращения к ее рассмотрению.

Статьи данного коллективного труда касаются различных аспектов мировоззренческих и методологических проблем современной физики элементарных частиц. Они затрагивают многие стороны глубинных проблем микромира и знакомят читателей с современным состоянием дискутируемых вопросов. Здесь рассматривается эволюция представлений о структуре микрообъектов, о закономерностях их взаимодействий, о роли и значении новых физических и философских концепций, связанных с планковским уровнем организации материи и представляющих собой обобщение концепций допланковского уровня.

Обсуждается проблема физической реальности квантового и доквантового мира применительно к вопросам интерпретации квантовой механики, а также вопросы, связанные с анализом понятий состояния, вероятности и причинности в различных аспектах исторического развития физического познания.

Кроме этих вопросов, которые с известной долей условности можно назвать "традиционными", вышли на передний план обсуждений также вопросы о "скрытых параметрах" и "ЭПР-парадоксе" (вопросы, поставленные новейшими обсуждениями "неравенств Белла", а именно, об "отложенном выборе" и "множественности миров", о роли и значении "калибровочных преобразований", "струн", "кварков" и т.д.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ НОВОЙ - ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Хороший пример того, насколько глубоко основатели и творцы современной физической науки чувствовали тонкую диалектику локального и глобального, показывает следующая история, рассказанная В.Гейзенбергом в его творческой автобиографии, совершенно не случайно названной именно "Часть и целое". Большой любитель дальних пешеходных прогулок, он был приведен однажды Н.Бором к развалинам старого замка на берегу моря. Полюбовавшись вместе зеленью растительности, пробывавшейся между старых камней, и бликами солнца в волнах, Бор сказал Гейзенбергу: "Сейчас я скажу всего несколько слов. Ни один камень, ни одна веточка за это время не изменятся. Блеск солнца в волнах также останется тем же самым. Но все восприятие этого места полностью изменится". И после короткой паузы: "Это - Эльсинор. Здесь жил Гамлет". Эффект был действительно потрясающим.

История эта является, по-видимому, почти дзенским коаном, настраивающим даже эмоциональное восприятие современного исследователя именно на "прислушивание" к таким аспектам физической науки, которые до сих пор разрабатывались только фрагментарно, а еще чаще - просто оставались интересными и оригинальными физическими идеями, довольно слабо связанными с систематическим, концептуальным построением физики как научной теории. Сейчас, однако, становится ясным, что наиболее глубокие и фундаментальные физические понятия и идеи всегда связаны и с некоторым нетривиальным подходом к проблеме локального и глобального, целого и части в этой науке.

Введение калибровочных полей

Если мы хотим придать квантовой системе некоторую новую локальную динамическую степень свободы - ввести ее локальное динамическое взаимодействие с некоторым новым физическим полем, нам вовсе не обязательно вводить это поле с самого начала в основные динамические законы - уравнения

движения теории (или соответствующий им лагранжиан, характеризующий всю динамику интересующей нас системы). Мы можем ввести новые, добавочные полевые степени свободы любой квантовой системы и на некоторой последующей стадии ее динамического исследования, заставив локально изменяться от точки к точке пространственно-временного континуума фазу ее полной волновой функции. Такие локальные, определенным образом согласованные друг с другом - "координированные" по некоторому теоретико-групповому "закону" изменения фазы динамически, оказывается, полностью эквивалентны "включению" в нашей системе совершенно нового локального векторного поля, как бы "компенсирующего" своим действием локальные изменения фаз волновой функции (поэтому калибровочные поля часто и называют "компенсирующими"). Эта фундаментальная физическая идея¹ и лежит в наши дни в основе всех современных теорий сильных (ядерных) и "электрослабых" взаимодействий на уровне элементарных частиц.

Подобного рода важную локальную инвариантность физических систем в качестве нового фундаментального динамического принципа физики использовал впервые еще А.Эйнштейн - при создании общей теории относительности. Это и позволило ему локально трактовать в принципе эквивалентности поле тяготения чисто кинематически - как переход в некоторую новую, локальную ускоренную (относительно исходной) систему отсчета. Тысячи и тысячи физиков многократно, но только чисто формально осуществляли переход (в конкретных расчетах) от одной калибровки волновой функции к другой, обусловленный включением внешнего электромагнитного поля. Но только Ч.Янг и Р.Миллс догадались в 1954 г., что всегда и повсюду любое изменение фазы волновой функции квантовых систем должно иметь место только локально и поэтому может распространяться только от одной окрестности точки к другой ее окрестности. А на языке квантовой теории поля это и означает появление совершенно новой динамической степени свободы, некоторого нового векторного поля нулевой массы.

До Ч.Янга и Р.Миллса считалось, что координированное (например, одинаковое) изменение фазы волновой функции можно пр извести сразу - одновременно во всех точках пространства - и даже в таких, которые отделены друг от друга пространственно - подобным интервалом. Но это явно противоречит

¹ Янг Ч., Миллс Р. Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность // Элементарные частицы и компенсирующ. поля. М., 1964. С. 28.

исследуемому нами в этом параграфе фундаментальнейшему физическому принципу локальности - принципу близкодействия, являющемуся, фактически, уточненной современной топологической экспликацией философского принципа причинности. Здесь надо особо подчеркнуть, что в современной его трактовке именно локальность изменения фаз волновой функции квантовых систем ведет к появлению совершенно новых типов полевых взаимодействий - калибровочных. Глобальные свойства симметрии волновых функций в целом предполагают трансформации их, одинаковые (и постоянные) во всех точках пространства и времени, и не дают новых "сил" локального типа. Если же в различных пространственно-временных точках трансформации фаз волновой функции квантовой системы будут независимы и к тому же изменяться по определенным теоретико-групповым законам, это и будет локальная калибровочная симметрия, совершенно эквивалентная динамически введению нового локального безмассового векторного-компенсирующего эти изменения фаз волновой функции (калибровочного) поля.

Конечно, калибровочные "силы" не являются поэтому, строго говоря, совсем уж классически "локальными" - ведь они всегда обусловлены некоторой целостной, глобальной волновой функцией всей исследуемой квантовой системы. В каком-то смысле они, по-видимому, даже представляют собой промежуточный, гибридный тип "сил" - и не совсем локальных, но и не совсем уж глобальных. Более того, они как бы осуществляют "непрерывный переход" от чисто локальных взаимодействий (каковыми являются, например, обычные электромагнитные "силы", на которых впервые и была, как известно, обнаружена калибровочная инвариантность полной волновой функции квантовых объектов) к взаимодействиям системного, глобально-целостного типа, о которых подробно речь пойдет в следующем параграфе. Калибровочные поля, таким образом, позволяют провести наиболее основательный и тщательный анализ² сложного взаимоотношения локальных и глобальных свойств в наиболее общих типах динамических взаимодействий, изучаемых современной физикой, - взаимодействий, имеющих место как на очень малых расстояниях, внутри адронов, так и протекающих на огромных дистанциях типа межгалактических расстояний.

Именно калибровочные (компенсирующие) поля, как уже говорилось выше, наиболее глубоко вскрывают некоторую со-

² Коноплева Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. М., 1972.

вершенно новую, вообще говоря, уже обобщенно-пространственную, локальную природу внутреннего единства всех видов взаимодействия элементарных частиц между собой - сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных. Как известно, и эксперимент, и теория физических процессов при очень больших энергиях показывают все более и более явно в последние годы, что ставшее уже традиционным разделение взаимодействий элементарных частиц по их силе имеет место только в области достаточно небольших энергий. С ростом же энергий слабые взаимодействия становятся все сильнее и сильнее и могут даже сравняться с электромагнитными, а сильные взаимодействия - "слабеют" и могут по порядку величины приблизиться к "усилившимся" при больших энергиях электромагнитным. При этом это может, правда, только при совершенно гигантских концентрациях энергии на отдельных частицах в 10^{18} ГэВ - таких энергий пока что не наблюдалось даже в космических лучах, самом высокоэнергичном источнике излучений, известном человеку.

Подобная, прямо скажем, совершенно дикая концентрация энергий на отдельных элементарных корпускулах имела место, по-видимому, только в самые первые доли секунды после гигантского "Большого Взрыва", породившего все многообразие известных нам сейчас объектов Вселенной. Так что глубокие теоретические проблемы внутреннего единства природы всех взаимодействий элементарных частиц переходят здесь в не менее глубокие космологические проблемы их общего, единого исторического происхождения: калибровочные поля, оказывается, совсем не изменяют своей внутренней "природы" в совершенно колоссальном диапазоне энергий и промежутков времени, меняя, правда, иногда спонтанно свойства своей внутренней симметрии, что приводит при определенных критических значениях энергий, расстояний и промежутков времени к их довольно сильным трансформациям, перестройкам в отношении силы, радиуса действия и т.п. Но глубокая внутренняя - локальная природа калибровочных взаимодействий остается при этом неизменной.

Такие аспекты поведения калибровочных полей позволяют обнаружить некоторые новые и - очень глубокие стороны общенно-геометрического единства физики элементарных частиц и, например, теории твердого тела, квантовых жидкостей, плазмы и статистической физики вообще. Это обеспечивает весьма и весьма плодотворное взаимообогащение этих разделов современной физики унифицирующими идеями, едиными методами и обобщающими концепциями.

Так, еще в квантовой электродинамике "реальный" физический вакуум (в частности, и благодаря свойствам калибровочной инвариантности электромагнитных взаимодействий) оказывался подобным очень ярко выраженному "диэлектрику", весьма и весьма сильно "экранирующему" - благодаря интенсивной поляризуемости вблизи "самых" зарядов процессов виртуального рождения электронно-позитронных, протон-антипротонных и других пар заряженных корпускул - бесконечно большие "голые" (до перенормировки) заряды исходных частиц. И по мере роста энергий пробных корпускул - по мере "приближения" их взаимодействий к самым "центрам" исходных зарядов - постепенно росла и "сила" электромагнитных взаимодействий.

Иные локальные теоретико-групповые - калибровочные свойства сильных и слабых взаимодействий - в отличие от электромагнитных - ведут к тому, что физический вакуум этих полей в различных моделях и физических ситуациях калибровочных взаимодействий может вести себя³ и как сверхтекучая жидкость (модель Голдстоуна), и как сверхпроводник (модели Намбу и Иона-Ласинио, Вакса и Ларкина и др.) и даже как проводящая плазма (модели Хиггса и Вайнберга-Салама). В этом последнем случае, в частности, калибровочный аналог дебаевского экранирования далекодействующих кулоновых сил зарядов и ведет к появлению в конце концов очень короткодействующих сил, физически проявляющих себя именно как слабое взаимодействие. А по мере роста энергий исследуемых процессов происходит - на определенном энергетическом рубеже восстановление полной группы локальных калибровочных симметрий физических полевых взаимодействий (спонтанно очень сильно нарушенных при малых энергиях).

Тем самым, чисто локальные свойства калибровочных симметрий определяют уже глобальные, справедливые для всей Вселенной в целом характеристики относительной "силы" сильных - ядерных, электромагнитных и слабых - распадных взаимодействий и самое главное - тенденции их изменений с ростом энергий. Так получается, что различие локальных калибровочных симметрий влечет сначала различие локальных свойств физического вакуума, электромагнитных и слабых взаимодействий на различных расстояниях: для процессов, разрывающихся на расстояниях до 10^{-13} - 10^{-16} см, вакуум калибровочных полей не меняет заметным образом своих свойств. Но на расстояниях ме-

³ Грив А.А. Проблема неинвариантности вакуума в квантовой теории поля. М., 1978. С. 5 и далее.

нее 10^{-16} см очень резкое изменение его "экранирующих" свойств как реальной физической "сплошной" среды уже ведет к локальному отождествлению друг с другом электромагнитных и слабых "сил" - на таких расстояниях они становятся физически неразличимыми и полностью превращаются друг в друга.

Аналогичное локальное изменение на еще меньших расстояниях экранирующих свойств физического вакуума калибровочных полей, переносящих сильные - ядерные взаимодействия, ведет к тому, что образно говоря, пространство "внутри" адрона (нуклона или гиперона) становится подобным сверхпроводнику. Мы приводим для специалистов целый ряд возникающих при этом физически очень интересных аналогий:

Асимптотическая свобода: Взаимодействие электрона с кристаллической решеткой; Притяжение глюона к глюону; Притяжение электрона к электрону (благодаря этим взаимодействиям); Нулевая масса "голого" глюона; Существование "голой" поверхности Ферми; Неустойчивость "голого" вакуума; Неустойчивость "голой" поверхности Ферми; Многоглюонные связанные состояния: Замкнутые петли токов Куперовых пар.

Исследования здесь еще продолжают, но общее направление их подсказывает, что с ростом энергий физических процессов (и соответственно - с переходом ко все меньшим расстояниям) физический вакуум сильных калибровочных взаимодействий также постепенно меняет свои "экранирующие" свойства. Это ведет к постепенному, логарифмическому уменьшению (с ростом энергий и уменьшением исследуемых расстояний) эффективной константы сильных взаимодействий, которая где-то в области сверхгигантских энергий в 10^{15} ГэВ и сверхкоротких расстояний 10^{-29} см делается равной растущей с энергией эффективной константе "электрослабых" взаимодействий. Если предложенные до сих пор варианты теории "Великого объединения" содержат хотя бы элементы истины, это означает, что единое для всей Природы, так сказать, "гранд-унифицирующее" калибровочное взаимодействие испытывает при таких длинах и энергиях еще одно очень сильное спонтанное нарушение локальных свойств калибровочной симметрии, приводящее к разделению сильных - ядерных и "электрослабых" сил во всем Космосе

Еще одна очень важная особенность калибровочных полей, физически очень отличающая их от всего, что до сих пор было исследовано в теории поля, - их нелинейность. Для ураний компенсирующих калибровочных полей это значит, что далеко не все их даже классические решения допускают достаточно однозначную квантовомеханическую интерпретацию, например, в

виде определенных наборов элементарных частиц. Только специальные конфигурации калибровочных полей, имеющие так называемую плоскую асимптотику, могут быть ныне истолкованы - согласно принципу соответствия, - например, как определенные, локализованные, устойчиво распространяющиеся возбуждения поля (солитоноподобные решения). Еще более необычны физические свойства инстантонных квантовых состояний калибровочных полей, которые представляют собой результат подбарьерного - туннельного "просачивания" калибровочного вакуума нетривиальной топологической природы в наш обычный, считающийся (пока что) топологически тривиальным физический вакуум. Все известные нам сегодня элементарные частицы (или, по крайней мере, некоторые из них - адроны) могут оказаться связанными "локально" - "внутри" - с именно такими инстантонами - существованию квантовыми результатами глобального "влияния" (посредством квантовых калибровочных полей) на нашу Вселенную (считающуюся пока что имеющей топологически тривиальную структуру) других - топологически очень и очень не тривиальных Вселенных.

Новые аспекты локальности: "слоения" движения и локализации по Морита

Важнейший - и даже несколько неожиданный результат физики последних лет - это то, что все ее основные динамические уравнения могут быть получены как определенное следствие довольно самоочевидных предположений о "локально-глобальных" аспектах слоения общего многообразия динамических состояний, "движения" исследуемой нами системы - о том, как оно "составлено", "выстроено" из каких-то своих "частей" - подмногообразий меньшей размерности. В этом можно видеть дальнейшее углубление и расширение нашего понимания очень разнообразных (и во многом определяющих детальную динамику любой физической системы) соотношений в ней локальных и глобальных аспектов детерминаций обобщенно-причинного типа, - учитывающих не только метрические, но и другие, более общие способы задания, фиксации окрестностей, наиболее "близких" заданной, интересующей нас в том или ином отношении.

Образно говоря, динамические физические системы наших дней допускают локализации - разложение на составляющие их элементарные "части" несколькими совершенно различными и, главное - никак не сводимыми друг к другу способами. И каждое

такое разложение - каждый новый тип топологической локализации "частей" в системе⁴ - выявляет некоторые совершенно новые стороны глубокого внутреннего единства всей физической науки, а возможно - и всего человеческого познания в целом. Динамические законы физики существенно связаны с объемлющими интересующие нас объекты расслоениями - более "вместительными" обобщенно-пространственными структурами, лишь "частями" которых являются исследуемые нами объекты и их возможные движения. Здесь же мы рассмотрим обстоятельнее разложение самих динамических систем физики на составляющие их "части".

Совсем недавно К.Тейтельбойм смог показать, что если мы выделим самые различные слоения четырехмерного пространственно-временного континуума на составляющие его "части" - трехмерные, только пространственные гиперповерхности, пересекающие ось времени под различными углами, то лишь очень малое число основных динамических уравнений остается инвариантными относительно следующего, довольно самоочевидного тополого-динамического преобразования. Возьмем две такие трехмерные пространственные гиперповерхности - исходную и конечную, разделенные определенными промежутком времени.

Само собой разумеется, что фундаментальные динамические уравнения физической теории должны давать на конечной гиперповерхности один и тот же физический результат, если мы будем переходить от исходной гиперповерхности к конечной двумя топологически несколько различными способами. В одном из них "левый фланг" гиперповерхности сначала как бы забегают немного вперед по сравнению с ее "правым флангом", а в другом случае наоборот - наша трехмерная пространственная гиперповерхность вперед заходит сначала как бы своим "правым плечом": вперед сначала несколько вырывается ее "правый фланг". Но на конечную гиперповерхность они "прибывают", так сказать, одновременно: в первом случае "левый фланг" гиперповерхности резко замедляет свое движение перед конечной гиперповерхностью (чтобы компенсировать свою, так сказать, излишнюю "резвость" на старте), а во втором - то же делает "правый фланг".

В итоге оказывается, что один и тот же результат на конечной гиперповерхности дают только те динамические уравнения физики, которые мы ныне, в наши дни, связываем с наиболее фундаментальными законами движения материи - уравнения электромагнитного поля Максвелла, уравнения сильных

⁴ Тамура И. Топология слоений. М., 1979. С. 121 и далее.

(ядерных) и слабых (распадных) взаимодействий - описанные выше кратко калибровочные (компенсирующие) уравнения Янга - Миллса и уравнения сильных полей тяготения - уравнения общей теории относительности Эйнштейна. Таким образом, основные динамические уравнения наиболее фундаментальных физических теорий наших дней являются в определенном смысле некоторого рода следствиями чисто топологической локальной "составленности", "выстроенности" полного многообразия динамических состояний исследуемой физической системы из каких-то ее "частей" - возможности локального однозначного разложения ее движения на динамические "слоения", подмногообразия меньшей размерности, все вместе, в сумме составляющие полное многообразие динамических состояний системы.

Динамическая "самосогласованность" внутренней "составленности" движения исследуемой физической системы из самых различных его "частей" (в различные моменты времени) однозначно определяет - вполне естественным образом - конкретный вид основных законов "поведения" элементарных физических объектов (материальных точек, векторов напряженности и т.д.), составляющих эту систему. Топологические понятия и структуры впервые позволяют ныне исследовать эту внутреннюю самосогласованность "различных разложений движения на его части" исключительно эффективным образом - так, что исходя из нее можно получить основные динамические законы некоторых разделов современной физики.

Хотя чисто внешне, поведение какого-нибудь гироскопа в кардановом подвесе или сложного волновода поражает именно своей иногда даже полной непредсказуемой целостностью и системностью, на самом деле за всем этим ничего не стоит, кроме предельно локальных причинно-динамических законов и определенных граничных (и начальных) условий. "Системность" (подлинная) физических объектов здесь фактически почти полностью исключена - за счет осуществимого "полного и без остатка" погружения всех их даже только возможных состояний движения в обычное метрическое, евклидово пространство достаточно большого числа измерений. Эта предельная "разложимость" любых - даже и вполне системных структур и объектов классической физики на свои наиболее элементарные "части" (материальные точки, вектора напряженности поля и т.д.) - далеко не тривиальный физический факт, заслуживающий специального рассмотрения.

Выбор абстрактного математического пространства, "окрестностная" локализация в котором дает в физике наиболее

плодотворные теоретические результаты, определяется, вообще говоря, новыми и важными понятиями так называемых теорем о Морита - I, II и III - эквивалентности. Самый простой случай здесь - теорема о "Морита - I - эквивалентности", в которой рассматривается почти тривиальный пример эквивалентности друг другу многомерных векторных пространств и их обобщений - модулей, в которых, образно говоря, по различным координатным осям "откладываются" уже не числа (как в векторных пространствах), а их алгебраические обобщения - абстрактные кольца. Так вот эти многомерные векторные пространства (и модули) оказываются, в определенном смысле, эквивалентными друг другу, если эквивалентны их системы эндоморфизмов (внутренних их преобразований самих в себя).

Физика уже на самых первых этапах своего становления - неявно и неосознанно - использовала локально "Морита I - эквивалентность": абстрактные пространства перемещений любых макроскопических тел оказываются локально тривиальным образом эквивалентны друг другу - и обычному трехмерному евклидову пространству - именно потому, что наиболее общей системой их внутренних преобразований являются эквивалентные галилеевы преобразования различных инерциальных систем отсчета друг в друга. Далее, понятия фазового объема в статистической физике, векторов напряженности электрического и магнитного поля в теории поля, непрерывно изменяющейся метрики четырехмерного пространственно-временного континуума в общей теории относительности, совершенно неклассической гильбертовой "геометрии" квантовых состояний и наблюдаемых в квантовой механике - как точные обобщения наших интуитивных повседневных пространственных образов столь много дают для единого локального-обобщенно-геометрического (и количественного) объяснения физических процессов именно потому, что все они, так сказать, "Морита I - инвариантны". Все они допускают локальное "погружение" и очень плодотворную для всей теоретической физики "окрестностную" локализацию в соответствующем многомерном (и даже бесконечномерном типе - гильбертовом, квантовомеханическом) пространстве только потому, что характеристические системы эндоморфизмов этих пространств, по крайней мере, локально, "отражают" основные физические свойства инвариантности исследуемых объектов (теорема Лиувилля о сохранении фазового объема в статистической физике, преобразования Лоренца в электродинамике, любые непрерывные преобразования координат в общей теории относитель-

ности, унитарные преобразования состояний в квантовой теории).

Своего рода "следствием" теоремы о "Морита I - эквивалентности" можно считать тогда в этом аспекте и знаменитую теорему Веддерберна-Артина⁵, выявляющую, с нашей точки зрения, "физические условия" однозначного "погружения" локально всей совокупности каких-то новых физических явлений в некоторое конечномерное векторное пространство. Она в этом смысле является почти идеальным образом теорем "типа Морита": очень немногие и очень абстрактные условия, накладываемые на произвольную алгебраическую структуру эмпирических соотношений, делают ее совершенно конкретной - такой, с которой каждый из нас повседневно сталкивается. (Теорема Веддерберна-Артина утверждает, как известно, что любое абстрактное кольцо изоморфно кольцу эндоморфизмов (внутренних преобразований в себя) векторного пространства конечной размерности, если и только если особые структуры правых идеалов этого абстрактного кольца минимальны, а структура всех его идеалов вообще состоит только из двух элементов).

Таким образом, исследуя физические свойства инвариантности (при движениях или преобразованиях) некоторых новых природных процессов, мы можем заранее решить, можно ли вообще их объясняющие математические модели и теории локально "вложить", локализовать "окрестностно" в том или ином конечномерном векторном пространстве (А все эти последние обычно связаны только с топологически тривиальными структурами классической физики). Структуры же физики наших дней чаще всего топологически весьма и весьма не тривиальны, и поэтому их приходится "погружать" уже не в векторные пространства любого - даже бесконечного - числа измерений, а в более общие "вместилища" всякого рода топологических патологий - в упоминавшиеся уже выше модули. Только к последним, рассматриваемым уже как категории, и относится вторая теорема Мориты об эквивалентности - "Морита II - эквивалентность", физический смысл которой состоит, образно говоря, в том, что она дает условия, при которых очень общая категория над абстрактным модулем оказывается эквивалентной некоторой достаточно конкретной, по крайней мере, лучше изученной. Эти условия физически можно истолковать как своего рода наличие в таких категориях локальных конечномерных линейных эквивалентностей, вполне сбалансированных "вблизи" каждой образующей и накла-

⁵ Фейс К. Алгебра: кольца, модули и категории 1. М., 1977. г. 1. С. 15 и далее.

дывающих определенные ограничения на систему идеалов кольца. А это, в конечном счете, и определяет физические свойства инвариантности системы эндоморфизмов (внутренних преобразований в себя) модуля как категории. Сейчас уже проводятся первые попытки применить теоремы о "Морита II - эквивалентности" к задаче о том, какого типа "патологичности" топологические пространства наиболее хорошо - лучше других, по крайней мере, приспособлены для "погружения" в них топологически не тривиальных физических процессов, определенного класса (типа инстантонов, кинков и т.п.).

Но ее достаточно обстоятельное и тем более - полное решение в современной физике (и математике) окажется возможным, по-видимому, только на основе использования еще более общих теорем - уже о "Морита III - эквивалентности" друг другу самых общих из известных нам категорий, локализуемых "пространственно" в наиболее абстрактных модулях с помощью линейных свойств особых функторов в категориях, описывающих алгебраические свойства соответствующих систем эндоморфизмов, характеризующих физическую инвариантность исследуемых объектов. В этом смысле даже наиболее фундаментальная в современной теоретико-категорной алгебре теорема Попеску- Габриэля⁶, описывающая, как совершенно произвольная категория может быть изоморфно "моделирована", погружена полностью в определенную категорию модулей над некоторым кольцом, является также своего рода "локализационной" теоремой типа Мориты-III - эквивалентности.

Неизбежная включенность любых средств наблюдения современной физики, в определенную (всегда) понятийную систему как раз и фиксирует, какие именно конкретные базовые (алгебраические) кольца будут использованы для построения (с помощью идеалов этих колец) абстрактного "локального" математического пространства теории и то, какие именно наблюдаемые только и имеют инвариантный физический смысл (даже локально) в этой теории. Базовое алгебраическое кольцо всякой физической теории выступает, в наши дни, таким образом, определенным аналогом меняющегося от точки к точке метрического тензора в общей теории относительности.

Последний изменяет локально (вследствие локальных изменений концентрации материи, описываемой тензором энергии - импульса) метрику, а с ней - и всю систему расстояний в каждой локальной окрестности исследуемой системы объектов - сам тип

⁶ Фейс К. Алгебра: кольца, модули и категории 1 Т. 1. С. 541 и далее.

геометрии (Лобачевского, Бойли или Римана), который имеет место в этой окрестности. Точно также базовые алгебраические структуры колец (и модулей над ними), применяемые для описания всего разнообразия физических опытных данных, (посредством локализационных теорем о Морита - I - II - III - эквивалентностях), определяют конкретный топологический тип локального пространства, в которое можно геометрически "погрузить" без какого-либо остатка ("изоморфно") все эти опытные данные в некоторой физически целостной, обобщенно-наглядной картине - теории всех их взаимоотношений и взаимосвязей. Тем самым, в различных пространственных окрестностях определенных физических процессов теперь может очень резко изменяться в современной физике даже сам тип локального расслоенного пространства, которое необходимо для построения полной теории.

Топологическая двойственность и принцип Маха

Космологический принцип Маха - определяемости локальных характеристик объектов (их масс, зарядов и т.п.) полной совокупностью всех их возможных взаимодействий с лежащими вне их объектами внешнего мира - несет в себе, с точки зрения единства физической науки, разумеется, весьма и весьма глубокое материалистическое содержание. Он указывает на постоянную необходимость все более и более утонченных поисков новых физических связей выделенных локально (и чем-то интересным нам) материальных структур со всем остальным материальным миром.

Вместе с тем, принцип Маха - один из немногих действительно фундаментальных принципов Западного естествознания, которые указывают конкретные пути реализации точными экспериментальными науками нашего времени глубоких, диалектических идей философии Востока о всеобъемлющей мировой гармонии, о совершенно новых принципах детерминации локальных процессов и явлений всей мировой тотальностью, всей космической целостностью. Идеи эти сейчас интенсивно и многосторонне обсуждаются многими ведущими физиками и методологами науки современности, однако, пути их конкретного, эвристического "внедрения" в физическую науку наших дней остаются пока что, к сожалению, достаточно неопределенными, неясными.

Нам кажется, что наиболее интересными и перспективными представляются сейчас здесь попытки истолковать космологический принцип Маха как физическую "экспликацию" чисто математических и, прежде всего, - топологических принципов и теорем двойственности, уже на уровне интуиции поражающих внушительной глубиной устанавливаемых ими связей целого и части, локального и глобального.

Эти весьма и весьма глубокие теоремы топологической двойственности в наши дни уже позволяют более основательно понять чисто физические "механизмы", благодаря которым наиболее существенные динамические свойства интересующего нас локального объекта (его индивидуальная масса, заряды - электрический, ядерный и т.д.) определяется целостными, глобальными - топологическими характеристиками "всей" совокупности его взаимодействий со всеми остальными объектами в незанятой им - "остальной" части пространства. По самому своему физическому, интуитивному смыслу любые индивидуальные динамические характеристики всякого локального объекта характеризуют, так сказать, "силу" его взаимодействий с "остальным" внешним миром и еще в каком-то плане - "скорость" его 'внутреннего отклика" на определенные изменения в этом внешнем мире.

Классические топологические теоремы двойственности Пуанкаре-Понтрягина, как известно, утверждают детерминацию определенных - и очень важных топологических характеристик геометрического объекта топологическими свойствами незанятой им, - "остальной" части пространства и наоборот. Например, замкнутая кривая на плоскости, грубо говоря, топологически подобна окружности только тогда, когда "незанятая" ею часть плоскости (плоскость "минус" ее часть, занятая кривой) распадается на две (и только на две) несвязные друг с другом области ("части"). Определенная топологическая характеристика этих последних - их нульмерная группа когомологий, - таким образом, однозначно детерминирует собой, грубо говоря, количество "дырок", которые может иметь данная кривая внутренне, сама по себе (характеризуемых несколько другим топологическим инвариантом кривой - рангом ее одномерной группы гомологий). Следствием теорем двойственности Пуанкаре-Понтрягина является также интуитивно, казалось бы, совершенно очевидный и общеизвестный факт: всякая плоская замкнутая кривая, гомеоморфная окружности, всегда разбивает плоскость на две - и всегда только на две! - несвязные друг с другом части (знаменитая теорема К.Жордана). Однако, доказательство этого

"очевидного" факта - вернее топологической инвариантности этого всем "ясного" и "наглядного" геометрического результата - занимает (со всеми необходимыми определениями и предварительными теоремами) несколько страниц очень серьезного математического текста, а многолетние размышления над ним целых нескольких поколений выдающихся исследователей и привели, по-видимому, сейчас к таким глубоким обобщениям топологических теорем двойственности, что они становятся применимыми уже к основным динамическим законам и характеристикам объектов и в физике (а возможно - и в биологии).

Обобщенные теоремы двойственности⁷ Серра-Гротендика позволяют - благодаря формулировке законов физики на языке топологии - аппроксимировать все физически важные взаимодействия "внешнего" мира и интересующего нас локально выделенного объекта с помощью специальной системы "покрытий" внешнего мира - так называемым дуальным топологическим комплексом. Этот последний является, вообще говоря, очень сложной обобщенно-геометрической "моделью" всех возможных взаимодействий с внешним миром данного объекта - топологической конструкцией особого рода, которая, однако, в некоторых случаях в пределе - при все большем "измельчении" покрытий внешнего мира по определенному закону - становится, как это ни странно, очень простой. Если базовые алгебраические кольца всех покрытий внешнего мира (как топоса) и в пределе являются так называемыми кольцами Горенштейна, предельный дуальный топологический комплекс "внешнего мира" оказывается изоморфным нашему обычному евклидову пространству того или иного числа измерений, а вся совокупность связей интересующего нас объекта с внешним миром "вне его" оказывается сконцентрированной в один объект и суммарно выражается особым "комплексом вычетов".

В самом простом случае этот последний оказывается эквивалентным обычному вычету теории функций комплексного переменного, когда, например, дисперсионные соотношения позволяют представить амплитуду рассеяния элементарных частиц при данной энергии как некоторый интеграл в комплексной плоскости, и наиболее важный вклад в величину этого интеграла дают именно массы новых частиц, трактуемые просто как новые вычеты в комплексной плоскости. Тем самым, топологические теоремы двойственности Серра-Гротендика позволяют более глу-

⁷ Гротендик А. Теория когомологий абстрактных алгебраических многообразий // Международный математический конгресс в Эдинбурге 1958 г. М., 1962. С. 129 и далее.

боко понять причины и основания для существующей в физике элементарных частиц тенденции представлять массы вновь открываемых корпускул, прежде всего как новые "вычеты" некоторых комплексных интегралов (дисперсионных соотношений) в топологически очень сложно "устроенных" гиперповерхностях функций многих комплексных переменных, описывающих виртуальную динамику того или иного процесса взаимодействий элементарных частиц.

Следующий более сложный в концептуальном плане случай конкретного действия топологических "механизмов" двойственности, целостности, глобальности в современной физике представляет собой, по-видимому, принцип дополнительности квантовой теории. Операциональные измерительные установки, определяющие частицу или волну, мы будем наблюдать в том или ином конкретном физическом эксперименте, являются, с точки зрения топологических теорем двойственности, как раз чисто "внешними" границами той "части" трехмерного пространства, которую может "занимать" интересующий нас - уже гораздо менее локальный, чем классические корпускулы, - существенно квантовый объект.

Любые экспериментальные установки имеют строго определенные топологические характеристики (например, число щелей, через которые может пройти квантовый объект в классических опытах по выявлению его волновых или корпускулярных свойств, и т.п.). С точки зрения топологии устанавливаемая принципом дополнительности в квантовой теории детерминация именно числом щелей экспериментальной установки того "опытного факта" корпускулой или волной окажется исследуемый нами квантовый объект в данном конкретном эксперименте, также представляет собой пример чисто "онтологического" действия топологических теорем двойственности в современной физике. Дело в том, что с точки зрения топосов, именно квантовая механика впервые показала, что классическое поле действительных чисел совершенно недостаточно для фиксации состояния квантовых объектов, и исторически говоря, первая совершенно неклассическая топология Стоуна-Зариского⁸ была введена впервые именно в связи с тщательным анализом необычных топологических свойств алгебры состояний квантовых объектов первым автором еще в 1936 г.

Теперь, после успешного обобщения идей Стоуна-Зариского Гротендиком в пространственной теории топосов, мы должны

⁸ Бурбаки Н. Коммутативная алгебра. М., 1971. С. 678-680.

считать, что "полное" многообразие характеристических параметров, фиксирующих определенное состояние интересующего нас квантового объекта, представляет собой уже не классическое поле действительных чисел, а некоторое абстрактное алгебраическое кольцо, различные идеалы которого и соответствуют различным состояниям квантовых объектов. При этом конкретные математические характеристики экспериментальной установки (число щелей, их координаты, ширина и т.д. - в случае изучения волновых или корпускулярных свойств микрообъектов) осуществляют как бы автоматическое "разложение" этих идеалов абстрактного кольца квантовых наблюдаемых на его так называемые примарные компоненты.

Но если классическое поле действительных чисел обладало очень и очень важным для физики свойством совершенно однозначного разложения идеалов на примарные компоненты (например, 10 можно представить в поле действительных чисел только как произведение простых чисел 2×5), то уже следующее за ними (по простоте топологического и алгебраического "устройства") кольцо комплексных чисел теряет это свойство: 10 можно представить в этом кольце также еще и как $(3+i)(3-i)$. Этот достаточно простой, но вместе с тем и весьма фундаментальный - в плане алгебры и особенно топологии - факт, по-видимому, и определяет, с современной точки зрения теории топосов, всю специфику, всю необычность, поведения существенно квантовых объектов - в сочетании с кратко описанными выше теоремами двойственности Серра-Гротендика, разумеется. Грубо говоря, природа корпускулярно-волнового дуализма микрочастиц связана именно с тем фактом, что не только $10 = 2 \times 5$, но и $(3+i)(3-i)$ - именно неоднозначность разложения идеалов общих алгебраических колец квантовой теории на примарные компоненты - благодаря топологическим теоремам двойственности делает возможным, что в одних условиях данная конкретная экспериментальная установка своими двумя щелями глобально, целостно, "вырезает" из информационно очень "богатого" квантового объекта только волну, а в других топологических "условиях" другая - "дополнительная" ей топологически (в определенном смысле) экспериментальная установка своей щелью "вырезает" из того же самого квантового объекта уже только корпускулу.

Это наше "путешествие" по свойствам дополненности, топологической двойственности физических объектов - определенности их наиболее важных и даже совершенно фундаментальных свойств (массы, корпускулярное или волновое представление и т.д.) топологически целостными, глобальными характери-

ками "внешней" для них, "не занятой" ими части пространства можно продолжить. Оно, по-видимому, приводит в конце концов к установлению неожиданных и глубоких связей только что описанного кратко квантово-механического принципа дополнительности с другим фундаментально важным принципом, но уже не физической науки, а биологии - с принципом эволюции.

В каком-то смысле можно даже утверждать, что последний является, так сказать, топологическим "четырёхмерным" обобщением первого. Нужно только сформулировать их обоих на языке еще более сложно устроенных алгебраических объектов - так называемых вложенных примарных идеалов общих алгебраических колец - базовых локально-алгебраических структур топосов как пространств с переменной, вариабельной топологией. Вложенные примарные идеалы - еще более патологически ведущие себя алгебраические объекты, появляющиеся в общих топосах в тех ситуациях, когда их топология локально задается уже не кольцами комплексных чисел, а самими общими алгебраическими кольцами. В таких общих алгебраических кольцах "многозначность" разложения некоторого абстрактного объекта, сопоставляемого определенному идеалу кольца, может приобрести уже не только точечный характер (как в нашем примере выше - $10 = 2 \times 5 = (3+i)(3-i)$), но и, так сказать, многомерный - пространственный характер (в смысле неоднозначности разложения исследуемого пространственного объекта на составляющие его неприводимые кривые, поверхности, гиперповерхности и т.д.).

Топологические характеристики "внешней" по отношению к объекту - "не занимаемой им" части пространства могут в этом случае определять не только его "статическое", чисто геометрическое разложение на подобъекты меньшей размерности, но и динамическое "поведение" этих подобъектов во времени - существование, например, преимущественных траекторий их движения. Именно это имеет место, по-видимому, в отношении прямых линий всякого иерархического механического движения или концентрических "окружностей" магнитного (или электрического) поля, как бы "навивающихся" на всякий ток (или переменное во времени магнитное поле). Такого рода выделенные, преимущественные направления "канализации" всякого материального движения на каждом конкретном уровне его пространственно-временной организации определяются, по-видимому, пока неизвестными нам еще (в самом общем ил. виде) динамическими общефизическими принципами топологической двойственности.

В биологии существенная "креодичность" (по Уолдингтону) - эффективная канализованность по определенным траекториям

движения почти всех молекулярно-биофизических структур живой клетки - вероятно, также окажется проявлением действия именно таких динамических принципов физико-топологической двойственности. Формирование креодов в пространстве и особенно - удивительнейшую согласованность, когерентность их действия во времени нам еще предстоит исследовать и исследовать. Именно здесь, по нашему мнению, физика приобретает совершенно новые для нее, очень необычные для чистой "протяженности" измерения - измерения организации или даже символические, "предидеальные", так сказать.

Однако, тополого-динамические основы таких совершенно новых типов детерминации целым своим частей - с помощью топологических теорем двойственности - уже исследованы. Американский математик Дж.Макки⁹ смог показать, что структура электронной оболочки всех атомов, т.е. в сущности говоря, принципы организации всех атомов Вселенной в Периодическую систему Менделеева - определяются группами симметрии "внешнего" по отношению к данному атому пространства.

Это - в простейшем, статическом случае неизменных пространственных свойств "внешних" по отношению к данному атому "частей" пространства. Если же эти последние мы будем определенным образом - "целенаправленно" менять, изменяя их топологические инварианты, мы получим конкретную экспликацию возникновения принципиально новых "механизмов" передачи "целевых" - телесомических воздействий из будущего каких-то процессов в их прошлое, предсказанных еще Аристотелем. Они, конечно же, не могут иметь классическую - "силовую" (или "полевую") природу, а скорее обладают характером симметрии (или ее нарушения) - преимущественных направлений (или их ограничений) в движении объектов. В будущем (сознательно) изменяются вполне определенные топологические характеристики (инварианты, например, те же кохомологии) внешних, граничных условий - и глобальная теория общих динамических систем показывает, что описанный кратко выше топологический принцип двойственности "заставляет", "вынуждает" заранее предсказуемым образом изменить в настоящем определенные топологические инварианты всех возможных движений исследуемой динамической системы (все фазовое пространство "минус" его часть, занятая сознательно, измененными - в будущем! - объектами).

⁹ Макки Дж. Лекции по математическим основам квантовой механики. М., 1965. С. 185 и далее.

**ФИЛОСОФСКОЕ ПОНЯТИЕ МАТЕРИИ И РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ***

Проблема материи на протяжении тысячелетий стояла в центре внимания как философской, так и (с момента ее появления) естественнонаучной мысли. От первых наивных представлений об элементах и стихиях вплоть до современных представлений о кварках, глюонах, суперструнах и т.д. - вот путь, пройденный человеческим познанием. Все более и более глубокое проникновение в строение окружающего нас мира неизменно было связано с философским анализом проблемы материи. Важной вехой на этом пути явилось данное В.И.Лениным в "Материализме и эмпириокритицизме" философское определение материи как объективной реальности, данной нам в ощущениях. Мы считаем, что выяснение действительной новизны ленинского определения не всегда находит четкое выражение в нашей философской литературе.

По буквальному смыслу выражения "ленинское определение", следовало, казалось бы, предполагать, что В.И.Ленин впервые указал на то, что материя является объективной реальностью и что мы имеем с ней дело в наших ощущениях. В признании материи объективной реальностью нет, разумеется, ничего нового. Действительная новизна ленинского определения может быть, на наш взгляд, раскрыта лишь в сопоставлении с концепцией материи в предшествующем материализме, обычно характеризуемой выражениями: материя как строительный материал или первоматериал. Возникающее в древней натурфилософии понятие материи обозначает, прежде всего, первооснову, понимаемую как некоторый абсолютно исходный материал, из которого построено все окружающее, как некоторую первоматерию (как мы сказали бы сейчас - раскрыть строение материи), оставляя на

* Настоящая статья была написана в 1989 г. Поскольку в принципиальном отношении взгляды авторов по проблеме определения материи не изменились, они решили сохранить (хотя бы в качестве раритета) и принятую тогда манеру изложения (прежде всего это относится к 1-ой части статьи).

втором плане собственно философскую проблематику, связанную с выяснением отношения материи к сознанию.

Центральное положение проблемы строения материи было, на наш взгляд, исторически неизбежным и прогрессивным явлением: оно стимулировало развитие естественнонаучного подхода к материи, содействовало выделению естествознания из рамок натурфилософии. Но оно же обусловило и метафизический (в смысле антидиалектический) характер складывающейся концепции материи как абсолютно исходного строительного материала или, что то же самое (в употребляемом нами здесь смысле), концепции материи как первоматерии.

Если материя понимается как абсолютно исходный строительный материал, то тем самым неизбежно предполагается его ограниченность, конечность в качественном отношении. Человеческое познание, двигаясь по пути все большего углубления в сущность, рано или поздно должно дойти до последней основы всех вещей, до образующей их материи как таковой, обладающей некоторой конечной совокупностью свойств.

Вплоть до конца XIX века концепция первоматерии не вступала в противоречие с данными естествознания. Но на рубеже XIX-XX веков казалось бы уловленная физиками первоматерия (или материя как таковая) стала ускользать из их рук. Популярной стала фраза об исчезновении материи. Это была совершенно новая ситуация. Физика, которая всегда рассматривалась как оплот и фундамент материалистической философии, вдруг объявила об исчезновении материи. Поверхностное рассуждение без труда приводило к выводу, что если исчезла материя, то, разумеется, потерпел крушение философский материализм. На наш взгляд, не требуется особых интеллектуальных усилий, чтобы усомниться в наличии сколь-нибудь существенных связей между вопросом о строении атома и общей доктриной философского материализма. Но одних таких сомнений мало. Для того, чтобы эти сомнения перешли в уверенность, надо было совершенно четко и недвусмысленно вычленить собственно философское содержание понятия материи, выяснить, с чем именно связан философский материализм в трактовке материи. Этой задачи не стояло перед материалистической философией в прошлом. Эта задача была впервые поставлена "новейшей революцией в естествознании".

Ответом на эту новую ситуацию и было выдвинутое Л.И. Лениным определение материи. Его действительная новизна состоит в установлении неразрывной связи философского определения материи с основным вопросом философии. Ленинское

определение и есть определение через основной вопрос философии. Оно связано с принципиальным отказом философии от задачи дать определение материи как таковой. В той мере, в какой эта задача разрешима, она есть дело естествознания, а не философии. Никакого философского определения материи как таковой, материи самой по себе, вне ее отношения к сознанию просто не может быть. В.И. Ленин неоднократно указывал, что по самой сути дела нельзя дать иного определения двум предельно общим понятиям гносеологии - материи и сознанию - кроме как указать, что берется за первичное, а что - за вторичное.

Перед философским понятием материи стоит фундаментальная, но ограниченная задача - раскрыть основные направления философских исследований, и философская полнота ленинского определения материи заключается в его способности противопоставить диалектический материализм основным философским оппонентам: субъективному и объективному идеализму, агностицизму и метафизическому материализму. Эту задачу оно полностью решает:

1. В противоположность субъективному идеализму, в этом определении утверждается наличие объективной реальности.

2. В противоположность агностицизму (считающему, что даже если объективная реальность и существует, то в познании мы с ней дела не имеем), в этом определении утверждается, что объективная реальность дана нам в ощущениях.

3. В противоположность объективному идеализму, в этом определении утверждается, что объективная реальность, данная нам в ощущении, является единственной реальностью. Никакой другой, за ней стоящей и принципиально от нее отличной реальности нет.

4. В противоположность метафизическому материализму не ставится задача охарактеризовать материю саму по себе (это означало бы отрицание ее неисчерпаемости), а дается единственно возможное определение через основной вопрос философии.

Важнейшая черта ленинского определения материи, вытекающая из стоящих перед этим определением задач (задать основное направление философских, гносеологических исследований) состоит в неспецифицированности понятия материи. В рамках ленинского определения решается лишь основной вопрос философии (существует ли объективная реальность? Единственная ли она? Дана ли нам в ощущениях?). В просы о том, как она "устроена", существует ли в пространстве и времени, является ли движение ее неотъемлемым атрибутом, как в ней соотносятся вещи, свойства и отношения и т.д. - все эти вопросы возникают

после, их решение предваряется решением основного гносеологического вопроса. Поэтому, в частности, настаивание на том, что понятие материи относится только к вещам, представляет собой, на наш взгляд, выражение весьма архаичной - реистской - точки зрения.

В связи со сказанным мы считаем нужным остановиться на вопросе о двух понятиях материи - философском и естественнонаучном (физическом). В советской философской довоенной литературе было общепринятым говорить о различии В.И.Лениным философского и физического понятия материи. В конце 40-х без сколько-нибудь серьезного обсуждения этого вопроса, было провозглашено, что никаких двух понятий материи у В.И.Ленина нет и что говорить о философском и физическом понятии материи есть грубейшая ошибка, а надо говорить о философском понятии материи и естественнонаучных представлениях о строении и свойствах материи.

В ленинских текстах действительно нет термина "физическое понятие материи". Но в изложении существа ленинского подхода к философскому понятию материи, ничего ошибочного во введении термина "физическое понятие материи" нет. Физики говорят о строении материи, о тензоре материи-энергии, о распределении материи в Метагалактике (изотропном или не изотропном) и т.д. Физик имеет в виду материю как таковую, тот или иной вид материи, т.е. пользуется другим, не философским, а физическим понятием материи. И совершенно непонятно, почему философия должна настаивать, что только она одна имеет право на использование термина "материя".

При этом надо всегда иметь в виду недопустимость абсолютизации физического понятия материи. Надо всегда отдавать себе отчет, что, говоря о материи как таковой, материи самой по себе, мы всегда имеем дело не с некоей абсолютной первоматерией, а с "материей на данной ступени проникновения в нее".

Концепция материи как строительного материала необходимо предполагает конечность этого материала вглубь, постулирует наличие некоего окончательного (последнего, самого наипростейшего, абсолютно элементарного и т.д.) уровня, короче, называется концепцией первоматерии. О метафизическом характере концепции первоматерии, о ее противоположности принципу неисчерпаемости материи много писалось в нашей философской литературе. Сейчас нам хочется подчеркнуть рациональное содержание этой концепции, сыгравшей и продолжающей играть (с соответствующими оговорками) в высшей степени

плодотворную роль в развитии наших знаний о строении материи от воды Фалеса до гипотетических лептокварков.

Концепция первоматерии стимулировала и стимулирует поиски человеком конкретных воплощений материального единства мира. Но, как мы сказали, к концепции первоматерии должны быть сделаны соответствующие оговорки. Первоматерия не должна пониматься как некоторая абсолютная сущность, субстанция. Она должна быть релятивирована и соотнесена с историческим ходом познания. Все наше знание носит исторический характер, всегда соотнесено с достигнутой ступенью познания. На каждой такой ступени естествознание говорит не о материи как таковой, а о материи на данном уровне проникновения в нее. И это понятие "материи на данном уровне проникновения в нее" выполняло ту же методологическую функцию, которую в течение столетий выполняло понятие первоматерии и поэтому вполне оправдано может быть названо диалектически понятой или относительной первоматерией или физическим понятием материи.

Отрицание абсолютной первоматерии или, что то же самое, принцип неисчерпаемости материи, является по своему происхождению глубоко диалектическим. Однако (аналогично принципу развития), возникнув как диалектический принцип, он может быть подвергнут (и действительно подвергается) метафизическому истолкованию. Суть этого истолкования состоит в понимании неисчерпаемости в духе бесконечной делимости на все более и более малые части и может быть названа, согласно Гегелю и Энгельсу, "дурной" бесконечностью. Переход от одного уровня к другому предполагает качественное изменение самих структурообразующих отношений, радикальные изменения математических структур, описывающих элементарные объекты более глубокого уровня.

Однако здесь необходимо сделать одно важное методологическое замечание. Диалектика действительно утверждает необходимость качественных изменений при переходах от одного структурного уровня к другому, однако степень радикальности этих изменений никак не может постулироваться диалектикой по принципу: чем радикальнее изменение, тем более оно соответствует диалектике. Такой рецепт сам является глубоко антидиалектическим, догматическим. Развитие новейшей физики как раз очень ярко иллюстрирует отмеченное обстоятельство.

В первые годы своего существования концепция кварков встречала у многих достаточно прохладный прием, и, напротив, значительно более диалектичной и революционной представлялась бутстрапная идеология. Однако в науке решающими явля-

ются не общие философские соображения, а достигаемый реальный прогресс знания, и здесь решающий перевес оказался на стороне кварковой модели. Причем, по мере развития этой последней ее кажущаяся традиционность оказалась "сильно преувеличенной".

Мы считаем, что революционное содержание современных физических представлений, дальнейшее углубление физического понятия материи может быть по настоящему понято лишь в свете исторического развития этого понятия.

Диалектика развития физического понятия материи

Естествознание обратилось к исследованию глубинной структуры материи лишь в XX веке, в рамках бурно развивающейся физики элементарных частиц, которую часто называют атомистикой XX века. Это название сразу вызывает ассоциации с атомистикой Демокрита или атомистикой Ньютона. Причем, на долгом пути от Демокрита к Ньютону мы можем достаточно четко проследить концептуальную преемственность в развитии атомистики. Например, если у Демокрита бесконечные с своим разнообразием (по величине, форме и порядку) и неделимые (абсолютно плотные и не содержащие в себе пустоты) атомы носились в бесконечной пустоте и, соединяясь различными способами с помощью крючков, образовывали все многообразие объектов и явлений реального мира, то у Ньютона уточняется способ связи уже унифицированных атомов (материальных аналогов математических бесконечно малых или дифференциалов), и на смену "наивным" крючкам античности приходит сила гравитации, которая объединяет всю Вселенную и четко отражена в законе всемирного тяготения. Эти уточнения не затронули основы атомистической концепции, - в основе мира лежит полное и пустое, бытие и небытие (которое существует не менее реально, чем бытие). Плотные атомы двигаются в безтелесной пустоте, которая в ньютоновской механике трансформировалась в абсолютное пространство. Это абсолютное пространство играет в классической механике очень важную и новую роль - роль привилегированной универсальной инерциальной системы отсчета, но при этом оно не перестает быть пустотой, которая была усмотрена умозрением великого Абдерита более двух с половиной тысяч лет назад.

В рамках этой атомистической концепции строения материи была развита классическая механика, которая достигла огромных

успехов в описании природы. Более того, механика стала трактоваться как некая единственно фундаментальная наука: все сводилось, редуцировалось к механике, к построению механических моделей, к решению механических уравнений. Вселенная предстала как гигантский механизм.

С развитием электромагнитной картины мира в физике достойное место заняла и континуалистическая концепция строения материи. Но она выступила не как отрицание атомистической концепции вообще, а как отрицание ее лишь механической конкретной модели. Более того, целый ряд экспериментальных и теоретических исследований показал, что в природе существуют дискретные элементарные объекты в рамках электромагнитной картины мира. Атомизм был возрожден на более глубоком уровне строения материи - само электричество оказалось "атомистичным", состоящим из электронов ("крайне малые электрически заряженные частички").

В конце XIX - начале XX столетий атомистическая концепция строения материи получила очень существенное развитие, которое привело к очень странным результатам, находящимся в поразительном противоречии с исходными представлениями атомистики.

Нечто похожее уже произошло с одним из начал атомистической доктрины: первоначальное представление о пространстве как пустоте постепенно трансформировалось (в оптике) в свою противоположность, и эфир (как ипостась абсолютного пространства Ньютона) стали рассматривать как твердое тело.

Теперь аналогичная история, только с обратным знаком, произошла с самим атомом. В 1911 г. Э.Резерфорд показал, что положительное электричество в атомах сконцентрировано в неких частицах, а не рассредоточено по всему атому. Атом оказался не плотным билиардным шаром, а некоей "солнечной системой" в миниатюре. Главное в этой модели то, что масса атома сосредоточена в мельчайших частицах, которые занимают ничтожную часть объема атома. Получается, что атом в основном состоит из внутриатомной пустоты, что он пуст.

Во всяком случае развитие физики продемонстрировало интересную тенденцию к оборотничеству: пустой эфир может оказаться "твердым телом", а атом, хотя и является изначальным синонимом твердости, может оказаться на поверку весьма эфемерным образованием, почти пустотой. Но все это было лишь началом познания глубокой диалектики в строении материи.

На повестке дня физики начала XX века встала проблема построения специальной механики атомного мира. Если у Де-

мокрита атомы сцеплялись крючками, у Ньютона они соединялись гравитационным притяжением (о природе которого сам Ньютон ничего определенного не знал), то в современной физике элементарные частицы взаимодействуют путем обмена квантами соответствующих полей. Построение квантовой механики дало возможность понять сложный мир атомов и навести там порядок. Но при этом выяснилось, что сами атомы совсем не являются некими первокирпичиками в структуре материи, а суть сложные динамические системы, составленные из различных элементарных частиц: электронов, протонов, нейтронов. Сложилась следующая ситуация: с одной стороны, существуют элементарные частицы, и они участвуют в различных взаимодействиях, а с другой - не существует какой-либо теории (или теорий), описывающей законы этого нового, более глубокого уровня структурной организации материи.

Физики попытались ликвидировать этот пробел, но натолкнулись на следующую трудность: известных элементарных частиц - электронов, протонов, нейтронов и фотонов - вполне хватало для объяснения порядка в атомном мире (кстати, этого порядка удалось достичь лишь в начале 30-х годов, когда был обнаружен нейтрон, выяснена его роль в реакциях распада атомов и развита протон-нейтронная модель ядра Д.Д.Иваненко-В.Гейзенберга), но их катастрофически не хватало для наведения порядка непосредственно в мире элементарных частиц. Для построения здания физики микромира, известных четырех "кирпичиков" оказалось мало. Соответственно в физику стали постепенно, но со все нарастающей интенсивностью проникать новые элементарные частицы - сейчас различные "странные", "очарованные", "цветные" и т.д. элементарные частицы считают не единицами, а сотнями.

В этом процессе порождения новых элементарных частиц великую роль сыграли законы сохранения и идеи симметрии, которые оказались глубоко взаимосвязанными компонентами физического знания, а также соображения о единообразии механизмов различных физических взаимодействий микрообъектов.

По мере развития физики микромира непрерывно возрастает роль идей симметрии. Следует учитывать, что математической основой современных теорий различных фундаментальных физических взаимодействий являются соответствующие группы симметрий и их представления (что, конечно, не отрицает значимости исследований в рамках иных математических структур). Мы еще вернемся к этому вопросу позднее, а сейчас просто отметим, что плодотворность идеи симметрии в полной мере прояви-

лась в первых же ее применениях в физике микромира - в этой области она привела к ряду принципиально новых представлений. Достаточно показателен пример с появлением в физике античастиц. Уже простое объединение квантовой механики со специальной теорией относительности привело П.А.Дирака к выводу, что в природе должны существовать положительно заряженные антиподы электрона - они были названы позитронами и в дальнейшем экспериментально обнаружены.

Принципиальное значение этого открытия великолепно отразил В.Гейзенберг, акцентируя внимание на роли идеи симметрии: "При этом существенным было отнюдь не открытие еще одной, до того неизвестной частицы - было открыто еще множество частиц без сколько-нибудь серьезных последствий для оснований физики: существенным было открытие новой симметрии, с пряженности частиц - античастиц, тесно связанной с лоренцевой группой специальной теории относительности, а также с превращением кинетической энергии сталкивающихся частиц в массу покоя частиц и обратно"¹.

В дальнейшем выяснилось, что и другие элементарные частицы обладают своими "антидвойниками". Отличаются частицы и античастицы знаком заряда. Причем, если в электромагнитных взаимодействиях участвуют электрически заряженные частицы, то для других типов взаимодействий характерны свои специфические заряды (лептонный, барионный и др.). Элементарная частица может быть нейтральной в отношении одного взаимодействия, но "заряженной" - в отношении другого. Не менее важную роль в развитии физики микромира сыграли соображения о единообразии механизмов физических взаимодействий элементарных частиц. Образцом для подражания послужила квантовая электродинамика, в рамках которой было выяснено, что взаимодействие электрических зарядов осуществляется с помощью обмена фотонами. По этому рецепту постарались развить теории других типов взаимодействий, что потребовало введения в физику микромира новых обменных элементарных частиц - мезонов (Х.Юкава и др.).

Что же касается самих ядерных частиц - нуклонов, то они оказались всего лишь двумя представителями огромного семейства сильно взаимодействующих частиц, число которых сегодня достигает нескольких сотен. Они объединены под общим названием адроны. Чуклоны оказались всего лишь вершиной огром-

¹ Гейзенберг В. Космическое излучение и фундаментальные проблемы физики // УФН. 1977. Т. 121, вып. 4. С. 670.

ного адронного айсберга, которая оказывается в сравнительно стабильном атомном мире, "под водой" расположена основная часть, составленная из нестабильных, быстро распадающихся (время жизни некоторых адронов составляет всего лишь 10^{-22} с!) барионов, мезонов, гиперонов, резонансов и др.

Если на заре атомного века было известно слишком мало частиц, чтобы можно было из них построить стройное здание физики микромира, то теперь этих "первокирпичиков" оказалось слишком много, и они столь разношерстны, что о постройке здания опять не могло идти и речи. Прежде всего, элементарные частицы следовало как-то классифицировать, а затем попытаться систематизировать в рамках соответствующих физических теорий.

Первоначальная классификация элементарных частиц началась, собственно говоря, еще в рамках квантовой механики. При попытках навести порядок в атомном мире, физики столкнулись с множеством трудностей (типа аномального эффекта Зеемана), которые имели общее происхождение - их решение зависело от ответа на вопрос: почему в основном состоянии атома все электроны не занимают самой первой внутренней оболочки?

Что заставляет электроны рассредоточиваться по разным орбитам, что обуславливает характер заполнения каждой электронной оболочки атома? Решение было найдено В.Паули, который в 1925 г. сформулировал новый физический принцип - принцип запрета. Этот принцип запрещает двум электронам находиться в одном и том же квантовом состоянии (которое задается набором квантовых чисел). На их фоне заметно выделяются другие частицы, обладающие "общительным" характером, которые могут в любом состоянии находиться в любом количестве. Примером таких частиц является наш старый знакомый - фотон. Так произошла наиболее общая классификация элементарных частиц на "общительные" и "необщительные". Смысл этой классификации стал выясняться после того, как в том же 1925 г. Уленбек и Гаудсмит ввели представление о спине электрона. Необщительные частицы оказываются обладательницами полуцелых спинов и подчиняются специальной статистике Ферми-Дирака. Эти частицы получили название фермионов. Что же касается общительных частиц с целочисленными спинами, то они подчиняются совершенно иной статистике Бозе-Эйнштейна и называются бозонами.

Следующим шагом была попытка построить теории различных взаимодействий элементарных частиц. Здесь следует учитывать, что само представление о взаимодействии претерпело суще-

ственное изменение при переходе к физике микромира. В различных взаимодействиях участвуют различные элементарные частицы, и они обмениваются также различными промежуточными частицами, переносчиками соответствующих взаимодействий. Однако при этом многообразии различий все же есть одно очень важное единство - все взаимодействия элементарных частиц обладают единым механизмом. Это обусловило попытки построения теорий различных взаимодействий по единому образцу.

Таким образом послужила первая конкретная квантово-полевая теория электромагнитных взаимодействий элементарных частиц - квантовая электродинамика. Квантовую электродинамику характеризует ряд очень важных особенностей. Во-первых, в этой теории взаимодействие реализуется посредством рождения и поглощения промежуточных квантов поля (фотонов) - переносчика взаимодействия, которым является электромагнитное поле. Во-вторых, квантовая электродинамика является локальной теорией, т.е. взаимодействие (рождение и поглощение) происходит в точке пространства-времени. В этой теории фигурируют точечные частицы, которые взаимодействуют в точке пространства-времени. В-третьих, квантовая электродинамика является перенормируемой теорией. Здесь же следует отметить, что эта теория существенно основывается на очень общей технике вычислений, называемой теорией возмущений. Создать такую теорию возмущений позволила разработка в начале 50-х годов Р.Фейнманом, Ю.Швингером, С.Томонагой и Ф.Дайсоном корректно определенной процедуры перенормировки. Как выяснилось, среди всех возможных конкретных теорий, которые можно сформулировать в рамках квантово-полевой исследовательской программы, есть особый класс теорий, называемых перенормируемыми. В этих теориях преобразования конечного числа основных параметров (масса, заряд и др.) устраняют бесконечность во всех членах ряда теории возмущений сразу. Именно этим свойством обладает квантовая электродинамика.

Применение метода перенормировок привело к наивысшему во всей современной физике согласованию теории с экспериментом - с точностью 10^{-10} .

В теории сильных взаимодействий ситуация была еще более сложной. Дело в том, что константа связи для сильных (ядерных) взаимодействий оказалась больше единицы - ее величина, полученная из анализа взаимодействий π - мезонов с нуклонами, оказалась примерно равной 14. Таким образом, трудности возникли

кали не на уровне перенормировки, а на предшествующем этапе построения теории - не работала теория возмущений³.

Вышеуказанные моменты определили различные возможные пути выхода из затруднений локальной квантовой теории поля. Во-первых, можно было пойти по пути отказа от локальности взаимодействий и перейти к рассмотрению протяженных частиц - так строились нелокальные теории поля. Более того, пытались даже ревизовать представление о непрерывности пространства-времени, ибо введение в физику микромира "кванта" пространства-времени механически устраняет расходимости.

Во-вторых, были предприняты попытки выйти вообще за рамки квантово-полевой исследовательской программы - это было характерно для таких направлений, как аналитическая теория S-матрицы или бутстрапная идеология. Речь шла не только об отказе от полевых переменных, динамических уравнений и т.д., но и о существенном изменении наших представлений о структуре материи.

Все подобные направления свидетельствуют о том, что современная физика элементарных частиц не исчерпывается лишь квантовой теорией поля. Однако, все другие направления сталкиваются с существенными трудностями и лишены определенной цельности и целенаправленности.

В-третьих, многочисленность и многозарядовость (вспомним об одиннадцати константах связи сильных взаимодействий) адронов, которые к тому же обладают размерами и внутренней структурой, можно было интерпретировать как свидетельство их неэлементарности. Соответственно встает вопрос о фундаментальных элементарных частицах, которые лежат в основе адронов и вместе с точечными и бесструктурными лептонами образуют истинный (хотя бы на сегодняшний день) фундамент материи.

В-четвертых, можно было не просто отказаться от квантово-полевой исследовательской программы, а попытаться пересмотреть и обобщить ее основы. Для этого необходимо было развить новую базисную теорию, которая могла бы сыграть роль "твердого ядра" новой исследовательской программы. Конкретный вариант такой теории был создан в 1954 г. Ч.Янгом и Р.Миллсом - неабелева калибровочная квантовая теория поля. Локальная неабелева теория Янга-Миллса первоначально представлялась многим физикам лишь "интересной математической

² Вайнберг С. Единые теории взаимодействия элементарных частиц // УФН. 1976. Т. 118, вып. 3. С. 510-511.

игрушкой" (Л.Б.Окунь). Показательно, что в коллективном труде "Философские проблемы физики элементарных частиц" (М., 1963), получившем международную известность и высоко оцененном научной общественностью, основное внимание авторов было уделено нелокальным обобщениям, квантованию пространства-времени, дисперсионным соотношениям и т.д., но даже вскользь не упоминается работа Янга-Миллса и связанная с ней проблематика. Однако, именно ей суждено было сыграть решающую роль в последующем развитии физики элементарных частиц.

Первые успехи были достигнуты в рамках традиционной квантово-полевой мезодинамики и носили формальный характер: речь шла об успешном объединении всего множества адронов в некую упорядоченную конструкцию. Такая идея супермультиплетов была реализована в 1962 г. М.Гелл-Манном и Ю.Нейманом. Этот результат можно было рассматривать как сугубо формальное достижение, как некое возрождение пифагорейских игр с числами, которое привело к формальной классификации частиц. Однако скоро выяснилось, что ситуация больше напоминает создание таблицы химических элементов Д.И.Менделеева, ибо классификация М.Гелл-Манна и Ю.Неймана позволяла предсказывать существование ранее неизвестных адронов, и они были экспериментально обнаружены, заняв предназначенные для них в таблице места.

Но этим не исчерпывается эвристический потенциал супермультиплетной классификации адронов по группе $SU(3)$ - на ее основе в 1963 г. М.Гелл-Манн и независимо от него Г.Цвейг развили оригинальную кварковую модель.

Вновь возникла надежда, что в основе материи лежат немногочисленные фундаментальные элементарные частицы: все огромное многоликое множество адронов оказывается очень изящно сведенным к трем первокирпичикам - кваркам, которые также описываются группой $SU(3)$. В рамках этой группы симметрии кварки образуют семейство из трех членов (u , d и s) со спином $1/2$. Все остальные квантовые числа у кварков различаются. Однако у кварков была одна обескураживающая особенность: они обладают дробными электрическими зарядами. Представления о кварках заставляют нас пересмотреть догму об абсолютности элементарного заряда электрона, ибо u -кварк имеет заряд $+2/3 e$, а d - и s -кварки обладают электрическим зарядом по $-1/3 e$.

В 1969 г. на ускорителе в Стенфорде приступили к изучению глубоконеупругих рассеяний электронов нуклонами. В этих эк-

спериментах было обнаружено, что внутри нуклонов расположены точечные частицы (Р.Фейнман назвал их партонами), сталкиваясь с которыми электроны резко меняют направление движения. Все очень напоминало давнюю ситуацию в опытах Резерфорда, когда было обнаружено ядро. С той только разницей, что теперь были обнаружены партоны (в дальнейшем было доказано, что эти партоны как раз и являются кварками), которые до сих пор предпочитают не появляться в свободном состоянии. Есть подозрение, что они в свободном состоянии вообще не могут существовать.

Итак, были достигнуты великолепные результаты и построена корректная теория сильных взаимодействий - квантовая хромодинамика. Но этот успех оказался возможным лишь в рамках новой исследовательской программы, в основе которой лежит новая базисная теория - перенормируемая квантовая теория неабелевых калибровочных полей со спонтанно нарушенной симметрией. Это была реализация четвертого пути развития, на котором удалось не только построить квантовую хромодинамику, но и объединить слабые и электромагнитные взаимодействия в рамках единой теории и, более того, разработать плодотворные основы для построения единой теории всех видов физических взаимодействий элементарных частиц.

Каковы же основные вехи на пути построения теории сильных взаимодействий, с которой в физику вошли необычные квантовые теории полей нового типа? Следует, конечно же, отметить, что в начале 70-х годов была выяснена ограниченность первоначальной трехкварковой модели.

Последующие экспериментальные открытия потребовали введения в физику новых сортов (их стали называть ароматами) кварков, что же касается теоретических соображений, то они потребовали введения тонких различий внутри каждого аромата.

Если мезоны вполне удовлетворяли требованиям статистики, ибо образованы из частицы и античастицы, у которых различаются квантовые числа, то иная картина получается в случае барионов, часть из которых образовывалась тремя кварками с одинаковыми квантовыми числами (например, uuu , ddd и sss), что несовместимо с принципами запрета.

Отдельные исследователи предполагают, что каждый аромат кварка может существовать в трех различных состояниях, которые характеризуются одинаковыми значениями всех квантовых чисел, а их отличие определяется новым параметром, который имеет как раз три различных значения, - этот параметр получил условное название "цвет".

Естественно, что все эти кварковые ароматы и цвета не имеют никакого отношения к нашему сенсорному аппарату, - здесь не поможет ни нос дегустатора, ни глаз художника. Тем не менее, в новом квантовом числе присутствует одна особенность, которая наталкивает на аналогию с цветовыми соотношениями. Так, если складывать различные цвета вместе, то в итоге возникнет белый цвет, т.е. вместо множества цветов получится обесцвечивание.

Аналогичная ситуация наблюдается в микромире: если мы "сложим" желтый, синий и красный кварки, то получим бесцветный барион. Что же касается бесцветности мезонов, то она обесцвечивается соединением цвета и антицвета (это дополнительный цвет антикварка).

Цвет оказался давно разыскиваемым физиками "сильным" зарядом. Если в электромагнитных взаимодействиях участвуют частицы с электрическим зарядом, которые симметричны относительно положительного и отрицательного знаков, то в сильных взаимодействиях участвуют кварки, обладающие "сильным" зарядом, цветом, которые симметричны относительно трех цветов.

Непросто представить себе те необычные последствия, к которым ведет переход физики от концепции дипольных зарядов к зарядам трехполярным. Это особенно ярко проявилось при выяснении механизма сильных взаимодействий. На помощь приходит представление об единообразии всех фундаментальных взаимодействий, что проявляется, например, в их обменном характере. В качестве канона, с которым можно проводить сравнение, берут квантовую электродинамику - единственную успешно развитую квантово-полевую теорию. В этой теории описываются электромагнитные взаимодействия элементарных частиц, обладающих электрическими зарядами двух знаков (+ и -), и это взаимодействие реализуется обменом частиц одного типа - электрически нейтральными безмассовыми фотонами.

Переход к трехполярным "сильным" зарядам резко усложнил картину и механизм взаимодействия - для переноса сильных взаимодействий необходим обмен восемью различными частицами, которые, как и фотон, являются безмассовыми и обладают спином, равным 1. Эти векторные бозоны были названы глюонами, ибо они "склеивают" кварки в адронах.

Конечно, поражает воображение уже сам факт такого количественного роста типов частиц, необходимых для реализации взаимодействия, но оказывается, что с глюонами в физику пришли и качественные изменения в наших представлениях о механизме взаимодействий. Дело в том, что сами глюоны несут цветовой

заряд (в отличие от электрически нейтрального фотона), а это означает, что они находятся между собой в сильном взаимодействии, что они испускают и поглощают друг друга, изменяя при этом свой цвет. Для отражения этого необычного процесса Л.Б.Окунь нашел наглядный образ: это как бы "светящийся свет"⁴.

Такие емкие образы крайне важны при продвижении познания на качественно новые уровни строения материи, но нас больше интересуют те новые теоретические и концептуальные средства, которые позволили познать закономерности этого уровня мира, в данном случае - позволили построить теорию сильных взаимодействий, которая описывает кварк-глюонные взаимодействия и называется квантовой хромодинамикой (от греч. "хромос" - цвет).

Во-первых, если уравнения электродинамики, вообще говоря, линейны, то уравнения квантовой хромодинамики принципиально нелинейны, в чем отражается факт самодействия элементарных частиц. Во-вторых, введение в физику адронов представления о цвете повлекло за собой пересмотр группы симметрии $SU(3)$, которая первоначально имела дело с тремя ароматами кварков. Она оказалась лишь приближенной симметрией, и ей на смену пришла цветная $SU(3)$ - симметрия, которая является точной (кварки одного аромата но разных цветов имеют одинаковые массы).

В-третьих, квантовая хромодинамика, на основе $SU(3)$ - симметрии оказалась отнесенной к очень интересному классу теорий - это класс калибровочных теорий. С этим типом теорий и соответствующими калибровочными преобразованиями, симметриями и инвариантностью физики знакомы достаточно давно. Здесь можно указать, например, классическую электродинамику, которая относится к классу калибровочных теорий.

Однако введение в физику неабелевых калибровочных теорий помогло не только развить квантовую хромодинамику, но и поставило на повестку дня создание соответствующей единой теории всех (электромагнитных, слабых и сильных) взаимодействий элементарных частиц. Было выяснено, что калибровочная инвариантность обладает универсальным статусом. Перспективы, открываемые программой неабелевых калибровочных полей в современной физике, грандиозны.

Калибровочная инвариантность стала одной из основ объединения фундаментальных физических взаимодействий. Реали-

³ Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М., 1988. С. 43.

зации такого объединения способствовало развитие в физике множества принципиально новых представлений (часть из которых мы уже упоминали при анализе квантовой хромодинамики).

В первую очередь, следует отметить, что в современной физике произошла ревизия самого метафизически застывшего членения природы на различные типы фундаментальных взаимодействий. Проявлением и подтверждением таких разграничений в природе служили существенно различающиеся по величине и фиксированные константы различных взаимодействий, определяющие их силу и характер. В этой связи достаточно вспомнить постоянную тонкой структуры, которая характеризует электромагнитные взаимодействия и чья малая величина ($1/137$) во многом предопределила возможность построения корректно квантовой электродинамики.

Однако развитие современной физики вскрыло поразительный факт: оказалось, что все эти константы различных фундаментальных взаимодействий не являются строго фиксированными. Величины этих констант зависят от передаваемой массы (импульса) обменных частиц. Эта ситуация нашла отражение в новом названии этих констант - их стали называть бегущими. Например, при массах обменных частиц 10^{15} Гэв бегущие константы электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий сравниваются по величине, и мы имеем дело с единой константой единого взаимодействия.

В этом случае не учитываются гравитационные взаимодействия, которые входят в подобное объединение при фантастически огромных энергиях. А для современной ситуации и область 10^{15} Гэв лежит далеко за пределами возможности не только сегодняшней, но, пожалуй, и завтрашней физики. Если же мы обратимся к области "сбегания" констант электромагнитного и слабого взаимодействия, то в этом случае требуются значительно меньшие массы (импульсы) обменных частиц - речь идет о величинах порядка сотни гигаэлектронвольт. Такие значения лежат в пределах возможностей современной ускорительной техники, и поэтому вопрос о создании единой теории электромагнитных и слабых (их называют электрослабыми) взаимодействий является крайне актуальным как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Именно в этой области были достигнуты наиболее впечатляющие успехи в физике последних лет: в 1979 г. С.Вайнберг, Ш.Глэшоу и А.Салам были удостоены Нобелевской премии за создание единой теории электрослабых взаимодействий, а лауреатами этой премии за 1984 г. оказались К.Руббиа и С. ван дер

Мер за их определяющий вклад в проект, осуществление которого привело к экспериментальному обнаружению W^\pm и Z^0 - бозонов, существование которых следует из теории Вайнберга-Глэшоу-Салама.

В свою очередь, создание единой теории электрослабых взаимодействий Вайнберга-Глэшоу-Салама явилось, наряду с развитием квантовой хромодинамики, значительным достижением на пути реализации программы неабелевой калибровочной квантовой теории поля. Идеи, лежащие в основе этого успеха, определяют пути и реальные перспективы построения единой теории всех форм взаимодействий элементарных частиц (программа "Великого синтеза"). Это кварковая модель, $SU(3)$ - цветовая симметрия сильных взаимодействий, локально калибровочный характер этих симметрий, существование спонтанно нарушенной симметрии и новый статус перенормировки.

На каком пути будет достигнуто это объединение? Сейчас, конечно, невозможно ответить на этот вопрос исчерпывающе и определенно. Может быть, для этого надо будет ввести какие-то более фундаментальные частицы, из которых состоят и лептоны, и кварки (лептокварки, преоны и т.д.), но, может быть, нужно рассматривать все известные сейчас фундаментальные частицы как составляющие единого мультиплета, описываемого группой симметрии, объединяющей симметрии $U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$ и др.

Такой подход, основанный на расширении группы симметрии, кажется наиболее перспективным, но при этом все равно остается вопрос о характере расширения группы.

КВАНТОВО-ПОЛЕВОЙ И ХРОНОГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ В ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

История формирования теории элементарных частиц (ТЭЧ) с методологической точки зрения очень поучительна. Именно здесь общие закономерности формирования новой фундаментальной теории проявляются в особенно ясной и отчетливой форме. В то же время, ввиду незавершенности процесса становления ТЭЧ, его методологический анализ имеет свою специфику.

Как известно, главная проблема ТЭЧ состоит в следующем: зная фундаментальные (масса, заряд, спин и т.п.) и динамические (энергия, импульс и т.п.) характеристики взаимодействующих элементарных частиц, определить, какие именно новые частицы могут образоваться в результате такого взаимодействия и с какой вероятностью. При этом речь идет о решении этой проблемы не только в отдельных частных случаях (для некоторых классов взаимодействий), а и в общем случае (для любых взаимодействий). В этой своей предельно общей форме указанная проблема сегодня в полном смысле является "проблемой века". Она является ключевой потому, что закономерности взаимодействия частиц включают в себя и закономерности их взаимопревращений, а последние определяют и закономерности классификации частиц, критерий элементарности и т.п. В качестве необходимого условия решения указанной проблемы выступает "великое объединение" (грандобъединение) электрослабого (КФД - квантовая флავодинамика) и сильного (КХД - квантовая хромодинамика) взаимодействий.

Существует множество подходов к решению "проблемы века". От обилия различных подходов и точек зрения даже у опытного теоретика буквально "рябит в глазах".

Естественно, что на этом крайне запутанном и тернистом пути его поджидает немало опасностей: и чисто методологического характера. Будучи поглощен практической работой, он об этих опасностях вообще не думает. А между тем, игнорирование таких методологических "риффов" нередко приводит к тому, что некоторые проблемы, которыми он занимается в течение многих лет, в

дальнейшем оказываются псевдопроблемами¹. Самыми серьезными из упомянутых "рифов" являются феноменологизм (отказ от раскрытия физической сущности описываемых явлений), спекулятивизм (попытка раскрыть эту сущность с помощью умозрительных понятий, исключающих экспериментальную проверку) и метафоризм (попытка раскрыть сущность принципиально новых явлений с помощью старых теоретических понятий, что может до поры до времени выдерживать опытную проверку, но ведет к теоретическим парадоксам). Стихийное игнорирование этих трех опасностей наглядно подтверждает справедливость слов Эйнштейна, что точная наука без теории познания "становится примитивной и путаной".

При огромном разнообразии умозрительных возможностей и их формальных выражений требуется какой-то ориентир, который позволил бы ограничить множество возможностей и облегчить, тем самым, нахождение пути к истине. Так как число качественных возможностей значительно превышает число качественных, то этот ориентир по самому своему существу должен иметь качественный характер. Методологический анализ фундаментальных теоретических понятий, их взаимоотношений, возможностей их развития и тех противоречий ("антиномий"), которые возникают в ходе этого развития. Когда многочисленные попытки строгой математической формулировки теории образуют "непроходимые джунгли" формальных конструкций, качественный анализ фундаментальных понятий ("идейной стороны" теории) играет роль ариадниной нити, позволяющей выбраться из этого, с первого взгляда, безнадежно запутанного лабиринта и увидеть за деревьями лес. Конечной целью указанного анализа является выработка такой исследовательской программы, которая бы решала обнаруженные теоретические антиномии и исключала феноменологизм, спекулятивизм и метафоризм.

Несмотря на огромное разнообразие различных подходов к проблеме построения единой ТЭЧ, в истории ТЭЧ четко прослеживаются две ведущие тенденции: стремление 1) сохранить неизменным понятие макроскопического пространства-времени, описываемого псевдоевклидовой геометрией (то есть "плоского", но анизотропного) и впервые введенного Минковским в 1908 г.², и 2) изменить его. Первая может быть условно названа квантово-

1 Таким образом, "экономия" времени за счет методологических изысканий приводит, в конечном счете, к гораздо большей растрате рабочего времени вследствие неудачно выбранного направления исследований.

2 Минковский Г. Пространство и время. (Принцип относительности) / Сост. А.А.Тяпкин. М., 1973.

полевым подходом, поскольку пространство-время Минковского, в точках которого возможно уничтожение и рождение элементарных частиц, получило название "квантового поля". Вторую можно назвать хроногеометрическим подходом, ввиду того, что она связана с изменением "хроногеометрии" (то есть структуры пространства-времени). Как квантово-полевой, так и хроногеометрический подход в процессе своего развития породил несколько модификаций. Важнейшими разновидностями квантово-полевого подхода являются аксиоматический (исследование аксиом, которым подчиняется взаимодействие различных квантовых полей), унифицирующий (сведение множества полей к единому полю, взаимодействующему с самим собой) и калибровочный (исследование такого взаимодействия полей, которое инвариантно относительно локальных калибровочных преобразований). Так как ТЭЧ как квантовая теория поля в ее калибровочном варианте (квантовая теория калибровочных полей - КТКП) достигла наибольших результатов и является в настоящее время наиболее развитой формой квантово-полевого подхода, то калибровочный подход заслуживает более детального рассмотрения. Основным понятием КТКП является понятие калибровочного квантового поля. Оно представляет собой такое квантовое поле, взаимодействие которого с другими квантовыми полями инвариантно относительно локальных калибровочных преобразований.

История калибровочного подхода вкратце такова³. В 1954-1964 гг. были заложены основы общей КТКП (Янг и Миллс, Хиггс и др.), в 1967-1968 гг. путем применения этой теории к слабым взаимодействиям была построена теория электрослабых взаимодействий (квантовая флავодинамика - КФД), которая обнаружила глубокую связь между слабыми и электромагнитными взаимодействиями и сделала описание слабых взаимодействий "перенормируемым", то есть свободным от расходимостей (Вейнберг и Салам), в 1972-1973 гг. на основе применения КТКП к сильным взаимодействиям была построена теория сильных взаимодействий (квантовая хромодинамика - КХД), которая сделала перенормируемым описание сильных взаимодействий при высоких энергиях (Гелл-Манн, Вейнберг, Гросс, Вильчек, Политцер). В период с 1973 по начало 80-х годов усилия теоретиков сконцентрировалось в двух направлениях: с одной стороны, делались попытки завершить построение КХД,

³ См.: Квантовая теория калибровочных полей // *Новости фундаментальной физики*. Вып. 8. М., 1977; *Славнов А.А., Фаддеев Л.Д.* Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М., 1978 и др.

построив перенормируемую теорию сильных взаимодействий при низких энергиях (т.е. проблема конфайнмента), с другой стороны, начались исследования в области синтеза КФД и КХД (грандкалибровочные теории (CVT) и суперкалибровочные теории (SUSY). Очевидно, что общая ТЭЧ, описывающая любые взаимодействия любых элементарных частиц, может быть построена только после решения проблемы "великого объединения", или (как выразился Салам) "калибровочного объединения фундаментальных сил". В рамках КТКП эта проблема формулируется следующим образом: надо найти такую группу локальных калибровочных преобразований, относительно которой был бы инвариантен лагранжиан универсального взаимодействия. В качестве такой группы предложено множество различных групп, однако, какая именно из этих групп соответствует объективным свойствам универсального взаимодействия и содержится ли вообще в этом множестве та группа, которая соответствует этим свойствам, пока остается неизвестным.

Если теперь взглянуть на калибровочный подход с методологической точки зрения, то нетрудно заметить, что основным достоинством этого подхода является его высокая эмпиричность, то есть способность согласовать предсказания теории с опытом. В то же время в этом подходе имеется определенный неэстетический аспект. Такое замечание, с первого взгляда, может показаться необоснованным, если учесть принцип локальной калибровочной инвариантности, лежащий в основе КТКП. Ведь из этого принципа можно получить "очень красиво" множество эмпирически проверяемых следствий. Подобное же "сведение" многообразия к единству, как известно, всегда рассматривалось в качестве одного из важных признаков "красоты" теории. Однако красота теории определяется гармонией не только между частным и общим, но и между математической формой теории и ее физическим содержанием⁴. На философском языке это эквивалентно гармонии между количественным и качественным описанием (как явлений, так и их сущности).

Полный критерий красоты теории в строгой форме может быть сформулирован следующим образом. С онтологической точки зрения, теория красива, если она раскрывает сущность множества явлений при условии гармонического сочетания качественного и количественного описания этой сущности. С гносе-

⁴ См.: Гейзенберг В. Смысл и значение красоты в точных науках // Вопр. философии. 1979. N 12.

ологической точки зрения, это значит, что теория позволяет дедуцировать из одного теоретического закона множество эмпирических закономерностей, причем указанный теоретический закон должен быть описан как формально ("формализован" на искусственном языке), так и содержательно ("интерпретирован" на естественном языке). Другими словами, единство количественного и качественного описания предполагает единство формализации и интерпретации⁵.

Последнее означает, что: а) все теоретические понятия, выраженные на естественном языке, должны быть "формализованы", то есть должны быть найдены соответствующие знаковые структуры, адекватно выражающие количественный аспект этих понятий (в том числе, количественные отношения между величинами, характеризующими эти понятия), б) все знаковые структуры, записанные на искусственном языке, должны быть интерпретированы (прямо или косвенно) с помощью теоретических понятий ("конструктов"), то есть понятий, имеющих умоглядное происхождение и эмпирическое значение и выражающих на естественном языке качественный аспект соответствующих величин (и количественных отношений, которыми последние связаны между собой).

Указанный критерий красоты теории является следствием обобщения как теорий классической физики, так и СТО, ОТО и НКМ. Нетрудно заметить, что возможны два основных отклонения от этого критерия: превалирование 1) интерпретации над формализацией (вербалистический подход, характерный для натурфилософской тенденции в современном естествознании) или 2) формализации над интерпретацией (формалистический подход, типичный для позитивистской тенденции)⁶.

Из сказанного ясно, что теория некрасива, если гармония между частным и общим достигается в ней на чисто количественной (и, следовательно, формальной) или чисто качественной (исключительно содержательной) основе. Другими словами, теория некрасива, если для нее характерен формалистический ("игра в формулы") или вербалистический ("игра в слова") подход. Следовательно, красота теории нарушается тогда, когда на-

⁵ О единстве качественных и количественных методов см., например: *Ильин В.В.* Онтологические и гносеологические функции категорий качества и количества. М., 1972; о единстве формализации и интерпретации: *Алексеев Б.Т.* Философские проблемы формализации знания. Л., 1982.

⁶ Это превалирование проявляется в недооценке интерпретации (формализации) и может доходить до полного игнорирования интерпретации (формализации).

рушается гармония не только между общим и частным, но и между формальной и содержательной стороной теории (то есть между формализацией и интерпретацией). Но именно с такой ситуацией мы сталкиваемся в случае квантовой теории калибровочных полей. С одной стороны, в ней нарушается гармония между общим и частным благодаря тому, что процедура перенормировок по-прежнему сохраняется в качестве искусственной процедуры, ибо необходимость последней не вытекает из исходных принципов теории. С другой стороны, нарушается гармония между содержательной (качественной) и формальной (количественной) стороной теории ввиду неясности физического смысла калибровочных эффектов (конфайнмента, механизма Хиггса и т.п.). Остается загадкой и сам принцип локальной калибровочной инвариантности: он вводится, по существу, из чисто формальных соображений, в чем же заключается то глубокое физическое содержание, которое скрывается за ним, остается совершенно неясным.

Между тем, в истории теоретической физики несоответствие тех или иных теоретических построений принципу методологической красоты является не менее важным стимулом для дальнейшего развития теории, чем несоответствие этих построений опытным данным. Быть может, лучше всех об этом сказал Дирак: "Теория, обладающая математической красотой, имеет больше шансов оказаться правильной, чем уродливая теория, согласующаяся с каким-то числом"⁷.

Теперь нам следует подвергнуть аналогичному анализу хроногеометрический подход. Основными разновидностями последнего являются континуальный подход (модификация пространства-времени Минковского без нарушения аксиомы непрерывности), квантование специальной теории относительности (СТО), то есть квантование "плоского" пространства-времени, и квантование общей теории относительности (ОТО), то есть квантование "искривленного" пространства-времени⁸.

Обычно считается, что причиной стремления к модификации хроногеометрии СТО явилась потребность в устранении расхождений, с которыми был связан квантово-полевой подход.

⁷ Дирак П.А.М. Пути физики. М., 1983. С. 5.

⁸ См., например: Блахинцев Д.И. Пространство и время в микромире. М., 1982. Следует обратить внимание на двусмысленность выражения "квант вание пространства-времени": оно может означать как квантование "плоского", так и "кривого" пространства-времени. А эти два понятия имеют существенно разный смысл. См. также: Барашенков В.С. Проблемы субатомного пространства и времени. М., 1979.

Этим объяснялась большая популярность хроногеометрического подхода в 30-х - 50-х годах. Той же причиной объясняют и падение его популярности после того, как квантово-полевой подход в своей калибровочной форме смог устранить расходимость не только в теории электромагнитных (квантовая электродинамика - КЭД)⁹, но и в теории слабых и сильных взаимодействий. Правда, когда речь заходит об устранении расходимостей в универсальном взаимодействии (гранд- и суперкалибровочные теории), здесь квантово-полевой подход даже в своей калибровочной форме по-прежнему сталкивается с очень серьезными трудностями. Тем не менее, успехи калибровочного подхода в преодолении расходимостей в области слабых и сильных взаимодействий породили среди большинства физиков уверенность в том, что потребность в модификации хроногеометрии отпала.

Между тем, необходимость устранения расходимостей была лишь одним из "технических" следствий гораздо более глубокой причины, а именно: фундаментального противоречия между исходными принципами СТО и НКМ¹⁰.

Указанное противоречие состоит в следующем. В основе СТО лежит предположение о совместимости макроскопического пространственно-временного (M) и импульсно-энергетического (M_p) описания движения микрообъектов. Это значит, что точная локализация частицы в точке X , в одной из пространственно-временных зон допускает ее точную локализацию в "точке" P в соответствующей зоне M_p (и обратно). Поэтому псевдосвклидова структура M (т.е. конус в координатном представлении) предполагает аналогичную структуру M_p (конус в импульсном представлении) и обратно. Напротив, НКМ требует их несовместимости ("дополнительности" в смысле взаимоисключаемости). Действительно, в силу соотношений неопределенности $\Delta p, \Delta x \sim \hbar$ и $\Delta E, \Delta t \sim \hbar$ точная локализация частицы в соответствующей зоне M приводит к полному неопределенности P , т.е. возможности локализации частицы в любой "точке" M_p (и обратно). Вследствие этого причинные ограничения на движения частицы в M оказы-

⁹ Устранение расходимостей в КЭД было осуществлено еще до возникновения калибровочного подхода в 30-х годах (Фейнман, Дайсон).

¹⁰ "...Более точное исследование показало, что обе эти теории (СТО и НКМ - В.В.) вступают в определенном пункте в конфликт, в результате чего и происходят все дальнейшие трудности" (Гйзенберг В. Физика и философия. М., 1963. С. 132)

ваются несовместимыми с причинными ограничениями ее движений в M_p ¹¹.

Естественно, что потребность в разрешении указанного противоречия привела к идее, что его следует искать на пути модификации хроногеометрии СТО (то есть модификации M). Если мы, однако, сравним различные типы такой модификации с методологической точки зрения, то сразу заметим, что они далеко не равноценны.

Рассмотрим вначале континуальный подход ¹². Модификация свойств M без квантования основана на предположении, что квантование движения может не повлечь за собой квантование пространства-времени.

Действительно, дискретность движения микрообъекта, проявляющаяся, в частности, в квантовании его энергии, сама по себе не требует дискретности пространства-времени (Ср. нерелятивистскую квантовую механику). Однако когда ставится вопрос об объяснении этой дискретности путем модификации хроногеометрии (изменения метрических или топологических свойств M), тогда естественным объяснением является переход от непрерывного к дискретному пространству-времени. Это не исключает возможности формального объяснения и путей модификации каких-то свойств M в рамках непрерывного пространства-времени, но последняя процедура в методологическом плане выглядит довольно искусственной (если мы учтем, что пространство-время есть не что иное, как геометрическая модель всевозможных движений). Поэтому кажется маловероятным, чтобы в ультрамалых масштабах квантование движения было связано с переходом от одного типа непрерывного пространства-времени к другому типу непрерывного же пространства-времени.

Рассмотрим теперь квантование ОТО. Квантование "искривленного" пространства-времени основано на предположении, что ОТО применима не только в мега- и макро-, но и в микромире. В пользу такого расширения границ применимости ОТО, казалось бы, говорят два аргумента: а) гравитационные взаимодействия между элементарными частицами начинают играть существенную роль на расстояниях порядка 10^{-33} см, б) они

¹¹ Описанное противоречие с методологической точки зрения очень напоминает противоречие между классической механикой (обратимость процессов) и классической термодинамикой (их необратимость); между классической механикой (принцип относительности Галилея) и классической электродинамикой (его нарушение) и т.п.

¹² См., например: *Блохинцев Д.И. Пространство и время в микромире.* М., 1982. С. 244-256.

играли существенную роль на ранних этапах расширения Метагалактики, когда она имела микроскопические размеры (теория Большого взрыва). Оба эти аргумента, однако, основаны на релятивистском уравнении гравитационного поля (основном законе ОТО, Эйнштейн 1915). Следовательно, они пытаются доказать законность экстраполяции ОТО на микромир, уже предполагая такую экстраполяцию. Между тем, существуют серьезные методологические аргументы против законности такой экстраполяции¹³. В частности, нельзя смешивать необходимость изменения геометрии в микромире с необходимостью "искривления" М. Поэтому и квантование "искривленного" пространства-времени с методологической точки зрения не представляется достаточно перспективным.

В отличие от рассмотренных вариантов хроногеометрического подхода квантование "плоского" пространства-времени не приводит к тем методологическим трудностям, с которыми столкнулись другие его варианты. Это не значит, что квантование СТО (будем называть его условно дистонным¹⁴ подходом) свободно от методологических неувязок: у него есть свои трудности. Важнейшей из них является кажущаяся невозможность совместить дискретность пространства-времени со специальным принципом относительности таким образом, чтобы при этом не нарушался принцип соответствия теории дискретного пространства-времени макроскопической теории непрерывного пространства-времени.

Опишем теперь вкратце историю дистонного подхода. В 1927-1938 гг. возникает простейший вариант квантования М - теория пространственно-временной решетки (Флинт, Амбарцумян, Иваненко, Гейзенберг), в 1947-1948 гг. появляется теория операторов координат (Снайдер), в 1959-1960 гг. - теория "конечного" пространства-времени (Коиш, И.С.Шапиро), в 1961-

13 "...Может оказаться, что подобная экстраполяция (римановой геометрии и связанных с нею гравитационных сил на микромир - В.Б.) имеет не больше оснований, чем распространение понятия температуры на части тела молекулярных размеров" (*Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 2. М., 1966. С. 88*). "...Гравитация является чрезвычайно слабой в атомной физике (имеет λ в виду физика элементарных частиц В.Б.), поэтому кажется маловероятным, что она будет играть важную роль. В силу указанного обстоятельства нам следует искать в другом направлении" (*Dirac P.A.M. The Future of Atomic Physics /, International Journal of Theoretical Physics. 1984. Vol. 23, N 8. P. 677*).

14 От словосочетания "дискретный" и "СТО". В отличие от квантования СТО квантование ОТО будем обозначать в дальнейшем термином "дистонный подход" (от словосочетания "дискретный и СТО").

1967 гг. - теория "искривленного" пространства 4-импульсов (Гольфанд, Кадышевский, Тамм), наконец, в 1968-1978 гг. создается теория пространственно-временного кода (Д.Финкельштейн)¹⁵.

Если сравнить эту историю¹⁶ с историей калибровочного подхода, то сразу бросается в глаза одно различие. В случае калибровочного подхода мы имеем дело с явной преемственностью теорий, на основе которой получалось прогрессивное развитие (когда каждая более сложная теория включает в себя менее сложную как некоторый фрагмент или аспект). В случае же дистонного подхода такой преемственности не заметно и поэтому никакого прогрессивного развития как будто бы не происходит: речь идет просто о разных вариантах квантования M , которые имеют мало общего¹⁷. Однако, такое представление о разных этапах дистонного подхода основано на его поверхностном рассмотрении и в действительности является иллюзией: при более глубоком анализе и здесь обнаруживается закономерная связь и преемственность. А поэтому и здесь наблюдается определенный прогресс, хотя он сильно затуманен различными побочными факторами.

В методологическом отношении дистонный подход является в некотором смысле прямым антиподом калибровочного подхода: в основу его положена чрезвычайно смелая и революционная идея о качественном отличии микропространства-времени от макропространства-времени. Но красота этой идеи оказалась как бы свособразным "запятисом", затрудняющим ее эмпирическую проверку: все попытки связать различные варианты дистонного подхода с опытом кончились безрезультатно.

Из изложенного ясно, что самой характерной чертой истории ТЭЧ является борьба между подходом квантово-полевом (наиболее совершенной формой которого выступает калибровочный подход) и хроногеометрическим подходом (наиболее совершенной формой последнего оказывается дистонный подход): первый стремится сохранить макроскопические представления о пространстве-времени, а второй - изменить их.

15 Здесь отмечены только наиболее важные вехи в развитии дистонного подхода.

16 Об истории дистонного подхода см.: *Вяльцев А.Н.* Дискретное пространство-время. М., 1965; *Андреев Э.П.* Пространство микромира. М., 1969; *Ахундов М.Д.* Проблема прерывности и непрерывности пространства и времени. М., 1974 и др.

17 Исключение составляют только теории операторов координат и "кривого" пространства 4-импульсов.

В ходе указанной борьбы тенденция к неограниченной экстраполяции пространства-времени Минковского "вглубь" берет явный верх над тенденцией к модификации этого понятия (то есть к установлению границы его применимости в ультрамалых масштабах). С чисто физической точки зрения, в этом нет ничего удивительного (и, тем более, "драматического"), ибо область применимости любого физического понятия может в принципе как сужаться, так и расширяться. Однако, дело обстоит совсем иначе, если на него посмотреть с методологической точки зрения.

Обобщение истории теоретической физики дает, по крайней мере, четыре аргумента в пользу того, что модификация макроскопических пространственно-временных представлений в микромире не только возможна, но и необходима.

1) Изменение пространственно-временных представлений в мегамире (ОТО). Было бы странно и алогично, если бы увеличение масштабов материальных объектов было бы связано с изменением пространственно-временных представлений, а их уменьшение - нет. На это обратил внимание еще Риман (1854)¹⁸. Такое поведение пространства-времени "в малом" нельзя бы было согласовать ни с фундаментальной зависимостью пространства и времени от материи, ни с не менее фундаментальной зависимостью количественных и качественных изменений любого типа друг от друга. Таким образом, прецедент изменения пространства-времени "в большом" является серьезным аргументом в пользу его изменения "в малом".

2) Изменение представлений о движении и причинности в микромире (НКМ). Поскольку между атрибутами материи существует тесная взаимосвязь¹⁹, то не может возникнуть такая ситуация, при которой изменение фундаментальных характеристик одного атрибута не затрагивает фундаментальные характеристики другого. Достаточно вспомнить тесную связь, существующую между пространством, временем, движением и причинностью в макромире (описываемую СТО) и мегамире (описываемую ОТО). Это делает понятным настойчивые призывы Бора и Гейзенберга к дальнейшему отказу от традиционных наглядных представлений и связанных с ними фундаментальных понятий, которые были присущи классической физике и "незаметно" проникли из нее в физические теории XX века, включая СТО и НКМ.

¹⁸ Риман Б. Сочинения. М.:Л., 1948. С. 291.

¹⁹ См., например: Диалектика материального мира / Под. ред. В.В. Ильина, Д.А. Гущина. Л., 1986. Гл. 1 и 2.

3) Связь развитой консервативной тенденции в истории физики с так называемой метафорической теорией. Как уже отмечалось, специфика метафорической теории заключается в объяснении существенно новых явлений с помощью старых теоретических понятий, заимствованных из разных старых теорий. Так как старые понятия могут быть неадекватными для описания новых явлений, то они используются в парадоксальных сочетаниях, благодаря чему в такой теории возникают "парадоксы" (особого типа противоречия). Классическим примером метафорической теории была эфирная теория электромагнитного поля (Максвелл, Кельвин, Лоренц и др.), которая пыталась "втиснуть" принципиально новый класс явлений (электромагнитные) в "прокрустово ложе" понятий классической механики. При этом возникали парадоксы (например, получалось, что эфир должен сочетать в себе свойства жидкости и твердого тела и т.п.). Метафорическая теория отличается от действительной теории тем, что ее понятия дают не буквальное, а инносказательное, условное ("метафорическое") отражение сущности описываемых явлений, то есть являются своего рода научными "метафорами"²⁰. Тем не менее, метафорическая теория существенно отличается от спекулятивной конструкции: хотя ее понятия не дают адекватного отражения сущности изучаемых явлений, она не только может объяснять известные эмпирические законы, но и предсказывать новые, причем эти предсказания, вообще говоря, могут подтверждаться экспериментом.

Как известно, господствующей консервативной тенденцией в XIX веке было стремление к "механизации" любых немеханических явлений. Подавляющее большинство физиков было абсолютно уверено в правильности такой методологической установки. Всякие сомнения в этом казались необоснованной спекуляцией, связанной с недостаточным профессионализмом скептиков. С позиций XX века становится ясно, почему тогда физикам казалось, что сам эксперимент свидетельствует о механической природе любых немеханических (в том числе, электромагнитных) явлений: они смотрели на эти явления и на результаты экспериментирования с ними через "механические (ньютоново-лагранжевы) очки". Другими словами, из множества возможных интерпретаций сущности изучаемых явлений и результатов экспериментирования над ними они выбирали ту, которая соответствовала их априорной методологической установке.

²⁰ О роли метафор в научном исследовании см.: Гусев С.С. Наука и метафора. Л., 1984.

4) Связь развитой консервативной тенденции с подготовкой революционной ситуации в теоретическом исследовании. История физики убедительно свидетельствует о том, что нельзя отказываться от старых фундаментальных понятий по поводу открытия любых новых явлений. Первоначально надо попытаться понять эти явления с помощью старых понятий ("здоровый" консерватизм в науке). Не раз такое применение старых понятий к новым явлениям приводило к прекрасным результатам (см., напр., описание тепловых явлений с помощью механических понятий). Поэтому периодическое появление в истории физики метафорических теорий является не случайным, а необходимым (и притом не отрицательным, а положительным) процессом. С одной стороны, метафорическая теория дает возможность полноты максимум новых количественных закономерностей в рамках старых качественных представлений. С другой стороны, возникающие в ней внутренние парадоксы являются своеобразным симптомом того, что старые теоретические понятия по отношению к новым явлениям исчерпали себя (или, другими словами, что новые явления выходят за границы применимости старых понятий). Тем самым, указанные парадоксы как бы сигнализируют исследователю, что наступает пора построения новых фундаментальных понятий. Следовательно, не только во всемирной истории, но и в истории науки "сова Минервы начинает свой полет только с наступлением сумерек" (Гегель). Это значит, что действительная потребность в новой фундаментальной теории появляется лишь тогда, когда оказываются исчерпанными возможности старой теории²¹.

Таким образом, подлинный смысл и практическое значение метафорической теории заключается не в том, что она раскрывает действительную сущность новых явлений, а в том, что она подготавливает информационные и методические условия для раскрытия этой сущности. Метафорическая теория есть, следовательно, не копия качественной стороны изучаемых явлений, а

²¹ Следует отметить, что эти возможности, как правило, никогда не бывают исчерпанными на 100 процентов, поэтому в канун научной революции старая теория находится именно в состоянии "сумерек", а не полного "мрака". "Сумеречное" состояние теории обычно выражается в разного рода внутренних противоречиях. Одним из наиболее существенных является нарушение гармонии между формой теории и ее содержанием. Последнее проявляется, как уже отмечалось, или в доминировании формализации над интерпретацией (необычное усложнение формализма теории без ясной интерпретации - формалистическая тенденция) или интерпретации над формализацией (доминирование чисто качественных рассуждений при отсутствии математической формулировки - вербалистическая тенденция).

особый вспомогательный инструмент для построения такой копии. В этом отношении она играет в истории науки большую эвристическую роль. Отсюда ясно, что метафоризм как методологическая опасность, поджидающая теоретика (о которой упоминалось в начале этой работы), заключается не в построении метафорической теории, а в отождествлении последней с действительной теорией. Метафоризм - это приписывание метафорической теории функций, которыми она не обладает. Так, например, метафоризм физиков, которые строили различные эфирные теории электромагнитных явлений, заключался не в построении этих теорий (которые играли полезную эвристическую роль), а в приписывании им функций действительной теории, то есть релятивистской электродинамики.

Таким образом, интенсивное развитие метафорической теории, создавая видимость триумфального шествия старых понятий, в то же время незаметно и, так сказать, "подспудно" лишает их той основы, на которой они покоятся, т.е. "здоровый" консерватизм в науке оказывается, в конечном счете, ступенью к "нездоровому" консерватизму (метафоризм), который подготавливает почву для революции.

Из изложенного ясно, что в истории ТЭЧ складывается парадоксальная и в высшей степени "драматическая" ситуация: методологический анализ выдвигает очень серьезные аргументы как онтологического (1) и (2), так и гносеологического (3) и (4) характера в пользу модификации М, тогда как реальная практика научного творчества свидетельствует о необходимости консервации М. Каким образом может быть разрешено это противоречие? Этот вопрос порождает, в свою очередь, множество других вопросов. В самом деле: не связан ли указанный парадокс с тем, что мы смотрим на изменение фундаментальных характеристик атрибутов (пространств, времени, движения, причинности и т.п.) материи в микромире через "макроскопические очки", подобно тому, как Максвелл, Кельвин, Лоренц и др. выдающиеся физики XIX в. смотрели на электромагнитные явления через "механические очки"? Если это так то результатом такой "макроскопизации" микроявлений должна быть новая метафорическая теория, которая должна описывать микроявления на языке макропонятий (в частности, на языке M^{λ}). Хотя последние неадекватны микроявлениям (ибо заимствованы из мира существенной другой природы), но при некоторых парадоксальных сочетаниях они могут давать такое описание, которое до поры до времени будет выдерживать количественную проверку. Не является ли квантовая теория поля (КТП) именно такой теорией, а

калибровочный подход - не чем иным, как результатом своеобразной "макроскопизации" высокоразвитого дистонного подхода? И, тем самым, не оказываются ли оба эти подхода в процессе их развития разными сторонами одной медали?

Такие вопросы у ортодоксального мыслящего теоретика, получившего прекрасное "квантово-полевое" воспитание, могут вызывать лишь недоумение, ибо между формами квантования СТО, которые известны в истории ТЭЧ, и калибровочным подходом как будто бы нет ничего общего. Однако весь "фокус" проблемы заключается как раз в том, что калибровочный подход может быть результатом "макроскопизации" не старых форм квантования СТО, а той новой формой, которая может получиться в результате последовательного квантования СТО с учетом калибровочного подхода. Калибровочный подход, по-видимому, указывает направление, в котором следует развивать дистонный подход, чтобы сделать его доступным опытной проверке. Но если в методологически наиболее перспективных формах квантово-полевого (калибровочный) и хроногеометрического (дистонный) подходов намечается тенденция к их сближению и объединению в нечто единое, то не дает ли это ключ к разрешению старой антиномии между СТО и НКМ и к объединению на этой основе КФД и КХД?

Нетрудно заметить, что такая постановка проблемы существенно отличается от традиционной, когда проблема "великого объединения" или рассматривается чисто формально (как поиск калибровочной группы, объединяющей группы КФД и КХД - GVT) или связывается с объединением прокалиброванных КТП и все той же ОТО -SUSY. Следует подчеркнуть, что речь идет именно о содержательном синтезе, предполагающем выдвижение новых фундаментальных физических понятий и принципов в отличие от чисто формального синтеза, который ограничивается развитием математического аппарата в рамках уже существующих понятий и принципов. Разумеется, содержательный синтез требует, в свою очередь, адекватного математического аппарата для своего выражения, то есть "формального синтеза", но этот последний здесь перестает быть чем-то самодовлеющим, а выступает как "эманация" (форма проявления) лежащего в его основе содержательного синтеза.

Итак, анализ истории формирования ТЭЧ приводит к постановке существенно новой проблемы - синтеза калибровочного и дистонного подходов. Естественно допустить, что форме калибровочного и дистонного подходов квантово-полевой и хроно-

геометрический подходы (как это ни парадоксально) настолько сближаются, что их синтез становится вполне назревшей задачей.

Возникает вопрос о методе решения указанной проблемы. Дело в том, что возможности "синтеза" калибровочного и дистонного подходов могут быть чрезвычайно многообразными. Чтобы сузить их число, надо руководствоваться каким-то методологическим принципом, который бы давал достаточно сильное ограничение. Естественно использовать в качестве такого принципа требование, чтобы решение вышеуказанной проблемы одновременно удовлетворяло методологии Эйнштейна и Бора²². Под "методологией Эйнштейна" мы будем подразумевать эйнштейновскую идею геометризации взаимодействия, связанную с принципом относительности движения. Соответственно, под "методологией Бора" будет подразумеваться боровская идея квантования взаимодействия, ассоциирующаяся с принципом дополненности движения.

В литературе неоднократно отмечалась противоположность этих методологических установок: первая акцентирует внимание на непрерывности движения и связанной с этим динамической закономерности, вторая делает упор на дискретность движения и ассоциирующуюся с нею вероятностную закономерность. Именно ввиду противоположности указанных установок их объединение может дать очень сильное ограничение числа возможных решений вышеупомянутой проблемы.

Представляет интерес выяснить эвристическую роль принципа единства методологии Эйнштейна и Бора. Эта роль может быть раскрыта путем исследования селективной функции этого принципа. Практически это означает, что из множества возможных моделей синтеза калибровочного и дистонного подходов надо выбрать ту, которая удовлетворяет указанному принципу.

²² Речь идет, разумеется, не о методологии этих великих физиков в полном объеме, а только об определенном аспекте последней, существенном для рассматриваемой здесь проблемы.

ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Нам представляется, что ученые, работающие в области физики элементарных частиц, должны опираться на весь арсенал предшествующих ей теорий наследия, которые были органично связаны с физической наукой. Поэтому рассматриваемые проблемы бытия микрообъектов нельзя ограничить лишь собственной областью. В физике элементарных частиц часто речь идет о физической реальности, а известно, что теоретическое обоснование на этот счет впервые дал Эйнштейн. Тем не менее до сих пор в литературе нет единого взгляда на эту проблему.

Эйнштейновское представление о физической реальности мы рассмотрим в контексте развития физической науки и главным образом теории относительности. Но прежде всего хотелось бы напомнить о некоторых общих вопросах, связанных с этой теорией. Во-первых, она имеет многоаспектный характер, является результатом развития физической, математической и философской науки. Общим недостатком многих работ по теории относительности является абсолютизация какого-либо из этих аспектов, что не позволяет оценить подлинный вклад того или иного ученого в ее создании, раскрыть методы, побудительные мотивы по ее развитию.

Другим недостатком является ограничение историко-научных и философских предпосылок теории относительности лишь рассмотрением проблем пространства, времени и движения. К ее предпосылкам следует отнести также понятия "материя", "физическая реальность".

Каков же был философский фон в естествознании накануне развития теории относительности? Известно, что еще во второй половине XIX века представление о материи, как предельно широкою понятию, охватывающим предметы внешнего мира, отождествлялось с понятием вещества. Учение о веществе согласовывалось с концепцией древних мыслителей о наличии в природе лишь атомов и пустоты. Отсюда понятна устойчивость в сознании ученых ньютоновской идеи абсолютного пространства и времени.

О физических объектах в состоянии поля ясного научно обоснованного представления тогда не было. Хотя мы и не стоящие

время знаем, что эти две области внешнего мира - вещество и поле по своим свойствам принципиально отличаются друг от друга. Физические понятия о веществе и поле можно считать в настоящее время предельно широкими понятиями физической науки, отражающими нами исследованный внешний мир.

Известно, что вещественные объекты, как более доступные нашим чувствам, были относительно хорошо изучены на более ранних этапах развития философии и естествознания. В философии реализма получил обоснование объективный характер вещественных тел. Физика выявила их наиболее существенные свойства, такие как пространственно-ограниченные формы, наличие массы покоя, спектра скоростей, траектории движения. Эти свойства определяют бытие вещества, отделяют его от бытия поля. В общей форме назовем эту область внешнего мира вещественным субстратом.

Объективной основой классической физики являются вещественные тела, их отношения и свойства. Это обстоятельство было одной из причин абсолютизации классической механики. Застой в физике был преодолен благодаря изучению и включению в структуру физики объектов внешнего мира в виде поля и осознанию того факта, что электромагнитное поле существует объективно как и вещественная материя, но которое по своим свойствам принципиально отличается от вещества. Реальность в форме поля предстала перед учеными в виде объектов, которые в отличие от вещества, не локализованы в такой степени как вещество, а равномерно распределены в пространстве, не имеют траектории полета, скорость их всегда постоянна и не зависит от источника, они не имеют массы покоя. Эти свойства являются существенными свойствами поля, поскольку определяют его бытие. Названную область внешнего мира мы назовем полевым субстратом.

Ознакомление Эйнштейна с состоянием физики и философии привело его к выводу, что выход на качественно новый виток в теории можно сделать лишь опираясь не только на собственные знания, но и на философские обобщения. В работе "Физика и реальность" Эйнштейн писал: "Критический ум физика не может ограничиваться рассмотрением только его собственной теории. Он не может двигаться вперед без критического рассмотрения значительно более сложной проблемы: анализа природы повседневного мышления"¹.

¹ Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 4. М., 1967. С. 200.

В трудах Эйнштейна мы не найдем целостной системы его философских взглядов, хотя весь дух его творчества пронизан философскими идеями. Он интересовался содержанием различных философских направлений, изучал историю философии, извлекал философские зерна из работ основателей классической механики и, таким образом, создал определенную систему философских воззрений. Свои философские взгляды Эйнштейн излагал специфически, в форме выражений присущих тем философам, к которым он обращался. Это обстоятельство служило поводом для того, чтобы причислить его к сторонникам той или иной школы.

Опираясь на широкую гамму философских и естественнонаучных идей, Эйнштейн выработал для себя общие методологические установки по отношению к науке. Он различал существование двух принципиально различных концепций относительно природы Вселенной: мир как единое целое, зависящее от человека; мир как реальность, не зависящая от человека. Эйнштейн придерживался второй концепции. В беседе с ирландским писателем Мэрфи Эйнштейн говорил: "Ни один физик не верит, что внешний мир является производным от сознания, иначе он не был бы физиком". В статье "Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности" он подчеркивал: "Вера в существование внешнего мира, независимого от воспринимающего субъекта, лежит в основе всего естествознания"². Он глубоко верил во внутреннюю гармонию мира, в наличие причинно-следственной связи между явлениями. Эйнштейн, в отличие от ряда скептиков, был убежден в познаваемости мира. Наконец, он стоял на той точке зрения, что наши ощущения, научные понятия, законы физики, ее принципы есть не что иное как отражение объективных процессов природы, что это отражение, хотя оно и не полно, но в то же время объективно. Отсюда, подчеркивал он, необходимо постоянно изменять их содержание, включая и аксиоматическую базу физики.

Данные общие философские установки способствовали развитию Эйнштейном концепции физической реальности, включавшей в себя те философские идеи, которые "работали" в физической науке. Это была своеобразная система философских знаний, примененная к решению конкретных проблем физики на определенном этапе ее развития. Термин "физическая реальность" выступает у Эйнштейна в различной роли, включает разное содержание.

² Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 4. С. 136.

Во-первых, он использовал понятие физической реальности как эквивалент понятию материи. Эйнштейн вынужден был их отождествить при рассмотрении внешнего мира самого по себе, который существует независимо от того, воспринимаем, изучаем мы его или нет. Однако, Эйнштейн видел, что в механистическом материализме, с которым он был знаком, понятие материи отождествлялось лишь с понятием вещества, хотя перед Эйнштейном уже предстала новая реальность - электромагнитное поле. Он понимал, что эта концепция материи, господствовавшая в то время в физике, может принести свои негативные последствия, если она не будет изменена. В работе "Физика, философия и научный прогресс" Эйнштейн писал: "С возникновением теории электромагнитного поля Фарадея-Максвелла стало неизбежным дальнейшее усовершенствование концепции реализма. Возникла необходимость приписывать электромагнитному полю, непрерывно распределенному в пространстве, ту же роль простейшей реальности, какую раньше приписывали весомой материи".

Таким образом, в данной интерпретации эйнштейновское понятие физической реальности имеет более общий характер по сравнению с представлением о материи, господствующей в естествознании XIX века. И при этом Эйнштейн считал, что содержание данной концепции может быть изменено развивающейся физикой. Она распространялась им и на те объекты физического мира, которые могут быть открыты наукой в будущем, которые не даны нам непосредственно. Открытие атома, а затем и электромагнитного поля, явилось, по мнению Эйнштейна, существенным шагом в развитии концепции реализма. И все же эйнштейновская концепция физической реальности уже диалектико-материалистического понятия материи. Она не может быть возведена в ранг философской категории материи, ибо связана с изучением только физических объектов.

Во-вторых, понятие физической реальности охватывало также объекты внешнего мира, изучаемых физикой. Он пытался отделить их от объектов, изучаемых другими естественными науками. В книге "Эволюция физики" подчеркивалось: "Мы имеем две реальности: вещество и поле. Несомненно, что в настоящее время мы не можем представить себе всю физику построенной на понятии вещества, как это делала физика в начале девятнадцатого столетия"³. Как мы видим, Эйнштейн пытался обратить внимание на открытие новой реальности, на необходимость расширения сферы физической науки. Руководствуясь предельно

³ Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 4. С. 510.

широкими понятиями физики - вещества и поля, он четко определил физическую структуру внешнего мира с ее противоречивыми свойствами, и тем самым выразил новые возможности в познании природы. Под физической реальностью Эйнштейн понимал также отдельные объекты внешнего мира, изучаемые физикой, предметы повседневной жизни.

Вещественную и полевую материю, а также единичные предметы, изучаемые физикой, мы условно назовем физической реальностью первого порядка.

В-третьих, к физической реальности Эйнштейн относил также отношение друг к другу объектов внешнего мира, а также физические свойства предметов, которые проявляются в этих отношениях, такие, например, как время, пространство, масса, энергия, инерция, скорость, ускорение и др. Но эта реальность, назовем ее реальностью второго порядка, отличается от реальных вещей внешнего мира, поскольку отношение предметов или его свойства не есть сам предмет, а лишь его проявление, отдельная сторона. Отношения и свойства также реальны как и сами предметы. Обращаясь к Сэмьюэлу, Эйнштейн соглашается с Ньютоном, который подчеркивал, что "в его системе пространство и время столь же реальны, как и материальные точки, ибо если не считать, что пространство и время реальны в той же степени, что и материальные объекты, то законы инерции и понятие ускорения утрачивают всякий смысл"⁴.

Для Эйнштейна реальными представлялись не только тела и пространство, но и вся цепочка, которая ведет к образованию понятия пространства (телесный объект - отношение положений телесных объектов - пространственный промежуток - пространство). "Пространственные отношения, очевидно, реальны в таком же смысле, как и сами тела" - писал он в работе "Проблема пространства, эфира и поля в физике"⁵.

В-четвертых, в учении Эйнштейна есть еще один род физической реальности. Ее можно было бы назвать реальностью третьего порядка. Это - отраженная физическая реальность в научных понятиях, принципах, теориях и в целом в физике. "Если есть реальность, не зависящая от человека, - отвечал Эйнштейн Р.Тагору, - то должна быть истина, отвечающая этой реальности, и отрицание первой влечет за собой отрицание последней"⁶. По своему существу этого рода реальность отличается от предметов внешнего мира, поскольку она является не материальной суб-

⁴ Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 4. С. 329.

⁵ Там же. Т. 2. М., 1966. С. 276.

⁶ Там же. С. 131.

станцией, а идеальным человеческим отражением объективного мира. В известной совместной работе Эйнштейна с Подольским и Розеном говорится: "При анализе физической теории необходимо учитывать различие между объективной реальностью, которая не зависит ни от какой теории и теми физическими понятиями, с которыми оперирует теория. Эти понятия вводятся в качестве элементов, которые должны соответствовать объективной реальности, и с помощью этих понятий мы и представляем себе эту реальность"⁷.

В-пятых, понятие физической реальности употреблялось для определения общей методологической установки по отношению к цели физической науки. Эйнштейн категорически не был согласен с широко распространенной идеей, согласно которой целью науки является лишь описание внешних черт реальных объектов, их соотношения, взаимодействия. Конечно, он соглашался, что наука должна устанавливать связь между предметами, чтобы на их основе предсказать новые связи. Однако, для подлинной науки, подчеркивал Эйнштейн, эта задача слишком примитивна. Она не может вдохновить исследовательскую страсть, побудить на великие открытия. Подлинным мотивом развития науки, писал он Соловину, является стремление познать сущность предмета, объективную реальность как таковую. Эйнштейн настаивал, что исходным началом физической науки должны быть реальные объекты, процессы внешнего мира, которые могут отражаться в свойствах, проекциях, отношениях научных открытий, принципах, законах. В "Замечаниях к статьям" он писал на этот счет: "Реальность" в физике следует считать своего рода программой. Ничто не заставляет нас придерживаться этой программы априори. По-видимому, никому не придет в голову отказываться от этой программы, если речь пойдет о "макроскопических" явлениях... Но "макроскопический" и "микроскопический" аспекты настолько тесно переплетены между собой, что вряд ли стоит отказываться от этой программы и при рассмотрении одних лишь "микроскопических" явлений"⁸.

Таковой представляется нам эйнштейновская концепция физической реальности, которая сформировалась в процессе развития теории относительности.

Каково же было состояние физики накануне появления теории относительности? Мы кратко напомним лишь об успехах ближайших предшественников Эйнштейна - Лоренца и Пуан-

⁷ Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 3. С. 694.

⁸ Там же. Т. 4. С. 302.

каре. Как известно, в физике в то время шла бурная полемика вокруг учения Лоренца об электромагнитных процессах, а также о сущности эфира, его взаимодействии с веществом. В результате многочисленных дискуссий вокруг этих проблем делались все новые успехи, приближающие создание теории относительности. Вот только некоторые из этих достижений. Лоренц открыл релятивистские преобразования пространства и времени, ввел понятие "местное время". Правда, он не заметил, что эти преобразования обладают групповыми свойствами, а "местное время" - есть величина объективная. Главной причиной, которая мешала ему открыть теорию относительности была его идея о покоящемся эфире. Она находилась в противоречии с принципом относительности, не дала возможность отказаться от ньютоновски представлений о времени и пространстве.

Заслугой Пуанкаре является его распространение принципа относительности на электромагнитные процессы. Он указал на групповой характер преобразований Лоренца, на то, что они согласуются с принципом относительности. Пуанкаре подверг сомнению понятия "абсолютного времени", "одновременность двух событий", пришел к выводу о необходимости создания новой механики, "где инерция возрастала бы со скоростью и скорость света являлась бы непреодолимым пределом" и т.д.

Только из этих примеров видно, что до завершения теории относительности оставался один шаг, который мог бы сделать Пуанкаре. Однако это ему не удалось. Одной из причин является неадекватность философских установок Пуанкаре. Указывая на причины, которые не позволили Пуанкаре создать теорию относительности, Луи де Бройль писал, что будучи чистым математиком Пуанкаре "занимал довольно скептическую позицию в отношении физических теорий, считая, что вообще существует численное множество различных, но логически эквивалентных точек зрения и образов, которые ученый выбирает лишь из соображений удобства. Этот номинализм иногда мешал ему правильно понять тот факт, что среди логически возможных теорий имеются однако теории, которые наиболее близки к физической реальности"⁹.

В самом деле, если для Эйнштейна исходным началом теории относительности были две области материального мира - вещество и поле, существование которых он признавал независимыми от их изучения, Пуанкаре в работе "Ценность науки" пи-

⁹ Бройль Л. де. По тропам науки. М., 1962. С. 307.

сал: "Невозможна реальность, которая была бы вполне независима от ума, постигающего ее, видящего, чувствующего ее"¹⁰.

По мнению Пуанкаре главной целью науки является изучение лишь отношений между предметами, тогда как Эйнштейн, признавая необходимость изучения отношений, требовал идти дальше - к постижению сущности вещей.

Эйнштейн был оптимистом в науке, верил в силу человеческого разума, способного познать глубинные процессы природы и эта вера была основана на признании закономерностей, причинной обусловленности явлений природы. Для Пуанкаре если бы даже внешний мир существовал, то он никогда не был бы доступен нам. Если Эйнштейн за истиной науки видел реальные процессы природы, то Пуанкаре подчеркивал, что каждая частная истина может быть истолкована на бесчисленное множество ладов.

По Эйнштейну критерием научности понятий, принципов, законов является степень отражения ими сущности изучаемого объекта. Пуанкаре не ставит вопрос об их адекватности объективному миру. Они служат, считает он, лишь для удобства ученым.

Эйнштейн физические свойства материи, такие как масса, энергия, время, пространство относил к физической реальности, считая их объективными. Для Пуанкаре, например, масса является лишь удобным коэффициентом, который нам выгодно вводить в наше вычисление. То же он говорит и о времени. "Нет способа измерения времени, который был бы правильнее другого; способ вообще принятый является только более удобным"¹¹, - пишет он в работе "Ценность науки".

Эйнштейн утверждал, что мышление само по себе не приводит к знанию о внешних объектах. Истинность теоретического мышления достигается исключительно за счет связи его со всей суммой данных чувственного опыта. Все "понятия, - полагал он, - получаются из ощущений путем "абстракции", т.е. отбрасывания какой-то части их содержания". Понятия, принципы, теории для Эйнштейна есть примерные копии с внешнего мира, которые со временем нужно пересматривать. Для Пуанкаре они - символы, знаки, в которых не отражена объективная реальность.

Что касается положений математики, то Эйнштейн подчеркивал, что они имеют опытное происхождение. "Вопрос о том, имеет этот континуум эвклидову, риманову или какую-либо другую структуру, - писал он, - является вопросом физическим, от-

¹⁰ Пуанкаре А. Ценность науки. О науке. М., 1983. С. 158.

¹¹ Там же. С. 180.

вет на который должен дать опыт, а не вопросом соглашения о выборе на основе простой целесообразности". "Основные принципы геометрии суть не что иное, как условия. Опыт, - подчеркивал Пуанкаре, - не может разрешить вопроса о выборе между геометрией Эвклида и Лобачевского. Геометрия не истинна, она выгодна"¹².

Нам представляется более перспективной в развитии физики философская позиция Эйнштейна. Мы не будем здесь касаться анализа роли физических идей в развитии теории относительности. Наш интерес направлен лишь на те точки в генезисе теории, где наиболее рельефно сыграла свою роль философская наука и главным образом концепция физической реальности.

Прежде всего, эта концепция была адекватна вновь открытым реальностям; она четко определила материальный носитель механической формы движения, изучаемой классической физикой - вещественные объекты. Кроме того, Эйнштейн увидел отражение в работах Фарадея, Максвелла, Герца принципиально иной реальности, отличной от весомой материи и определил ее объективный статус. Это открытие явилось для Эйнштейна событием огромного значения. В своих работах по методологии физики Эйнштейн с особой силой выделяет открытие новой реальности - поля и призывает ученых осознать это событие. Вся дальнейшая работа Эйнштейна по созданию теории относительности рассматривалась через призму этих двух самостоятельных областей природы.

Философские знания помогли Эйнштейну также рассмотреть специфику методов, представлений классической механики, прийти к заключению о невозможности их переноса в полной мере на изучение качественно иной реальности. По его мнению, не понятия должны предшествовать реальности, а наоборот, они должны выводиться из нее методом абстракции. Для изучения полевых процессов должны быть созданы иные ценности физики.

Эйнштейн признавал, что все попытки разрешить противоречия, возникшие в физике на рубеже XIX-XX вв., создать удовлетворительную теорию, опираясь лишь на отдельные опытные факты, не привели его к успеху. И тогда он принимает решение проанализировать то огромное количество экспериментально установленных фактов, которые получили учеными при изучении этих двух областей внешнего мира, с тем чтобы найти об-

¹² Пуанкаре А. Указ. соч. С. 180.

щую основу, общие черты, присущие вещественной и полевой материи. Такой анализ понадобился Эйнштейну для того, чтобы, как он говорил, вывести у природы общие принципы, а потом уже из них вывести необходимые следствия.

Одним из таких общих проявлений или черт, наблюдаемых в движениях объектов вещества, которые выражены в законах физики, Эйнштейн усмотрел в независимости этих законов от выбора инерционной системы. Эйнштейн убедился, что это проявление распространяется и на электромагнитные процессы. Следовательно, оно имеет универсальный характер. Все движения вещественной и полевой материи обладают этим свойством. Следовательно, оно, по мнению Эйнштейна, может быть сформулировано, как всеобщий принцип физики, который получил название принципа относительности.

О другом принципе Эйнштейну подсказало открытие такого свойства полевой материи, как постоянство ее движения. Это свойство, а также и сформулированный Эйнштейном на его основе принцип связан лишь с полевой материей. На вещественную материю он не распространяется. Как мы видим, Эйнштейн, различая существование двух принципиально иных по своим качествам материальных областей, в каждой из них выделил общие черты, которые явились объективной основой всеобщих принципов.

Руководствуясь идеей единства мира, он считал, что вещественная и полевая материя должны быть связаны между собой. Исходя из этой посылки Эйнштейн пытался совместить названные принципы. Однако такое совмещение находилось в противоречии с господствующим в то время ньютоновском представлении о времени и пространстве. Здравый смысл требовал отказа либо от принципов, либо от представления о времени и пространстве. Эйнштейн в данном случае руководствовался своим основным методологическим критерием отношения к теории. По его мнению, адекватность теории должна определять ее проверяемость на практике. В этом случае отказаться от названных принципов он не мог.

Таким образом, перед ним встал вопрос о сущности ньютоновского представления о времени и пространстве. Надо было разобраться насколько философски и физически оно обосновано. Эйнштейн видел, что ньютоновские представления о времени и пространстве противоречили тем экспериментам, которые проводились в поисках неподвижного эфира. В "Истории механики" Маха Эйнштейн обратил внимание на утверждение о том, что понятия классической механики выражают не абсолютные, а от-

посительные величины. Он знал, также, что Ньютон проявлял беспокойство о том, что в опыте не было ничего, что соответствовало бы понятию абсолютного пространства, связанного с понятием абсолютного покоя. Однако эти важные для Эйнштейна сомнения физиков нужно было подкрепить также философски. Для этого Эйнштейн изучил вопрос о происхождении научных понятий. Для Эйнштейна была неприемлема позиция тех философов, кто полагал, что знание можно вывести из чистого мышления, он не был согласен также с выводами Канта об априорном характере научных понятий. Вывод Галилея о невозможности получения чистого знания Эйнштейн принял безоговорочно. Этот вывод он направил против априоризма Канта. Эйнштейн отбросил также установку механического материализма о возможности вывода понятий непосредственно, логически из самой действительности. Выход из тупика в этом отношении ему подсказал анализ работ Беркли, Юма и Канта. Если от Беркли и Юма он взял идею о невозможности вывести понятия непосредственно из ощущений, то от Канта - ту мысль, в которой он несколько "узаконил" реальность понятий, не связанных непосредственно с ощущениями. Хотя известно, что и Юм и Кант в этом вопросе пришли к крайностям - первый - к скепсису в отношении возможности познания, второй - к априоризму. И с той, и с другой крайностями, как известно, Эйнштейн не был согласен. Эйнштейн пришел к выводу, что все понятия получаются из ощущений путем "абстракции", т.е. отбрасывания какой-либо части их содержания. Такой вывод дал ему возможность ответить на вопрос о содержании ньютоновских представлений о времени и пространстве, об их произвольности. А признать их произвольность, говорил Эйнштейн в "Автобиографических заметках", в сущности уже означает решить проблему. Мы не будем дальше воспроизводить ход развития специальной теории относительности. Он хорошо известен.

Таким образом, только названные фрагменты из истории развития теории относительности показывают оправданность эйнштейновского подхода к осмыслению новых явлений природы.

Из вышеизложенного материала логична постановка вопроса о возможности и пределах использования концепции Эйнштейна о физической реальности в квантовой механике. Нам представляется, что в методологическом плане она могла бы способствовать изучению явлений и микромира.

Несмотря на то, что объектами квантовой механики являются частицы вещественной материи, все же данная теория дол-

жна опираться на общий каркас объективной физической реальности. В поле зрения исследователя кроме вещества должно находиться и поле. Такое соображение диктуется тем, что в основе квантовомеханических процессов не лежат лишь объекты вещества. Определенную роль в них играет и полевая материя. Она является инструментом познания, носителем информации о свойствах частиц, выступает как один из компонентов в этих процессах.

Обращение внимания на существование этих двух автономных областей внешнего мира поможет более правильной ориентации в вопросах о попытке сведения физики либо к представлениям о веществе, либо к полю; предостережет ученых от смешения понятий корпускулы и волны, как физических свойств с материальными носителями этих свойств - веществом и полем; поможет соотнести одинаковые физические свойства, присущие этим двум областям природы к своим материальным носителям. Каждая из этих двух областей материи имеет только им одним присущие свойства, что также должно учитываться при изучении процессов микромира.

Наконец, полевая и вещественная материя по-разному проявляют себя в процессе движения. В движениях вещества имеют место релятивистские эффекты. И т.д. Все это может придать некоторую упорядоченность объективной физической реальности.

Наличие в структуре понятия физической реальности понятий вещества и поля, как предельно широких понятий современной физики, неизбежно требует введения более обобщающего понятия, которое включало бы в себя эти две области и которое могло бы быть открытым понятием. Этим самым мы могли бы предостеречь науку от абсолютизации вещественной и полевой материи, как это было с веществом.

Мы не можем утверждать, что физический мир исчерпывается лишь этими двумя областями материи. Не исключено, что наряду с веществом и полем существует некая субстанция, которая принципиально отличается по своим свойствам от вещества и поля и которая "невидимо" для науки влияет на процесс взаимопревращения полевой и вещественной материи, на определенное поведение квантовомеханических объектов. Об этом свидетельствуют многочисленные примеры необъяснимого поведения микрообъектов, что вынуждает ученых постоянно обращаться к поиску скрытых потенциальных возможностей, имеющих в природе. Возможно одним из таких видов внешнего мира является вакуум, который все больше заявляет о себе.

Что касается разногласий в понимании содержания квантовой механики, то недоразумения могут возникать и из-за разного толкования ее исходного этапа. В классической физике, поскольку предмет изучения дан непосредственно в наших ощущениях, исходный этап познания начинается из признания объективных характеристик предмета. Вторым этапом считается сам процесс изучения. В квантовой механике, поскольку объекты наблюдать нельзя, некоторые физики не придают особого значения этому первому предварительному этапу в познании. Таким образом, физическая реальность, которую мы называли реальностью первого порядка иногда выпадает из поля зрения исследователей. Это приводит к тому, что под физической реальностью понимается лишь результат отражения, к к идеальный образ квантовомеханических процессов. Хотя справедливости ради следует признать, что создатели квантовой механики признавали, что микрообъекты предшествуют познанию и они существуют объективно. Н.Борн, в книге "Физика в жизни моего поколения" подчеркивал, что естествоиспытатель должен быть реалистом, он должен видеть в своих чувственных впечатлениях нечто большее, чем галлюцинации, а именно информацию, идущую от реального внешнего мира"¹³.

Надо иметь в виду, еще и то, что исходный этап это не есть лишь формальный процесс. На этом этапе еще до конкретного акта взаимодействия прибора с объектом, мы можем иметь значительную информацию о свойствах изучаемого микрообъекта, полученную из предшествующих знаний, из изучения других подобных объектов, опираясь на аналогии, теоретические прогнозы и т.д. Поэтому он нужен для того, чтобы упорядочить многие эмпирические и теоретические данные, осмыслить их с учетом новых обстоятельств, имеющих место в микромире, выработать общую методологию подхода, исходя из физической структуры мира. Тем самым, мы могли бы повысить конструктивную роль мышления в познании природы.

Целесообразность признания исходного этапа в квантовой механике вызывается и тем, чтобы избежать смешения субъективного с объективным, знания с самой действительностью, что иногда имеет место.

Наконец, существование в физической структуре двух субстанций - вещества и поля, их постоянное взаимопревращение, указывает на строгую гармонию внешнего мира, наводит на

¹³ Борн М. Физика в жизни моего поколения. М., 1963. С. 207.

мысль, что в физике не должна быть абсолютизирована ни изменчивость, ни стабильность. Эти два свойства и взаимопревращение полевой и вещественной материи внутренне присущи физическому миру.

В квантовой механике целесообразно выделить в самостоятельный класс физической реальности также понятия свойства микрообъектов. Это диктуется тем, чтобы избежать отождествления свойств с их материальными носителями. В литературе, например, можно встретить выражение: "о превращении вещества в энергию", или "о существовании двух субстанций вещества и энергии", "о превращении массы или энергии в излучение" и т.д. Хотя известно, что вещество и поле или, как его называют, излучение не могут превратиться в свои свойства энергию или массу и наоборот. Вещество и поле обладают рядом свойств, тогда как свойство - это лишь одна из сторон этих видов материи.

Выделение свойств необходимо также для того, чтобы подчеркнуть тем самым, что свойства имеют объективный характер, как и сам предмет, носитель этих свойств; что они не создаются в процессе познания, а лишь проявляются во взаимодействии, более или менее полно отражаются в знаниях.

Обособление понятия свойств необходимо также, чтобы при изучении объекта можно было бы выделить в нем наиболее важные из них с тем, чтобы определить таким образом сущность изучаемого предмета, сформировать научное понятие о предмете.

Наиболее сложной в квантовой механике является содержание физической реальности третьего порядка, отраженного представления о микромире. Хотелось бы на этот счет высказать лишь некоторые общие соображения. Нам представляется, что одной из причин неудовлетворенности результатами механики, является абсолютизация ее копенгагенского варианта в той части, где игнорируется познавательная роль свойств физической системы до процесса измерения. Знания о квантовомеханических объектах должны черпаться как из данных, полученных в процессе их измерения, так и из анализа совокупности структуры объективной физической реальности.

В процессе изучения микрообъектов мы не должны преувеличивать роль так называемых силовых приемов. Известно, что воздействие на изучаемый объект вносит определенные коррективы в его поведение. Не следует исключать из поля зрения исследователей ту информацию, которая поступает к нам в результате произвольных процессов, протекающих в природе. Естественная радиоактивность, космические излучения, поток электромагнитных волн и частиц, которые приходят от Солнца, таят

в себе огромную информацию о микромире, которую можно получить без прямого воздействия на изучаемый объект.

Нам представляется, что познание объектов микромира не может быть исчерпано лишь методом, который, безусловно, играет огромную роль в изучении квантовомеханических объектов. Статистический метод помогает изучить определенный класс объектов или событий. Однако, не следует уходить от вопроса об изучении единичных явлений, не следует противопоставлять общее единичному. Они взаимосвязаны между собой. Единичное может дать информацию об общем и наоборот.

**НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ НА ПЛАНКОВСКИХ
МАСШТАБАХ РАССТОЯНИЙ**

Обнаружение новых фундаментальных материальных объектов, особенностей их природы и движений, а также реализация идеи единства в физике сопровождается возникновением и обобщением концепций пространства-времени. Реляционная концепция пространства-времени возникла в связи с обнаружением электромагнитного поля, а также предельности и конечности скорости распространения взаимодействий (равной по величине скорости электромагнитных волн в вакууме) и реализацией идеи единства электрических, магнитных и световых явлений и согласованного с ними описания механических явлений. Классическая гравитационная концепция пространства-времени появилась после открытия геометрической природы гравитационного поля и реализации мысли о едином описании механических, электромагнитных и гравитационных явлений. Физическое осуществление идеи о непрерывном единстве пространства-времени и материи не могло возникнуть прежде, чем была обнаружена существование реляции вещественных объектов, осуществляемая калибровочным (электромагнитным) полем. Кажущаяся потеря глубинного единства пространства-времени и материи связана с малостью масс (энергий), ведущей к плоскостности, псевдоевклидовости (а значит физической ненаблюдаемости) пространства-времени, которое никогда не может быть само в себе сущим, но лишь атрибутом того или иного деятельного материального субстрата. Идеи единства всех (калибровочных и некалибровочных) взаимодействий и вещества, а также всех взаимодействий, вещества и вакуума, реализуемые вблизи планковских масштабов расстояний, должны привести к обобщению указанных концепций пространства-времени.

На уровне общего можно сказать, что реляционная концепция пространства-времени возникла в связи с возможностью реализации упорядоченного множества связанных объектов и их состояний, а классическая гравитационная концепция (которую на уровне общего лучше назвать субстратной) - в связи с возможностью реализации целостности и ее состояний (на фоне которой существует упорядоченное множество связанных объектов

и их состояний), которая содержит в себе масштабы и часы, т.е. пространственно-временные единицы измерения. Дальнейшее обобщение этих концепций на уровне общего связано с возможностью реализации неупорядоченного множества объектов и их состояний и той целостности самой по себе, на фоне которой они существуют.

I. Расширение концепции фундаментального объекта в современной физике

Согласно квантовополевой картине мира, в основе всех физических явлений лежат квантованные поля, основные состояния которых называются вакуумными. Возбужденные состояния квантованных полей содержат соответствующие элементарные частицы, взаимодействующие друг с другом и с вакуумом. Единое описание элементарных частиц и их взаимодействий приводит к понятию единого вакуума. Все квантованные поля, кроме гравитационного, не являются метрическими и для энергий меньше планковских их кванты можно считать движущимися на фоне заданного 4-мерного пространства-времени, связанного со столь слабым гравитационным полем, что его геометрия неотличима от геометрии Минковского. Негравитационные флуктуации вакуума не меняют существенным образом метрику пространства-времени, но сказываются на условиях движения частиц.

Однако при планковских энергиях ситуация коренным образом меняется. Локальная квантовая теория поля становится здесь неприменимой, ибо в этом случае не существует заданного плоского пространства-времени, на фоне которого разыгрываются события, геометрия становится сложной, а квантованное гравитационное поле сильно флуктуирующим по метрике, топологии, размерности и даже связности. Дело в том, что квантовомеханическое соотношение неопределенностей для энергии и времени требует нарушения закона сохранения энергии для малых интервалов времени. Но согласно ОТО, сильные флуктуации энергии в малых пространственных участках могут проявляться в рождении (а затем исчезновении) из вакуума виртуальных черных мини-дыр, что дает резкое изменение локальной структуры 4-мерного пространства-времени в масштабах планковской длины ("пространственно-временная пена"). Это и делает невозможным использование методов локальной квантовой теории поля, построенной в предположении, что геометрия пространства-времени повсюду является псевдоевклидовой.

Было предпринято много попыток учета изменения геометрии 4- мерного пространства-времени "в малом", но в настоящее время оптимизм физиков связан с достижениями в развитии новой нелокальной квантовой теории поля - суперсимметричной теории одномерно протяженных (с линейными размерами порядка планковской длины) релятивистских объектов - суперструн, несущих в себе бозонные и фермионные степени свободы и (при возбуждении) весь спектр масс элементарных частиц. Эта теория, основанная на синтезе локальной квантовой теории поля и ОТО, обобщает на расстояния порядка планковских фундаментальные понятия квантованного поля, квантов поля, пространства-времени и т.д. и утверждает существование новых фундаментальных физических объектов (суперструнного поля, суперструн, суперструнного вакуума), являющихся основой для концептуального описания пространства- времени. Теория суперструн радикальным образом меняет ОТО в планковских масштабах расстояний, расширяя центральную идею Эйнштейна об искривленном 4-мерном пространстве-времени до более богатого многомерного пространства-времени, в котором осуществляются все возможные конфигурации суперструн. Структура этого пространства, вообще говоря, не является заданной, а формируется в процессе динамики суперструн, хотя существующие пока примитивные модели рассматривают суперструны движущимися в заданном пространстве-времени, без учета их воздействия на его структуру в процессе движения.

Проникновение теоретической физики на планковские масштабы расстояний приводит к углублению воззрений на структурную сущность материи и ее атрибутов. Если локальная квантовая теория поля, синтезировав СТО и квантовую механику, значительно изменив картину мира, не затронула существенным образом трактовку пространства-времени в физике, то суперструнная теория, открыв существование суперструнного поля и тем самым углубив понятие квантованного поля, позволила по-новому взглянуть и на концепции пространства-времени. Отчасти это связано с тем, что уже ОТО более углубленно, чем СТО, подошла к экспликации пространства-времени, установив неразрывную связь его с полем тяготения и утвердив тем самым полевою трактовку пространства-времени: пространство-время и поле тяготения - это две стороны единого объекта. Можно сказать, что ОТО наложила на концептуальное описание пространства-времени два существенных требования - физической экспликации и математического представления. Кроме того, она утвердила мысль о том, что структура пространства-времени, в общем слу-

час, не является заданной, но формируется в процессе движения материальных объектов. Такие воззрения на пространство-время в корне отличались от всех предыдущих воззрений (существовавших в классической механике и СТО), которые являются слишком упрощенными. Концепцию пространства-времени, физически эксплицируемую на гравитационном поле и математически представимую в виде псевдоримановой геометрии, я назвал классической гравитационной, а концепцию, связанную с упорядоченным множеством связанных материальных объектов и их состояний - реляционной. Именно эти концепции углубила суперструнная теория. Обобщение концепции пространства-времени в связи с созданием теории суперструн оказалось связанным с расширением концепции фундаментального объекта в современной физике и реализацией идеи глубинного единства физического мира.

2. Физические и философские следствия теории релятивистских суперструн

За последнее время физика высоких энергий развивалась на основе стандартной модели, под которой понимается описание сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий элементарных частиц на кварк-лептонном уровне в рамках локальной калибровочной теории, основанной на стандартной группе симметрии. Сильные взаимодействия описываются квантовой хромодинамикой с цветовой калибровочной группой, электрослабые взаимодействия - моделью Вейнберга-Салама. Все имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные находятся в хорошем согласии со стандартной моделью, которая строится на основе предельного случая классической гравитационной концепции пространства-времени, когда метрический тензор имеет лоренцев вид. Стандартная модель может быть дополнена требованием суперсимметрии, что приводит к идее многомерного пространства-времени.

Следующим шагом на пути поиска единства физических взаимодействий явилась теория Великого Объединения, включающая в себя единое описание сильных и электрослабых взаимодействий на основе идеи о локальной калибровочной инвариантности в рамках обычной квантовополевой теории. В ней обсуждаются различные группы симметрии, но нет никакого принципа, позволяющего выбрать ее однозначно.

Несмотря на успехи, стандартная модель и теория Великого объединения содержат ряд нерешенных проблем (например, неясно, как естественно включить в общую схему гравитацию) и большой произвол в выборе параметров. В 1974 г. Дж. Шерк и Дж.Шварц¹ обнаружили, что струнные модели (рассматриваемые тогда в теории адронов) могли бы претендовать на роль единой теории всех физических взаимодействий, включая и гравитацию. В разработанной впоследствии теории суперструн, гравитацию в принципе нельзя исключить из рассмотрения, а группа симметрии, необходимая для ее включения, ведет к предсказанию групп симметрии, на основе которых объединяются другие взаимодействия.

Дело в том, что струны могут быть открытые и замкнутые. Если с концами открытых струн связать сохраняющиеся заряды, порождающие калибровочные поля, то открытые струны будут переносчиками калибровочных взаимодействий. Концы открытой струны могут соединиться так, что образуется замкнутая струна (она, в свою очередь, может разорваться), колебательные моды которой содержат безмассовый гравитон, поэтому замкнутые струны переносят гравитационные взаимодействия. В теории суперструн существование гравитации вытекает из факта существования калибровочных взаимодействий, и поля Янга-Миллса должны быть объединены с гравитацией. "Тот факт, что струнные модели содержат в себе калибровочные теории и общековариантную теорию гравитации, является довольно неожиданным, так как в них при построении не закладывались ни калибровочная инвариантность, ни общая ковариантность"². Теория суперструн удачно схватывает действительное единство казалось бы качественно разнородных свойств фундаментальных объектов материального мира и отображает его в модельной форме. Одной из важнейших моделей этой теории является модель гетеротической струны, в которой поля Янга-Миллса "размазаны" по замкнутой ориентированной струне. Таким образом, единство связывается с замкнутостью системы. Суперструнная теория - одна из типов единых теорий. "Другие теории также могут описывать гравитацию и калибровочные взаимодействия, но объединение этих вза-

1 Scherk J., Schwarz J.H. Dual Models for Non-Hadrons // Nucl. Phys. Ser. B. 1974. Vol. 81, N. 1. P. 118-144.

2 Барбашов В.М., Нестеренко В.В. Суперструны - новый подход к единой теории фундаментальных взаимодействий // УФН. 1986. Т. 150. Вып. 4. С. 511.

имедействий в них остается дополнительным предположением"³, в суперструнной же теории оно естественно.

В связи со сказанным появился глубокий интерес к разработке суперструнных теорий, существенных в той области, где проявляются эффекты квантовой гравитации. В настоящее время считается, что выход за пределы стандартной модели связан с областью планковских масштабов расстояний и переходом в этой области к многомерному пространству-времени суперструнной теории. Л.Б.Окунь отмечал: "Я не разделяю мнения тех, кто считает, что суперструны и дополнительные пространственные измерения - это кратковременная мода. Я думаю, что мы являемся свидетелями очень важного события в истории физики, по своему значению не уступающего созданию квантовой теории поля"⁴. Оказывается, что в "низкоэнергетическом" ($< 10^{19}$ ГэВ) пределе суперструнная теория переходит в супергравитацию и суперсимметричные теории других взаимодействий, а важнейшим свойством ее является отсутствие в ней аномалий, т.е. нарушений на квантовом уровне классических симметрий теории (калибровочной симметрии, лоренц-инвариантности), а также возможность устранения расходимостей.

Последовательная квантовая теория суперструн была сформулирована непротиворечивым образом в 10-мерном пространстве-времени Минковского (с одним временным и девятью пространственными измерениями), шесть измерений которого компактифицируются при выходе за пределы планковских масштабов расстояний. Хотя в суперструнной теории отсутствует свобода в выборе размерности пространства-времени, в отличие от теории супергравитации, где нет убедительных теоретических аргументов предпочесть ту или иную его размерность, но вопрос о том, какова истинная размерность пространства-времени на планковских масштабах расстояний все же окончательно не решен. В теории суперструн Грина-Шварца эта размерность равна 10, в бозонном варианте этой теории - 26, а если встать на точку зрения Калуцы-Клейна, то 506. В работе⁵ показано, что открытые струны, содержащие дополнительное скалярное поле с экспоненциальным потенциалом, при низших размерностях пространства-времени 7 или 13 для чисто бозонной и 3 или 5 для суперструны обладают такими же свойствами, что и при размер-

³ Энтони С. Суперструны: всеобъемлющая теория? // УФН. 1986. Т. 150. С. 582.

⁴ Окунь Л.Б. Физика высоких энергий // УФН. 1987. Т. 151. Вып.4. С. 470.

⁵ Bilal A., Gervais J.L. New Critical Dimensions for String Theories // Nucl. Phys. Ser. B. 1987. Vol. 284, N. 2. P. 397-422.

ностях пространства-времени 26 или 10 для струн без такого потенциала. Предложена даже модель⁶ замкнутой струны с критической размерностью пространства-времени, равной 4, т.е. не нуждающаяся в компактификации. В дальнейшем я буду рассматривать теорию Грина-Шварца, связанную с 10-мерным пространством-временем, как наиболее совершенную.

Теория суперструн Грина-Шварца интересна в том отношении, что она киральна (т.е. приводит к эффектам P-неинвариантности) и остается киральной после компактификации. Понятие киральности взаимодействия можно определить только для пространства с нечетным числом пространственных измерений, поэтому, например, 11-мерная теория супергравитации не может привести к киральной теории, а теория суперструн в 10-мерном (в отличие от теорий в 3-, 5-, $2n + 1$ -мерном) пространстве-времени может. М.Грин и Дж.Шварц^{7,8} показали, что имеется лишь ограниченное число реалистических теорий суперструн, а киральную суперструнную теорию, свободную от аномалий, можно сформулировать в 10-мерном пространстве-времени, если группой симметрии полей Янга-Миллса является унимодулярная группа вращений в 32-мерном внутреннем пространстве и группа $E_8 \times E_8$. Была обнаружена и третья группа $O(16) \times O(16)$, которая также ведет к отсутствию аномалий. "Это означает, что структура всех взаимодействий, включая гравитационное, почти полностью фиксирована и нет свободы, связанной с подгонкой параметров"⁹ для согласования с экспериментом. Вся "низкоэнергетическая" физика полностью определяется свойствами искривленного многомерного пространства компактификации. Таким образом, при решении проблемы квантовой гравитации на основе теории суперструн, получаются однозначные предсказания о характере других взаимодействий.

Этот очень важный физический результат имеет большое философское значение. Он говорит о том, что более общая теория фиксирует в себе менее общие теории (принцип соответствия теорий), а более общая концепция пространства-времени позволяет выявить существенные концепции в менее общих теориях. По-

⁶ Chen W., Zhao W. Four-Dimensional String // Phys. Lett. Ser. B. 1987. Vol. 183, N. 1. P. 40-46.

⁷ Green M.B., Schwarz J.H. Covariant Description of Superstrings // Phys. Lett. Ser. B. 1984. Vol. 136, N. 5-6. P. 367-370.

⁸ Green M.B., Schwarz J.H. Infinity Cancellations in SO(32) Superstring Theory // Phys. Lett. Ser. B. 1985. Vol. 151, N. 1. P. 21-25.

⁹ Грин М. Теория суперструн в реальном мире // УФН. 1986. Т. 150. Вып. 4. С. 577.

этому абсолютное пространство-время СТО следует рассматривать как предельный случай классического гравитационного пространства-времени, когда гравитационное поле очень слабо, т.е. практически ненаблюдаемо (в этом случае ненаблюдаемым будет и пространство-время Минковского). Никакой субстанциальной концепции пространства-времени, утверждающей существование пространства-времени самого по себе, без материального носителя, быть не может. (Аналогичная ситуация для пространства и времени имеет место и в классической механике).

Следует обратить внимание на существенность качественного скачка при приближении к планковским границам, требующего и более углубленного философского подхода к реальности. В частности, появляются основания различать чувственно созерцаемые и интеллектуально созерцаемые материальные объекты, наблюдаемое 4-мерное искривленное пространство-время и ненаблюдаемое многомерное пространство-время, в котором появляются струны, в связи с чем необходим поиск нового критерия истины, учет вероятностного характера ее и т.д. В связи с этим можно ставить вопрос о том, как возможно интеллектуальное познание, т.е. познание материальных объектов и связей между ними, которые лежат за пределами практической деятельности человека.

Если до создания ОТО считалось, что локальная структура пространства-времени не отличается от его глобальной структуры и на этом принципе строились квантовая механика и теория квантованных полей, то ОТО впервые провела различие локального и глобального аспектов пространства-времени, которое стало особенно ощутимым при попытке синтеза ее с квантовой механикой. Теория суперструн окончательно утвердила это различие. В ней считается, что на малых расстояниях можно пренебречь кривизной дополнительных шести измерений пространства-времени (только тогда проявится полная симметрия теории). Аналогичным образом, и 4-мерное пространство-время Минковского можно истолковать как экстраполированную до бесконечности малую (и потому плоскую) часть 4-мерного искривленного пространства-времени. Это указывает на вложимость соответствующих пространственно-временных концепций, например, тривиальной классической гравитационной концепции в классическую гравитационную концепцию пространства-времени, которая, в свою очередь, вложима в суперструнную концепцию, и соответствующую вложимость пространственно-временной концепции классической механики (принцип соответствия пространственно-временных концепций).

Первичным объектом в суперструнной теории является суперструнное поле, геометрическим аспектом которого является суперструнное пространство-время, в этом смысле пространство-время является формой существования материи, неразрывно связанной с ней (в данном случае с суперструнным полем). В отличие от обычных полей, суперструнное поле (множество конфигураций суперструн) является 10-мерным, соответственно 10-мерно и пространство-время (и суперструнный вакуум). Существование необычно многомерного объекта показывает опасность абсолютизации любых, казалось бы несомненных воззрений.

Так как пространство компактификации (при переходе от 10- мерного к 4-мерному наблюдаемому миру) является пространством специального типа (Калаби-Яо), не имеющим непрерывных симметрий, то предельное суперструнное поле (а значит и пространство) в шести скрученных (с большой кривизной) размерностях, не является вездесущим, ибо в "дырах" его нет "материального" содержания. Поэтому компактный мир Калаби-Яо может содержать внутри себя "нематериальные" участки. Этот интересный момент требует философского осмысления. По-видимому, под объективной реальностью следует понимать не только осуществленную, но и неосуществленную (в некоторой ситуации), потенциальную, виртуальную данность. Здесь дело обстоит так же как с микрочастицами, которым присущи две формы объективного существования - в форме потенциальных возможностей и в форме скачкообразных квантовых процессов, проявляющихся как действительность¹⁰.

В отличие от локальной квантовой теории поля, в которой каждое поле описывает частицы только одного типа, свободная струна несет в себе бесконечное число супермультиплетов, соответствующих различным модам ее колебаний. Супермультиплет основного состояния - безмассовый, возбужденные состояния могут иметь неограниченно возрастающие массы. Низшие гармоники струн должны содержать только безмассовые (по сравнению с планковской массой) мультиплеты, заполняющиеся наблюдаемыми экспериментально (сейчас и в будущем) элементарными частицами. Высшие гармоники наблюдать не удастся, ибо энергии, необходимые для их рождения, на 16 порядков выше энергий современных ускорителей. Безмассовые состояния суперструн содержат не только гравитоны, калибровочные бозоны, скалярные и спинорные частицы, но и гравитино, связан-

¹⁰ Пахомов Б.Я. Изменение картины мира как главное содержание научной революции // Природа научного открытия: Философско-методологический анализ. М., 1986. С. 59.

ное с супергравитацией. Поэтому в "низкоэнергетическом" пределе набор безмассовых частиц в теориях суперструн и супергравитации совпадает, т.е. супергравитация следует из теории суперструн.

Теория суперструн ярко продемонстрировала, что масса (и вообще вещественность) не является существенной характеристикой материи на ее глубинном уровне, таковой является способность к самодвижению, самоорганизации невещественных объектов, в частности, квантов суперструнного поля или, еще более обще, суперструнного вакуума. Элементарные частицы и их массы возникают как в процессе самодвижения (самоорганизации) безмассовых материальных объектов (суперструн), так и за счет спонтанного нарушения симметрии, поэтому энергия, связанная с массой, черпается из энергии натяжения безмассовой струны в процессе ее самодвижения, а в конце концов - из энергии суперструнного вакуума. С утратой важности вещественности на глубинном структурном уровне организации материи окончательно закрывается вопрос о сущности реляционной физической концепции пространства-времени, как отображающей порядок расположения вещественных объектов и их состояний.

Фундаментальным объектом современной физики следует считать квантованное суперструнное поле, возбуждениями которого являются суперструны, взаимодействующие друг с другом и с вакуумом (возникающие из него и поглощающиеся в нем). Струны же, в свою очередь, порождают элементарные частицы. Таким образом, получается следующая иерархия: суперструнный вакуум - суперструны - элементарные частицы. Поэтому за динамической теорией частиц и суперструн должна последовать динамика вакуума, описывающая процесс его самоорганизации, - фундаментальнейшая теория, которая пока еще не находится в центре внимания физиков. Все эти теории должны удовлетворять принципу соответствия. Пространство-время, связанное с суперструнным вакуумом самим по себе, можно назвать вакуумным, а на уровне общего - обобщенно-субстратным или, лучше, квазисубстанциальным.

На малых расстояниях 10-мерное суперструнное пространство-время является плоским. Псевдоевклидовость его определяется тем, что в основном состоянии суперструны безмассовы и лишь при переходе в возбужденные состояния появляются массы, а значит и кривизна пространства-времени. Что же является материальным носителем 10-мерного пространства-времени Минковского? Возможно, что существует обобщение

принципа эквивалентности ОТО в пространстве всех струнных конфигураций, приводящее к геометрическому описанию суперструн¹¹. Однако все же суперструны - это кванты физического поля, а глубинным физическим носителем плоского 10-мерного пространства-времени является суперструнный вакуум, материальная динамическая система, играющая роль носителя "инерциального" 10-мерного поля, способного поддерживать динамику родившихся струн (в этом также можно видеть физическую экспликацию пространства-времени). При возбуждениях родившихся струн плоскостность 10-мерного пространства-времени теряется, а шесть измерений его свертываются. "Можно думать, что классическое гравитационное поле в этой теории складывается из элементарных возбуждений множества суперструн, а затем объединяется с плоской метрикой "фонового" многообразия в метрику искривленного наблюдаемого мира¹². Поэтому нельзя считать, что теория суперструн возрождает субстанциальную концепцию пространства-времени, пространства-времени самого по себе, не имеющего материального носителя.

Но самым удивительным предсказанием $E_8 \times E_8$ - суперструнной теории является существование так называемой "теневого материи" (при компактификации шести измерений группа $E_8 \times E_8$ нарушается до $E_6 \times E_8$, которая затем расщепляется на E_6 (теория Великого объединения) и E_8 ("теневая материя")), подобной той, которую мы знаем, с аналогичными частицами и взаимодействиями, находящейся внутри нашего материального мира, но не перемешивающейся с ним и практически ненаблюдаемой обычными средствами. Предсказание существования второго мира, нашего двойника, слабо гравитационно связанного с нашим миром, обогащает представление о едином материальном мире и заслуживает философского осмысления. Можно прогнозировать, что этот двойник связан с единым вакуумом, как целостным объектом, внутри которого в виртуальном состоянии находятся все элементарные фундаментальные объекты и их взаимодействия. Наконец, следует отметить, что суперструнная теория с ее моделью релятивистских суперструн, порождает новое мировоззрение, новую физическую картину мира, которая может стать полезным компонентом форм и средств научного познания мира. Проблема взаимоотношения между спе-

11 Казаков Д.И. Суперструны, или за пределами стандартных представлений // УФН. 1986. Т. 150. С. 574.

12 Зельдович Я.Б., Гришук Л.П. Тяготение, общая теория относительности и альтернативные теории // УФН. 1986. Т. 149. Вып. 4. С. 700.

диальной научной моделью и научной картиной мира как элементом мировоззрения в плане отношения ее к формам и средствам познания, обсуждалась Б.Я.Пахомовым¹³ и П.С.Дышлевым¹⁴.

3. Суперструнная концепция пространства-времени

Каким же образом теория суперструн обобщает представления о пространстве-времени на планковские масштабы расстояний? В обычной локальной теории квантованных полей (кроме гравитационного) считается, что частицы движутся на фоне заданного плоского 4-мерного пространства-времени, не оказывая влияние на его структуру. С точки зрения ОТО, частицы движутся по геодезическим в искривленном пространстве-времени, оказывая обратное воздействие на его геометрию, ибо они испускают гравитационные волны (в квантовой теории - гравитоны), изменяющие кривизну пространства-времени. Гравитационные уравнения Эйнштейна позволяют найти не только траектории движения частиц, но и структуру пространства-времени, в котором они движутся. В суперструнной теории движение суперструны также происходит по геодезической, которая определяется не только локальной геометрией пространства-времени, но и конфигурацией суперструны, однако теперь это уже будет поверхность минимальной площади в 10-мерном пространстве-времени, в котором укладываются все возможные конфигурации суперструн. Суперструнное пространство есть пространство всех возможных конфигураций суперструн, в то же время оно является метрическим аспектом квантованного суперструнного поля.

Суперструнное квантованное поле - новый вид фундаментальной физической реальности, открытой суперструнной теорией. Это поле 10-мерно, в отличие от 4-мерного гравитационного поля, которое оно обобщает. 10-мерное пространство-время и суперструнное квантованное поле столь же тесно связаны друг с другом, как 4-мерное искривленное пространство-время с гравитационным полем: суперструнное квантованное поле также имеет

¹³ Пахомов Б.Я. Становление современной физической картины мира. М., 1985.

¹⁴ Dyshlevy P.S. Special Science Model of the Studied Reality as a Form of Scientific Cognition (on the Material of Physics) // 8 Intern. Congr. LMPs-87: Abstracts. Vol. 4, Pt. 1. Moscow, 1987. P. 173-175.

две ипостаси - геометрическую и физическую. М.Грин отмечал: "Абстрактное пространство всех возможных конфигураций струны является грандиозным развитием идеи обычного пространства, а его геометрия, связанная со струнным полем, - совершенно новым видом геометрии. Частицу-струну следует представлять как "волновое" возмущение в этом огромном пространстве, подобно тому как мы представляем гравитон в виде волны в обычном пространстве"¹⁵.

В отличие от традиционных представлений, с точки зрения суперструнной теории вблизи планковских масштабов расстояний существует только один вид поля - суперструнное квантованное поле, с ним и следует связать новую концепцию пространства-времени, которую можно назвать суперструнной концепцией. (Требование физической экспликации концепций пространства-времени позволяет классифицировать их по виду материального носителя пространства- времени).

Реляционное пространство-время, продвинутое в микромир, определяется как упорядоченное калибровочным взаимодействием множества объектов и их состояний. Для его реализации необходимо множество объектов (фермионов) и взаимодействий (для осуществления реляции) между ними (калибровочных бозонов). Но микрообъекты точечны, реляционное же пространство-время должно быть непрерывным. Непрерывность его достигается учетом существования физического вакуума. Поэтому реляционная концепция пространства- времени, проведенная в микромир, получает смысл только при учете возможной реляции к вакууму (в макромире реляция множества вещественных объектов осуществляется электромагнитным полем). Однако, фермионы, калибровочные бозоны и другие частицы можно рассматривать на фоне искривленного (или плюского) пространства-времени, связанного с классическим гравитационным полем (или его предельным случаем).

Там, где гравитационное поле квантовано (планковские масштабы расстояний), ситуация резко меняется. Суперструны (как и частицы) не образуют непрерывного целого, но совокупность всех возможных конфигураций суперструн (даже без учета существования суперструнного вакуума), в отличие от совокупности частиц - суть непрерывное целое. Значит суперструнная концепция пространства-времени мыслима и сама по себе, без реляции к вакууму, в отличие от реляционной концепции, продвинутой в микромир. Более того, суперструнную концепцию

¹⁵ Грин М. Суперструны // В мире науки. 1986. N 11. С. 26.

можно считать обобщением реляционной концепции пространства-времени, реляция здесь осуществляется между неупорядоченным множеством суперструн (говорить о порядке в расположении одномерных объектов в общем случае бессмысленно).

На уровне общего концепцию пространства-времени, обобщающую реляционную концепцию на планковские масштабы расстояний, можно назвать обобщенно-реляционной, ибо реляция между объектами не упорядочивает их. Смысл обобщенно-реляционной концепции пространства-времени состоит в том, что она представляет собой неупорядоченное множество связанных взаимодействием объектов и их состояний. Поскольку точечны только взаимодействия, то порядок существует только для них, поэтому временные отношения здесь в принципе упорядочены. Значит в обобщенно-реляционной концепции можно говорить о порядке реляций, а не объектов. Большой акцент на реляции в обобщенно-реляционной концепции (по сравнению с реляционной концепцией) подчеркивает глубинную сущность этой концепции.

Струнная природа фундаментальных частиц существенна лишь вблизи планковских масштабов расстояний. Для обычных масштабов теория суперструн не отличается от теории точечных частиц и переходит в ОТО и калибровочные теории других взаимодействий. Аналогично, и суперструнная концепция пространства-времени переходит в классическую гравитационную и реляционную концепции.

ЧАСТИЦЫ, ПОЛЯ И ВСЕЛЕННЫЕ

Введение

В самом начале юбилейного, 30-того тома широко известного международного журнала по физике высоких энергий ("ЦЕРН Курьер") была сделана попытка дать обзор основных событий в этой науке за истекшее драматическое десятилетие. При этом, его авторы не ограничиваются перечнем чисто физических идей и достижений, но уделяют также серьезное внимание прогрессу ускорительной техники, заслугам наиболее выдающихся ученых и научно-организационным успехам мирового научного сообщества. Вместе с тем бросается в глаза практически полное отсутствие сведений о прогрессе в развитии физической (измерительной) аппаратуры, а также о развитии интереснейшей, полной драматизма и загадок области науки, связывающей физику элементарных частиц и космологию.

Автор попытается в какой-то мере восполнить эти недостатки, а также извлечь в заключении уроки философского плана. При этом будет вестись и полемика с интересными взглядами известного теоретика С.Хокинга (Англия) в его статье "Цель теоретической физики", опубликованной на рубеже 80-х годов в том же журнале "ЦЕРН Курьер".

О роли научных лидеров и международного сотрудничества в физике высоких энергий

В статье из "ЦЕРН Курьера" заслуженно упоминаются имена корифеев, закончивших свое земное существование в 80-х гг. XX в., но зато открывших новую эру в фундаментальных представлениях о строении материи. Это - теоретики Х.Юкава (Япония), П.Дирак (Англия), Л.де Бройль (Франция), Р.Фейнман (США) и А.Д.Сахаров (СССР), выдающийся экспериментатор Э.Сегре (Италия), крупнейшие организаторы науки Д.Адамс

(Англия) и Э.Амальди (Италия). К этому списку следовало бы добавить такую исключительно разностороннюю личность, каким был Я.Б.Зельдович (СССР), заложивший наравне с Сахаровым целый ряд основополагающих идей в космологии, тесно связанных с физикой элементарных частиц и полей.

На смену ушедшим из жизни корифеям пришли удостоенные высшей научной награды - Нобелевской премии по физике - К.Вильсон (США) за крупные теоретические исследования, К.Руббиа и С.Ван дер Мейер (ЦЕРН) за открытие промежуточных бозонов (W^{\pm} и Z^0), Л.Ледерман (США), Дж.Штейнбергер и М.Шварц (все США) за открытие мюонного типа нейтрино и, наконец, Н.Рамсей и Х.Демельт и В.Пауль за разработки эффективных методов точных физических измерений.

Особо отмечается 25-летний юбилей Международного центра теоретической физики в Триесте, основанного выдающимся теоретиком А.Саламом (Пакистан) и крупные успехи Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН), использующего в настоящее время средства 14 стран Западной Европы при активном научном участии также физиков из СССР, США, Японии и других стран. Для экспериментальных исследований большое значение имеет открытая в 1984 г. подземная лаборатория Grand Sasso (под Монбланом) на глубине 4 км водного эквивалента, в работах которой активное участие принимают советские физики во главе с Г.Т.Зацепиным.

Характерными чертами современного международного сотрудничества можно считать, во-первых, широкое развитие конкурсной основы признания крупных проектов, во-вторых, создание единой мировой сети ЭВМ с оперативной системой обмена научной информацией, и наконец, непрерывный крупномасштабный обмен научными кадрами (особенно - молодыми) из разных лабораторий мира. К сожалению, в нашей стране по всем этим трем линиям все еще имеется значительное отставание, которое вызвано, прежде всего, прочно укоренившимися традициями административно-командного стиля управления наукой¹. События, подобные созданию в СССР в 1989 г. Центра наук о человеке и организации конкурсов молодых ученых, это - лишь предвестники существенной перестройки.

¹ В связи с этим хотелось бы обратить внимание на весьма актуальную статью А.М.Кулькина. Научная деятельность в административно-бюрократической системе // Допр. философии .. 1989. N 12.

Цель оправдывает средства

Еще в ранних опытах с космическим излучением (20-е - 30-е гг. нашего века), особенно после опытов Д.В.Скобелевича в Ленинграде, физикам стало ясно, что единственным ключом к "раю" принципиально новых частиц материи может быть наблюдение процессов с возможно более высокой концентрацией энергии взаимодействующих между собой частиц. По-настоящему же конкурировать с природой, а со временем во многих отношениях превзойти ее возможности удалось путем реализации фундаментальных физико-технических идей, заложенных в середине 40-х гг. В.И.Векслером в нашей стране и независимо от него Э.Мак Милланом в США. Именно они сформулировали основные принципы как преодоления релятивистского порога, так и борьбы с потерями в интенсивности пучков частиц на многокилометровом пути их ускорения в электрических и магнитных полях. Тогда же стало ясно, что помимо теоретических принципов нужны и немалые средства и специализированные заводы, и инженерные кадры высокой квалификации, чтобы создавать все новые и новые поколения ускорительных машин, оснащенных мощнейшими магнитами, рекордной вакуумной технологией, разнообразной электроникой, электронно-вычислительной техникой и совершенной измерительной аппаратурой. Неудивительно, что в лидеры этой гонки вверх по шкале энергий вырвались именно наиболее развитые и богатые страны мира - США, наступающее им "на пятки" ядерное содружество западноевропейских стран - Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) и в известной мере, Япония.

В восьмидесятые годы был достигнут ряд выдающихся успехов в ускорительной "технологии". Таковы, например, предложенный еще в Новосибирске (Г.И.Будкер) и независимо от этого в ЦЕРНе (С.Ван дер Мейер) метод поперечного сжатия (как бы "охлаждения") пучков ускоряемых частиц с помощью электронов, все более широкое внедрение электромагнитов на сверхпроводящей основе, методика ускорения все более тяжелых атомных ядер (пока вплоть до серы) и пр.

Особенно важной оказалась идея предварительного накопления интенсивности двух независимых пучков частиц с последующим их встречным столкновением. Она реализована, в частности, в виде так называемых пересекающихся накопительных колец (сокращенно ISR) в ЦЕРНе для протон-антипротонных взаимодействий (1981 г.), но еще до этого - для электрон-позитрон-

ных взаимодействий в Новосибирске (линейный ускоритель ВЭПП) и в Гамбурге (ускоритель PETRA).

Интересно отметить, что остроумное использование процессов распада заряженных частиц, пионов и мюонов позволило получить и короткие во времени (~ 20 нсек) пучки таких, казалось бы, почти "неуправляемых" частиц как нейтрино (лаборатория им. Резерфорда, Англия, 1985 г.). Процессы взаимодействия других, тоже нейтральных частиц - фотонов, правда, в виртуальном виде удастся изучать на встречных пучках электронов и позитронов (ускоритель DESY, ФРГ).

Характерные энергии сталкивающихся частиц составили десятки миллиардов электроновольт (ГэВ) для электронов и позитронов, сотни миллиардов для ядер и тысячи миллиардов (ТэВ) для протонов и антипротонов. В отличие от традиционных опытов с неподвижной мишенью использование движущихся мишеней в виде встречных пучков в так называемых коллайдерах позволяет избежать от испущенной траты энергии на отдачу частиц мишени и использовать, в принципе, всю накопленную энергию E на образование новых частиц соответствующей массы $M = E/c^2$ (c - скорость света).

Для характеристики масштабов тех затрат, к которым приходится прибегать при реализации подобных проектов, упомянем, что финансирование создаваемого в США к концу 90-х гг. сверхпроводящего суперколлайдера (SSC) на энергию встречных пучков 2 по 20 ТэВ с размерами (по периметру) 87 км выливается в сумму около 6 млрд. долларов (напомним для сравнения, что вся американская программа полетов человека на Луну составила 25 млрд. долларов).

В нашей стране (в районе Протвино близ Серпухова) начато строительство большого ускорительно-накопительного комплекса (УНК) с энергиями кольцевых протонных пучков 2 по 3 ТэВ, в сочетании с линейными ускорителями электронных и позитронных пучков на энергии 2x0,5 ТэВ (в дальнейшем планируется осуществить встречные столкновения электронов и протонов тех же энергий).

В масштабах ферми-, нано- и мегамира

Х.Юкава был первым, кто пришел к выводу, что очень малые размеры атомных ядер, $\sim 10^{-13}$ см, связаны со столь же малым радиусом сильных взаимодействий ядерных частиц, а само это короткодействие обусловлено сравнительно большой (в сотни раз

тяжелее электрона) массой виртуальных квантов ядерного силового поля. Впрочем, масштабом 10^{-13} см научное сообщество решило увековечить память другого ученого - крупнейшего итальянского теоретика и экспериментатора Энрико Ферми. Лежащий в основе идеи Юкавы принцип неопределенности, связывающий энергию со временем жизни виртуальных частиц, а их импульс - с радиусом действия сил замечателен и тем, что он позволяет, вообще говоря, избежать прямых измерений расстояний порядка 1 ферми (1 ф). Оказывается, что для этих целей достаточно анализ баланса импульсов участвующих в реакции частиц.

С другой стороны, разрешения порядка десятков микрон уже необходимы в современной измерительной аппаратуре для четкого разделения следов разных частиц. В частности, именно микронные разрешения ядерных фотоэмульсий² позволяют выполнять прямые измерения времен распада нестабильных частиц вплоть до 10^{-13} сек. (если известны их энергии и массы, а значит, и скорости движения).

Наряду с этим для разделения различных частиц по времени пролета, с целью "сортировки" их по массам современная аппаратура должна иметь разрешения во времени порядка пикосекунды (10^{-9} сек) даже в опытах с космическими лучами (особенно для широких атмосферных ливней).

И, наконец, обилие различных каналов взаимодействия и распада частиц, порой чрезвычайно редких, но принципиально важных требует "переваривания" на ЭВМ колоссальных объемов информации, исчисляемых многими миллионами дискретных единиц информации (мегабайты)³, причем скорость их обработки достигает 100 мегабайт в секунду. В качестве одного из характерных примеров можно привести серию десятилетних исследований (в ЦЕРНе) процессов упругого рассеяния нейтрино на электронах, когда 2000 подобного типа событий было выделено на фоне 900 млн. взаимодействий тех же нейтрино с атомными ядрами атомов вещества.

Для успешной ориентировки во всем этом удивительном мире масштабов длины, времени и информации порядка ферми (1 ф), нано- секунды (1 нс) и мегабайта (1 Мб) совершенно необходимо также уметь разделять частицы по их природе (в том числе - непосредственно не регистрируемые нейтральные ча-

² Впрочем, к 1982 г. точность измерения координат частиц полупроводниковыми приборами (полоски кремния) приблизилась уже к 5 мкм.

³ Каждый байт есть выбор числа в двоичной системе (0 или 1).

стицы) и измерять с достаточно высокой точностью (как правило, доли %) их импульсы.

Из числа бесспорных достижений в области измерительной аппаратуры последнего десятилетия можно упомянуть так называемый "кристаллический бочонок" (crystal Barrel), сконструированный усилиями 9 лабораторий ЦЕРНа и "умеющий" измерять характеристики всех заряженных и нейтральных мезонов - продуктов протон-антипротонной аннигиляции в жидком водороде. Пожалуй, еще более впечатляющим будет изготовление в Садбари близ Онтарио (Канада) уникального детектора солнечных нейтрино (стоимостью 50 млн.долларов). Этот детектор будет находиться в никелевой шахте на глубине 2000 м под землей, в основе своей имеет 1000-тонный контейнер с тяжелой водой, и в нем ожидается регистрация 10 000 взаимодействий нейтрино в год.

Было бы ошибкой считать, что многомиллионные затраты на ускорительные машины и уникальную физическую аппаратуру это - только плата за человеческое любопытство в познании глубин строения материи. Как было показано на многих выставках и конференциях, организованных в странах Запада, они дали и косвенный "технологический" выход в развитие передовой сверхпроводящей, вакуумной, электронной и электронно-вычислительной техники в целом.

Уникальные возможности использования мюонных пучков для физико-химических исследований структуры твердых тел, основанные на явлении их деполяризации, были реализованы во многих лабораториях мира. Разнообразны применения "отходов производства" на электронных ускорителях (синхротронах) в виде пучков так называемого синхротронного излучения с очень широким спектром, начиная от рентгеновских лучей и вплоть до инфракрасного света. Ощутимое влияние на технический прогресс имеет широкое применение разнообразных новых материалов, разработанных первоначально для нужд ускорительной техники, в том числе - сверхпроводящих материалов для генерации, накопления и передачи электроэнергии. Отметим также, что на 1986 г. в мире работало около 2 500 линейных ускорителей частиц, и из них лишь менее 1% обслуживало исследования по физике частиц. Особенно большое значение имеет использование ускоренных пучков частиц (протонов, пионов и позитронов) в медицине для исследования и лечения разнообразных органов и опухолей.

Еще четверть века тому назад (1964 г.) известными теоретиками М.Гелл-Манном и Г.Цвейгом (США) была предложена очень плодотворная идея о кварках, как основных структурных элементах всех сильно взаимодействующих частиц (адронов), как относительно стабильных, так и столь "эфемерных" как резонансы, т.е. структурные образования со временем жизни того же порядка, что и время обмена квантами силового поля.

В частности, протон состоит из 3-х кварков с зарядами $-2/3e$ для 2-х u-кварков (тип "up") и $-1/3$ для одного d-кварка (тип "down"), а пион π^+ , π^- - из кварка u и античастицы кварка d. Взаимодействия между кварками, согласно созданной в 1973 г. теории - квантовой хромодинамике, переносятся особыми частицами - глюонами, причем в отличие от электрического поля величина, характеризующая интенсивность взаимодействия, в данном случае ослабевает с уменьшением расстояния между кварками (так называемая "асимптотическая свобода").

Существенным свойством глюонов является то, что они являются одновременно и носителями и источниками сил взаимодействия, отсюда и многочисленные попытки обнаружения чисто глюонных (так называемые "глюболы") по составу частиц. Такими, в частности, кандидаты в глюболы с массами 1,6 и 1,8 ГэВ (они получили "маркировку" как G- и X-частицы), обнаруженные на ускорителе У-70 в Протвино в совместных исследованиях физиков ИТЭФ и ЦЕРН.

Спустя несколько лет (1967-1968 гг.) субэлементарные квазиточечные составляющие протона (так называемые партоны) были обнаружены в опытах по так называемому глубоко неупругому рассеянию электронов, которые "удобны" тем, что сами по себе являются квазиточечными частицами. Кварковая гипотеза при всей "экстравагантности" идеи о дробном электрическом заряде кварков смогла блестяще объяснить многочисленные симметричные (по зарядам и спинам) семейства адронов, близких по массам, но при этом поставила во весь рост проблему прямого экспериментального наблюдения самих кварков.

В восьмидесятые годы эту трудность пытались обойти двумя способами. С одной стороны, удалось осуществить (ЦЕРН, 1981) косвенные наблюдения кварков по продуктам их превращений - так называемым струям. Такие струи, т.е. узко направленные группы частиц связаны с превращением одного кварка в не-

⁴ e - заряд электрона.

сколько частиц с обычным, целочисленным электрическим зарядом в момент их выбивания из адрона. С другой стороны, развивались чисто теоретические модели, объясняющие удержание кварков в пределах адрона и невозможность их вылета в свободном виде. В частности, это была модель своего рода вакуумных "мешков" с "кварконепробиваемыми" стенками. Другую возможность открывает модель струн, связывающих кварки с их "партнерами" - антикварками ирывающихся при расхождении кварка и антикварка на слишком большие (более одного ферми) расстояния. Принципиальная новизна модели струн состоит в том, что она впервые вводит в качестве структурного элемента материи не точечные, а линейные (одномерные) объекты. Плодотворность этой модели подтверждается на эксперименте: тем, в частности, что она естественным образом объясняет ступенчатый ("лестничный") характер энергетических спектров (в логарифмическом масштабе) при множественном рождении сильно взаимодействующих частиц.

Кроме того возникла очень заманчивая модель фазового перехода адронного состояния материи в состояние квазисвободных кварков и глюонов, аналогичное электронно-ионной плазме и получившее название кварк-глюонной плазмы⁵. Для экспериментального осуществления такого фазового перехода надо иметь исключительно высокие температуры, порядка триллиона градусов. Именно такие условия вполне могли осуществиться на самых ранних стадиях (в первые микросекунды) развития расширяющейся Вселенной в концепции Большого взрыва.

Чтобы не обращаться к столь далеким временам, возникает идея получения хотя бы на очень короткое время аналогичной "взрывной" ситуации и сейчас, путем столкновения частиц (особенно атомных ядер) достаточно высоких энергий. Отдельные попытки наблюдения подобных явлений выполнены с помощью стратосферных установок (рентгенэмульсионных камер) при регистрации космических лучей. В частности, это делалось в работах группы НА.Добротина (ФИАН) и в большом японо-американском (с участием Польши) эмульсионном эксперименте (IACSEE). Однако истолкование получаемых результатов осталось пока неоднозначным и недостаточно убедительным.

Более серьезные попытки делались в те же годы на ускорителе ЦЕРНа с пучками ядер кислорода и серы, ускоренных, правда, до несколько меньших энергий (порядка 10^8 эВ на ядро).

⁵ Это понятие ввел в обиход физиков советский ученый Э.В.Шурик в конце 70-х годов.

Были замечены аномалии в рождении частиц, имеющих в своем составе не обычные, а более тяжелые - так называемые "странные" или "очарованные" кварки. Эти аномалии можно при желании приписать возникновению кварк-глюонной плазмы, но опять-таки вопрос остается спорным.

Большие надежды в этих поисках нового состояния материи возлагаются на будущий ускоритель встречных пучков релятивистских ионов (RHIC), запланированный к запуску в США примерно к 1997 г. (проектирование начато в 1987 г.). На этом ускорителе предполагается "разгонять" ядра тяжелых атомов вплоть до золота и особое внимание уделять их центральным (с точностью до 1ф) столкновениям, когда вероятность разогрева кварковой материи особенно велика.

Нарушение симметрии и единство сил природы

Казалось бы, что может быть общего между электромагнитными взаимодействиями, определяющими собой структуру атомов в масштабах порядка 10^{-8} см, и едва уловимыми, ничтожно слабыми взаимодействиями с веществом таких частиц, как нейтрино от атомных реакторов с характерным радиусом взаимодействий с атомными ядрами не более 10^{-17} см. И тем не менее, еще в 70-х гг. известные теоретики С.Вайнберг, А.Салам и Ш.Глэшоу⁶ обратили внимание на то, что быстрый рост сечения слабых взаимодействий с энергией нейтрино позволяет предсказать наличие "родственных связей" между дальнедействующими носителями электромагнитных взаимодействий (фотонами) и возможными короткодействующими переносчиками слабых взаимодействий, получившими название промежуточных бозонов. Дело в том, что при достаточно высоких энергиях, когда сечения слабых и электромагнитных процессов становятся сравнимыми по величине, фотоны и промежуточные бозоны могут стать равноправными членами одного и того же семейства частиц. Их отличия (в данном случае непринципиальные) будут состоять в том, что фотоны бывают только одного типа и лишены массы покоя, а промежуточные бозоны могут быть трех разновидностей (2 заряженных, обозначаемых W^+ , W^- бозон, и одна нейтральная Z^0 -бозон), при этом их массы почти в 100 раз должны превышать массу протона.

⁶ За эти работы им была присуждена Нобелевская премия в 1979 г.

Необходимым условием такого "расслоения" электрослабого поля является нарушение симметрии его состояний при охлаждении за счет взаимодействия с гипотетическим скалярным полем Хиггса. Поиск квантов этого поля, возможно, очень тяжелых является одним из важнейших пунктов программы ускорителей следующего поколения.

Кстати, сама нестабильность многих адронов, в отличие от резонансных состояний сильного взаимодействия, связана с превращением более тяжелых входящих в их состав кварков в более легкие в результате слабых взаимодействий. Именно поэтому нестабильность таких частиц, как гипероны, К-мезоны и др. весьма условна: по масштабам длительности сильных взаимодействий (10^{-23} сек) они живут очень долго (10^{-10} - 10^{-13} сек), а по масштабам привычного нам макромира "умирают" настолько быстро, что "изготовить" из них пучки для экспериментов далеко не просто, хотя и возможно.

Для экспериментальной проверки гипотезы электрослабых сил возникла сложнейшая задача создания нового поколения ускорителей, резко отличающихся от всех предыдущих как энергией, так и интенсивностью потоков ускоряемых частиц. Понадобились огромный энтузиазм и изобретательность большого коллектива физиков и инженеров ЦЕРНа во главе с К.Руббиа и С.Ван дер Мейером, чтобы, наконец, в 1983 г. надежно обнаружить сначала W^{\pm} , а затем и Z^0 - бозон, массы которых лишь незначительно отличались от предсказанных теорией.

Резкое повышение интереса к нейтрино как частицам, олицетворяющим слабое, но быстро растущее с энергией взаимодействие, проявилось и в физике космических лучей. Уже ряд лет ведутся в США и СССР подготовительные работы по созданию гигантских установок площадью свыше гектара каждая для регистрации нейтрино с энергиями не менее 10^{14} эВ на больших глубинах (океан или озеро Байкал), где отсутствует фон других частиц. Этот проект получил условное название DUMAND - аббревиатура термина "глубоко подземные мюонные и нейтринные детекторы". Цель такого эксперимента - "нащупать" уникальные астрофизические объекты - естественные ускорители частиц сверхвысоких энергий, от которых могут доходить и другие, еще неизвестные нейтральные частицы.

Блестящее, удостоенное вскоре Нобелевской премии, открытие тяжелых квантов электрослабого взаимодействия оказало огромное стимулирующее влияние на дальнейшие, еще более смелые поиски пути объединения физических сил природы. Одно

из таких направлений получило название "Великого объединения". Речь идет о том, чтобы на этот раз объединить в рамках единой первичной симметрии все три типа взаимодействий, включая сильные. К сожалению, "исходная" симметрия трех полей должна нарушаться лишь при энергиях порядка 10^{24} электронвольт, т.е. на 4 порядка выше наблюдаемого верхнего предела энергий космических лучей и далеко за пределами возможностей всех мыслимых на сегодня ускорителей.

И тем не менее предлагаемые (хотя и не единственно возможные) принципы Великого объединения можно проверять на опыте уже сейчас. Дело в том, что универсальный характер всех взаимодействий ведет к возможности, хотя и крайне маловероятной, распада протонов (свободных и внутриядерных) на более легкие частицы. Такая возможность проверялась в нескольких лабораториях мира, а особенно тщательно и, казалось, небезуспешно (начиная с 1982 г.) в очень глубокой лаборатории индийской золотой шахты Колар голд филдс (KGF). К сожалению, все наблюдавшиеся за несколько лет исследований события, имитирующие распады протонов по разным каналам, можно, в конечном итоге, объяснить теми или иными фоновыми явлениями. Определенную ценность представляет лишь полученный в итоге всех исследований нижний предел времени жизни протона, порядка 10^{31} лет (это означает, например, что на каждые 100 кг вещества может происходить распад только одного протона в столетие).

Известные возможности экспериментальной проверки дают и совсем иного рода теоретические соображения, связанные с так называемой суперсимметрией частиц (кратко обозначаемой как модели SUSY). Речь идет здесь о математической модели универсальной симметрии между частицами с целым и полуцелым механическим моментом - спином. Такая модель привлекательна уже тем, что она обещает устранить пока еще непреодолимую разницу между "настоящими" частицами с их полуцелыми (в единицах постоянной Планка $\hbar/2\pi$) спинами и квантами силовых полей с их целочисленными спинами.

В итоге появились гипотезы о возможных частицах типа фотино ("партнер" фотона с полуцелым спином), глюино (наряду с глюоном) и пр. И массы и возможные каналы реакций всех этих частиц могут сильно отличаться от соответствующих суперсимметричных "партнеров". Особенно заманчиво искать нейтральные частицы (в частности, фотино), которые могут приходиться на Землю от уникальных по своей мощности источников космичес-

ких лучей, в частности, от Лебедь-X-3⁷ и проявляться, например, в избыточных потоках заведомо вторичных, нестабильных частиц, особенно, - мюонов (такого рода указание в печати было опубликовано в 1985 г., хотя и не подтвердилось впоследствии).

Особое направление исследований взаимосвязи разных взаимодействий и частиц представляют поиски осцилляций нейтрино между тремя разновидностями нейтрино, связанными с электроном, мюоном и тау-мезоном (так называемые, ν_e , ν_μ и ν_τ - частицы). Сама возможность таких осцилляций (т.е. периодических спонтанных превращений в веществе и даже в вакууме!) тесно связана с возможным наличием пусть очень небольшой, но конечной массы нейтрино. Большой интерес научной общественности в начале 80-х гг. вызвало сообщение московской группы из ИТЭФ (В.А.Любимов и др.) об оценке массы электронного нейтрино в пределах 14-46 электронвольт, однако этот результат был подвергнут сомнению в последующих исследованиях других лабораторий мира. Кстати, если бы масса нейтрино была порядка 30 эВ, это привело бы к тому, что именно в этих частицах заключена основная масса Вселенной. Поэтому очень важно учесть и более поздние результаты, в частности, полученную в Цюрихе (1986 г.) оценку 18 эВ как верхний предел массы того же нейтрино.

Проблема возможных осцилляций нейтрино связана еще и с загадочным "дефицитом" потока нейтрино от Солнца, обнаруженным в ходе многолетних исследований Р.Дэвиса (США). Правда, на эту тему существуют и другие соображения, о которых пойдет речь ниже.

Если вернуться к идеям Великого Объединения, то нельзя не упомянуть и о дальнейших теоретических (пока не связанных с экспериментом) разработках моделей так называемой супергравитации, в которых предполагается исходная симметрия всех 4-х сил природы, включая гравитацию с характерным для нее переносчиком взаимодействий - гравитоном. В данном случае нарушение исходной симметрии должно происходить при энергиях порядка 10^{28} электронвольт, а в современной, уже сильно остывшей и разреженной Вселенной гравитация в мире элементарных частиц столь слаба, что, например, вырывание одного электрона из атома электромагнитными силами требует в 10000 раз больше энергии, чем его заброс на Луну с преодолением сил земного притяжения.

⁷ X-3 - рентгеновский источник в созвездии Лебедь, обнаружен в 1961 г. и состоит из двух близко расположенных звезд с периодом обращения всего 4,6 часа.

Если же говорить о способах экспериментальной проверки теоретических моделей супергравитации, то единственно возможным остается использование того уникального природного ускорителя (не связанного притом с каким-либо финансовым ограничением!), который, судя по косвенным данным, "работал" на самой ранней стадии формирования нашей Вселенной, в течение ничтожно короткого промежутка времени порядка 10^{-43} сек.

Темные "углы" небосвода и лабиринты виртуальных Вселенных

Гравитационные взаимодействия, которые издавна казались важными только для макромира, сравнительно недавно вошли и в сферу интересов физики элементарных частиц. Проблема началась с парадокса: как показали точные астрономические наблюдения, скорости вращения ряда звездных галактик, в том числе и нашей, резко не соответствуют сосредоточенной в них массе звездного и межзвездного вещества. Последовал вывод о том, что не менее 90% всей материи по каким-то причинам не видно, скажем, с темными участками Млечного пути, в которых громадные пылевые облака поглощают значительную часть света расположенных за ними светил.

В итоге возникла гипотеза о том, что основная масса галактической материи заключена в какой-то материи, недоступной воздействию электромагнитных волн. Расчеты показали, что восстановить баланс за счет энергии различных типов нейтрино невозможно. И тогда возникла новая гипотеза о так называемых "вимпах" (WIMP - аббревиатура английского термина "слабо взаимодействующая массивная частица"). В отличие от макрочастиц межзвездной пыли это могут быть элементарные частицы, которые практически не взаимодействуют с электромагнитными волнами именно вследствие своей относительно большой массы.

Одно время казалось, что вимпы могли бы помочь и в разгадке тайны трехкратного, по сравнению с теоретически ожидаемым потоком, дефицита солнечных нейтрино в опытах Дэвиса, поскольку их присутствие в недрах Солнца существенно нарушило бы теоретический вывод о соотношении между общей массой, внутренней температурой и наружной светимостью Солнца. Правда, анализ длительных наблюдений за потоками солнечных нейтрино постепенно выявил довольно четкую, хотя и непонятную пока корреляцию между интенсивностью этих потоков и уровнем солнечной активности, который, как известно, испыты-

васт весьма ощутимые квазипериодические колебания с периодом 11 лет. Если не подвергать сомнениям такого рода корреляцию, то окажется, что постоянно действующие факторы в виде вимпов, не имеют отношения к загадке нейтринного дефицита в его многолетнем среднем значении.

И тем не менее гипотеза о вимпах, в частности, как о массивных положительно заряженных частицах оказалась в какой-то мере доступной для экспериментальной проверки. В лаборатории имени Э. Резерфорда (Англия) был задуман и начат оригинальный эксперимент по масс-спектроскопическому анализу больших количеств воды, сильно обогащенной тяжелой водой D_2O . Идея состоит в том, что за все время "обстрела" земного вещества космическими лучами в ней постепенно могут накапливаться молекулы типа НХО, где Х - таинственный положительно заряженный вимп. Возможная чувствительность такого опыта характеризуется относительной концентрацией молекул НХО в воде порядка 10^{-17} .

Еще более интересный путь объединения физики элементарных частиц и полей с космологией намечился в 1981-1982 гг. в связи с идеями так называемого "инфляционного", самоподдерживающегося разогрева Вселенной на начальной ("доисторической") стадии ее развития. Весь "исторический", т.е. сопоставляемый с экспериментом по реликтовому излучению период отсчитывался от момента Большого взрыва, и вопрос о том, "что было, когда ничего еще не было?" казался бессмысленным, поскольку время и пространство это - формы существования материи, а тогда отсутствие материи означает и отсутствие времени.

Однако чем дальше тем больше становилось очевидным, что понятие материи физикам совершенно необходимо распространить и на вакуум (вспомним, хотя бы о вакуумных "мешках", удерживающих кварки "в рамках" адронов). Удивительной особенностью вакуума оказывается в целом ряде теоретических моделей его "умение дышать", самовозбуждаться, флуктуировать. При этом, как было показано, в частности, в работах фиановской школы (в лице А.Д. Линде) в специальном случае скалярных полей вакуум оказывает как бы отрицательное давление на возникающие в вакууме виртуальные образования. Как следует из термодинамики, отрицательное давление приводит уже не к охлаждению, как у обычного газа при его расширении в пустоту, а наоборот, к очень быстрому (за 10^{-30} сек) и резкому разогреву материи (такой процесс и получил специальное название "инфляционного"). Так можно объяснить и само возникновение

Большого взрыва нашей Вселенной и вполне естественным образом возможность хаотичного, нерегулярного возникновения других, сколь угодно разнообразных по своим свойствам Вселенных, со специфическим для каждой из них набором основных физических симметрий. Заслуживают серьезного внимания также "сценарии" формирования исходно многомерного (10 измерений) пространства, которое быстро "сворачивается" (как говорят "компактифицируется") в обычное 4-мерное пространство и время.

Лишь ничтожно редкие "вариации на тему о Вселенной" могут быть хоть как-то похожи на наш мир - в том числе и по условиям, обеспечивающим возникновение биологической жизни вообще и разумной жизни особенно. Более того, как было показано, в частности, в серии работ И.Л.Розенталя (ИКИ) для этой цели необходимо иметь исключительное, крайне редкое сочетание физических констант. Но зато, если все эти рассуждения верны, отпадут и основания удивляться тому, как можно было бы в одном, уникальном случае именно нашей Вселенной заранее "запланировать" тот набор физических параметров, который позволяет доводить развитие материи до уровня, определяющего ее способность к самопознанию. В этом и заключается разгадка парадокса с так называемым "антропным принципом": "мир оказывается таким, как он есть именно потому, что мы в нем живем".

Отметим здесь еще один любопытный "мостик", связывающий космологию, астрофизику и теорию тяготения с ядерной физикой. Речь идет о наблюдениях над развитием взрыва Сверхновой звезды в Большом Магеллановом облаке. Впервые в истории науки в феврале 1987 г. в ряде лабораторий мира удалось наблюдать потоки нейтрино в самом начале, в первые секунды взрыва⁹ (еще до того, как он стал заметен в оптических телескопах) и при этом измерить его температуру (50 млрд.градусов). Впоследствии, уже на космических аппаратах наблюдались и характерные линии гамма-излучения, свидетельствующие о мощных процессах нуклеосинтеза в недрах бывшего голубого гиганта с постоянным образованием все более тяжелых элементов вплоть до железа.

Особый интерес к наблюдениям за этой Сверхновой связан еще и с проблемой обнаружения гравитационных волн, вызванных резким коллапсом большой массы звезды. В течение ряда лет ведутся испытания сверхчувствительных гравитационных ан-

⁹ К сожалению, полного согласия между данными разных лабораторий достичь не удалось.

тени, способных, в принципе, зарегистрировать столь ничтожный эффект гравитационной волны как изменение длины антенны на $10^{-16}\%$. Какие-то сигналы на гравитационных антеннах в Италии и США в период взрыва действительно принимались, но никакой гарантии в правильной их интерпретации нет, тем более, что при удалении на 160 тыс. световых лет (во времени и пространстве) возникшая гравитационная волна, судя по расчетам, не дала бы достаточного для ее обнаружения эффекта. Более убедительны были бы точно совпадающие во времени сигналы, по крайней мере, на трех антеннах в разных концах планеты, но таковых пока не наблюдалось.

Заключение

Основанные на предыдущем изложении выводы, необходимые для философского осмысливания достижений современного естествознания, можно кратко представить следующим образом.

Во-первых, крупнейшие достижения физики частиц и полей оказались возможными лишь благодаря непрерывно растущему (в количественном и качественном плане) технологическому уровню мировой цивилизации и вовлечению в эту деятельность все более широкого круга стран на основе оперативного международного обмена информацией и научными кадрами. Важно и то, что эта деятельность, изначально преследуя чисто познавательные цели, характерные для фундаментальной науки, начинает давать все более разнообразную обратную "отдачу" для технологического прогресса.

Во-вторых, для основных направлений развития этой области науки характерны поиски все более общих законов симметрии, позволяющих обнаружить единство сил взаимодействия частиц, казавшихся прежде принципиально разнокачественными.

В-третьих, история с созданием теории электрослабых взаимодействий и открытием промежуточных бозонов дает неплохую иллюстрацию к образному высказыванию Нобелевского лауреата Т.Д.Ли о двух законах, которым, как правило, подчиняются все физики: "1) без экспериментаторов теоретики пассивно дрейфуют, 2) без теоретиков экспериментаторы спотыкаются".

Далее, наряду с общей тенденцией к доказательству единства природы на основе принципов симметрии просматривается и другая, в известной степени противоположная тенденция к выявлению многообразия ее проявлений. Это касается не только поисков все более разнообразных и неожиданных типов симметрий

(вспомним, в частности, о суперсимметриях частиц), но и поиска новых состояний материи (кварк-глюонная плазма!) и новых типов частиц - новых разновидностей (поколений) кварков и нейтрино, новых массивных частиц ("темная материя" Вселенной).

Наконец, весьма перспективными оказались исследования в области, пограничной между физикой частиц и полей, с одной стороны, астрофизикой и космологией, с другой, в частности, создание теоретических моделей возникновения множественных Вселенных из флуктуаций вакуума, с учетом термодинамики инфляционных процессов, своего рода "вычерпывания" энергии из вакуума.

В заключение коснемся извечного вопроса о возможном конце развития науки, в частности, теоретической физики. В своей очень содержательной лекции на эту тему еще в 1977 г. известный английский теоретик С.Хокинг упоминает, как уже дважды в истории физики (в начале XX в. и в 20-х гг.) такого рода предсказания уже объявлялись крупными учеными, и однажды (как это высказал в свое время М.Борн) даже с конкретными сроками в 6 месяцев! И тот же Хокинг отнюдь не исключает возможности того, что уже к концу нашего века может быть создана "полная, самосогласованная и единая теория физических взаимодействий, которая смогла бы описать все возможные наблюдения". Он пытается обосновать эту точку зрения успехами, достигнутыми путем сочетания идей и выводов физики частиц, общей теории относительности и термодинамики. Но, увы, (а скорее, к счастью), история развития науки за истекшие 17 лет дает большие основания в ней серьезно сомневаться и настаивать на бесконечном, хотя и дискретном в наиболее существенных его чертах процессе познания человеком окружающего мира.

Автор благодарит профессора Н.А.Добротина за обстоятельное и плодотворное обсуждение данного обзора.

ПРИНЦИПЫ СИММЕТРИИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Сфера применения теоретико-групповых методов в физике микромира является исключительно широкой. Структура и симметрия атомных и волновых функций, молекул, электронная структура кристаллов - вот далеко не полный перечень явлений микромира, при изучении которых использовались методы теории групп. Широкая экспансия этих методов в конце 20-х, начале 30-х годов получила даже у физиков шутливое название "групповой чумы". Однако нас, в силу специфической направленности работы, будет интересовать лишь одна область применения теоретико-групповых методов - их использование для изучения фундаментальных объектов микромира - элементарных частиц.

Прежде чем охарактеризовать ту специфическую роль, которую принципы симметрии играют в физике элементарных частиц, охарактеризуем хотя бы кратко их роль и функцию в физике вообще.

Известно, какое место занимает теоретико-групповой подход в физическом познании. Возникнув в математике (геометрия, теория чисел, теория алгебраических уравнений), он начал использоваться в физике. Вначале главной областью его применения была кристаллография. Окончательно утвердился он в физике в процессе становления СТО. После установления релятивистской физики стало очевидным - обстоятельство до сего времени не осознававшееся в явной форме - что все фундаментальные физические теории строятся на величинах и соотношениях, инвариантных относительно некоторых групп преобразований.

Геометрические и динамические принципы симметрии

Все известные принципы симметрии, различающиеся между собой степенью точности, уровнем общности, характером изложений группы, согласно Вигнеру разделяются на два больших класса - геометрические и динамические.

Геометрические формулируются в терминах самих явлений, устанавливая независимость событий от выбора системы отсчета

при соответствующих данной группе преобразованиях. Исходными в этих симметриях являются преобразования пространства и времени. Несомненно, что соответствующей инвариантностью должны обладать и законы, которым подчиняются явления и которые, помимо пространственных и временных переменных, включают и динамические переменные. И, следовательно, геометрические принципы инвариантности включают также преобразования динамических переменных. Но исходным является инвариантность событий относительно преобразований пространства и времени. Это обстоятельство определяет внешний характер геометрических принципов по отношению к законам данной теории.

Геометрические принципы связаны с известными законами сохранения - энергии, момента количества движения, импульса, которые являются точными, и с законом сохранения четности, который имеет приближенный характер.

Геометрические принципы носят универсальный характер. Динамические принципы не обладают им. Они формулируются в терминах законов природы и относятся к определенным типам взаимодействий, поэтому каждое из известных взаимодействий обладает своей собственной симметрией. С этими принципами также связаны законы сохранения. Но эти законы относятся не к переменным измеряемым физическим характеристикам, но к параметрам, характеризующим взаимодействие, которое обычно называют в некотором обобщенном смысле зарядом. В связи с этим динамические симметрии являются внутренними.

Как мы увидим далее, вигнеровская классификация принципов симметрии приобретает существенно новые черты в современной физике частиц.

Функции принципов симметрии в физическом познании

Принципы симметрии выполняют в физическом познании следующие основные функции.

а) организующая

В известном смысле задача, которую решает физик-теоретик при построении теории, аналогична той, которую решает геометр: дано многообразие, требуется найти группу преобразова-

ний, относительно которой инварианты уравнения теории. Какие бы возражения не выдвигались против программы эрлангизации физики, два момента, связанные с ней представляются бесспорными: а) структура физической теории носит теоретико-групповой характер; б) основные этапы развития физического знания, каждый из которых представляет собой фундаментальную теорию, могут быть связаны с теоретико-групповым расширением. Последнее очевидно, по крайней мере, для такой цепочки теорий: классическая механика - специальная теория относительности - общая теория относительности. Эти теории инварианты относительно группы преобразований пространственно-временных переменных. Классическая механика является теорией инвариантов относительно преобразований галилей-ньютоновой группы. В основе СТО лежит группа Пуанкаре. Введение группы Пуанкаре явилось групповым расширением в следующем смысле: группа Пуанкаре в пределе, при $c \rightarrow \infty$ переходит в галилей-ньютонову группу. Группа Пуанкаре рассматривается как некоторая невырожденная структура, имеющая в качестве своего "вырожденного" аналога галилей-ньютонову группу, и переход от этой последней к группе Пуанкаре трактуется как "антисжатие". В основе ОТО лежит группа произвольных непрерывных преобразований, переход к которой (с известным приближением) может также трактоваться как расширение группы Пуанкаре.

Однако с точки зрения задачи реконструкции кумулятивного аспекта развития физического знания пространственно-временной вариант эрлангизации физики является ограниченным. В его рамках переход, например, от классической механики к статистической физике и термодинамике (также как и переход от классической механики к квантовой) не связан с групповым расширением. В основе этих теорий лежит одна и та же группа, хотя совершенно очевидно, что эти переходы сопровождались ростом знания. В связи с этим были сделаны шаги к поискам другой основы для теоретической реконструкции роста знания, которая позволила бы более точно учесть его кумулятивный характер. Один из таких шагов состоит в поисках более общих (по сравнению с теоретико-групповым) подходов к теоретической реконструкции развития физической теории. По этому пути идут авторы, разрабатывающие так называемую "алгебру наблюдаемых", из которой в качестве частного случая выродится понятие "фундаментальной группы"¹.

¹ См.: Заицев Г.А. Алгебраические структуры физики // Физическая теория (Философско-методологический характер). М., 1980.

Другой путь состоит в модификации самого теоретико-группового подхода к структуре теории. Так, В.П.Визгиным разрабатывается так называемый "фазовый" вариант эрлангизации физики². В его рамках формулировка принципов симметрии опирается не на пространство-время, а на понятие "фазы" (состояния) и "пространство состояний". С точки зрения "фазового" варианта физическая теория, будучи математической, строится на определенном многообразии. Понятие пространства состояний входит в систему ее основных понятий как множество, на котором задается многообразие физических величин. Физическая теория в этом случае предстает как теория инвариантов группы автоморфизмов пространства состояний. Если в пространственно-временном варианте переход к новой группе не сопровождается расширением многообразия, то в "фазовом" варианте расширение группы - это и расширение самого многообразия. В связи с этим здесь переход, скажем, от классической механики к статистической физике связан с теоретико-групповым расширением. Он представляет собой движение от группы автоморфизмов фазового пространства обобщенных координат и импульсов к группе автоморфизмов "обобщенного фазового пространства" - пространства счетно-аддитивных мер на фазовом пространстве, относительно которой инварианты уравнения статистической механики. На том же основании можно считать, что переход от классической механики к квантовой также сопровождается групповым расширением: это переход от группы автоморфизмов фазового пространства обобщенных координат и импульсов к группе автоморфизмов бесконечномерного сепарабельного гильбертова пространства (группа унитарных преобразований).

Таким образом, в "фазовом" варианте, в отличие от пространственно-временного, оба перехода сопровождаются расширением группы и могут быть истолкованы как включение менее общих структурных отношений в более общие.

б) ограничительная

Другая функция принципа инвариантности может быть охарактеризована как ограничительная. Она имеет два аспекта - гносеологический и онтологический. В гносеологическом плане принципы симметрии служат своеобразными правилами отбора выдвигаемых уравнений и гипотез. Соответствие вновь форму-

² См.: *Визгин В.П. Эрлангенская программа в физике. М., 1975.*

лируемых гипотез и теоретических представлений определенным принципам инвариантности является, по выражению А.Н.Вяльцева, свособразной "платой за вход" в науку³. Употребляя это выражение, А.Н.Вяльцев имел в виду требование релятивистской инвариантности, являющееся очень жестким правилом отбора в физике. Любая теоретическая система исключается из дальнейшего рассмотрения, если ее релятивистская формулировка оказывается принципиально невозможной.

В онтологическом плане ограничительная функция принципов инвариантности состоит в том, что они вычлениают физически реализуемые состояния из всех логически возможных состояний: физически реализуемыми оказываются состояния, инвариантные относительно группы преобразований, лежащей в основании теорий.

В некотором тривиальном смысле любой закон связан с введением ограничений в поле ожидаемых событий (Бриллюэн). Но принципы инвариантности накладывают дополнительные ограничения на возможности реализации событий. Это обстоятельство было тонко подмечено К.Фордом⁴. Он предложил различать обычные законы, как законы "дозволения" и законы сохранения, тесно связанные с принципами симметрии, как законы запрета. В физике элементарных частиц доказал свою необычайную плодотворность принцип, согласно которому в мире элементарных частиц может происходить все то, что не противоречит законам сохранения. И хотя каждый отдельный закон сохранения накладывает менее жесткие ограничения на возможное поведение элементарных частиц по сравнению с законами дозволения, взятые в системе, они накладывают на априорно возможные особенности поведения элементарных объектов очень жесткие ограничения.

Можно утверждать также, что принципы инвариантности связаны с еще одним типом ограничений. Расширение инвариантных аспектов теории, как правило, влечет за собой уменьшение числа начальных условий, необходимых для описания поведения систем. Ретроспективное постулирование уже самых первых геометрических принципов инвариантности в физике - относительно вращений и сдвигов в пространстве - фактически провозглашало в явной форме иррелевантность для описания поведения физических систем таких начальных условий, как абсо-

³ Вяльцев А.Н. Дискретное пространство-время. М., 1965. С. 194.

⁴ Форд К. Мир элементарных частиц. М., 1965. С. 112.

любом положении системы в пространстве и ее ориентация. Да и любой другой принцип симметрии можно сформулировать так, что будет подчеркнута "даруемая" симметрией независимость от тех или иных начальных условий. Так, симметрия относительно зарядового сопряжения означает, что указание на то, имеют ли в реакциях дело с частицей или античастицей, не является начальным условием, необходимым для описания поведения частиц. Сохранение четности говорит о том, что irrelevantным становится указание на то, идет ли речь о системе или ее зеркальном отображении. И т.д.

Расширение группы влечет за собой сокращение числа начальных условий. Переход от группы $SU(2) \times SU(1)$ к группе $SU(2) \times U(1) \times SU(3)$ в значительной степени диктуется стремлением "усовершенствовать" теорию, уменьшив число ее произвольных параметров. В принятой в настоящее время стандартной схеме электрослабых взаимодействий параметр, определяющий отношение констант электромагнитного и слабого взаимодействий (угол Вайнберга) остается внешним для теории: его "неоткуда вычислить"⁵. Этот недостаток пытаются ликвидировать на пути расширения группы теории.

в) унифицирующая

Принципы симметрии выполняют роль одного из основных тенденций физического знания к единству.

Для того, чтобы понять, почему именно принципы симметрии могут выполнять такую роль в познании, следует учесть, что понятия "инвариантность", "симметрия", "группа" несут в себе идею тождества, равенства, эквивалентности. Это может быть эквивалентность систем отсчета относительно преобразований пространства и времени (как в геометрических принципах инвариантности), либо состояний физической системы по отношению к преобразованиям фазового пространства, либо тождественность объектов, свойств, параметров систем относительно того или иного типа взаимодействий (как в динамических принципах). Уравнивание, отождествление систем отсчета, объектов в определенном отношении служит основой расширения поля приложения понятий теории, создает основу для экономии теоретических средств, для использования одних и тех же понятий, уравнений

⁵ См.: Матилян С.Г. На пути объединения слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий: $SU(5)$ // УФН. 1980. Т. 130, вып. 1. С. 12.

для объектов разных классов, разных классов систем отчета, разных состояний физических систем, т.е. обеспечивает как раз те особенности научных теорий, которые связаны с их общностью.

Унифицирующая функция принципов симметрии становится особенно очевидной, если сопоставить ее с той ролью, которую играют в физическом познании нарушения симметрии. Известно, что все симметрии физики элементарных частиц являются нарушенными. И нарушения симметрии играют самостоятельную роль в теоретической реконструкции мира элементарных частиц, поскольку в противовес симметриям, служащим основанием для поиска единства в многообразии частиц, нарушения симметрии ответственны именно за само многообразие.

Так, именно приближенный характер изотопической симметрии (она нарушается электромагнитным взаимодействием) вызывает расщепление мультиплетов, появление различия в массах у членов одного и того же изотопического мультиплета. При "выключении" электромагнитного взаимодействия эти массы были бы равны, что привело бы к тождеству членов изотопического мультиплета, к его "вырождению".

Еще более нарушенной является $SU(3)$ не цветовая, что ведет к появлению еще больших различий между различными изомультиплетами - членами унитарных мультиплетов. Только выключение умеренно сильных взаимодействий (нарушающих унитарную симметрию) привело бы к вырождению супермультиплета. Предполагается далее, что спонтанное нарушение локальной изотопической инвариантности (до обычной электромагнитной калибровочной инвариантности) приводит к появлению масс и промежуточных векторных бозонов. И именно это нарушение "повинно" в существовании столь резких различий между электромагнитными и слабыми взаимодействиями. И, наконец, нарушенный характер группы симметрии, кладущейся в основание программы "великого объединения", позволяет объяснить расхождения в значениях констант связи электромагнитного и слабого взаимодействий и существование столь заметного различия между свойствами лептонов и кварков. Таким образом, и симметрия, и нарушения симметрии равным образом необходимы для реконструкции мира элементарных объектов.

Рассмотренные функции принципов симметрии не просто связаны между собой. Они тесно переплетены, и ни одна из них не может быть реализована в изоляции от других. Основанная на действии принципов симметрии унификация знания лежит в основании организующей функции, и в то же время ее действие со-

проводится сокращением числа фундаментальных частиц и взаимодействий, т.е. реализацией ограничительной функции. Вычленение физически реализуемых состояний означает и сокращение, элиминацию логически возможных, но физически нереализуемых состояний (ограничительная функция), и одновременно ведет к организации знания в систему - созданию закона, теории. И т.д.

Как проявились эти функции в физике элементарных частиц? Рассмотрим этот вопрос, имея в виду историческую последовательность развития идеи симметрии в этой области физического знания.

Довоенный этап развития идеи симметрии в физике элементарных частиц

При рассмотрении применения идей симметрии в физике элементарных частиц уместно выделить два этапа: от возникновения квантовой механики до начала второй мировой войны; и от создания в конце 40-х, начале 50-х годов современной квантовой электродинамики до настоящего времени. Эти два периода находятся в достаточно сложных отношениях друг к другу. С одной стороны, между ними существует преемственность, и ряд результатов второго периода являются непосредственным продолжением первого. С другой стороны, между первым и вторым этапами есть определенный разрыв, и ряд важных идей, которые развивались на первом этапе, оказались забытыми к началу 50-х годов, и их пришлось заново перескрывать.

Если использовать идею разделения симметрий на геометрические и динамические, о которой упоминалось выше, можно утверждать, что на первом этапе ведущую роль играли геометрические симметрии, тогда как использование внутренних симметрий носило в какой-то степени подчиненный характер. На втором этапе, напротив, на первое место выдвигаются именно динамические симметрии, причем, намечается объединение динамических и геометрических симметрий, т.е. сами геометрические симметрии начинают трактоваться как имеющие динамический характер⁶. Это обстоятельство является

⁶ Вообще говоря, можно было бы сказать и наоборот: динамические симметрии приобретают геометрическую интерпретацию в рамках расширения представлений о пространстве.

следствием очень мощной унифицирующей способности симметрий и основанных на них методах.

Первое применение идеи симметрии в физике элементарных частиц было, тем не менее, связано с использованием ее ограничительной функции. Поиски симметрии стимулировали переход, совершенный в 1926 г. О.Клейном, В.А.Фоком и В.Гордоном, от нерелятивистского уравнения Шредингера к релятивистски инвариантному полемому уравнению. Уравнение Клейна-Гордона представляет собой релятивистски инвариантное выражение для скалярной волновой функции и имеет, соответственно, второй порядок по времени. Это обстоятельство порождает ряд трудностей в интерпретации волновой функции как амплитуды плотности вероятности.

Наличие этих трудностей побудило П.Дирака к поиску релятивистски инвариантного уравнения первого порядка, причем исходным пунктом исследования было уравнение Клейна-Гордона. Эта задача была решена Дираком в 1927 году. Уравнение Дирака было получено путем перехода от скалярной полевой переменной к многокомпонентной волновой функции, обладающей более сложными трансформационными (симметричными) свойствами, нежели скаляр. Такая сложная структура называется спинором (точнее биспинором) Дирака. Уравнение Дирака автоматически учитывает наличие у электрона такой внутренней степени свободы, как спин и существование у электрона античастицы - позитрона.

Примерно в то же время аналогичная работа была выполнена итальянским теоретиком Э.Майорана, который также как и Дирак получил релятивистски инвариантное уравнение первого порядка для частиц со спином $1/2$. Уравнения Дирака и Майорана отличаются тем, что в них по-разному входит массовый член уравнения. В настоящее время считается, что масса электрона имеет дираков характер и, следовательно, именно уравнение Дирака является адекватным описанием электронов. Однако, исследования Майорана не утратили значения, и в современных работах по физике элементарных частиц достаточно часто обсуждается возможность майорановой массы.

Работы Дирака и Майорана вызвали к жизни большую серию работ других физиков, в которых были установлены все возможности для типов линейных релятивистски инвариантных полевых уравнений.

Так были изучены векторные полевые уравнения для частиц с конечной массой покоя, а в середине 30-х годов в работах В.Паули, В.Вайскопфа, П.Иордана и Е.Вигнера и ряда других фи-

зиков было проведено достаточно полное исследование возможных типов релятивистски инвариантных уравнений различного порядка тензорности⁷.

Необходимо отметить, что эти поиски проводились в тесной связи с идеей квантования полей. Т.е. речь шла не просто о классических полевых уравнениях, а о квантовании этих полей и их применении для описания вновь открываемых и предполагаемых (гипотетических) частиц. Среди этих работ нам хотелось бы особо выделить работы Г.Вейля, в которых было рассмотрено релятивистски инвариантное уравнение для безмассовой частицы со спином $1/2$. Это уравнение неинвариантно относительно зеркального отражения пространства. По этой причине на него не обратили внимания, и оно оказалось забытым. Но во втором, послевоенном периоде развития физики элементарных частиц, когда было открыто несохранение четности, это уравнение пережило свое второе рождение.

Рассматриваемое выше направление связано с внешними, геометрическими симметриями. Но одновременно в нем развивалось и другое направление, в котором (пусть пока еще и не очень последовательно) в физику частиц проникали внутренние, динамические симметрии. Одним из существенных путей такого проникновения явилось обнаружение спина электрона. Спин представляет собой внутреннюю степень свободы частицы и, хотя геометрические преобразования затрагивают преобразования спиновой переменной, спиновые характеристики не могут быть полностью выражены только через геометрические свойства.

Связь спина с симметрией была быстро обнаружена в работах Б.Ван-дер-Вардена, Э.Картана и ряда других математиков и физиков-теоретиков. Для значения спина $1/2$ спиновые переменные обладают группой симметрии $SU(2)$, изоморфной группе вращений трехмерного пространства $O(3)$. Кроме того, в силу одного из важнейших положений квантовой теории - принципа неразличимости тождественных частиц - группа преобразований спина очень сильно связана с группой перестановок. Это обстоятельство очень активно используется в физике многочастичных систем, особенно в теории химической связи (концепция спин-валентности). Однако эти аспекты связи спина с симметрией лежат вне сферы внимания данной работы. Более важным для нас является то, что понимание спина как внутренне-

⁷ Когда мы говорим "достаточно полное исследование", то это вовсе не означает, что работы 30-х годов исчерпывают проблему. Изучение уравнений полей с высшими спинами продолжалось и во втором периоде (после войны).

ней степени свободы послужило отправным моментом в возникновении понятия изотопического спина (изоспина), которому суждено было сыграть фундаментальную роль в дальнейшем развитии физики элементарных частиц. А именно в реализации объединительной функции.

Понятие изоспина было введено В.Гейзенбергом в 1932 г. вскоре после открытия нейтрона. После открытия взаимодействий нейтрона физики обратили внимание на то, что в сильных (ядерных) взаимодействиях протон и нейтрон ведут себя одинаково и что все различия связаны с различием их электрического заряда. На этом основании Гейзенберг выдвинул предположение о том, что протон и нейтрон представляют собой разные состояния одной и той же частицы и что эти состояния соответствуют разным проекциям внутренней степени свободы, которая может иметь лишь две проекции и в этом смысле аналогична спину. Эта проекция получила название изоспина, обозначается T , а ее "проекции" T_3 . Симметрия протона и нейтрона в сильных взаимодействиях получила название изотопической симметрии, причем группой этой симметрии является группа $SU(2)$, также как и у обычного спина.

Эта мысль оказалась первой попыткой объединить разные частицы на основе теоретико-группового подхода⁸, и ее можно считать началом чрезвычайно плодотворного направления в физике частиц во втором (послевоенном) периоде ее развития. Именно к этой идее восходят все последующие составные модели элементарных частиц. На более раннем этапе эта тенденция хотя и признавалась очень важной, все же не получила существенного развития. Единственным развитием ее оказалась работа Е.Вигнера, который пытался построить теорию на основе объединения спиновой и изоспиновой $SU(2)$ групп, т.е. теорию на базе $SU(2) \times SU(2)$ симметрии. Эта попытка не привела к какому-либо существенным сдвигам в понимании элементарных частиц и была основательно забыта. О ней вспомнили лишь в наши дни. Однако для нас она представляет интерес как одна из первых попыток продвижения в направлении расширения группы симметрии, ставшем в наши дни одним из центральных в физике частиц.

⁸ Говоря об изотопической симметрии как о первой попытке объединения разных частиц, не следует трактовать это в абсолютном смысле слова. Объединительная тенденция проявилась уже в 20-е годы, при применении идеи галилеовочной симметрии (которая будет рассмотрена ниже) к проблеме объединения взаимодействий - электромагнитного и гравитационного, и даже более сложному объединению в 30-х годах.

Пожалуй, еще более тесная связь существует между объединительной функцией принципов симметрии и идеей калибровочных симметрий. Калибровочная инвариантность, как существенная характеристика полевых уравнений, была установлена еще в начале XX века при исследовании трансформационных свойств уравнений Максвелла (в электродинамике ее называют также градиентной инвариантностью). Этот тип симметрии имеет специфически внутренний характер, поскольку преобразования этого типа, оставляющие неизменными уравнения движения (или лагранжиан системы) относятся исключительно к динамическим полевым переменным и не включают пространственно-временных преобразований. Смысл этих преобразований в электродинамике состоит в том, что к 4-х мерному вектор-потенциалу электромагнитного поля можно прибавить 4-мерный градиент произвольной функции координат и времени и это не изменяет уравнений Максвелла.

Впервые в физике частиц идея калибровочной инвариантности была использована в 1919 г. в работе Г.Вейля, в которой он пытался развить идеи общей теории относительности и объединить гравитационные и электромагнитные взаимодействия. Строго говоря, отношение этой работы к физике элементарных частиц довольно опосредованное, поскольку в работе 1919 г. и в ряде работ начала 20-х годов Вейль рассматривал чисто классические поля без квантования. Так что в данном случае речь шла скорее об объединении взаимодействий. Однако, ввиду того, что одним из аспектов физики частиц является именно изучение их взаимодействий, имеет смысл при рассмотрении калибровочных симметрий начать еще с доквантового этапа. Важно отметить, что уже на этом этапе (включая и более позднюю, 1921 г. работу Вейля) обнаружились мощные объединительные возможности калибровочных симметрий.

Дальнейшее развитие идеи калибровочной симметрии в физике частиц проходило уже в рамках квантовой механики, в особенности в сфере активного исследования полевых уравнений в 1926-1929 гг., в работах В.А.Фока, Ф.Лондона и Г.Вейля. Общим свойством квантово-полевых уравнений (Шредингера, Клейна-Гордона) является их инвариантность относительно преобразований умножения волновой функции на фазовый множитель - преобразование $\Psi \rightarrow \Psi \cdot e^{i\varphi}$. При этом, если φ - константа, то это будет глобальное калибровочное преобразование, которое не представляет существенного интереса, но если φ - функция координат, то это будет локальное калибровочное преобразование, очень тесно связанное с калибровочным (градиентным) преобразова-

нием 4-мерного вектор-потенциала электромагнитного поля. Для того, чтобы полевое уравнение частицы, взаимодействующей с электромагнитным полем осталось инвариантным при таком преобразовании, нужно чтобы к вектор-потенциалу был прибавлен 4-мерный градиент функции f . Т.е. локальная калибровочная инвариантность очень тесно связана с взаимодействием частиц с векторным полем (бозонной частицей) переносящим это взаимодействие. В этом плане опять-таки обнаруживается объединяющая возможность калибровочной симметрии. Именно с этим обстоятельством связано высказанное Вейлем в 1929 г. положение о весьма общем характере требования калибровочной симметрии.

Специальный интерес в этом плане представляет работа О.Клейна 1938 г., в которой он сделал попытку объединить гравитационное, электромагнитное и сильное (ядерное) взаимодействия на основе идеи калибровочной инвариантности, используя также идею Юкавы (1935) о π - мезонах, как переносчиках ядерного взаимодействия. Важность этой работы для целей настоящей статьи состоит в том, что в ней объединительные возможности требования калибровочной симметрии были использованы максимально для того времени.

Таким образом, на первом этапе применения принципа симметрии сложились три основных направления: изучение следствий релятивистской инвариантности уравнений, т.е. геометрической симметрии, и использование внутренних симметрий, изотопической и калибровочной. Каждое из этих направлений получило дальнейшее развитие на следующем этапе, который начался в конце 40-х годов нашего века.

Послевоенный период

В послевоенный период продолжают исследования, связанные с требованием релятивистской инвариантности (ограничительная функция симметрии). Однако на этом этапе на первый план выдвигается новый момент, суть которого в разработке квантовой теории поля. В этом направлении можно отметить два очень важных результата. В начале 50-х годов в работах Ю.Швингера, Р.Фейнмана, С.Томонаги и Ф.Дайсона была создана последовательная релятивистски инвариантная теория возмущений квантовой электродинамики, включая теорию перенормировки. Вторым фундаментальным результатом является установление в работах В.Паули, Г.Людерса и Ю.Швингера связи между

релятивистской инвариантностью, спином и типом статистики и знаменитой СРТ-теореме, т.е. инвариантности явлений относительно комбинированного преобразования зарядового сопряжения, зеркального отражения пространства и обращения времени. Оба эти результата оказались важными не только для дальнейшего развития физики элементарных частиц, но и в другом отношении: в определенном смысле они оказались завершающими в развитии всего направления. После них исследования релятивистской инвариантности оказались законченными и основную роль в развитии физики частиц стали играть внутренние симметрии.

Наиболее активно в 50-х годах нашего века в физике элементарных частиц стала использоваться идея изотопической симметрии (объединительная функция инвариантности). Представление о том, что протон и нейтрон могут рассматриваться в качестве разных проекций изотопического спина и на этой основе быть объединены, привело к попыткам более широкого объединения сильно взаимодействующих частиц, число которых (частиц) быстро росло по мере развития экспериментальной техники. Важным аспектом этой объединительной тенденции было стремление рассматривать в качестве фундаментальных лишь небольшое число частиц. Все остальные полагались состоящими из фундаментальных.

Первым шагом в этом направлении была попытка Э.Ферми и Ч.Янга, избравших в качестве фундаментальных дублет протон-нейтрон. Результаты, достигнутые на основе этой модели были незначительными, но она дала мощный толчок всему направлению. Дальнейшее развитие моделей составных частиц происходило в теснейшем взаимодействии с изучением симметрий. Роль принципов симметрии в моделях составных частиц очень многогранна. Мы выделим два аспекта. Первый заключается в способности симметрий выступить основой объединения частиц в мультиплеты. Второй - в том, что требования симметрии определяют относительные вероятности распада частиц по различным каналам, причем в соответствии с этими требованиями некоторые распады оказываются вообще запрещенными. Это обстоятельство позволяет проводить сравнение на основе сопоставления с экспериментально наблюдаемыми вероятностями распадов различных групп симметрии, обладающими примерно одинаковыми объединительными возможностями.

Наиболее плодотворными в рамках этого направления оказались работы, в которых объединение производилось не на базе дублета изоспиновой симметрии (группа $SU(2)$), а на основе

триплета фундаментальных частиц, т.е. переход к группе $SU(3)$. Исключительно важную роль в развитии этого направления сыграла модель С.Сакаты, в которой в качестве фундаментальных частиц рассматривался триплет протон (P), нейтрон (N) и лямбда-гиперон (λ). Именно в процессе анализа и дальнейшего развития этой модели родилась классификация сильно взаимодействующих частиц (адронов) по представлениям группы $SU(3)$, последовательное развитие которой привело М.Гелл-Манна, Ю.Неемана и Г.Цвейга в 1964 г. к гипотезе кварков, которые представляют собой тройку частиц, преобразующихся по наименьшему неприводимому представлению группы $SU(3)$.

Судьба гипотезы кварков была достаточно сложной. Успех кварковой модели в систематизации и объединении всех сильно взаимодействующих частиц вызвал у части физиков большой энтузиазм. С другой стороны, непривычные характеристики кварков (дробный электрический заряд) и отсутствие прямого их обнаружения в опытах типа Милликена или по трекам в разного рода камерах (Вильсона, пузырьковой, искровой) порождали скептическое отношение к вопросу о реальности этих частиц. Многие физики предпочитали рассматривать кварки в качестве математических фикций, являющихся лишь удобным средством для классификации "зоологии" элементарных частиц, т.е. чисто инструменталистски. Существенный сдвиг произошел в самом конце 50-х, начале 60-х годов. В это время были обнаружены динамические следствия кварковой модели (зависимость форм-факторов рассеяния от кварковой структуры адронов и ряд других следствий). Но наибольшее влияние оказало расширение самой кварковой модели. С одной стороны выяснилось, что простая кварковая модель, в которой существует всего три типа кварков явно недостаточна, и расширение совокупности кварков привело к большим успехам в предсказании новых частиц. С другой стороны, оказалось необходимым ввести новую характеристику кварков - цвет, причем это введение цвета также было связано со свойствами симметрии. Таким образом, в физику частиц вошла новая группа симметрии - цветовая $SU(3)_c$.

С этого времени начинается чрезвычайно интенсивное, можно сказать, триумфальное распространение идей симметрии в физике частиц. В некоторый период, примерно на рубеже 60-х, начале 70-х гг. возникла даже тенденция противопоставлять симметричный подход традиционному динамическому квантово-полевому подходу. Основной тенденцией этого периода является очень активный поиск более широкого объединения, расширения возможностей алгебраического подхода. Однако период

противопоставления теоретико-группового подхода квантово-полевому был недолгим. Уже в конце 60-х годов обнаруживается (и опять-таки на основе идеи симметрии, на этот раз калибровочной) их объединение. Но мощный импульс поиска более широких симметрий сохранился и в настоящее время, и представляет, пожалуй, важнейшее направление развития физики элементарных частиц.

Третьим направлением применения идеи симметрии в физике частиц (которое, как было сказано выше, сливается со вторым) является использование калибровочной симметрии. Попытки построения объединительных теорий на основе требования калибровочной симметрии, начавшиеся, как отмечалось, на первом этапе использования идей симметрии в физике частиц, к началу 50-х годов были основательно забыты. Поэтому второй период использования калибровочной симметрии начинается статьей Ч.Янга и Р.Миллса 1954 года. Основной идеей этой работы была констатация существования связи требования калибровочной инвариантности с концепцией взаимодействия частиц как обмена промежуточными бозонами (векторными частицами со спином 1). При этом нужно отметить два важных момента этой пионерской работы. Один из них состоит в том, что в ней в качестве калибровочной рассматривалась именно изотопическая симметрия, и речь сразу шла не о глобальной, а о локальной инвариантности. Таким образом, идеи калибровочной и изотопической симметрии рассматривались в единстве. Вторым важным моментом работы Янга-Миллса является то, что в калибровочном преобразовании $\Psi \rightarrow \Psi \cdot e^{if}$ функция f является не числовой функцией, как в электродинамике, а матрицей (оператором), точнее говоря, матричным вектором, компоненты которого не коммутируют между собой. Это означало, что совершался переход от абелевой (коммукативной) группы калибровочных преобразований к неабелевой. Это изменение имело исключительно важное значение для последующего развития теории.

Работа Янга и Миллса вызвала к жизни ряд исследований ведущих физиков, в которых делались попытки описания различных взаимодействий (сильных, гравитационных) при помощи теорий, основанных на использовании неабелевой калибровочной симметрии. Особый интерес представляют в этом ряду первые попытки объединения слабого и электромагнитного взаимодействий. Однако до середины 60-х годов прогресс в этой области был не очень существенным. Причиной этого были трудности, с которыми сталкивались калибровочные неабелевы теории взаимодействия. Одна из наиболее существенных трудно-

стей состояла в том, что во всех таких теориях векторные частицы, переносящие взаимодействия, должны быть безмассовыми подобно фотону, являющемуся промежуточной частицей в электродинамике. Тем не менее, в эксперименте была известна только одна такая частица - все тот же фотон. Все остальные бозоны обладают массой.

Существенный сдвиг в этом направлении произошел в 1967 г., когда усилиями С.Вайнберга, А.Салама и Л.Глэшоу была создана единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий, основанная на идее локальной калибровочной инвариантности относительно группы $SU(2) \times U(1)$, где $SU(2)$ - группа изоспина, характеризующая слабые взаимодействия (неабелева) и $U(1)$ - группа калибровочных преобразований электродинамики (абелева). Исключительно важным моментом в создании этой группы явилось, наряду с использованием идеи симметрии, обращение к противоположной идее - нарушения симметрии, точнее, спонтанного нарушения симметрии.

Вообще говоря, о возможности спонтанного нарушения симметрии физики знали довольно давно. Эта идея зародилась еще в довоенный период в работах В.Гейзенберга, посвященных теории спонтанного упорядочивания спинов в ферромагнетиках. Фундаментальные работы по исследованию свойств квантовых систем со спонтанно нарушенной симметрией были выполнены в начале 60-х годов Дж.Голдстоуном. В период между 1964 и 1967 гг. рядом физиков, исследовавших математическую структуру квантовой теории поля с нарушенной калибровочной симметрией, была открыта возможность появления массы у промежуточных векторных бозонов. Это явление получило название механизма Хиггса, по имени одного из физиков, обнаруживших эту возможность. Использование этого механизма позволило Вайнбергу, Саламу и Глэшоу (не в совместных работах, а независимо друг от друга) нейтрализовать трудность, связанную с появлением в теории безмассовых промежуточных векторных бозонов, со спином 1. Это касается именно тех бозонов, которые являются переносчиками слабого взаимодействия W^\pm и Z^0 бозонов (фотон - переносчик электромагнитного взаимодействия - остается безмассовым), причем теория позволяет вычислить массу промежуточных W, Z^0 - бозонов на основе эмпирически известной константы слабых взаимодействий. Проверка единой теории электрослабых взаимодействий в многочисленных экспериментах увенчалась открытием W и Z бозонов, и значение масс оказалось в полном согласии с теоретическим предсказанием.

Начало 70-х годов знаменуется еще одним важным продвижением в направлении использования идеи калибровочной симметрии. Истолкование цветовой симметрии кварков - $SU(3)_c$ -группы - как локальной калибровочной неабелевой симметрии привело к созданию квантовой хромодинамики - квантовополевой теории кварков и промежуточных векторных переносчиков взаимодействия - глюонов. Успехи квантовой хромодинамики в описании очень большого числа явлений сильных взаимодействий породили твердую убежденность, что, несмотря на ряд трудностей и нерешенных проблем, мы имеем адекватную теорию сильных взаимодействий.

Таким образом, к концу 70-х гг. в физике элементарных частиц прочно утвердились две теории, основанные на использовании локальной неабелевой калибровочной симметрии - квантовая хромодинамика (группа $SU(3)_c$) и единая теория электрослабых взаимодействий (группа $SU(2) \times U(1)$). Глубокое сходство внутренней структуры этих теорий позволяет надеяться на то, что обе они являются подтеориями некоторой более общей теории, подобно тому, как теории электромагнитных и слабых взаимодействий являются подтеориями единой теории электрослабых взаимодействий. Естественно предположить, что эта объединяющая теория по отношению к теоретико-групповому рассмотрению должна основываться на группе симметрии, для которой группы $SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$ являются подгруппами. Минимальной группой, обладающей такими свойствами является группа $SU(5)$. Однако, существует множество других групп, обладающих данным свойством. В связи с этим, одним из направлений физики частиц является детальное изучение структуры групп высших симметрий и основанных на трактовке этих групп как локальных калибровочных симметрий квантово-полевых теорий. Задача эта очень сложна, поскольку повышение симметрии приводит к увеличению числа фундаментальных частиц и промежуточных бозонов и структура соответствующей квантово-полевой теории становится трудно обозримой.

Вторая проблема, которая возникает при таком расширении группы симметрии, состоит в том, что эту симметрию необходимо нарушить так, чтобы из нее "выщепились" известные нам симметрии уже изученных взаимодействий ($U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$). Это может быть выполнено очень многими способами, которые приводят к одинаковому расщеплению. В связи с этим, очень важной задачей является поиск различий наблюдаемых явлений (в основном вероятностей разных распадов), которые позволили бы выбрать конкретный механизм нарушения симметрии. Од-

ним из таких явлений, которые предсказываются объединяющими теориями, является нестабильность протона. Поэтому вопрос об обнаружении этой нестабильности и измерение времени полураспада является исключительно важным для физики частиц: оно позволило бы значительно более определенно двигаться по пути теоретических обобщений.

Объединение электрослабых и сильных взаимодействий хотя и очень привлекает внимание физиков, но у них есть еще более впечатляющая цель - объединение всех известных взаимодействий, включая и гравитационное. Надежда на возможность такого объединения связывается с тем, что существует калибровочная трактовка гравитационного взаимодействия. Вместе с тем, здесь есть и существенная трудность. Группа преобразований, с которой связано гравитационное взаимодействие является "геометрической" - внешней симметрией, тогда как симметрии всех остальных взаимодействий являются внутренними, и в начале 70-х гг. были доказаны теоремы о невозможности нетривиального объединения внешних и внутренних симметрий (теоремы типа "no go").

Есть и еще один аспект проблемы объединения. Он состоит в том, что все частицы очень резко делятся на фермионы (с полуцелым спином) и бозоны (с целым), и они также не объединяются какой-либо симметрией. Однако, в начале 70-х гг. была обнаружена возможность объединить фермионы и бозоны. Это оказалось возможным на основе расширения пространства, в котором определены полевые переменные, за счет введения некоммутирующих координат, называемых грассмановыми переменными. Такая симметрия получила название суперсимметрии, причем выяснилось, что преобразование фермион-бозон-фермион (или бозон-фермион-бозон) приводит к сдвигу в обычном пространстве. Это означает, что на основе суперсимметрии могут быть объединены внутренние и внешние симметрии, что открывает дорогу к объединению всех взаимодействий (в физике эта программа называется "Великим объединением").

На этом пути были построены теоретические схемы, получившие название супергравитации, причем может быть несколько типов таких схем. Супергравитационные схемы предсказывают также большое число до сих пор не обнаружившихся частиц, что делает пока невозможным постановку вопроса о правильности или неправильности теории супергравитации.

Еще одной трудной проблемой является вопрос о нарушении суперсимметрии. Внеение в теорию такого нарушения является необходимым, поскольку в теории с ненарушенной суперсим-

метрией все частицы имели бы одну и ту же массу (нулевую). В настоящее время последовательного способа нарушения суперсимметрии не существует. Впрочем, в последнее время этот вопрос потерял свою остроту, так как в физике частиц на первое место выдвинулась идея суперструн: релятивистских одномерных объектов, обладающих суперсимметрией. Таким образом, концепция супергравитации даже не успев вполне развиться, была "опережена" своим собственным порождением - моделью суперструн. В этой модели, так же как и в предшествующих, идеи симметрии продолжают играть очень важную роль. Однако, пока все развитие концепции суперструн, равно как и других объединительных моделей, происходит "внутри" самой себя и не дает каких-либо реальных результатов, которые можно было бы сравнить с опытом. Поэтому мы считаем обсуждение этих моделей преждевременным. Единственное, что хотелось бы подчеркнуть: идеи симметрии являются и в данном случае руководящими, как в переходе к этим моделям, так и в их собственном развитии. Такова в общих чертах история реализации теоретико-группового подхода в физике элементарных частиц.

**ПРИСУТСТВУЕМ ЛИ МЫ ПРИ КРИЗИСЕ БАЗИСНОЙ ПРОГРАММЫ
ПАРАДИГМЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ?**

История физики, рассматриваемая с птичьего полета, есть история смены парадигм.

Сколько их было, зависит от деталей определения термина "парадигма", я склонен отождествить этот термин с введенным исторически намного раньше Вернадским термином "формальная реальность". В этом смысле выбор парадигм фиксирует язык некоторой области науки - систему терминов или понятий, в которой эта область описывается. В этом смысле парадигма есть более общая и менее жесткая система, чем теория.

Скажем, исторически первая продуктивная теоретическая система физики - классическая механика - есть парадигма, а небесная механика - теория, обладающая предсказующей силой. Надо сделать оговорку: фиксация языка и грамматики позволяет все же доказывать некоторые утверждения. В этом легко убедиться, обратившись к книге В.Арнольда "Математические методы классической механики".

С точки зрения математики разница между сформировавшейся парадигмой и теорией есть различие между категорической системой аксиом и некатегорической: так аксиомы геометрии, предложенные Гильбертом, категоричны, а аксиомы теории групп некатегоричны.

В истории физики можно насчитать тогда три "больших парадигмы".

1. Классическая механика.
2. Классическая теория поля.
3. Квантовая теория поля.(QFT)

Историческо-социологическое общественное мнение исследователей всегда было склонно онтологизировать парадигмы, но дальнейшее развитие всегда показывало, что на самом деле речь шла о феноменологических структурах.

Вряд ли можно поэтому сомневаться, что QFT также есть некоторая феноменологическая структура. Социум "High Energy Physicists" уже занят попытками проникнуть на следующий этап

иерархии парадигм с помощью теории струн. Лично мне кажется, что этот проект так же, как теория мембран с произвольным числом внутренних измерений n , m , где m - размерность пространства, не достаточно безумен для того, чтобы быть верным.

Цель этой статьи - попытаться убедить в том, что теперешнее положение QFT указывает на то, что парадигма фактически уже применяется в той области, где на самом деле она уже неприменима.

Ситуация не необычна. От Максвелла до Пуанкаре включительно господствовало убеждение, что уравнение Максвелла описывает на феноменологическом уровне Ньютоновскую механику эфира, так же, как уравнение Навье-Стокса описывает феноменологию вязкой Ньютоновской жидкости. Это оказалось не так, но это выяснилось только после работы Эйнштейна 1905 г.

Более сложна была ситуация с квантовой теорией. С самого начала по крайней мере с 1905 года было ясно, что происходит революция: все же успехи "старой" квантовой теории были столь велики, что Борн, ясно понимавший, что речь идет о совершенно новой теории, несколько нелогично считал в начале 20-х годов, что орбиты электронов + постулат войдут в будущую теорию, а теория будет изменена наиболее существенно для взаимодействий высоких частот: например, для задачи двух электронов в атоме гелия, что должно было объяснить неудачи предпринятых в то время попыток рассчитать многоэлектронные атомы и дать способ расчета излучения. В результате же революции 24-27 года оказалось, что орбит вообще нет.

Я считаю возможным, что несмотря на все успехи QED (точность 10^{-8}) и стандартной модели электрослабых и сильных взаимодействий (так называемой $SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$ теории (или ST - стандартная теория) ситуация на самом деле такая же как в эпоху между Максвеллом и появлением частной теории относительности: то есть так же, как считали несомненным существование эфира, также и сейчас многое из того, что сообщество физиков считает "существующим" может исчезнуть. Моя аргументация будет изложена ниже.

1. Неабелевы калибровочные теории предсказывают, что при эволюции Вселенной должны происходить фазовые переходы, предсказанные впервые в работе Д.Киржница. Вообще говоря, при таких фазовых переходах должны образовываться домены, рассмотренные в работе Я.Зельдовича, И.Кобзарева, Л.Окуня и струны или монополии, на что было указано Кибблом. В теориях "Большого Синтеза" с простой группой обязаны возникать моно-

поли (Ю.Тюпкии, А.Фатесв, А.Шварц, М.Монастырский). Чтобы их было не слишком много, необходимы специальные ухищрения в космологии. В теории $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ монополей не возникает. Получается, что Природа как бы нарочно выбирает такие группы, где дислокаций нет, так же как у Лоренца и Пуанкаре она выбирала такую модель электрона, для которой, в отличие от модели Абрагама, было необнаружимо движение относительно эфира. Потом оказалось, что Природа не мучалась: механический эфир просто не существует. Не происходит ли того же с монополями и "Большим Синтезом"?

2. Теория поля, вообще говоря, предсказывает существование космологического члена в уравнениях Гильберта-Эйнштейна. Опять-таки наблюдательно он либо вообще не существует, либо так мал, что в рамках QFT этого понятия не удастся. Это, кажется, считается загадкой N 1 в QFT (Обзор ситуации можно найти в Лесбовских лекциях С.Вейнберга). Хорошего объяснения нет. Не означает ли все это, что вакуум гораздо более пуст, чем этого требует QFT?

3. ST предсказывает сильное нарушение CP. Спасти ST можно сравнительно дешевой ценой: надо ввести еще одну безмассовую частицу - аксион. Тем не менее, проще опять предположить, что вакуум просто более пуст, чем требует теория. Замечу, что хотя введение аксиона теоретически безвредно, оно также приводит к нетривиальным космологическим следствиям, которые пока не приводят к прямому противоречию с наблюдениями. У меня, однако, есть предчувствие, что скоро они выявятся.

Все это заставляет меня думать, что следующая революция парадигмы, которая заодно позволит включить в нее квантовую гравитацию, приведет к устранению из теории многих "реальностей" современной физики. Для этого потребуются какая-то новая математика.

Высказанные здесь надежды, по-видимому, совпадают с тем, что высказывал Л.Фаддеев в своей статье в "Природе" 1989 года. Людвиг Дмитриевич не использовал космологических аргументов - его точка зрения обоснована на историческо-математическом анализе развития теоретической физики, но его окончательный вывод, как мне представляется, совпадает с тем, к чему я пришел, анализируя ситуацию в космологии. Читателя не должно смущать то, что Л.Фаддеев не считает плодотворным использование термина "парадигма" при историко-научных рассуждениях.

Crise salutaire, приведший к созданию Частной теории относительности, имел долгую предысторию. Он начался с серии опытов, в которых искались v/c эффекты, и, как казалось, был разрешен Лоренцом, который, используя формулу Френеля-Физо, доказал в 1886 году, что эффектов v/c быть вообще не должно. Сейчас мы знаем, что формула Френеля-Физо есть v/c разложение формулы Пуанкаре для релятивистского сложения скоростей и не удивляемся.

Однако уже в 1887 году в опыте Майкельсона-Морли было показано, что с точностью до $1/20 - 1/40$ отсутствуют эффекты в порядке v^2/c^2 . В 1882 году Лоренц ввел гипотезу, названную позже гипотезой сокращения Лоренца-Фитцджеральда и доказал (для некоторого класса условий) теорему соответственных состояний. В 1895 году А.Пуанкаре высказал гипотезу о несобнаружимости движения относительно эфира во всех порядках по v/c . В 1900 году он же указал на связь местного времени Лоренца с синхронизацией часов светом.

В 1904 г. после знаменитой статьи Лоренца дело стремительно пошло к развязке. В 1905 году в статье Пуанкаре от 5 июня 1905 года был дан весь математический аппарат Частной теории относительности в объеме почти сравнимом с объемом, достигнутым после работ Минковского, и предъявлена модель электродинамики инвариантной относительно группы Лоренца. Пуанкаре однако продолжал считать сокращение Лоренца-Фитцджеральда абсолютным эффектом.

Развязка наступила, когда А.Эйнштейн в статье, поступившей 30 июня 1905 года в редакцию *Annalen der Physik* предложил выбросить эфир и динамику за борт, рассматривать формулы преобразований Лоренца как чисто кинематические, и считать все инерциальные системы равноправными. Так произошел переворот, который впоследствии сравнивали с Коперниковской революцией. Забавно, что при этом не возникло ни одной новой формулы. Впоследствии при разработке релятивистской гидродинамики, термодинамики была перестроена практически вся физика: развит тензорный аппарат и, что было конечно самым важным, понято, что дело идет не столько о кинематике, сколько о новой геометрии $3+1$ измерений (геометрии Минковского). Весь процесс перехода занял примерно 80 лет.

Развивая дальше *mon court historique*, я буду более краток. Переход теоремы Кирхгофа к квантовой механике занял период 1860-1930 гг. Наконец, от первых опытов Резерфорда до ST-теории прошло около 70 лет. Однако при приближении к развязке теория начала опережать опыт: массы W^\pm и Z^0 бозонов были

предсказаны и даже косвенно измерены. Известные опыты были в сущности демонстрационными экспериментами.

Общая теория относительности методологически намного опередила время. Как известно, Эйнштейн взял принцип эквивалентности в нерелятивистской области, известный со времени Галилея, перенес его в область $v \approx c$, скрестил его с результатами Частной теории относительности, и с помощью Gedanken experimenten пришел к Римановской геометрии.

Обычно считают, что сейчас мы располагаем хорошо отработанной методологией. Практически все что можно спросить (в рамках парадигмы, разумеется) у Природы спрашивается: будь то вопрос о массе фотона или о "диком" водороде или о магнитных моментах l и μ . Все измеряется с максимальной возможной точностью и границы отодвигаются до предела с совершенствованием техники прецизионных измерений.

В теории исследуются все, что можно выразить на существующем языке, от дискретного пространства-времени и до моделей типа Калузы-Клейна в числе измерений порядка n к 100 (где n 4-5).

Переход от парадигмы 1970 к следующей по очереди вряд ли будет инициирован опытом, скорее он будет инициирован внутренним кризисом ST-теории, который будет обнаружен какими-то мысленными экспериментами, которые, разумеется уже в математизированной форме сейчас все время делаются. Можно надеяться, что переход будет более быстрым, чем предыдущие.

Пока писалась эта статья, я узнал, что очень близкая оценка ситуации с выражением надежды на появление нового Эйнштейна была дана Виттенем.

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМАТИКИ ЭПР-ПАРАДОКСА

В 1983 г. в статье "Парадокс Эйнштейна-Подольского- Розена и принцип причинности"¹ я писал о том, что известный французский физик Оливье Коста де Борегар² охарактеризовал ЭПР-парадокс как "третий шторм двадцатого столетия", сравнивая поставленные в этом парадоксе проблемы с "двумя облачками" на ясном небосклоне классической физики, о которых в начале нашего века говорил выдающийся английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин)³. Как известно, этими "двумя облачками" были отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли и проблема излучения абсолютно черного тела, из которых родились теория относительности и квантовая механика. Де Борегар отмечал при этом, что данный "третий шторм", видимо, приведет к коренному изменению наших представлений о пространстве и времени, и это предсказание в известном смысле подтверждается современным состоянием обсуждения этих проблем. Но прежде чем перейти к его обсуждению, напомним кратко концептуальное содержание ЭПР-парадокса.

Как известно, А.Эйнштейн не признавал вероятностного характера квантовой механики, подчеркивая неоднократно детерминистический характер своего мировоззрения, и именно поэтому считал вероятностное описание микромира квантовой теорией "неполным". В качестве одного из аргументов в пользу справедливости своей точки зрения он и выдвинул соображения, которые легли в основу ЭПР-парадокса. Эти соображения развивались им, начиная с его выступления на 5-м Сольвеевском конгрессе⁴ в 1928 г., и претерпели некоторую эволюцию в течение его творческого пути, но в принципе не изменились до самого конца. Наибольшую известность в мировой научной литературе

1 *Вопр. философии.* 1983. N 3. С. 30-39.

2 *Costa de Beauregard O. The Third Storm of Twentieth Century: the Einstein Paradox. In The study of Time III. Proceedings of the Third Conference of the International Society for the Study of Time. N.Y., Heidelberg, Berlin, 1978. P. 53-70.*

3 *Philosophical Magazine.* 1902. Vol. 2, N 8.

4 *Эйнштейн А. Замечания о квантовой теории // Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М., 1966. Т. 3. С. 528-530.*

имеет его совместная статья с Борисом Подольским и Натаном Розеном "Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?"⁵. И хотя недавние исследования его переписки с Э.Шредингером обнаруживают, что сам Эйнштейн был не совсем доволен предложенным изложением и говорил, что статья, в общем, написана Б.Подольским, и позиция, с его точки зрения, нуждается в уточнении и совершенствовании⁶, все же соотношение квантовой механики и описания физической реальности, с нашей точки зрения, изложены в статье достаточно убедительно, а в уточнении нуждаются трактовки проблем индивидуальности физических систем и соотношений между ними, к чему мы еще вернемся.

Что же касается проблемы неполноты описания физической реальности квантовой теорией, то она сводится к противопоставлению двух основных положений этой теории. Волновая функция, дающая описание квантовых систем и их изменений со временем, выражаемая уравнением Шредингера, позволяет на основании знания современного состояния системы определять точные значения ее параметров в сколь угодно отдаленном будущем и прошлом. Это одна сторона проблемы.

С другой стороны, основным принципом квантовой механики является принцип или соотношение неопределенностей, согласно которому ряд важных параметров квантовых систем, в частности положение и импульс, энергия и время, не могут быть определены одновременно с достаточной точностью и вообще не могут существовать одновременно.

Основная идея парадокса направлена именно на доказательство несостоятельности принципа неопределенности. Если уравнение Шредингера точно описывает прошлые и будущие состояния известной нам квантовой системы и величины ее параметров, то мы можем, взяв систему из двух связанных (взаимодействующих между собой частиц), и узнав ее параметры определить (измерить) в какой-то будущий момент времени один из интересующих нас параметров у одной из рассматриваемых частиц, которые уже не взаимодействуют, вывести из уравнения Шредингера значение такого же параметра для другой частицы. Но с таким же успехом мы можем заинтересоваться другим, некоммутирующим с первым параметром, и, измерив его на первой частице, вывести его точное значение (из уравнения Шредингера) для второй частицы.

⁵ Эйнштейн А. Замечания о квантовой теории. С. 604-611.

⁶ Don Howard. Einstein on locality and separability // Study History Philosophy of Science. Vol. 16, 1985. N 3. P. 171-201.

Над второй частицей мы никаких измерений не производим, но измеряя на первой частице то один некоммутирующий параметр, то другой, мы определяем их значения для второй частицы, а тем самым подтверждаем реальность их существования.

Значит, утверждение принципа неопределенности о невозможности одновременного существования двух некоммутирующих параметров является неверным, либо неверным является описание квантовой механической реальности с помощью волновой функции и уравнения Шредингера.

Эти утверждения Эйнштейна и соавторов вызвали определенные возражения со стороны сторонников точки зрения Н.Бора и копенгагенской интерпретации. Мы не будем заострять внимание на этой дискуссии, поскольку имели возможность высказаться об этом в упомянутой выше нашей статье 1983 г.

Все дело в том, что парадокс имеет еще одну сторону. Если правильно и полно уравнение Шредингера, и правильным является принцип неопределенности, то необходимо признать в лучшем случае наличие в природе мгновенного дальнего действия или какой-то другой мгновенной связи (например в обратном направлении времени) между пространственно разобщенными материальными системами, что с точки зрения А.Эйнштейна, противоречит нашей научной интуиции и, в свою очередь, является парадоксальным.

Дальнейшее обсуждение проблемы

Философские и физические вопросы, поставленные А.Эйнштейном, вызвали интересные дискуссии, которые продолжаются и по сей день. Эти дискуссии ведутся в основном в двух направлениях. Хотя эти направления и связаны между собой, они не тождественны друг другу.

Первое направление касается проблемы полноты квантовой теории вообще и в частности уравнения Шредингера. Постепенно она эволюционировала в проблему "скрытых параметров". Корректное введение новых параметров в существующую квантовую теорию, которые пока нам неизвестны, или построение принципиально новой теории, учитывающей их существование, смогло бы, по мнению сторонников данной гипотезы, преодолеть недостатки существующей теории, в частности, ее "неполноту".

Все сторонники гипотезы "скрытых параметров" должны, видимо, признавать справедливость ЭПР-парадокса в том его аспекте, который связан с соотношением проблемы полноты кван-

товой механики и справедливостью соотношения неопределенностей. Хотя сам Эйнштейн и не может быть причислен к явным сторонникам этой гипотезы и не выступал с ее поддержкой (видимо, просто потому, что при его жизни она активно не обсуждалась), однако он правомерно может быть поставлен у истоков этого направления, поскольку именно он в ЭПР-парадоксе остро поставил проблему полноты квантовой теории.

Попытки предложения новых квантовых теорий, учитывающих "скрытые параметры" продолжают до сих пор. Правда, пока без особого успеха и не вызывают особого ажиотажа.

Зато другое направление, связанное с поисками и доказательствами существования мгновенной или какой-либо другой еще более экзотической связи между разделенными в пространстве ранее взаимодействовавшими между собой квантовыми системами, можно сказать, процветает. Предлагались различные догадки, правда, фактически без попыток раскрыть механизм подобного явления, зато под различными наименованиями, наталкивающими на основные идеи. Это и гипотезы о "квантовых потенциалах" и "неделимой целостности"⁷, о "несиловых взаимодействиях"⁸, о "связи на уровне Ψ - функции"⁹, об "особой форме связей в зависимости от условий"¹⁰, о "детерминации будущим" и об "опережающих взаимодействиях"¹¹.

Хотя направления исследований, связанных с решением обоих вышеупомянутых проблем, достаточно самостоятельны и специфичны, все же между ними существует глубокая и весьма тесная связь, которая стала особенно прозрачной после получивших широкую известность работ Дж.С.Белла, где сформулирована так называемая "теорема Белла" или "неравенство Белла".

В своей статье "О парадоксе Эйнштейна-Подольского-Розена"¹² Дж.С.Белл, отмечая, что этот парадокс был выдвинут в

⁷ *Bohm D., Hiley B.* On Intuitive Understanding of Nonlocality as Implied by Quantum Theory // *Quantum Mechanics*. Dordrecht; Boston, 1977. P. 207-225.

⁸ *Фок В.А.* Замечания к творческой автобиографии А.Эйнштейна // УФН. 1956. Т. 59, вып. 1. С. 107-118; *Haas R.* Subject, Objekt and Measurement // *The Physicist's Conception of Nature*. Dordrecht; Boston, 1973. P. 691-696.

⁹ *Фейнман, Лейтон Р., Сандс М.* Фейнмановский лекции по физике. М., 1978. Вып. 9.

¹⁰ *Александров А.Д.* О парадоксе Эйнштейна в квантовой механике // Докл АН СССР. 1952. Т. 84, N 2. С. 253-256

¹¹ *Beauregard O.C.* de. Op. cit.

¹² *Bell J.S.* On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox // *Physics*. 1964. Vol. 1, N 3. P. 195-200.

качестве аргумента, что квантовая механика не может быть полной теорией, что она "должна быть дополнена добавочными переменными", которые "должны были бы восстановить в этой теории причинность и локальность", ставит своей целью дать математическую формулировку этой идеи и показать, "что она несовместима со статистическими предсказаниями квантовой механики"¹³.

Идея Белла состоит в том, что требование локальности (запрет мгновенного дальнего действия и сверхсветовых скоростей) или нелокальности (допущение мгновенного дальнего действия и сверхсветовых скоростей взаимодействий) по отношению к теориям, описывающим явления микромира, вообще говоря не связано с решением вопроса о их "полноте" или "неполноте".

Если, согласно широко распространенному мнению, нашедшему выражение в известной теореме фон Неймана о "скрытых параметрах", любая теория со скрытыми параметрами должна быть локальной и сепарабельной, то есть должна быть связана с предположением о независимости друг от друга разделенных в пространстве и не взаимодействующих между собой материальных систем, то, согласно Беллу, это мнение не является обоснованным. Он предлагает частный вариант теории со "скрытыми параметрами", которая является нелокальной, т.е. в отношении второго аргумента ЭПР-парадокса ничем не отличается от обычной квантовой механики. Отличие теории Белла от последней состоит в том, что она дает иные статистические предсказания, относительно квантовомеханических явлений. И это различие может быть проверено в эксперименте. О.К. де Борегаар оценивает вариант Белла как "Новую Квантовую Механику", а применяемый в ней статистический формализм как новую "волноподобную" (wavelike) статистику¹⁴.

Пока эксперимент не дал решающего заключения в пользу либо "традиционной", либо "новой" квантовой механики, хотя, по мнению большинства исследователей, больше свидетельств в пользу всетаки "традиционной" механики. О.К. де Борегаар, оценивая ситуацию, считает, что "новая" и "более полная" квантовая теория не только не снимает ЭПР-парадокса, но даже приводит к более резкой его постановке. "На 5-м Сольвевском конгрессе в 1927 году Эйнштейн обнаружил парадокс, который коренится в самой сущности новой квантовой механики и который сегодня,

¹³ Bell J.S. On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. P. 195.

¹⁴ Beauregard O.C. de. Op. cit. P. 54-55.

если хорошенько подумать, поистине проявляется как "Парадокс Новой Квантовой Механики"¹⁵.

Дело в том, что идеи Белла дали толчок развитию дискуссий в направлении теоретического рассмотрения и экспериментального обоснования возможности установления реальной физической связи между событиями, происходящими в областях пространства-времени, разделенных пространственно-подобными интервалами, что рассматривалось А.Эйнштейном, как не укладывающееся в рамки нашей научной интуиции. Было предложено несколько различных экспериментальных схем, общая основная идея которых сводится к проверке, окажет ли воздействие на одну из двух ранее взаимодействовавших, а теперь разделенных квантовых систем, какое-либо влияние на другую.

Припомним идею эксперимента ЭПР-парадокса. Квантовая система, состоящая из двух взаимосвязанных частиц, - функция которой известна распадается на две квантовые системы (каждая по одной частице), которые разделяются в пространстве и уже не взаимодействуют друг с другом. Над одной из систем (частицей) производится измерение, выявляющее один из ее параметров (в частности один из некоммутирующих параметров, например, координаты) и тем самым экспериментально устанавливается его значение. На основании уже известной-функции объединенной системы и этого измерения вычисляется значение такого же параметра у другой частицы ранее входившей в общую систему, а теперь удаленную на некоторое расстояние и не взаимодействующую с первой.

Поскольку мы свободны в выборе измеряемых параметров, мы можем выбрать для измерения другой параметр (скажем, тоже некоммутирующий, например, импульс), и точно таким же образом определить этот параметр для второй (удаленной) системы. Таким образом, обладание системы тем или иным некоммутирующим параметром зависит от нашего выбора, но для возможности такого выбора, необходимо, чтобы система обладала ими одновременно, что противоречит принципу неопределенностей.

А.Эйнштейн следующим образом оценивал существующее обстоятельство дел: "Аппарат квантовой теории таков, что - функция одной подсистемы некоторой полной системы, состоящей из двух подсистем, изменяется в зависимости от характера (полного) измерения, производимого над второй подсистемой. Так происходит даже в том случае, если обе подсистемы к тому

¹⁵ *Beauregard O.C. de. Op. cit. P. 55.*

времени, когда производится измерение, оказываются разделенными в пространстве. Если бы Ψ -функция давала полное описание реального состояния, то это бы означало, что измерение, производимое над второй подсистемой, оказывает влияние на реальное состояние первой подсистемы. Это соответствовало бы существованию какой-то непосредственной связи между двумя пространственно разделенными объектами. Однако этот случай также отвергается интуицией. Таким образом, и в этом случае приходит к выводу, что описание состояния с помощью Ψ -функции следует считать неполным¹⁶.

Предлагаемые сейчас эксперименты как раз и имеют своей целью доказать, что подобная "непосредственная связь" существует.

Как мы отмечали выше, теоретическая схема у всех этих экспериментов одинакова. Она повторяет схему ЭПР-эксперимента, однако испытываемые процессы являются разными.

Это эксперименты В.Эренберга и Р.Е.Сайди, рассматривающие поведение заряженных частиц при наличии и отсутствии электромагнитного поля¹⁷. Их идея была подвергнута тщательному рассмотрению в серии статей Я.Ааронова и Д.Бома¹⁸. Был проведен еще ряд экспериментов, показавших, что классические представления об отделимости различных материальных систем и о запрете дальнего действия в квантовой физике вроде бы не действуют¹⁹. Как отмечают Б.И.Спасский и А.В.Московский, эти эксперименты "демонстрируют присущие квантовым объектам черты специфической целостности и рассматриваемые классически, могут породить иллюзию своеобразного "действия на расстоянии" дифрагирующая на двух щелях частица как бы "знает" о состоянии сразу двух щелей, поле действует там, где его нет в эффекте Ааронова-Бома и т.д.... дилемма "близкодействие - дальнее действие" теряет в квантовой физике свой ясный смысл. Более соответствует сути дела термин "нелокальность", который можно рассматривать как "квантовый аналог" понятия дальнего действия"²⁰.

16 *Эйнштейн А.* Вводные замечания об основных понятиях // *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. Т. 3. С. 625.

17 *Ehrenberg W.E., Study R.E.* Proc // *Phys. Co. Ser. B.* 1949. Vol. 62. P. 8.

18 *Aharonov J., Bohm D.* // *Phys. Rev.* 1959. Vol. 115. P. 485; 1961. Vol. 123. P. 1511; 1963. Vol. 130. P. 1625.

19 *Спасский Б.И., Московский А.В.* О нелокальности в квантовой физике // *УФН.* 1984. Т. 142, вып. 4. С. 599-617.

20 Там же. С. 613.

Ряд новых работ по рассмотрению гипотезы скрытых параметров и обсуждению проблем "квантовой целостности" был стимулирован, как мы уже отмечали, идеями Д.И.Белла. Были предложены эксперименты по проверке оптических явлений, поведению - квантов, предметом которых являлась корреляция квантовых явлений²¹.

Хотя, как мы уже отмечали, все предлагаемые новые эксперименты в принципе сохраняют теоретическую схему эксперимента ЭПР, современная трактовка, идущая от Д.А.Уилера, предлагает некоторые, во многом новые идеи и опирается на идею Н.Бора о структуре квантовых явлений.

Сепарабельность и локальность

Однако до этого необходимо отметить, что обсуждение ЭПР-парадокса, полемика вокруг него и анализ его концептуального содержания привели к осознанию и формулировке двух пар новых методологических принципов, содержание которых весьма активно обсуждается в современной литературе и которые значительно упрощают обсуждение проблемы. Это принципы "сепарабельности - несепарабельности" и "локальности - нелокальности".

Принцип сепарабельности сводится к утверждению о том, что реальные физические системы, отделенные друг от друга, обладают каждая своим собственным внутренним состоянием, которое не зависит от чего-то внешнего. "Характерным для этих физических объектов является, далее, то, что они мыслятся распределенными некоторым образом в пространственно-временном континууме. Существенным для этого распределения вводимых в физику объектов является требование существования вещей в некоторый определенный момент времени, независимо друг от друга, поскольку они "находятся в различных частях пространства". Без признания такой независимости существования ("бытия как такового") пространственно отдаленных друг от друга объектов, которое берет начало от обыденного мышления, было бы невозможно физическое мышление в привычном для нас смысле. Без такого чистого обособления было бы неясно также,

²¹ Гриб А.А. Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // УФН. 1984. Т. 142, вып. 4. С. 619-634.

как могли формулироваться и проверяться физические законы²³.

Соответственно, принцип несепарабельности означает, видимо, взаимную несамостоятельность двух или более пространственно разделенных физических систем, что говорит о принадлежности их к некоей целостной системе или о наличии между ними какой-то связи, физическое содержание и значение которой пока нам неизвестно.

Другая пара принципов, применяемых для описания и оценки характера протекания квантовых явлений, именуется принципами локальности и нелокальности. Грубо говоря, локальность соответствует принципу близкодействия, то есть положению о том, что воздействие одной физической системы на другую могло передаваться лишь через промежуточную среду и с конечными скоростями, не превышающими скорости света в пустоте (хотя последнее условие и не обязательно), то есть могут существовать любые скорости, кроме бесконечных.

Принцип же нелокальности, осуществляет в современной физике принцип дальнодействия, то есть любое событие оказывает воздействие сразу на всю Вселенную и получает сразу же ответную реакцию от всех остальных систем. Вот как оценивал ситуацию с принципом локальности (сам он этого термина не использовал) А.Эйнштейн: "для относительной независимости пространственно отдаленных объектов (А и В) характерна следующая идея: внешнее влияние А не имеет никакого непосредственного влияния на В; Это известно как "принцип близкодействия", который последовательно применяется только в теории поля. Полное упразднение этого основного положения сделало бы невозможной идею о существовании (квази-) замкнутых систем и, вместе с тем, установление эмпирически проверяемых законов в привычном для нас смысле"²⁴.

Мы помним, что ЭПР-парадокс привел к выводу, что если считать описание квантово-механической реальности с помощью уравнения Шредингера полным и одновременно признавать справедливость принципа неопределенности, то тогда необходимо признать и существование явлений дальнодействия что, по мнению А.Эйнштейна, несовместимо с нашей научной интуицией. Современные исследования (теоретические и экспериментальные) по этой проблематике направлены как раз на то,

23 *Эйнштейн А. Квантовая механика и действительность // Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 3. С. 613-614.*

24 *Эйнштейн А. Квантовая механика и действительности // Там же. Т. 3. С. 614.*

чтобы доказать, что квантовые процессы характеризуются как несепарабельностью, так и нелокальностью. На это направлены эксперименты по проверке эффекта Ааронова и Боба, теоремы или неравенства Белла. В подавляющем большинстве случаев эксперименты подтвердили предсказания квантовой теории.

Вообще говоря, различие между сепарабельностью-несепарабельностью и локальностью-нелокальностью довольно условно. Несепарабельность говорит о самом факте неразрывной связи взаимно отдаленных систем и оставляет в тени вопрос о том, с помощью каких механизмов или процессов осуществляется эта взаимная связь. Локальность же имеет прежде всего в виду сам механизм связи (дальнодействие-близкодействие). Например, классическая физика нелокальна и, следовательно, несепарабельна, хотя это и не осознается четко, ибо если есть мгновенное дальнодействие, то все в мире связано в единое целое, хотя опять же в открытую об этом не говорится. Специальная теория относительности локальна и сепарабельна и т.д.

Запаздывающий или отсроченный выбор

В последнее время одним из центральных вопросов в этих дискуссиях является вопрос об экспериментах с так называемым отсроченным или запаздывающим выбором (delayed choice experiment). Переходя к их обсуждению, полезно, на мой взгляд, рассмотреть эволюцию экспериментов по проверке ЭПР-парадокса, начиная с того времени, когда в статье трех авторов предлагалась следующая теоретическая схема. Имеется исходная система, состоящая из двух частиц (в простейшем случае). Состояние этой двухчастичной системы известно и описывается уравнением Шредингера. Затем эта система распадается на две (частицы), и предполагается, что каждая из систем является полностью сепаратной (то есть они прекращают взаимодействие) и каждая из частиц описывается своим уравнением. Но кроме того, остается старое уравнение, которое описывает их совместно. Затем над одной из двух разделенных пространственно-подобным интервалом систем производится измерение. в результате которого мы получаем знание о присущей ей в этот момент величине одной из ее квантовых характеристик, скажем, коммутирующих переменных (например, координат или импульса). Затем, исходя из полученного знания величины измеренной переменной, и начального волнового уравнения, для системы, состоящей из двух частиц, мы получаем значение такой же переменной, ха-

рактизирующей вторую сепаратно-отделенную от первой, над которой проведено измерение. Таким образом, не затрагивая вторую частицу и не взаимодействуя с ней, мы можем получить знание отдельных ее параметров, которое выводится из знания характеристик первой частицы, и общего для обеих частиц, уравнения, описывающего прежнее состояние объединенной двухчастичной системы.

Поскольку выбор измеряемых величин определяется нами, мы можем измерять любую из некоммутирующих величин и определять ее значение для другой. Отсюда вытекает, что вторая частица одновременно должна обладать обеими некоммутирующими величинами, скажем, и положением (координатами), и импульсом, вопреки принципу неопределенности Гейзенберга. В этом и усматривался, как уже отмечалось, парадоксальный характер квантовой механики и ее неполнота.

Итак, сначала имеется исходная двухчастичная система, состояние которой известно, и которая затем распадается на две сепаратных системы, которые между собой уже не взаимодействуют. Затем измеряется некоторая характеристика одной из сепаратных систем и по этому результату измерения и уравнения для двухчастичной системы выводится знание об аналогичной характеристике другой системы. С точки зрения логики, никакого парадокса здесь нет. Есть только противоречие принципу или соотношению неопределенностей.

Для большей ясности напомним макроскопический пример, предложенный О.С.де Борегаром. Из Калькутты в Лондон и Токио одновременно отправляются два самолета, в каждом из которых летят курьеры, везущие по ящику, куда втайне от них либо положен, либо не положен шар. В Лондоне и Токио ящики вскрывают и сразу же узнают, что было во втором ящике. Скажем, если в Токио находят этот шар, то сразу же узнают, что в Лондоне шара нет. Здесь тоже никакого парадокса пока нет, если курьерам известна заранее схема опыта. Открыв ящик в Токио и убедившись, что шара в нем нет, курьер сразу же узнает, что шар находится в Лондоне. Но если схема опыта курьеру неизвестна, то он никаких сведений об обстоятельстве дел в Лондоне не получит и не будет в состоянии вообще сделать какие-то выводы. Нам представляется, что знание схемы опыта, позволяющее сделать вывод о состоянии дел в другой точке пространства в макроскопическом опыте, равнозначно знанию уравнения Шредингера для объединенной системы в опыте микроскопическом, что является необходимым условием для вывода о значении перемен-

ной, характеризующей вторую частицу, без какого-либо измерения ее характеристик.

Согласно Эйнштейну, все это свидетельствовало либо о неполноте квантового описания действительности, либо о наличии таких сил, которые мгновенно связывали разделенные в пространстве ранее взаимодействовавшие системы. По поводу их характера выдвигались различные предположения, о чем мы упоминали выше. Однако прежде всего нужно было удостовериться в самом наличии такой связи между этими системами.

С обычной точки зрения, для этого необходимо было обеспечить исходное состояние - наличие системы из двух взаимодействующих систем, описываемых уравнением Шредингера и разделяющихся на две производных не взаимодействующих системы. Затем, производя измерение над одной системой, нужно было бы установить, реагирует ли как-нибудь на это измерение сепаратная от нее вторая система.

С обычной точки зрения, частицы получают все свои характеристики в момент распада исходной системы и несут их с собой в течение всего дальнейшего пути, если они ни с чем не взаимодействуют. Конечно, такая характеристика, как положение и время будет изменяться с течением времени, подчиняясь уравнению Шредингера, но другие, такие как импульс и энергия будут постоянными.

Таким образом, свои характеристики частица получает в момент своего рождения из объединенной квантовой системы.

Напомним также, что одним из основных возражений Бора и его сторонников на ЭПР-парадокс, было утверждение, что квантовые явления или феномены не являются таковыми до тех пор, пока их никто не наблюдает, и становятся квантовыми феноменами лишь после того, как над ними произведено измерение. Так, в ЭПР-парадоксе мы измеряем положение частицы А (точнее не "измеряем", а "придаем" положение) и это сразу же оказывает влияние на частицу В, придавая ей сразу же (мгновенно) определенное положение, которое выводится из уравнения Шредингера.

Все это не очень-то осознавалось в предыдущих дискуссиях, а в современной литературе получило наименование "отложенного" или "запаздывающего выбора". Это обстоятельство дел хорошо иллюстрируется О.К. де Борегаром: "Новая квантовая механика характеризуется тем, что в квантовой аналогии случая с шаром и двумя коробками жребий бросается не в С, а позднее

там и тогда, где и когда делается измерение L и/или T ²⁵. По его мнению, это свидетельствует в пользу представления о том, что существует "теледикция" и "телеакция", но также и о возможности обратного распространения во времени материальных взаимодействий.

Интерпретации Уилера

Гораздо более "экзотические" выводы и предположения делают другие исследователи, в которых, пожалуй, наиболее видное место занимают идеи известного американского физика Джона Арчибальда Уилера.

Комментируя эксперименты с запаздывающим или отложенным выбором, Уилер отмечает, что они вступают в конфликт с представлением о существовании вселенной "во вне" ("out - there") независимо от любых актов наблюдения²⁶, то есть с позицией, которую отстаивал А.Эйнштейн, на что Н.Бор, возражая ему, подчеркивал, что мы здесь сталкиваемся с неизбежным новым свойством природы, которое нужно не отвергать, как Эйнштейн, а приветствовать, поскольку оно расширяет возможности нашего познания. В стремлении прояснить свою точку зрения на решение этого вопроса Бор выдвинул термин "феномен". В современном квантовом языке значение этого термина определяется следующим образом: "Ни один элементарный феномен не является феноменом до тех пор, пока он не зарегистрирован (воспринят наблюдением)"²⁷. По мнению Уилера неверно говорить о "пути фотона" в экспериментах с расщепителями лучей и с прохождением через две щели. Неверно также приписывать осязаемость (материальность) фотону на всем его пути от входа в измерительную установку, до поглощения его детектором. "В широком смысле мы обнаруживаем, что природа на квантовом уровне не есть машина, которая идет своим неумолимым путем. Вместо ответа, мы получаем зависимость от того, какой вопрос мы поставили, какой эксперимент мы проводим, какие регистрирующие устройства мы выбрали"²⁸.

25 *Beaugregard O.C. de. Op. cit. P. 57.*

26 *Wheeler D.A. Law without Law, in D.A.Wheeler and W.H.Zurek ed-rs // Quantum Theory and Measurement. Princeton; New Jersey, 1983; Wheeler D.A. The "past" and the "dilated choice double-slit experiment" // Mathematical Foundation of Quantum Theory. N. Y., 1978.*

27 *Ibid. P. 184.*

28 *Ibid. P. 185.*

Поставив вопрос о том, чем отличается точка зрения Н.Бора от точки зрения Дж.Беркли в его "esse est percipi", Уилер отвечает на него следующим образом. По его мнению, различие состоит в том, что Бор имеет дело с индивидуальными квантовыми процессами, Беркли же, подобно всем нам, в обыденном опыте, с множеством квантовых процессов. Он иллюстрирует это аналогией с восприятием импрессионистских картин, когда при близком рассмотрении мы видим лишь совокупность различным образом окрашенных точек, которая при рассмотрении издалека, дает вполне ясную определенную картину. Конечно, эта аналогия не может рассматриваться, как сколько-нибудь убедительная.

Возникает вопрос, может быть имеется какой-то скрытый механизм, который управляет этими вероятностными процессами (скрытые параметры) и их исходом)? Все попытки ввести рассмотрение до сих пор оканчивались неудачей. Не подходят для объяснения исходов квантовых процессов и ссылки на "волю Аллаха" и "судьбу". По мнению Уилера, можно придти к пониманию, рассматривая процесс измерения как акт творения, то есть убеждения в том, что квантовый феномен возникает в результате вторжения наблюдателя в микромир.

Д.А.Уилер рассматривает поразительный пример, который, по его мнению, хорошо освещает проблему.

"Среди знаков, которые должны подтверждать, что "квантовый феномен" является элементарным актом творения, наиболее поразительным является его неосвязаемость. Во время эксперимента с двумя щелями и отложенным или запаздывающим выбором, мы не имеем права говорить о том, что делает фотон на своем длинном пути от его вхождения в измерительную установку до его регистрации. До акта регистрации феномен, который должен осуществиться, еще не феномен. Мы могли бы вмешаться в любой точке вдоль его пути с различными измерительными устройствами, но тогда безотносительно к тому, является ли это устройство новым, или прежним, мы вынуждены были бы признать то, что случилось, является новым феноменом"²⁹.

Из всех свойств "акта творения" или элементарного квантового явления, наиболее возбуждающим (удивительным) являются те, которые наблюдаются в эксперименте с запаздывающим выбором. Они простираются назад в прошлое в явном противоречии с нормальным порядком времени. Дистанция путешествия расщепленного луча в лаборатории может быть тридцать метров,

²⁹ Wheeler. D.A. The "past" and the "delayed choice double-slit experiment". P. 189.

а время - десятые и сотые доли микросекунды. Однако, отмечает Уилер, расстояния могут быть в миллиарды световых лет, а время в миллиарды лет. Так, наблюдающая установка "здесь и теперь", согласно своим показаниям в последние минуты, устанавливает, какой путь прошел фотон, что имеет непоправимую последовательность для того, чтобы кто-то имел право сказать о фотоне, что было с ним задолго до того, как во вселенной возникла жизнь.

Так, известны два астрономических объекта (0957+561 А,В), которые рассматривались как два различных квазизвездных объекта или "квазара", потому что они отделены друг от друга шестью секундами дуги. Сейчас многими исследователями они рассматриваются как два различных образа одного квазара. Основанием для такой трактовки послужило предположение, что примерно на четверти пути от нас до квазара находится галактика, которая пересекает путь световых лучей, оказывая на них возмущающее влияние, и играющая роль гравитационной линзы. Часть лучей от квазара, прошедшая прямо до нас без каких-нибудь препятствий, дает одно изображение, а другая, попавшая в эту галактику, дающую эффект линзы, отклоняется и тоже приходит к нам, но уже в другую точку, и дает второе изображение.

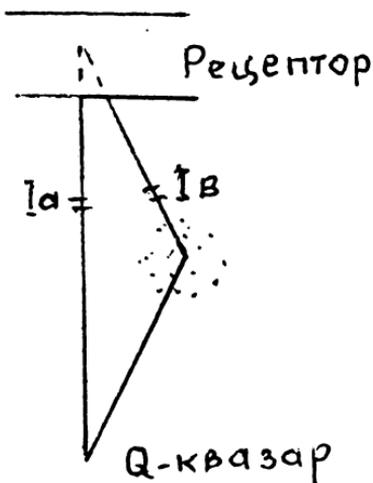


Рис. из статьи Д.А.Уилера

Мы можем поставить эксперимент, в котором будем наблюдать эти лучи по отдельности, либо их интерференцию. Таким образом, мы сейчас решаем, по какому пути проходили фотоны, через космическую линзу, или минуя ее, напрямую. Но сам процесс их прохождения произошел 50 000 лет тому назад. "Это и есть смысл, в котором мы, свободно говоря, решаем, что должен сделать фотон после того, как он это уже сделал. На самом же деле неверно говорить о "пути" фотона. Для правильного рассуждения мы повторим еще раз, что не имеет смысла говорить о феномене до тех пор, пока он не завершится необратимым актом усиления: "ни один элементарный феномен не является элементарным феноменом до тех пор, пока он не стал зарегистрированным (наблюденным) феноменом"³⁰. Эти представления вызывают, однако, лишь один из возможных языков описания квантовых явлений.

Если же использовать другой язык, отмечает Д.А.Уилер, то в случае квантового измерения мы имеем дело с "актом творения" (creation). Он достиг настоящего из миллиардов лет в прошлом. Ошибочно думать, продолжает он, - что прошлое "уже существует" во всех деталях. "Прошлое" есть теория. Прошлое не имеет существования за исключением того, что существует в настоящем. Принимая решение о том, какие вопросы наше квантовое регистрирующее оборудование доставит в настоящем, мы имеем неоспоримый выбор, в котором мы имеем право сказать что-либо относительно прошлого.

То, что мы называем реальностью, состоит из небольшого числа определенным образом расставленных "железных" столбов наблюдения, промежутки между которыми заполняются "конструкциями из папье-маше", выработанными воображением и теорией. Образно говоря, пространство-время в доквантовых представлениях является великой летописью на пергаменте.

Этот лист, этот континуум, этот носитель всего, что есть, было и будет, имеет определенную структуру со своими искривлениями, волнами и пульсацией, и на этой великой странице каждое событие подобно приклеенной к листу песчинке, имеет свое определенное место.

Квантовая теория провела далеко идущие модификации в этой застывшей картине. То, что мы имеем право говорить о прошлом пространстве-времени и о событиях прошлого, зависит от выбора, какие измерения нужно осуществить в ближайшем прошлом и сейчас. Феномены, призванные в бытие

³⁰ Wheeler D.A. The "past" and the "delayed choice" double-slit experiment" P. 192.

этим решениями, простираются в обратном направлении времени до самых ранних дней Вселенной. Регистрирующее оборудование, действующее здесь и теперь, принимает неоспоримое участие в осуществлении того, что должно случиться. Полезное при повседневных обстоятельствах утверждение, что мир существует вне и независимо от нас, не может более поддерживаться. Существует некий удивительный смысл, в котором это и есть "соучаствующая Вселенная".

Поставив вопрос, построена ли Вселенная из элементарных актов наблюдения - творения, Уилер отвечает на него утвердительно, несмотря на явную энергетическую и масштабную диспропорцию.

Дальнейшие рассуждения приводят американского физика к вопросу "не лучше ли рассматривать Вселенную как "самовозбуждаемый контур (круговорот) "self-excited circuit")... Начиная с Большого взрыва, Вселенная расширяется и охлаждается. После вечностей динамического развития она дает начало "наблюдательству". Акты наблюдений - соучастий посредством механизма - эксперимента по (запаздывающему) отложенному выбору в свою очередь придают осязаемую "реальность" Вселенной не только сейчас, но и обратно к ее началу. Говорить о Вселенной, как о самовозбуждаемом круговороте означает соучаствующую Вселенную"³¹.

В связи с таким пониманием структуры Вселенной как результата экспериментов по отложенному (запаздывающему) выбору, изменяется, по Уилеру, и задача физики. "Мы уже больше не удовлетворяемся проникновением только в частицы, или поле сил, или геометрию или даже пространство и время. Сегодня мы требуем от физики понимания самого существования"³².

Концепция Д.А.Уилера хороша на наш взгляд тем, что она доводит до логического конца определенный вариант решения ЭПР-парадокса, а именно тот, который приводит к утверждению о существовании каких-то таинственных сил, мгновенно связывающих разделенные в пространстве события.

Следуя копенгагенской интерпретации, согласно которой любое квантовое явление, феномен лишь тогда становится феноменом, когда оно воспринимается и осознается наблюдателем, Уилер расширяет ее и распространяет на всю Вселенную, причем не только в пространстве, но и во времени, вплоть до "начала" ее в Большом взрыве. Такая трактовка, несмотря на всю ее оригина-

31 Wheeler D.A. The "past" and the "delayed choice double-slit experiment". P. 194.

32 Ibid. P. 210.

нальность и экзотичность, явно не укладывается, как говорил А.Эйнштейн, в рамки "нашей научной интуиции".

Так и хочется сказать, что "этого не может быть, потому что этого не может быть никогда". Конечно, это не очень-то убедительный аргумент, и поэтому следует, видимо, внимательно проследить за тем, какие возражения можно выдвинуть против правдоподобия таких представлений.

Одним из них является несовместимость масштабов - наблюдение за микропроцессами и микрособытиями в наше время и сверхглобальное по своим энергетическим характеристикам событие за миллиарды лет до наших дней. По мнению Уилера, не нужно пугаться подобных диспропорций. Ведь мы знаем, "что температура раскаленной болванки есть результат хаотического движения миллиардов микрочастиц, а форма слона системы микроскопических черт ДНК"³³.

То же можно сказать и о воздействии наблюдателя и процесса наблюдения на события отдаленного прошлого. Если эксперименты по запаздывающему выбору свидетельствуют о возможности воздействия на события неотдаленного прошлого, то почему не признать возможность воздействия из современности на события весьма отдаленного прошлого. Правда, здесь опять диспропорция между множеством различных экспериментов над явлениями микромира и одной единственной Вселенной, существующей, как мы достаточно хорошо знаем, задолго до осуществления подобных экспериментов. Причем эксперименты осуществляются в различных начальных условиях и их влияние носило бы невообразимый хаос и в настоящее и в прошлые события, чего мы не наблюдаем, несмотря на статистический характер в конечном счете известных нам явлений и законов.

³³ *Wheeler D.A. 'The "past" and the "delayed choice double-slit experiment" P. 196.*

ДЕТЕРМИНИЗМ, КРИТЕРИИ ТОЖДЕСТВА, ПРОБЛЕМА ОБЪЕКТИВНОЙ
РЕАЛЬНОСТИ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Принято считать, что настойчивые попытки ввести в квантовую физику "скрытые параметры", продолжающиеся до сегодняшнего дня вопреки убедительным, казалось бы, опровержениям, порождены ностальгией по детерминизму лапласовского типа. Если бы все дело сводилось к реанимации в науке конца XX века идеалов науки XVIII века, то подобная настойчивость, проявляемая вновь и вновь и притом определенным сообществом, а не одиночками-чудаками, действительно выглядела бы странно¹.

На самом деле, как показывает анализ проблемы, логико-методологические основания поиска "скрытых параметров" не сводятся к защите лапласовского детерминизма. Специфика законов квантовой физики затронула самые фундаментальные принципы методологии научного познания. Важнейшей логико-методологической предпосылкой всякой научной теории выступает понятие тождественности объектов. Формулировка закона теории как устойчивой, необходимой, повторяющейся связи состояний (свойств и т.п.), логически предполагает возможность устанавливать тождественность или нетождественность исходных состояний, внешних условий, воздействий на объект, конечных состояний.

Представляется логичным в качестве методологической основы исследования законов принять следующий критерий тождественности (нетождественности) объектов (состояний, условий, воздействий): объекты тождественны, если их поведение в одинаковых условиях под влиянием одинаковых воздействий одинаково. (Подстановкой в эту формулировку соответствующих фундаментальных понятий можно получить критерий тождественности состояний, условий, воздействий. Например, воздействия являются тождественными, если они переводят одинаковые объекты в одинаковых условиях в одинаковые конечные состояния). Чтобы избежать логических кругов, необходимо иметь в виду не

¹ См.: Ахизер А.И., Половин Р.В. Почему невозможно ввести в квантовую механику скрытые параметры? // УФН. 1972. Т. 107, вып. 2. С. 464.

один и тот же процесс, а различные связанные между собой процессы. Например, воздействия, приготовляющие одинаковые исходные состояния группы объектов, другие воздействия, позволяющие калибровать внешние условия, независимо калибруется одинаковость воздействий на объект. Собственно, именно так проводится разносторонняя калибровка экспериментальной установки, прежде чем она будет использована для исследования поведения познаваемых объектов.

Парадоксы квантовой теории проявляются по меньшей мере двояко. Во-первых, как парадоксы корпускулярно-волнового дуализма - в форме логической несовместимости проявления волновых и корпускулярных свойств. Во-вторых, как парадоксы детерминизма - и не только лапласовского, но общего принципа детерминизма, базирующегося на общем понятии тождественности - нетождественности. В квантовой физике два одинаковых объекта, находящиеся в одинаковых начальных состояниях и подвергающиеся в одинаковых условиях одинаковым воздействиям, переходят в неодинаковые конечные состояния, т.е. ведут себя неодинаково. Копенгагенская интерпретация - в ее минимальном варианте - преодолевает оба типа парадоксов, вводя принципиальные методологические ограничения².

Чтобы избежать логических парадоксов корпускулярно-волнового дуализма, необходимо, согласно минимальной копенгагенской интерпретации, отказаться от попыток описать процесс движения квантового объекта до фактического наблюдения или в промежутке между наблюдениями. "Вместо того, чтобы дать модель для изображения реальных пространственно-временных событий, она дает распределения вероятности для возможных измерений" - писал о квантовой механике в ее копенгагенской интерпретации А.Эйнштейн³. Отказ от описания теоретическими средствами реальности вне наблюдения А.Эйнштейн считал принципиально неудовлетворительным⁴.

2 Расширение минимальной копенгагенской интерпретации осуществлялось Н.Бором, В.Гейзенбергом и другими путем введения ряда несогласованных между собой предположений, призванных объяснить необходимость принятия методологических ограничений. Сюда относятся идеи неконтролируемого возмущения объекта прибором, макроскопичности детектора как системы из многих частиц, трактовка квантовомеханического состояния как информации наблюдателя ("записной книжки"), ссылки на устарелость материалистических представлений о реальности и детерминизме, необычность самого способа существования квантовых объектов и т.п.

3 Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 4. С. 237.

4 Там же. С. 296.

В своей знаменитой статье А.Эйнштейн, Б.Подольский и Н.Розен рассмотрели теоретическую модель, показывающую, как они считали, возможность вычислить значения параметров одной из частиц по измерениям, выполненным над другой частицей, и таким образом, описать реальность вне непосредственного наблюдения⁵. С точки зрения авторов, это означало, что квантовая теория не дает полного описания реальности, что есть "элементы реальности", не находящиеся, по крайней мере в течение некоторого временного интервала, отражения в теоретическом описании. Если есть "скрытые параметры", выявление которых позволяет решить проблему отражения в теории объективной реальности вне непосредственного наблюдения, то можно рассчитывать и на восстановление в своих правах классического понимания тождества и соответствующей ему концепции детерминизма, что также было предметом методологических забот А.Эйнштейна. Опираясь на положение о неполноте квантовомеханического описания реальности, Эйнштейн неоднократно высказывался в пользу следующего решения проблемы детерминизма: "...Квантовая механика описывает ансамбль систем, но не отдельные системы. В этом смысле описание отдельной системы с помощью Ψ -функции является неполным; Ψ -функция не описывает реальное состояние такой системы"⁶. Парадокс с критериями тождества разрешается тем, что квантовая механика, согласно ансамблевой интерпретации, предсказывает одинаковые статистические распределения для одинаковых ансамблей, находящихся в одинаковых условиях, но состоящих из частиц с неодинаковыми значениями некоторых "скрытых параметров", которые не отражаются при ансамблевом описании.

Между тем в минимальной копенгагенской интерпретации считается, что квантовая теория дает полное описание каждой отдельной частицы и потому поиски "скрытых параметров", которые позволили бы дополнить вероятностные предсказания однозначными, бесперспективны⁷. В равной мере бесперспективны попытки описать "скрытые параметры" как реальность вне непосредственного наблюдения.

⁵ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 3. С. 604-611.

⁶ Там же. С. 621.

⁷ В процессе развития квантовой физики неоднократно открывались новые, ранее неизвестные параметры, которые вводились в теорию и позволяли давать более полное описание реальности. Так, были введены спин, странность, "очарование" и другие характеристики частиц. Однако на эти характеристики распространяется парадоксальная специфика квантового мира, о чем будет сказано дальше.

Как видим, проблема "скрытых параметров", как она поставлена в квантовой теории, отнюдь не сводится к сохранению детерминизма лапласовского типа. Она затрагивает, во-первых, фундаментальную методологическую проблему отражения в теоретических построениях объективной реальности не только в момент наблюдения. Во-вторых, она затрагивает принцип тождества, выступающий методологической предпосылкой любой формы научного детерминизма.

На какие же аргументы могла опираться минимальная копенгагенская интерпретация, предлагавшая преодолеть парадоксы физической теории за счет принятия парадоксов философско-методологических - отказаться от описания реальности в е наблюдении, оказаться от поиска "скрытых параметров", согласившись с парадоксальной формой детерминизма? Как мы уже отмечали, аргументы были различные, во многом несамосогласованные. Вероятно, решающий аргумент привел оппонент копенгагенской интерпретации, А.Эйнштейн: "Надо признать, что новая теоретическая концепция обязана своим происхождением не взлету фантазии, а непреодолимой силе опытных фактов. Все попытки представить частицу и волновые свойства... непосредственно пространственно-временной моделью до сих пор кончались неудачно"⁸.

Проблема отражения объективной реальности и проблема детерминизма обозначились уже в разработанной М.Борном статистической интерпретации волновой функции, с помощью которой теория отображает состояние объекта. Как выяснилось уже в самом начале развития математического аппарата квантовой теории, волновая функция, позволяющая с помощью уравнения Шредингера дать теоретическое описание изменения состояния объекта с течением времени, отнюдь не является математическим пространственно-временным изображением физической волны. В 1926 г. М.Борн предложил статистическую интерпретацию волновой функции: квадрат абсолютного значения (модуля) волновой функции определяет вероятность осуществления соответствующего квантового перехода (скачка).

Интерпретация М.Борна получила широкое признание, и через 28 лет ему была присуждена Нобелевская премия. По словам М.Борна, "Труды, за которые мне выпала честь быть удостоенным Нобелевской премии за 1954 год, содержат не открытие но-

⁸ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 4. С. 237.

вого явления природы, а обоснование нового способа мышления о явлениях природы"⁹.

Однако интерпретация М. Борна, достаточная для применения аппарата квантовой теории, была недостаточна для понимания его физической сущности. По оценке М. Борна, его статистическая интерпретация функции "была только первым шагом в нашем понимании взаимоотношений частицы-волны в атомной физике. Наиболее важным вкладом в уяснение этой идеи были соотношения неопределенностей Гейзенберга и принцип дополненности Бора. Хотя подавляющее большинство физиков присоединилось к этому толкованию, некоторые его отклонили, причем среди них были такие крупнейшие ученые, как Планк, Эйнштейн, де Бройль и Шредингер, которые были лидерами на первом этапе развития квантовой теории"¹⁰.

Статистическую интерпретацию волновой функции, данную М. Борном, можно назвать минимальной интерпретацией квантовой теории. Фактически, ее признали все, хотя не все согласились с тем, что такой вариант теории является единственно возможным.

Следующим шагом явилась минимальная копенгагенская интерпретация. К минимальной статистической интерпретации М. Борна она добавила два принципиальных методологических ограничения: квантовая теория описывает реальность в момент наблюдения с помощью той или иной экспериментальной установки и не описывает процессы до наблюдения или в промежутке между наблюдениями (относительность к средствам наблюдения); волновая функция дает максимально полное описание результатов измерений с индивидуальным объектом; вероятностный характер этого описания не может быть изменен введением дополнительных ("скрытых") параметров. Вот с этими методологическими ограничениями и не согласились многие физики, в том числе А. Эйнштейн. В ходе острых дискуссий, продолжающихся уже более 60 лет, спектр обсуждаемых вариантов интерпретации значительно расширился, что не уменьшило, а только увеличило разногласия.

За или против каждого из вариантов могут быть приведены (и неоднократно приводились в ходе затянувшихся дискуссий) аргументы логического, философского или прагматического характера (например, что на основе де-бройлевской концепции "волны-пилота" не удалось построить альтернативный вариант

⁹ Борн М. Физика в жизни моего поколения. М., 1963. С. 301.

¹⁰ Борн М. Размышления и воспоминания физика. М., 1977. С. 17.

теории). За последние четверть века все чаще стали обращаться к возможностям экспериментальной проверки того или иного варианта интерпретации с надеждой положить конец хождениям по кругу повторяющихся аргументов и контраргументов логического или общепhilosophического характера и прояснить возможность (или невозможность) практического осуществления тех или иных альтернативных подходов к построению квантовой теории¹¹.

Мысль о сопоставлении конкурирующих между собой интерпретаций с экспериментальными данными представляется нам методологически важной, открывающей новую страницу в длительных дискуссиях об интерпретации квантовой теории. Хотя экспериментальная проверка интерпретации (как и теории) не дает общих однозначных выводов, она позволяет исключить некоторые конкретные варианты как не соответствующие фактам, позволяет дать оценку степени правдоподобия тех или иных вариантов.

Еще до того, как Д.Белл выступил с идеей экспериментальной проверки существования "скрытых параметров" (1964 г.), эта идея была высказана и осуществлена Р.Винтером¹². Пусть имеются неизвестные нам параметры, некоторые из которых (или их соотношение) определяют, какое из ядер взятого радиоактивного изотопа распадется в данный момент времени, а какое останется. Если выждать 30-40 периодов полураспада, то сама природа отберет и предоставит нам ядра с такими значениями "скрытых параметров", которые предопределили их "долголетие". В таком случае мы вправе ожидать, что оставшиеся ядра будут иметь иной период полураспада, чем ядра первоначального образца, где были смешаны "долгожители" и "однодневки". Используя короткоживущий изотоп, возникающий при работе ядерных реакторов, Р.Винтер показал, что первоначальный образец и образец, полученный из "долгожителей", проживших 30-40 периодов полураспада, имеют совершенно одинаковые периоды полураспада. Из этого он сделал вывод, что "скрытые параметры", предопределяющие время жизни каждого отдельного ядра, не существуют.

На этом примере мы можем видеть как достоинства, так и ограниченность экспериментальной проверки интерпретаций теории. Эксперимент Р.Винтера однозначно исключает гипотезу о

¹¹ См.: Грив А.А. Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // УФН. 1984. Т. 142, вып. 4. С. 619.

¹² Winter R. Large - Time Exponential Decay and "Hidden Variables" // Phys. Rev. 1962. Vol. 126, N 3. P. 1152.

"скрытых параметрах" в радиоактивном распаде при том условии, что определенные значения "скрытых параметров" считаются длительно сохраняющимися (например, 50 периодов полураспада или даже больше). Он не опровергает гипотезу, что "скрытые параметры", определяющие момент распада, есть, но они быстро меняются. И еще один момент хотелось бы отметить. Р.Винтер мог бы и не делать свой эксперимент, требующий филигранной техники работы с короткоживущими изотопами. Если бы ожидаемая сортировка была возможна, то ее давно обнаружили бы при анализе горных пород, сформировавшихся на разных этапах геологической истории Земли: одноименные изотопы, полученные из разных горных пород, имели бы неодинаковый период полураспада. Поскольку это не так, ответ на вопрос Р.Винтера был достоверно известен до его эксперимента.

Вся совокупность наших знаний о специфике квантового мира делает маловероятным допущение, что "скрытые параметры", хотя бы и быстро меняющиеся, однозначно определяют момент распада того или иного ядра. Но этот вывод лишь вероятен, а не однозначно достоверен. В последнее время двумя группами экспериментаторов в США и ФРГ был выполнен эксперимент с "запаздывающим выбором" (по идее Дж.Уилера), имеющий прямое отношение к проверке копенгагенской интерпретации. Излучение лазера в экспериментальной установке разделялось на два направления, а затем с помощью зеркал сводилось вместе. При этом возникала картина интерференции (проявление волновых свойств фотонов). Излучение было столь малой интенсивности, что в каждый момент времени в установке находилось не более одного фотона. На одном из путей фотон проходит через кристалл, который при включении электрического поля отклоняет его на детектор. В этом случае установка регистрирует фотон как частицу, оказавшуюся на одном из двух путей (проявление корпускулярных свойств). Специфика описываемого эксперимента в том, что время переключения кристалла меньше, чем время движения фотона в экспериментальной установке (путь в 4,3 м). В связи с этим при попытке изобразить процесс движения света в экспериментальной установке пространственно-временной моделью возникает парадоксальная ситуация. Как именно должен вести себя фотон на входе - пойти по одному из путей или сразу по двум, если переключение состояния отклоняющего кристалла (а этим изменяется смысл эксперимента - будут ли выявляться корпускулярные или волновые свойства) произойдет позже, когда фотон будет, образно говоря,

на середине пути? (В этом как раз состоит идея "запаздывающего выбора")¹³.

Вопреки ухищрениям экспериментаторов, эксперименты подтвердили количественные предсказания квантовой теории (этого и следовало ожидать, принимая во внимание подтверждение квантовой теории колоссальным массивом фактов). Одновременно эксперимент свидетельствует в пользу копенгагенской интерпретации - надо рассчитывать вероятности получить те или иные результаты при измерении определенного типа и не предпринимать попытки построить образную картину того, как ведет себя фотон перед измерением, ибо картина получится физически абсурдной. (Например, фотон пошел по одному из путей, чтобы зарегистрироваться как частица, но кристалл не переключается, и фотон, "узнав" об этом, возвращается в прошлое время, расщепляется на две составляющие и идет по двум путям, чтобы создать картину интерференции). В связи с этим ряд авторов, в том числе А.Шимони, употребляет понятие объективной неопределенности: "Более естественной представляется интерпретация, согласно которой объективное состояние фотона в интерферометре оставляет многие его свойства неопределенными"¹⁴.

Однако, и в том случае, когда мы принимаем принцип ограничения - не говорить о свойствах перед измерением, и в том случае, когда мы соглашаемся о них говорить, но приписываем им объективную неопределенность, возникает еще один "неудобный" вопрос: "Как и когда неопределенные свойства становятся определенными?"¹⁵. В связи с копенгагенской интерпретацией широко распространено мнение, что определенность возникает в момент наблюдения (либо в момент срабатывания детектора, либо - по мнению других - в момент психического восприятия показания прибора).

Заметим однако, что описанный эксперимент не исключает однозначно концепцию "скрытых параметров" (понимаемых в данном случае, как пространственно-временное изображение движения фотона: перед заключительной его регистрацией на выходе). По крайней мере в качественной форме эксперимент может быть интерпретирован известной моделью "волны-пилота" де Бройля. Например, физический волновой процесс распространяется по двум путям и создает на выходе чередующиеся зоны максимумов и минимумов физического поля (которое непосред-

13 Популярное описание этого и некоторых других экспериментов см. в статье А.Шимони "Голубинство квантового мира" // В мире науки. 1988. N 3. С. 22.

14 Там же. С. 28.

15 Там же.

ственно не регистрируется). Частица (только она в данной постановке опыта может быть зарегистрирована прибором) движется всегда по одному из путей, следуя по максимумам поля. Если кристалл переключается и отклоняет частицу - она попадает в детектор и регистрируется им. Если нет - частица проходит дальше и попадает на фотопластинке на один из максимумов поля. Много таких частиц нарисуют картину интерференции. Никаких физических абсурдов применительно к данному эксперименту эта интерпретация не рождает - за исключением того, впрочем существенного обстоятельства, что построить последовательную квантовую теорию с подтверждаемыми количественными прогнозами на основе концепции "волны-пилота" пока не удалось. Ряд экспериментаторов предпринимает усилия с целью обнаружить в опыте де-Бройлевскую волну как самостоятельную реальность (своего рода "скрытый параметр")¹⁶. Конечно, не отдельный эксперимент, хотя бы и очень изощренный, а весь комплекс экспериментальных, логических, методологических, практических свидетельств может выявлять большую или меньшую вероятность правдоподобия той или иной интерпретации. Тем не менее привлечение экспериментальных свидетельств существенно проясняет многие спорные моменты интерпретации квантовой теории. Не менее интересны эксперименты, выполнявшиеся по идее А.Эйнштейна, Б.Подольского и Н.Розена, А.Шимони и сотрудниками, а затем - по более изощренной методике - А.Аспектом и сотрудниками во Франции. В экспериментах использовались атомы, излучающие при возбуждении по два фотона, летящих в противоположные стороны. При этом из законов сохранения следует, что плоскости их поляризации совпадают. На путях фотонов помещаются поляризационные фильтры, например, под углом 45° к плоскости поляризации фотонов. В этом случае вероятность прохождения каждого из фотонов через свой фильтр равна $1/2$.

В эксперименте, где можно было регистрировать каждый индивидуальный случай, четко выявляется парадоксальное свойство квантовой статистики: если один из фотонов проходит через фильтр, то второй - хотя первоначально определяемая вероятность его прохождения равна $1/2$, обязательно пройдет через свой фильтр. Если первый будет поглощен - второй тоже будет поглощен. (Для теории это не удивительно - это означает, что за-

¹⁶ См., в частности: *Selleri F. Foundations of Physics. 1982. Vol. 12, N 11. P. 1087.* См. также: *Тяпкин А.А.* К развитию статистической интерпретации квантовой механики на основе совместного координатно-импульсного представления // *Философские вопросы квантовой физики. М., 1970.*

кон сохранения момента вращения выполняется в каждом индивидуальном случае). Но это поразительно при попытке представить себе, каким образом два фотона, уже разошедшиеся на макроскопическое расстояние, согласуют между собой свое взаимодействие с поляризационным фильтром. Ситуацию не удастся пережить и в эксперименте Аспекта, где направление плоскости пропускания фильтров изменяется, когда фотоны уже летят к ним. Эксперимент такого типа является реальным физическим аналогом знаменитого мысленного эксперимента Эйнштейна, Подольского и Розена. Эйнштейн, Подольский и Розен считали, что корреляция в поведении двух разошедшихся на макроскопическое расстояние частиц свидетельствует в пользу существования "скрытых параметров", имеющих определенные значения независимо от их регистрации. В опыте Аспекта и сотрудников это предположение исключается (по ряду причин все же не с полной однозначностью) на основе применения теоремы Дж.Белла - эксперимент не подтвердил предсказаний, вытекающих из теоремы Белла при допущении довольно широко понимаемых "скрытых параметров".

Тем не менее из самых общих методологических установок напрашивается предположение, что должен существовать некий, загадочный пока, физический механизм согласования на расстоянии поведения двух фотонов. Ряд исследователей обозначает его термином "нелокальность": без передачи физического сигнала каждая из частиц способна реагировать на событие, происходящее на расстоянии с другой частицей, связанной с ней совместным происхождением или предшествующим взаимодействием. Если угодно - это тоже "скрытый параметр", но только специфически квантовый, не соответствующий - как это видно из экспериментов - тем критериям, которым отвечают величины классической физики.

Итак, проблема "скрытых параметров", как это видно и из ее логического анализа и из анализа специально поставленных экспериментов, проявляется в трех основных аспектах: 1) как проблема детерминизма - в связи с вероятностным характером квантовых законов; 2) как проблема объективной реальности - в связи с загадочной неопределенностью свойств частицы в промежутке между измерениями; 3) как проблема нелокальности - в связи с необъяснимой пока согласованностью изменений, происходящих с разделенными и невзаимодействующими частями когерентной системы (парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена).

Продвижение вперед в разрешении этих загадок невозможно без уточнения философско-методологической интерпретации те-

ории. Собственно говоря, это утверждение лучше обернуть: философско-методологическая интерпретация и должна высветить ответ на указанные три проблемы. Копенгагенская интерпретация, в своем узком варианте сводящаяся к запретам искать ответы на эти три вопроса, не отвечает такому условию. (Хотя она полезна как рабочий вариант, предотвращающий неправильное понимание физического смысла уравнений квантовой теории, например, с позиций картины мира классической физики).

Может ли какая-либо из известных интерпретаций квантовой теории рассматриваться как философско-методологическая, т.е. как интерпретация, конструктивно разрешающая категориальные проблемы - объективной реальности, детерминизма, нелокального взаимодействия? (Естественно, она должна согласовываться с экспериментальными данными). На наш взгляд, этим условиям отвечает интерпретация В.А.Фока (с некоторыми коррективами). Уточним ее содержание. В серии публикаций конца 50-х и 60-х годов В.А.Фок развил следующую систему представлений об интерпретации квантовой теории:

1. Волновая функция описывает "свойственные данной физической системе при данных условиях потенциальные возможности". Волновая функция "не зависит от заключительной стадии опыта и, тем самым, является объективной характеристикой состояния объекта непосредственно перед заключительной стадией"¹⁷.

2. Относительность к средствам наблюдения: "Переход от потенциально возможному к осуществившемуся, действительному, происходит на заключительной стадии опыта"¹⁸ при взаимодействии с классически описываемым регистрирующим прибором.

3. Для изучения свойств атомных объектов наиболее важной является такая постановка опыта, при которой можно различать в нем три стадии: "приготовление объекта, поведение объекта в фиксированных внешних условиях и собственно измерение"¹⁹.

Приготовление объекта представляет собой физический процесс, в результате которого объект приобретает состояние, характеризующееся данной волновой функцией. Оно позволяет при необходимости многократно получать объекты, находящиеся в тождественных состояниях. Поведение квантового объекта в фиксированных условиях - это плавное изменение его состояния с

17 Фок В.А. Квантовая физика и философские проблемы // Физическая наука и философия. М., 1973. С. 68.

18 Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Философские проблемы современного естествознания. М., 1959. С. 222-223.

19 Там же. С. 223.

течением времени под влиянием физического воздействия или внутренних процессов, описываемое уравнением Шредингера. Другими словами, это эволюция потенциальных возможностей с течением времени. Эта эволюция описывается теорией для каждого индивидуального объекта и притом даже в духе классического детерминизма.

Наконец, взаимодействие регистрационного типа представляет собой квантовый скачок, реализацию потенциальных возможностей в форме события, детерминируемую лишь вероятностным образом. Для проверки прогнозов, вытекающих из решения уравнения Шредингера, необходимо много раз повторить опыт, накопив статистические данные.

Теперь мы можем посмотреть, что дает интерпретация В.А.Фока для разрешения философско-методологических (категориальных) проблем.

Принцип тождества: объекты, приготовленные как тождественные (находящиеся в одном и том же квантовом состоянии) в фиксированных условиях ведут себя одинаково:

а) на средней стадии опыта, где они одинаково описываются одним и тем же уравнением Шредингера (эволюция потенциальных возможностей одинакова);

б) на заключительной стадии опыта, где они дают одинаковое статистическое распределение (т.е. с одними и теми же вероятностями осуществляют те или иные переходы). Правда, сами переходы различны.

Б. Проблема объективной реальности: в отличие от копенгагенской интерпретации в ее узком варианте интерпретация В.А.Фока может быть понята в том смысле, что теория разрешает говорить о реальности до акта наблюдения на языке объективно присущих частице потенциальных возможностей. Теория отражает эту реальность - с помощью уравнения Шредингера (или его аналогов). При этом надо только подчеркнуть, что потенциальные возможности отображают не какую-то чисто мысленную конструкцию, а специфический тип объективной реальности, участвующий в физических процессах.

Однако интерпретация В.А.Фока не вполне последовательна в разрешении проблемы отражения объективной реальности. С одной стороны - она разрешает говорить о реальности в промежутке между наблюдениями (на языке объективных потенциальных возможностей), с другой - провозглашает относительность к средствам наблюдения. А это - как и в обычной копенгагенской интерпретации - может быть понято, как невозможность отразить в теории реальность вне наблюдения. Как нам представля-

ется, интерпретация В.А.Фока может быть скорректирована так, чтобы снять эту несамосогласованность, сохранив специфику квантовомеханической реальности. Это возможно, если в центре внимания поставить не прибор (даже в его широком понимании, как естественного сочетания условий, в которые помещен микробъект), а тип физического процесса.

Описание реальности на языке процессов (событий) вошло в физику со специальной теорией относительности. Логично считать, что язык событий более адекватен и для квантовой механики даже в ее нерелятивистской форме²⁰.

Обратим в связи с этим внимание на пункт 3 в изложении интерпретации В.А.Фока. В средней стадии опыта изменение состояния объекта под влиянием физического воздействия происходит в форме не регистрируемой непосредственно приборами эволюции потенциальных возможностей. На заключительной стадии возможности реализуются в форме квантовых событий, регистрируемых приборами. Отличие второй стадии от третьей В.А.Фок определил тем, что на второй стадии описание производится на языке квантово-механических законов, а на третьей - на языке классической физики. Анализ показывает, что язык классической физики здесь не при чем (мы вернемся к этому чуть позже). Есть только то сходство с классической физикой на заключительной стадии опыта, что от языка потенциальных возможностей второй стадии переходят на язык действительных событий. Вот это различие двух стадий опыта и представляется логичным объяснить объективным различием физических процессов: процесс типа 1 - непосредственно не регистрируемая эволюция потенциальных возможностей; процесс типа 2 - скачкообразный квантовый переход (рождение частицы, распад частицы и т.п.) - реализация той или иной возможности, процесс регистрационного типа²¹.

При таком подходе пункт 2 в интерпретации В.А.Фока изменяется следующим образом:

2'. Квантовая теория построена на основе принципа относительности к типу взаимодействия. В квантовом мире имеют ме-

20 См. подробнее: Пахомов Б.Я. Становление современной физической картины мира. М., 1985. Гл. II, параграф 3; гл. III, параграф 3.

21 В свое время о двух типах процессов писал И.фон Нейман, систематизируя основы квантовой теории. Однако в его трактовке физическим был только процесс постепенной эволюции состояния, в то время как скачок он обозначивал как акт психического восприятия (процесс 1 в его обозначении). См.: Нейман И.фон. Математические основы квантовой механики. Гл. 6. М., 1964.

сто два типа изменения объекта - скрытая эволюция потенциальных возможностей и скачкообразная реализация одной из возможностей в форме квантового события²².

В таком случае пункт 3 должен относиться не только к опытам, но и к любым ситуациям применения теории, - и его формулировка требует соответствующей корректировки с учетом сказанного о двух типах изменения объекта.

Уникальными объектами, позволяющими реально осуществить разностороннюю экспериментальную проверку различных интерпретаций квантовой теории, выступают нейтральные К-мезоны. "Если бы К-мезонов не было, - отмечает Л.Б.Окунь, - их надо было бы специально выдумать, чтобы объяснять студентам основные принципы квантовой механики"²³.

Частицы, родившиеся в сильном взаимодействии как K^0 (странностью $S=1$) или как анти- K^0 ($S=-1$), могут распадаться в слабом взаимодействии (с нарушением странности) двумя существенно различными способами - на две частицы (комбинированная четность $CP=1$) или на 3 частицы ($CP=-1$). В первом случае частица получила обозначение K^0_1 , во втором - K^0_2 . Время жизни второй частицы в 500 с лишним раз больше, чем первой²⁴, ее масса тоже чуть больше.

Поведение K^0 -мезонов отображается с помощью волновых функций следующими выражениями, основанными на понятии квантово-механической суперпозиции:

$$(K^0) = C_1(K^0_1) + C_2(K^0_2) \quad (1)$$

$$(\bar{K}^0) = C_1(K^0_1) - C_2(K^0_2) \quad (2)$$

Здесь (K^0) , (K^0_1) и т.д. - символы волновых функций, C_1 и C_2 - числовые коэффициенты, определяющие вероятность соответствующих распадов.

Соответственно

$$(K^0_1) = C_1(K^0) + C_2(K^0) \quad (3)$$

²² Г.Рейхенбах рассматривал предположение о двух способах существования квантовых объектов - активном, когда их можно регистрировать приборами, и пассивном, когда они непосредственно не наблюдаемы (Рейхенбах Г. Направление времени. М., 1962).

²³ Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М., 1981. С. 83.

²⁴ Мы здесь отвлекемся от аномально долгоживущего мезона на 2 частицы, составляющего 0,2% случаев.

$$(K^0_2) = C_1(K^0) - C_2(K^0) \quad (4)$$

где (K^0) - символ волновой функции анти- K^0 -мезона, C_1 и C_2 - числовые коэффициенты, определяющие вероятность того, что K^0_1 или K^0_2 проявят себя в сильном взаимодействии как K^0 ($S=1$) или \bar{K}^0 ($S=-1$).

Физический смысл этих выражений (а вместе с тем - и понятия волновой функции) с достаточной конкретностью проявляется в разнообразных экспериментах.

1. Физический смысл волновой функции.

Достаточно очевидным образом выражения (1), (2) отображают потенциальные возможности K^0 -мезона по отношению к слабому взаимодействию, (3) и (4) по отношению к сильному взаимодействию, выявляющему значение странности. Числовые коэффициенты, возведенные в квадрат, характеризуют вероятность соответствующего перехода от возможности к действительности.

2. Роль классически описываемого прибора. Слабый распад K^0 -мезона вполне возможен в вакууме (собственно говоря, выражения (1) и (2) и относятся именно к вакууму). К тому же характеристики странности или CP -четности не относятся к классической физике. Следовательно, специфическая квантовая относительность - это не относительность к классически описываемому прибору и не относительность к макроскопическому прибору, а относительность к квантовому переходу, взаимодействию.

3. Относится ли волновая функция к каждой частице или к ансамблю частиц? Можно представить себе, что выражение (1) и аналогичные ему отражают такое положение вещей, когда в пучке K^0 -мезонов есть частицы, постоянно сохраняющие признаки K^0_1 , и другие частицы, постоянно сохраняющие признаки K^0_2 . При таком понимании выражение (1) представляет собой усредненную характеристику ансамбля частиц, оставляя скрытыми параметры каждой частицы. Но это не так.

Как уже сказано, K^0_2 имеет несколько большую массу, чем K^0_1 . По законам квантовой теории это означает, что длина его дебройлевской волны короче. Если суперпозиция двух состояний $C_1(K^0_1) + C_2(K^0_2)$ относится к одной частице, то возникает интерференция двух волн. Через определенное время члены суперпозиции окажутся в противофазе: $C_1(K^0_1) - C_2(K^0_2)$. А это есть волновая функция анти- K^0 -мезона. Если компоненты суперпозиции относятся не к одной частице, а к разным, интерференции не будет. Эксперимент показывает, что частицы, родившиеся как K^0 , через некоторое время вступают во взаимодействие как анти-

K^0 . Еще через некоторое время (т.е. чуть дальше по расстоянию) в пучке K^0 -мезонов появляются события, показывающие, что странность вновь стала $+1$, затем она еще раз становится равной -1 и т.д. Если интерференционные "биения" налицо (это как раз проявление волновых свойств), значит суперпозиция двух состояний присуща каждой частице²⁵.

4. "Потенциальные возможности" - мысленная конструкция или объективная реальность? Ответ на этот вопрос непосредственно связан и с вопросом, в состоянии ли квантовая теория описывать то, что происходит в промежутке между наблюдениями.

Ответ на вопрос содержится в предыдущем примере. Эволюция потенциальных возможностей есть реальный физический процесс, находящий свое выражение в изменении значения странности при соответствующем взаимодействии. Эволюция возможностей проявляется и по отношению к слабому взаимодействию: благодаря различию во времени жизни K^0_1 и K^0_2 , первый член суперпозиции убывает по величине гораздо быстрее. Через некоторое время практически остается одна компонента - K^0_2 , т.е. возможность распада на 3 частицы (не считая 0,2% так называемых аномальных распадов). При этом меняются потенциальные возможности и по отношению к сильному взаимодействию, ибо теперь возникают равные возможности проявить себя и как K^0 , и как анти- K^0 , если будет реализовано сильное взаимодействие.

5. Процессы типа 1 и типа 2. Рассмотрим их различие на примере прохождения K^0_2 через фильтр, хотя это можно сделать и на рассмотренных выше примерах.

Если поставить фильтр на достаточно большом (порядка метра) расстоянии от места рождения K -мезонов, то к фильтру, как уже сказано, подойдут практически K^0_2 -мезоны. По отношению к сильному взаимодействию они обладают одинаковыми потенциальными возможностями - проявить значение странности либо $+1$, либо -1 . Так это и произойдет, если тот или иной K -мезон столкнется с протоном вещества, перестав при этом существовать. Но некоторые частицы сумеют пройти сквозь слой вещества, не обнаружив следов сильного взаимодействия. Останется ли состояние этих частиц без изменения? Оказывается нет. У них существенно уменьшится компонента (K^0). А состояние

²⁵ Эти уникальные особенности икродчастиц были обстоятельно проанализированы М.А.Подгорецким и О.А.Хрустальевым в статье "Интерференционные явления в квантовых переходах" // УФН. 1963. Т. 81, вып. 2. С. 217.

(K^0), как мы уже знаем, есть суперпозиция (K^0_1) и (K^0_2). Таким образом, после выхода из фильтра вновь появятся распады на две частицы, которых практически не было перед фильтром, а в сильных взаимодействиях сразу за фильтром будет проявляться странность + 1 преимущественно.

Итак, частица, вступившая в сильное взаимодействие в фильтре, реализует свои потенциальные возможности, оставив регистрируемые следы этого события. Это процесс типа 2. Другие частицы, прошедшие фильтр без столкновения, изменяют свои потенциальные возможности по отношению к будущим своим взаимодействиям - как сильным, так и слабым. Это и есть процесс типа 1. Он не оставляет видимых следов - и потому не регистрируем. Но его реальность проявится в будущих событиях - в распадах или столкновениях, статистика которых это покажет. Потенциальные возможности скрытым образом меняются и под влиянием внутренних процессов типа 1, что мы уже видели на примере превращения с течением времени суперпозиции $C_1(K^0_1) + C_2(K^0_2)$ в состояние $C_1(K^0_1) - C_2(K^0_2)$ в вакууме.

6. Можно ли считать, что волновая функция описывает не саму реальность, а изменение информации наблюдателя? Сказанное выше о реальности изменения потенциальных возможностей однозначно определяет отрицательный ответ на этот вопрос.

7. В какой момент и как неопределенные свойства становятся определенными? Неопределенные свойства (отражаемые потенциальными возможностями) становятся определенными при осуществлении скачкообразного квантового перехода (события), т.е. при реализации процесса типа 2. Только этот процесс регистрируем и потому только он может быть использован для наблюдения. Но это не значит, что свойства объекта становятся определенными лишь в акте восприятия или лишь в случае применения сконструированных человеком приборов. Процессы регистрационного типа (типа 2) происходят и в естественной среде - это скачкообразные квантовые переходы (распады частиц, рождения частиц, столкновения и т.п.).

8. Как оценить в свете изложенного копенгагенскую интерпретацию (в ее узком варианте)? Копенгагенская интерпретация зафиксировала основные особенности квантового мира, отразившиеся в теории:

а) Неопределенность некоторых свойств объекта в соответствующих физических ситуациях. В нашем примере состояние с определенным значением странности (K^0) или (K^0) неопределенно в отношении СР-четности, т.е. способа распада и времени

жизни; состояние с определенным способом распада (K^0_1) или (K^0_2) неопределенно по значению странности.

Однако в отличие от копенгагенской интерпретации неопределенность имеет объективный характер и не порождена лишь отсутствием у нас информации.

б) Дополнительность свойств и соответствующих взаимодействий. Сильное взаимодействие выявляет значение странности, но исключает возможность определить СР-четность - т.е. выявить, был ли это (K^0_1) или (K^0_2); выявление СР-четности исключает возможность определить, был ли это К или анти- K^0 -мезон, т.е. определить странность.

Однако в отличие от копенгагенской интерпретации дополнительность создается не предполагаемым "неконтролируемым возмущением" со стороны прибора, а объективной неопределенностью соответствующих свойств и объективной несовместимостью различных процессов типа 2, реализующих соответствующие возможности.

в) Нельзя говорить об определенных значениях некоторых параметров, если не осуществилось взаимодействие, которое выявляет этот параметр (т.е. делает его определенным).

Однако дело не в самом по себе наблюдении, как думают сторонники копенгагенской интерпретации, а в осуществлении процессов типа 2, которые и делают эти свойства определенными.

9. Как разрешаются известные парадоксы квантовой механики? Рассмотрим два из них.

а) "Кошка Шредингера". Состояние ядра нестабильного изотопа характеризуется объективной неопределенностью. Потенциальные возможности его поведения можно выразить суперпозицией C_1 (расп.) + C_2 (не расп.). Состояние кошки вполне определено и не отражает неопределенность состояния ядра, тем более, что неопределенность непосредственно не наблюдается. В момент распада - а это процесс типа 2, процесс регистрационного типа, - срабатывает то устройство, которое и само может быть регистрирующим прибором, но которое, по фантазии Э.Шредингера, убивает кошку, а роль наблюдателя, который в какой-то момент обнаружит кошку живой, а в другой момент - уже мертвой, становится тривиальной.

б) Парадокс ЭПР. Анализ корреляций, проявляющихся при парном рождении К-мезонов, дает возможность проанализировать парадокс ЭПР и пролить дополнительный свет на проблему "скрытых параметров".

Допустим, что обстоятельства рождения пары К-мезонов таковы, что система из двух частиц имеет СР-четность, равную нулю. В таком случае возникает корреляция по отношению к распадным свойствам частиц: если одна из них распадается как K^0_1 (СР = +1), то вторая должна распасться как K^0_2 (СР = -1) и наоборот. На языке потенциальных возможностей, выражаемых волновыми функциями, состояние системы будет представлено суперпозицией

$$(K^0, K^0) = C_1(K^0_1)_1 (K^0_2)_2 + C_2(K^0_2)_1 (K^0_1)_2,$$

где $(K^0_1)_1$ или $(K^0_2)_1$ - характеристики возможностей первой частицы, а $(K^0_2)_2$ или $(K^0_1)_2$ - второй.

Заметим сразу же, что при реализации той или другой из потенциальных возможностей в данном случае нет речи о возмущающем влиянии прибора: регистрация следов происшедших распадов (пи-мезонов) не порождает сами эти распады и не предопределяет (а только регистрирует) способы распада. Способ распада детерминируется (по-видимому, неоднозначно) внутренними процессами.

Попробуем теперь применить к данной ситуации способ рассуждений, предложенный А.Эйнштейном, Б.Подольским и Н.Розеном. Пусть первая частица распалась по типу K^0_1 (на два пи-мезона). Это значит, что наше "измерение" выделило первый член суперпозиции, в котором второй частице предписан способ распада только как K^0_2 (три пи-мезона). Поскольку частицы успели разойтись на достаточное расстояние и поскольку физически абсурдно допущение, будто информация о способе распада первой частицы каким-то образом передается второй частице и предопределяет ее способ распада, остается признать, что вторая частица уже заранее была K^0_2 -мезоном (следовательно, и первая заранее была K^0_1 -мезоном). В таком случае запись состояния системы в форме суперпозиции имеет отношение к ансамблю пар, а не к каждой отдельной паре частиц. Следовательно, описание реальности с помощью волновых функций является неполным.

Истолкование физического смысла волновой функции как выражения потенциальных возможностей различных квантовых переходов сразу же выявляет существенную некорректность этого рассуждения Эйнштейна, Подольского и Розена. Обозначения K^0_1 или K^0_2 характеризует не параметры (скрытые или не скрытые) частицы самой по себе, а способ осуществления квантового события (перехода). Пока частица фактически не распалась (пока не произошло соответствующее событие), она не является ни

K^0_1 -мезоном, ни K^0_2 -мезоном. Например, она может столкнуться с протоном, проявив себя в сильном взаимодействии как анти- K^0 -мезон или как K^0 -мезон.

После того, как первая частица фактически распалась (произошло "измерение" ее CP-четности), для второй частицы соответствующего "измерения" не произошло, а только переопределились ее потенциальные возможности по отношению к распаду (если он фактически произойдет). Ее квантовое состояние выражено теперь волновой функцией $(K^0_2)_2$, если первая частица распалась как K^0_1 .

Поясняя подобного рода ситуации, В.А.Фок писал, что старая волновая функция просто зачеркивается, а последующие прогнозы определяются изменившимися потенциальными возможностями, выраженными новой волновой функцией.

Уточненная формулировка парадокса ЭПР может теперь выглядеть следующим образом: каков физический механизм внезапного изменения потенциальных возможностей второй частицы, если первая частица реализует в квантовом переходе одну из своих возможностей?

Формальный ответ на этот вопрос достаточно прост: в силу обстоятельств рождения пары частиц (т.е. приготовления состояния) вероятность появления несогласованных значений CP-четности равна нулю (мы отвлекаемся от незначительного по величине - 0,2% - нарушения закона сохранения CP-четности в распадах K^0 -мезонов). Следовательно, после фактической реализации определенного способа распада первой частицы способ распада второй частицы предопределяется практически однозначно. Однако, этот формально убедительный ответ не проясняет, как представляется, физическую сущность дела. Аналогичные загадки, как отмечалось выше, возникают и в опытах с парами летящих в противоположные стороны фотонов.

Итак, с известным основанием мы можем констатировать:

- 1) Парадокс ЭПР имеет место как физический феномен.
- 2) Вопреки мнению авторов парадокса, он не может служить логическим основанием для введения "скрытых параметров" в смысле классической физики (у второй частицы изменяются или выявляются не актуально присущие ей параметры, а только меняются потенциальные возможности проявить определенные значения параметров, если произойдет соответствующий квантовый переход).

Заметим, что состояние второй частицы задано теперь собственной функцией измеряемой величины, так что исход соответствующего квантового события - если оно произойдет - задан

уже однозначно. Каков же физический механизм скачкообразного изменения потенциальных возможностей второй частицы после осуществления квантового перехода первой?

Парадокс ЭПР вскрывает еще один, совершенно экзотический, аспект проблемы "скрытых параметров". Не доказывая существования "скрытых параметров", соответствующих представлениям классической физики, он, однако, свидетельствует (добавим для осторожности - по всей видимости) о существовании в мире квантовых процессов совершенно необычной формы детерминации и весьма специфического "скрытого параметра", обеспечивающего неклассический механизм физической ее реализации. Эту форму детерминации можно было бы обозначить как когерентную детерминацию парных корреляций, предполагая при этом, что тайна внезапного изменения потенциальных возможностей второй частицы после реализации первой частицей одной из возможностей заключена в феномене когерентности. Более глубокое проникновение в физическую сущность когерентности, видимо, задача ближайшего будущего. Накопление возможно большего количества экспериментальных данных о свойствах пар К-мезонов могло бы существенным образом содействовать прояснению проблемы ЭПР.

ТЕОРЕМА БЕЛЛА И РЕАЛИСТИЧЕСКИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Как свидетельствуют источники, теореме Белла даются самые различные оценки в спектре от нигилистических до восторженных. Например, американский философ Н.Картрайт в своем докладе на американо-советском коллоквиуме "Квантовая механика: Локальность, сепарабельность и полнота", состоявшемся в г.Истоне (штат Мэриленд, США) осенью 1988 г., высказалась о несомненно неравенств Белла следующим образом: "Что дают неравенства Белла для понимания причинности в квантовой механике? Я думаю, что очень мало, ибо характерные особенности связи (квантовых причин и следствий. - А.П.) давно уже хорошо известны, прежде всего, из двухщелевого эксперимента (хотя это и не отрицает их важность для различных аспектов квантового реализма)"¹. В свою очередь, другой американский исследователь А.Шимони считает, что благодаря этой теореме стало окончательно ясно, что будущие физические теории уже никогда не вернутся к концептуальным рамкам классической физики. "Физическое значение неравенств Белла, - пишет Шимони, - заключается, по-моему, в том, что они допускают почти решающую проверку картин мира, отличающихся от картины мира квантовой механики. Это, безусловно, не подразумевает, что квантовая механика, как она теперь формулируется, никогда не будет вытеснена или улучшена какой-то новой физической теорией. Но хотя лишь горсточка квантовомеханических предсказаний проверяется в корреляционных экспериментах, эта горсточка не должна недооцениваться, ибо она относится к наиболее чувствительным точкам столкновения картин мира. Подтверждение предсказаний квантовой механики в этих точках и неподтверждение в них того или другого неравенства Белла дают сильные основания для уверенной оценки будущих физических теорий: любая теория, которая сменит и улучшит квантовую ме-та-

¹ Cartwright. Quantum causes: The lesson of the Bell inequalities: Report on the Joint US-USSR colloquium "Quantum mechanics: Locality, separability, and completeness". Easton (Maryland, USA). Sept. 29-Oct. 1, 1988. P. 16. См. также: Cartwright. How the laws of physics lie. N.Y., 1983.

нику, сохранит неопределенность возможностей, фундаментальную роль случайности и связанность систем"².

Далее, с одной стороны, новозеландский исследователь Д.Мердок считает, что Дж.Белл показал, что "исключена возможность того, чтобы теория внутренних свойств (т.е. "скрытых свойств самих по себе" - А.П.) удовлетворяла условию локальности и, вместе с тем, воспроизводила хорошо подтвержденные предсказания квантовой механики: такая теория должна либо нарушать условие локальности, либо быть эмпирически неадекватной"³. Но, с другой стороны, один из авторов одной из теорий со скрытыми параметрами Дж.Баб писал в свое время, что "аргумент Белла - Вигнера исключает классическое представление квантовой статистики - на базе очевидно неприемлемой посылки о соответствии квантовых статистических состояний мерам их представления на пространстве вероятности. В частности, этот аргумент не имеет ничего общего с локальностью"⁴. По мнению Баба, результат Белла тривиален, а эксперименты по проверке его неравенства "не доказывают ничего интересного для теоретика".

Наконец, приведем еще одно сравнение, используя теперь также и одну из работ отечественных авторов. В.И.Аршинов оценивал значение вклада Белла тем, что он "придал ясную математическую формулировку условию локальности Эйнштейна и непосредственно сопоставил его с предсказаниями квантовой механики"⁵. А вот американский философ А.Файн считает, что в контексте сопоставления теоремы Белла и позиции Эйнштейна следует различать целых три неодинаковых условия локальности (подробнее речь пойдет о них чуть ниже). Поэтому, пишет Файн, "трудности, порожаемые теоремой Белла, отделены, по крайней мере, двумя гигантскими шагами от реализации идей Эйнштейна о локальности, или его понимания более полной (чем квантовая механика. - А.П.) теории"⁶.

Такие сопоставления можно продолжить. В общем разнообразии и динамике оценок значения теоремы Белла вполне есте-

2 *Shimony A. Contextual hidden variables theories and Bell's inequalities // Brit. j. for the philosophy of science. Aberdeen, 1984. Vol. 35, N 1. P. 35.*

3 *Murdoch D. Niels Bohr's philosophy of physics. Cambridge etc., 1987. P. 183.*

4 *Bub J. The interpretation of quantum mechanics. Dordrecht; Boston, 1974. P. 83.*

5 *Аршинов В.И. Проблема интерпретации квантовой механики и теорема Белла // Теоретическое и эмпирическое в современном научном познании. М., 1984. С. 228.*

6 *Fine A. The shaky game: Einstein realism a. the quantum theory. Chicago; L., 1988. P. 63.*

ственны, ибо дискуссии относительно нее идут уже 25 лет. В этих дискуссиях оказались "задействованы" различные теоретико-физические программы, разные методологические и мировоззренческие концепции, да и к тому же в их ходе был достигнут определенный исторический прогресс. Можно констатировать, что контекст обсуждения теоремы Белла очень широк. Речь идет и о проблемах соотношения теории и опыта, и о проблемах реализма (как на уровне конкретных физических моделей и программ, так и на философском - методологическом и мировоззренческом - уровне), и об оппозиции "реализм - инструментализм", и об анализе, уточнении и обновлении концептуальных оснований физики (например, анализ принципа локальности и введение в физический оборот такого относительно нового понятия, как сепарабельность), и о причинности и детерминизме, и о природе вероятности и квантовой статистики и, наконец, даже о новой - квантовой - логике.

Прежде чем перейти к изложению собственно темы статьи (соотношение теоремы Белла и реалистических интерпретаций квантовой теории), остановлюсь вкратце на том, что я считаю "историческими достижениями" в анализе проблематики, связанной с теоремой Белла.

Как известно, эта теорема принадлежит потоку доказательств, начатому еще Дж.фон Нейманом, о невозможности переформулировки квантовой механики в виде теории, допускающей скрытые параметры. Неравенства, выведенные Беллом, были призваны доказать, что в квантовую теорию невозможно "внедрить" так называемые локальные скрытые параметры. Дальнейшие исследования вывода неравенств Беллом, проведенные в том числе Дж.Джарретом, Д.Хауардом и А.Файном⁷, прояснили, что в этом выводе были использованы фактически два различных (а не одно, как первоначально считал сам Белл) условия локальности. А.Файн характеризует их следующим образом: 1) белловская локальность, или утверждение о том, что "результаты измерений определенных квантовомеханических наблюдаемых одной системы не подвержены непосредственному влиянию видов измерений, производимых непосредственно над второй системой, которая достаточно отделена от первой в пространстве"; 2) условие факторизуемости, или "кондициональной стохастической независимости", означающее, что "для каждой спаренной си-

⁷ См.: *Jarrett J.P.* On the physical significance of the locality conditions in the Bell arguments // *Nous*. 1984. Vol. 18. P. 569-589; *Howard D.* Einstein on locality and separability // *Studies in history a. philosophy of science*. 1985. Vol. 16, N 3. P. 171-201; *Fine J.* Op. cit.

стемы (или для каждой "скрытой переменной") в корреляционном эксперименте с разделенными частями вероятность пары результатов одновременных измерений может быть представлена произведением вероятностей отдельных результатов"⁸. Файн выделяет еще и третье условие локальности, или эйнштейновский принцип локальности, которое отличается от первого (белловского) условия тем, что в нем речь идет не о результатах измерения (т.е. не о "наблюдаемых"), а о "реальных физических состояниях"⁹.

Файн анализирует соотношение всех трех условий (или принципов) локальности, чтобы соотнести эйнштейновскую критику квантовой механики как неполной теории со значением теоремы Белла. Эйнштейн, полагает он, доказывал, что квантовая механика не удовлетворяет его условию локальности как независимости реального состояния одной системы от того, что проделывают с другой, пространственно отдаленной (и отделенной) системой. Квантовая механика неполна потому, что она не "вскрывает" эти "реальные физические состояния", которые должны определять реальные физические свойства, проявляющиеся в наблюдениях. Поскольку же квантовомеханические наблюдаемые не являются "реальными" свойствами, оказываются, таким образом, нереалистическими, нет причин беспокоиться по поводу того, могут они или не могут испытывать "нелокальные влияния". "Нелокальность", продолжает Файн, значима для Белла, а не для Эйнштейна. При этом белловское условие локальности является интуитивным, требует дальнейшей экспликации, может выполняться в различных теориях, а вот условие факторизуемости, без которого вывод неравенств Белла просто невозможен, нарушается в квантовой физике. Его нарушение связано (и это показывает не только Файн, но и многие другие авторы, в том числе и Дж.Баб) со спецификой квантовой вероятности. Дело в том, что квантовая теория использует дисперсные меры вероятности, которые невозможно свести к бездисперсным мерам классической статистики. Из-за этого невозможно определить классическим статистическим образом условные и совместные вероятности. "Неравенства Белла, - подводит один из итогов своего анализа Файн, - имеют место тогда и только тогда, когда вероятности

⁸ Fine A. Op. cit. P. 59.

⁹ Согласно эйнштейновскому принципу локальности, "реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отдаленной от нее системой" S_1 (Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М., 1967. Т. 4. С. 290).

(для наблюдаемых, упоминаемых в них) можно свести к средним по единому ансамблю¹⁰.

Новые уточнения в анализ теоремы Белла внесли Д.Хауард и Дж.Джаррет. Эти уточнения также появились в контексте сопоставления этой теоремы и эйнштейновской критики квантовой теории. Джаррет показал, что условие факторизуемости совместных вероятностей результатов одновременных измерений (или, в его терминологии, условие "сильной локальности") распадается на два независимых условия - условие "полноты" и условие "слабой локальности". "Слабая локальность" эквивалентна требованию релятивистской локальности, или принципу близкодействия (она может быть отождествлена также с первым белловским условием локальности), а условие "полноты" предполагает справедливость критерия Эйнштейна-Подольского-Розена (о том, что в полной физической теории каждый элемент физической реальности должен иметь отражение) и выражается в требовании взаимной независимости отделенных эйнштейновских "реальных физических состояний". Иными словами, условие факторизуемости совместных вероятностей результатов одновременных измерений эквивалентно конъюнкции принципа близкодействия и условия факторизуемости "скрытых состояний"¹¹.

В свою очередь Д.Хауард, назвав условие факторизуемости "скрытых состояний" условием "сепарабельности" (или разделимости), подчеркнул важность различения принципов локальности и сепарабельности: "...сепарабельность означает, что пространственно разделенные системы обладают отдельными реальными состояниями (это, по сути дела, есть выражение вышеприведенного условия локальности Эйнштейна. - А.П.), а локальность - что состояние системы может быть изменено только локальными эффектами, эффектами, распространяющимися с конечными, досветовыми скоростями. Между двумя этими принципами нет необходимой связи, хотя они и представлялись часто как одно и то же... Квантовая механика - это... несепарабельная локальная теория"¹². Таким образом, "сильная локальность" Джаррета есть следствие "сепарабельности" и "слабой локальности" (и сама вытекает из последних). А поскольку А.Файн показал, что "сильная локальность" есть необходимое и достаточное условие вывода (и выполнения) неравенств Белла, постольку отсюда следует, что "все теории со скрытыми параметрами, пред-

¹⁰ Fine A. Op. cit. P. 164.

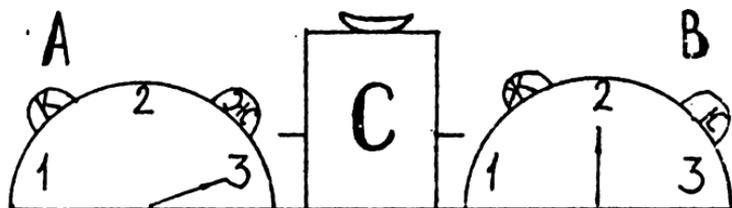
¹¹ См.: Jarret J. Op. cit.

¹² Howard D. Op. cit. P. 173.

сказания которых удовлетворяют неравенствам Белла, являются одновременно сепарабельными и локальными"¹³.

Прежде чем резюмировать выводы, вытекающие из анализа теоремы Белла, имеет смысл обратиться к упрощенной схеме экспериментов по проверке неравенств Белла, изобретенной американским физиком Н.Д.Мермином¹⁴.

Схема Мермина



На этой схеме изображен прибор, состоящий из трех, по предположению, несвязанных частей: детекторов А и В и источника частиц С. Каждый из детекторов имеет трехпозиционный (1, 2, 3) переключатель и две разноцветные лампочки К и Ж (обозначения позиций и цветов - условные, но легко понять, что в реальных экспериментах позиции отвечают трем направлениям в пространстве, а цвета - проекциям спинов частиц на эти направления). Источник С имеет сверху кнопку, нажатие которой приводит к излучению частиц (продуктов распада), характеристики которых регистрируются детекторами в виде зажигания лампочек. Эксперимент состоит из большой серии испытаний. В каждом испытании сначала случайным образом устанавливаются позиции переключателей детекторов, затем нажимается кнопка на источнике и затем регистрируются цвета загоревшихся лам-

¹³ Howard D. Op. cit. P. 196. ДДжаррет добавляет, правда, к "сильной локальности" еще принцип сохранения (двухчастичного состояния).

¹⁴ См.: Mermin N.D. Quantum mysteries for anyone // J. of philosophy. 1981. Vol. 78. P. 397-408; Mermin N.D. Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anyone // Amer. j. of physics. 1981. Vol. 49, N 10. P. 940-943; Mermin N.D. Is the moon there when nobody looks?: Reality a. the quantum theory // Physics today. 1985. Vol. 38. P. 38-47.

почек. (В реальных экспериментах, как у Аспека, изменения "позиций" осуществляются в коротких промежутках между "нажатием кнопки" и "зажиганием лампочек"). Результат испытания записывается в общей форме так: (x, y, i, j) , где

$x, y = K, Ж$, а $i, j = 1, 2, 3$. Например, $(K, Ж, 1, 3)$ означает, что когда детектор А находился в позиции 1, а детектор В - в позиции 3, на первом загорелась лампочка К, а на втором - Ж. В эксперименте допустимы 9 пар позиций $(11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33)$ и 4 пары зажиганий $(KK, KЖ, ЖК, ЖЖ)$. Цель эксперимента - исследовать статистику зажиганий в зависимости от распределения состояний детекторов.

Используя эту схему, можно проверить, казалось бы, естественную гипотезу, состоящую в том, что продукты распада - частицы - характеризуются некоторым "скрытым" состоянием, которое определяет зажигание той или иной лампочки в той или иной позиции переключателя детектора. Эта гипотеза позволяет предсказать статистику, которая должна была бы ожидаться в эксперименте, однако эксперимент не подтверждает предсказание.

Если резюмировать изложенное выше об исторических достижениях в анализе неравенств Белла и ее приложений, то эти достижения будут заключаться, по нашему мнению, в следующем:

Во-первых, в ходе этого анализа была выявлена сложная структура принципа локальности. Оказалось, что этот принцип расщепляется на ряд составляющих. Среди них: а) условие "слабой локальности", отвечающее по своему содержанию принципу близкодействия; б) условие локальности в смысле факторизуемости совместных вероятностей результатов одновременных измерений, требующее, по сути дела, редукции квантовой вероятности к бездисперсным мерам классической статистики (это условие отвечает условию "сильной локальности" Джаррета); в) условие локальности в смысле факторизуемости, или сепарабельности, "реальных физических состояний" (или эйнштейновский принцип локальности, который имеет также наименования принципа сепарабельности и принципа реальности) (это условие - условие "полноты").

Во-вторых, благодаря анализу понятия локальности выяснилась важность различения принципов локальности и сепарабельности. Оказалось, что квантовая теория является локальной, как и классические физические теории и специальная теория относительности, но, в отличие от них, несепарабельной теорией.

В-третьих, благодаря всему этому (но не только этому, конечно) в концептуальный аппарат физики вошло новое понятие

"несепарабельности", которое в нашей литературе именуется как "целостность"¹⁵. Важно подчеркнуть, что это понятие отличается от понятия нелокальности, которое обычно связывается с допущением сверхсветовых взаимодействий.

В-четвертых, была установлена (хотя, возможно, еще и не до конца) связь специфики вероятностных представлений с принципами локальности и сепарабельности (или несепарабельности)¹⁶.

Наверно, это перечисление "исторических достижений" в анализе теоремы Белла и ее приложений не исчерпывает всех его результатов.

Среди перечисленного, возможно, наибольшей новацией является "несепарабельность", или, если это понятие рассматривать в более широком смысле - как философское, "целостность". Конечно, это понятие использовалось в квантовой физике и раньше. Достаточно напомнить здесь хотя бы о боровской концепции целостного "квантового явления". В формальном плане это понятие связано также с принципом суперпозиции квантовомеханических состояний, который допускает возможность существования собственных состояний системы при отсутствии таковых для ее подсистем. Это выражается, в частности, в том, что собственное состояние системы не всегда возможно представить в виде произведения собственных состояний подсистем (в общем случае состояние первой представляется суммой произведений последних). Но вот новый акцент в содержании понятия квантовой целостности, выясненный в процессе анализа теоремы Белла и ее приложений, связан с переосмыслением этого понятия как онтологически исходного и как объясняющего принципа. Возможно, что фоковские "внесиловые" взаимодействия или "обменные силы" Паули являются некоторой интуицией квантовой "несепарабельности".

И все же понятие целостности как исходное онтологическое понятие физики является на сегодняшний день, можно сказать, полуинтуитивным. Рабочим методологическим принципом в

15 См.: *Цехмистро И.З.* Диалектика множественного и единого: Квантовые свойства мира как неделимого целого. М., 1972; *Тягло А.В.* Становление научной концепции целостности. Харьков, 1989. Следует подчеркнуть заслугу этих авторов (прежде всего - И.З.Цехмистро), акцентировавших значение категории целого для естествознания.

16 О неформальной природе понятия "вероятность" подробнее см.: *Панченко А.И.* Философия, физика, микромир. М., 1988. Гл. 4. В моей работе используются вовсе не термины "локальность" и "сепарабельность", а "амплитуда вероятности", "небулева решетка", но, видимо, все они связаны между собой.

физике все еще остается атомистический редукционизм. Какие методологические альтернативы могут быть здесь предложены? П.Теллер предлагает следующую экспликацию квантовомеханической целостности. Он полагает, что в основе квантовой теории лежит не механистический "партикуляризм" как рецидив мировоззрения и методологии классической механики, а так называемый "реляционный холизм". "Реляционный холизм" означает, что в квантовой реальности существуют состояния, отвечающие таким отношениям между отдельными объектами, которые не выводятся из нереляционных черт этих объектов (т.е. из их свойств "самих по себе"). Такой "холизм" совместим с принципом относительности в физике как характеристикой инвариантности законов. Например, считает Теллер, релятивистские квантовые теории поля приписывают невыводимые, или "внутренне присущие", отношения корреляциям пространственно-временных точек, не отказываясь от лоренцевой инвариантности (т.е. принципа локальности в смысле релятивистского близкодействия). В этих теориях, однако, не "работает" идея локальности в смысле контактного взаимодействия между нереляционными величинами, относимыми к точкам. Нарушения неравенств Белла свидетельствуют о существовании в природе "внутренне присущих" отношений¹⁷.

"Реальность" отношений как философская абстракция реальности квантовофизических корреляций ставит, однако, следующую логическую проблему. Пусть классический физический мир представляет собой совокупность "партикулярий", т.е. изолированных и идентифицируемых объектов-вещей. Пусть, далее, развитие человеческого познания и практики свидетельствует, что первое онтологическое предположение недостаточно и что, кроме "партикулярий", необходимо ввести нередуцируемые "универсалии" (или "внутренне присущие" отношения). Как тогда быть с методом редукционизма? Если этот метод не "работает", то тогда наравне с "партикуляриями" в мире существуют "универсалии". Но если последние существуют, то тогда как совместить несводимые квантовофизические отношения целостности с существованием отдельных сущностей? Здесь возникает проблема полноты представления мира, которая проявляет себя особенно при требовании когерентности, согласованности описания. Если метод редукционизма безучоризнен, то отношения - артефакт познания. Если отношения реальны и онтологически

¹⁷ См. *Teller P. Relational holism and quantum mechanics // Brit. j. for the philosophy of science. Aberdeen, 1986 Vol. 37, N 1. P. 71-81.*

исходны, то они не укладываются в "партикулярную" картину мира и "переполняют" ее.

Теперь перейдем собственно к теме статьи, надеясь, что вышеизложенное поможет представить ее более определенно, нежели это было бы возможно без данной пропедевтики. Поскольку мы обязаны говорить о реалистических интерпретациях квантовой теории, уместно поставить вопрос о том, что такое реализм. С гносеологической точки зрения, реализм можно определить как доктрину, противостоящую субъективному идеализму. Воспользуемся в этой связи следующим определением американского исследователя современных теорий познания Т.И.Хилла: "Представители реализма противопоставили идеалистическому утверждению о том, что объект познания либо по своим свойствам, либо по своему существованию зависит от того, как он познается, лозунг, согласно которому объект познания независим от познающего субъекта как в отношении своего существования, так и в отношении своих свойств..."¹⁸. Это гносеологическое определение реализма следует дополнить его логическим определением, связанным с принятием определенной концепции истины. Традиционный реализм, признающий существование логических сущностей (логический эссенциализм), принимает концепцию истины как соответствия высказываний реальности, причем, как пишет, например, Д.Мердок, "высказывания определенного класса выражают свойства реальных объектов, а их истинностные значения определяются реальностью независимо от того, как она нам является"¹⁹. На деле оказывается, что под реальностью, которой должны соответствовать наши высказывания, понимаются вовсе не материальные вещи, а их логические сущности.

Мердок раскрывает позиции реализма в физике при помощи следующих четырех тезисов: 1) физическая теория должна объяснять явления "в терминах постулируемой физической реальности, скрывающейся за ними. Это значит, что определенные виды ее предложений могут быть действительно пропозициональными, т.е. иметь истинностные значения, которые определяются физической реальностью независимо от нашего ее познания"; определенные теоретические термины или обозначают реальные физические сущности, которые могут и не восприниматься чувствами непосредственно, или выражают реальные физические свойства; 3) цель физики - построение объясняющих теорий,

¹⁸ Хилл Т.И. Современные теории познания. М., 1965. С. 97

¹⁹ Murdoch D. Niels Bohr's philosophy of physics. Cambridge etc., 1987. P. 200.

истинных в отношении физической реальности; 4) физика в ходе своего развития все более приближается к этой цели²⁰. Научный реализм добавляет к этим тезисам реализма еще один - "общепринятые физические теории, обеспечивающие наилучшее на данный момент объяснение физической реальности, следует считать истинными, а многие убеждения здравого смысла, противоречащие им, следует отвергать как ложные. С этой точки зрения, существуют атомы и элементарные частицы и нереальны такие вещи здравого смысла, как столы и стулья"²¹.

Совершенно очевидно, что боровская интерпретация квантовой механики не удовлетворяет этим реалистическим лозунгам и тезисам, поскольку Н.Бор неразрывно связывал "квантовое явление" как физическую реальность с экспериментальной установкой (т.е. средствами и условиями познания), писал, что "взаимодействие между измерительными приборами и исследуемыми физическими системами составляет неотъемлемую часть квантовых явлений"²², что условия определения физически реального "должны рассматриваться как неотъемлемая часть всякого явления, к которому с определенностью может быть применен термин "физическая реальность"²³. Со своей стороны Эйнштейн был неудовлетворен квантовой теорией, поскольку она не удовлетворяла его требованиям к полноте, не вскрывала содержание "реальных физических состояний". И здесь мы можем констатировать определенное сходство в оценках квантовой механики Бором и Эйнштейном: Эйнштейн считал, что эта теория нереалистична в том смысле, что она не отражает полностью "физическую реальность", ибо не удовлетворяет его принципу сепарации как принципу реализма²⁴; Бор тоже признавал, что эта

20 *Murdoch D. Niels Bohr's philosophy of physics. P. 200-201.*

21 *Ibid. P. 207.*

22 *Бор Н. Избр. науч. труды: В 2 т. М., 1971. Т. 2. С. 488.*

23 Там же. С. 179.

24 Следует заметить, что критерий полноты теории, предложенный в известной статье Эйнштейна, Подольского и Розена, самим Эйнштейном более нигде не использовался, поскольку эта статья, как считают ряд авторов (в том числе А.Файн и Д.Хауард), была написана скорее всего Б.Подольским (под впечатлением дискуссии ее авторов) и за своим техническим воплощением скрывает суть эйнштейновской критической позиции в отношении боровской и гейзенберговской интерпретации квантовой теории. Об этом свидетельствует найденное Файном неопубликованное письмо А.Эйнштейна Э.Шредингеру от 19 июня 1935 г. (см.: *Fine A. Op. cit. Ch. 3*). Это письмо было первым (более ранним, чем боровски...) ответом на статью ЭПР. В нем Эйнштейн критиковал доктрину "неконтролируемого возмущения" (квантовой) системы измерительным прибором), представил версию ЭПР-эксперимента, имевшего дело с

теория не удовлетворяет эйнштейновскому реализму (хотя он не столько критиковал этот реализм, сколько развивал свое понимание квантовой теории и физической реальности). Но все же: как быть с реализмом? И как быть с квантовой теорией? Ответить на эти вопросы помогла, в определенной степени, и дискуссия, развернувшаяся вокруг неравенств Белла. Прежде чем вернуться к ней, посмотрим, в чем выражался реализм Эйнштейна с гносеологической и мировоззренческой точек зрения. Для этого обратимся к его пониманию физической реальности.

Тексты Эйнштейна показывают различное понимание им понятия "физическая реальность". Однако наиболее типичным для его позиции является, на наш взгляд, понимание, связанное с определенной концептуальной программой теоретической физики. Это понимание он выражал, например, такими словами: "...реальность" в физике следует считать своего рода программой. По-видимому, никому не придет в голову отказываться от этой программы, если речь пойдет о "макроскопических" явлениях... Но "макроскопический" и "микроскопический" аспекты настолько тесно переплетены между собой, что вряд ли стоит отказываться от этой программы и при рассмотрении одних лишь "микроскопических" явлений"²⁵. (Заметим, в скобках, что, по Эйнштейну, отсюда следует, что один и тот же реализм должен быть справедлив как для теорий микромира, так и для теорий макромира, ибо существует единая физическая реальность). Конкретная суть эйнштейновской программы такова: "основными понятиями теории должны быть непрерывные функции, определенные в четырехмерном континууме"²⁶. А.Файн справедливо добавляет к этому следующее: "Причинность и независимость от наблюдателя - первичные свойства эйнштейновского реализма..."²⁷.

Но что такое "независимость от наблюдателя?" Файн поясняет, что для Эйнштейна "...нет сущности "вне" теории (например, "реальность внешнего мира"), с которой могла бы быть сравнена последовательность концептуальных объектов..."²⁸ Сам Эйнштейн ссылаясь на "веру в существование внешнего мира, независимого

измерением лишь одной (а не двух дополнительных) наблюдаемых величин, и ввел свой принцип сепарации, несовместимый с боровской интерпретацией волновой функции как дающей полное описание квантовой системы. Эйнштейн доказывал несовместимость признания полноты статистического квантовомеханического описания реальности и отстаиваемого им принципа локальности (или сепарабельности).

25 Эйнштейн А. Цит. соч. С. 302.

26 Там же. С. 303.

27 Fine A. Op. cit. P. 103.

28 Ibid. P. 96-97.

от воспринимающего субъекта"²⁹. Здесь как раз и скрывается самый существенный момент позиции Эйнштейна, который, однако, непросто уловить вне контекста (и легко, на наш взгляд, превратно истолковать как свидетельствующий целиком и полностью в пользу отождествления гносеологического статуса эйнштейновской физической реальности с объективной реальностью). А суть дела в том, что Эйнштейн всегда говорит о независимости именно от "воспринимающего субъекта" (в понятие которого входят в том числе наблюдения и измерения), а не от субъекта, который может, кроме того, еще и размышлять, и изобретать теоретические конструкции. Например, продолжение только что приведенной цитаты из работы Эйнштейна таково: "Но так как чувственное восприятие дает информацию об этом внешнем мире, или о "физической реальности", опосредованно, мы можем охватить последнюю только путем рассуждений"³⁰. Если внимательно отнестись к текстам Эйнштейна, то можно заметить, что он стоит на рационалистической позиции, противопоставляющей, прежде всего, не материю и сознание, а деятельность чувств и материальную деятельность экспериментатора как субъективную деятельности рассудка и мышления как объективному. "Основным принципиальным различием, являющимся необходимой предпосылкой научного и донаучного мышления, - пишет Эйнштейн, - является различие между чувственными восприятиями... с одной стороны, и чистыми идеями - с другой... Такое различие необходимо, чтобы не впасть в солипсизм... Мы считаем, что чувственные восприятия обусловлены "объективным" и "субъективным" факторами... "Объективный фактор" представляет собой совокупность таких идей и понятий, которые, по предположению, существуют независимо от нашего опыта, т.е. от чувственных восприятий"³¹.

Цитированные высказывания показывают, что гносеологический статус физической реальности у Эйнштейна ближе всего к гносеологическому статусу понятия (а не ощущения, восприятия или материальной, например, экспериментальной деятельности). При этом объективность познания связывается у него вовсе не с существованием объективной реальности как материи (это существование полагается как внешний фактор или как предмет веры), а с использованием общих понятий в их противопоставлении чувственным восприятиям и измерительным процедурам. В духе философского реализма постулируется независимость

²⁹ Эйнштейн А. Цит. соч. С. 136.

³⁰ Там же.

³¹ Там же. С. 301-302.

объекта ("физической реальности") как логической сущности от субъекта как отождествляемого в своей деятельности с чувственными восприятиями, наблюдениями, экспериментами, коммуникацией (отсюда и споры Эйнштейна с Бором)³².

Итак, что же мы имеем в итоге? По общему убеждению, Эйнштейн - реалист. "Но каким реалистом он был? - спрашивает Д.Хауард. - Аргументация Эйнштейна против полноты квантовой механики показывает, что его реализм не был просто философским предубеждением. Напротив, он надежно коренился в совершенно определенных допущениях не только о природе теории, но также и о самом физическом мире. И самым главным среди этих физических допущений является то, что я назвал сепарабельностью, а Эйнштейн называл "взаимно независимым существованием пространственно разделенных вещей"³³.

Не будем спорить с Хауардом о том, относятся или нет допущения о природе теории и "самом физическом мире" к "просто философским предубеждениям" или к "физическим допущениям". Проясним ситуацию с реализмом. Действительно, эйнштейновское понимание физической реальности не является просто "философским предубеждением". Это верно постольку, поскольку Эйнштейн связывал с реалистической программой физики определенные конкретные представления о мире. К ним относятся его принцип локальности (или сепарабельности состояний пространственно разделенных вещей, или реальности, или независимости от наблюдателя); принцип детерминизма, который имеет двоякое содержание, а именно принципа близкодействия и принципа необходимости как отвержения случайности; принцип континуального пространственно-временного описания. Однако все эти конкретные представления о том, как должен быть устроен физический мир, вступают в противоречия или, по крайней мере, неоднородны с представлениями других физических программ. Особенно ясно это становится в контексте обсуждения теоремы Белла. Анализ этой теоремы и ее приложений показывает, что эйнштейновский реализм не может быть универсальной доктриной в физике. По крайней мере, не "работает" его конкретная программа построения обязательно "сепарабельных" теорий. Но, может быть, универсален ее, так сказать, "философский остаток", выражающийся, в частности, в убежде-

32 Ср.: "Физика представляет собой развивающуюся логическую систему мышления, основы которой можно получить не выделением их какими-либо индуктивными методами из опыта, а лишь свободным вымыслом" (Эйнштейн А. Цит. соч. С. 226).

33 *Howard D. Op. cit.* P. 189-190.

нии, что идеи и понятия "существуют независимо от нашего опыта"?

Этот "остаток" тоже не универсален - хотя бы уже потому, что он не согласуется с приведенным выше лозунгом гносеологического реализма, прокламирующим, что объект познания независим от познающего субъекта и средств познания как в отношении своего существования, так и в отношении своих свойств. Эйнштейновский реализм не удовлетворяет этому лозунгу потому, что он отрицает зависимость "физической реальности" от деятельности чувств, восприятий и материальной деятельности экспериментатора, но вовсе не от деятельности рассудка и мысли (хотя акцентирует значение последней деятельности прежде всего для построения теорий, а не для определения "физической реальности"). В этом отношении Эйнштейна нельзя назвать реалистом. Однако он остается реалистом в традиционном философском смысле как человек, утверждающий реальность ислей.

Как теперь быть с реализмом в квантовой физике? Ответ на этот вопрос далеко не однозначен. Ведь, во-первых, можно заметить, что в этой сфере существовали или существуют несколько реалистических (конкретных) программ. Так, на реалистическую интерпретацию квантовой теории претендовали или претендуют программы Э.Шредингера, Лде Бройля, Эверетта, диалектическая концепция корпускулярно-волнового дуализма, квантовологический подход, концепция квантонов М.Бунге и, наконец, концепция несепарабельности и целостности квантовофизической реальности. Все эти достаточно конкретные программы обладают своими недостатками и преимуществами. В ходе их исследования было выяснено, что одни из них (например, программа Шредингера) физически неудовлетворительны, другие являются слишком "экзотическими" (например, модель Эверетта), третьи так или иначе делают уступки "инструментализму".

В связи с последним показателем анализ квантовой логики Х.Патнема и Дж.Баба, проведенный Д.Мердоком. Мердок обращает внимание на то, что согласно реалистической (квантовологической) интерпретации квантовой механики "каждая квантовомеханическая наблюдаемая должна иметь определенное значение во все времена"³⁴. Квантовая логика претендовала на реалистическую интерпретацию квантовой механики постольку, поскольку, как считали ее представители, она выражает "объективную структуру квантовомеханических событий"

³⁴ *Murdoch D. Op. cit. P. 256.*

(терминология Дж.Баба). Здесь мы не будем вдаваться в вопрос, уместно или нет вообще относить какую-либо логику непосредственно к миру, а не к мышлению человека. Посмотрим только, в чем выражаются уступки квантовой логики "инструментализму". Как показывает Мердок, квантовая логика сталкивается с противоречием между ее реалистическим предположением о том, что квантовомеханические наблюдаемые всегда обладают определенными значениями, допущением существования логически несовместных наблюдаемых (в этом, собственно, и состоит специфика квантовой логики) и свободой выбора измерения любой из них. Именно свобода выбора, которая принадлежит субъекту, составляет "инструменталистскую" посылку, несовместимую с "чистым" реализмом. "Тезис свободы выбора и тезис несовместности, - пишет Мердок, - совместно исключают тезис объективных значений и требуют введения вместо него тезиса создания значений в эксперименте. Но последний тезис несовместим с главным мотивом принятия реалистической интерпретации квантовой логики, состоящим в реалистическом истолковании экспериментальных высказываний, согласно которому эти высказывания относятся не просто к измеренным значениям, а к значениям, существующим до измерений"³⁵.

Во-вторых, отвечая на вопрос о реализме в квантовой физике, следует попытаться поискать его основания не только в реальности идей (так сказать, в человеческом измерении "физической реальности"), но и в самом объективном мире. Из квантовой физики известно, что физически реальные квантовые явления зависят от "системы отсчета", определяемой экспериментальной обстановкой (например, реальность положения и, соответственно, импульса). Можно ли в таком случае утверждать, что такая зависимость доказывает сводимость квантовофизической реальности целиком и полностью к "субъективному фактору", т.е. к деятельности экспериментатора? Безусловно, нет. Дело в том, что ни при каких условиях экспериментальной деятельности не удастся создать прибор, который бы измерял одновременно какие-либо несовместные величины (те же положение и импульс). Было предпринято множество попыток, которые бы позволили, хотя бы в принципе, обойти эту квантовую дополнительность. Однако ни одна из них не удалась. Невозможность создать такой прибор - это объективный фактор квантовой реальности, который не зависит от деятельности человека. И вместе с тем квантовая реальность имеет человеческие измерения: выбор

³⁵ Murdoch D. Op. cit. P. 254.

прибора автоматически определяет теоретические средства, которые необходимо применять для представления экспериментально исследуемого квантового явления.

Аналогичным образом обстоит дело в теории элементарных частиц, которая является релятивистской. Это можно проследить на ярком примере поведения нейтральных К-мезонов, о которых Л.Б.Окунь заметил: "Если бы К-мезонов не было, их надо было бы специально выдумать, чтобы объяснить студентам основные принципы квантовой механики"³⁶. Нейтральные К-мезоны могут участвовать как в сильных, так и в слабых взаимодействиях, которым отвечают разные теории. Мы не можем измерить одновременно их странность и СР-четность, которые отвечают характеристикам разных взаимодействий (странность характеризует сильное взаимодействие, СР-четность - слабое). Наблюдая распады К-мезонов, мы измеряем четность, но не можем определить странность, и наоборот.

А.Файн, осознавая рискованность эйнштейновской и вообще всяких теоретических программ в физике, приходит к выводу, что наука есть мероприятие, автономное по отношению к любым эпистемологическим и онтологическим философским концепциям мира. Наука живет своей внутренней жизнью, а любые так называемые "измы" являются внешними по отношению к ней. "Эйнштейн, - заключает Файн, - был прав в своих обвинениях инструменталистов копенгагенской школы в том, что они ведут рискованную игру с реальностью. Но было бы ошибкой рассуждения полагать, что реалист, когда он выходит за пределы истины квантовой теории для построения своей интерпретации, делает нечто иное, нежели играет. Его игра тоже рискованна, ибо ее правила свободны от ограничений текущей научной практики"³⁷.

Мы же, заключая статью, предлагаем читателю следующие свои выводы. Во-первых, гносеологический реализм, как он сформулирован цитированным выше высказыванием Хилла, вряд ли имеет место вообще, ибо объект познания невозможен без субъекта (как, впрочем, и наоборот), в этом объекте всегда присутствуют человеческие измерения (как его когнитивные или практические составляющие). Во-вторых, как это показывает анализ позиции Эйнштейна, в реализме имеются разные компоненты - и гносеологические (у Эйнштейна это вера в независимость и объективность идей по сравнению с чувственными восприятиями и экспериментальной деятельностью как чем-то субъективным), и физико-онтологические (в данном случае принцип локальности как сепарабельности). В-третьих, физико-онтологический реализм Эйнштейна тоже вряд ли имеет место, ибо, как показывает анализ теоремы Белла и ее приложений, "реальные физические состояния" не всегда являются "сепарабельными".

36 Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М., 1981. С. 83.

37 Fine A. Op. cit. P. 171.

ВЕРОЯТНОСТЬ, СТРУКТУРА, НЕЛИНЕЙНОСТЬ

1. Вероятность в основаниях знаний

Проникновение физики в интимные структуры материи не отделимо от вероятностных представлений. Идея вероятности, методы исследований, опирающиеся на теорию вероятностей, обеспечили два грандиозных прорыва в глубь материи - в структуру вещества (классическая статистическая физика) и в структуру атома, в структуру явлений атомного масштаба (квантовая механика). Каковы же традиции, каковы перспективы "приложений" вероятности в новом синтезе физики, в ходе исследований мира элементарных частиц? Последнее тем более интересно, что базисной теорией в познании мира элементарных частиц является квантовая теория, в основания которой вероятность входит имманентным образом.

Природа вероятности, анализ ее объективных оснований весьма активно обсуждались в период создания квантовой механики и ее первоначального развития. Особо острые философские дискуссии проходили по вопросам о судьбах принципов причинности и детерминизма в свете вхождения в фундамент физики идеи вероятности. Тогда же сложился богатый спектр подходов к анализу природы вероятности, среди которых были и чисто субъективистские взгляды, и сугубо статистические (ансамблевые) трактовки оснований вероятностных методов. В наше время такие дискуссии значительно приутихли. Причина тому - широкое признание принципиального характера вероятностных представлений в раскрытии структуры квантовой теории и их прямой связи с описанием поведения индивидуальных квантовых объектов. Сложился особый стиль мышления, который явился своего рода отрицанием стиля мышления классической физики с ее упором на жесткую, однозначную детерминированность любых процессов - и космического характера, и самых элементарных. Стиль мышления, основанный на квантовых идеях, существенно иной - понимание элементарных процессов не отделимо от слу-

чайности и вероятности. Именно вероятностный характер поведения микрообъектов принципиален и весьма интригующ. Квантовый стиль мышления меняет сам подход к пониманию вероятности: на исе перестали смотреть глазами классики, напротив, вероятностный язык стал рассматриваться как базисный, более общий, и с его позиций стали рассматриваться вопросы трактовки теорий классической физики.

В настоящее время вопрос о природе вероятности и ее взаимоотношении с основаниями физики обсуждается не столь живо. Можно сказать, что по отношению к вероятности сложилась своеобразная парадоксальная ситуация. Всеми признается, что она входит в основания теории микропроцессов, и в то же время в ходе самих исследований элементарных процессов о ней мало что говорится или же она играет второстепенную роль. Особо это касается физики элементарных частиц. Конечно, здесь имеются понятия, имеющие сугобо вероятностную природу и связанную с использованием волновых функций для характеристики частиц. К таковым относятся понятия, связанные с характеристикой, прежде всего, процессов рассеяния - изменения траекторий частиц в результате их столкновений с ядрами атомов или с другими частицами (это понятия - сечение взаимодействия, плотность состояний, времена жизни частиц). Однако при характеристике внутренних состояний и свойств элементарных частиц представления о вероятностях практически не используются. Можно сказать, что существует своеобразный вероятностный фон физических событий, на который накладывается концептуальный аппарат физики элементарных частиц и который как бы возвышается над этим фоном. Анализ строения и свойств частиц ведется на языке понятий этого аппарата и основаниями его связи с "вероятностным фоном" глубоко не интересуются. Вместе с тем, в плане теории познания анализ такой структуры знаний весьма интересен.

К сказанному можно подойти и с иной точки зрения. В настоящее время собственно вероятностные представления в физике элементарных частиц используются при описании поведения частиц в процессах их взаимодействий. Как сказал Р.Фейнман: "Сколько бы мы ни старались изобрести разумную теорию, объясняющую, как фотон "решает", проходить ли ему сквозь стекло или отскакивать назад, предсказать, как будет двигаться данный фотон, невозможно ... Это условие, которое приводит к различным результатам: одинаковые фотоны летят в одном направлении к одному куску стекла. Мы не можем предсказать, попадет ли данный фотон в А или в В. Все, что мы можем пред-

сказать - это то, что из 100 вылетевших фотонов в среднем 4 отразятся от поверхности. Значит ли это, что физику, науку великой точности, свели к тому, чтобы вычислять вероятность события и не предсказывать точно, что произойдет? Да. Так оно и есть. Это отступление. Природа позволяет нам вычислять только вероятности. Но наука не потерпела краха¹. Встает вопрос, почему же наука, ассимилируя вероятность в свои основы, не потерпела краха? Как это понять? Ведь нельзя же предполагать, что по мере развития науки точность ее утверждений и предсказаний уменьшается, а сами ее высказывания делаются все более неоднозначными и неопределенными. Наоборот, развитие науки, и особо физики элементарных частиц, свидетельствует о непрерывном возрастании точности всех измерений. Именно физика здесь демонстрирует наиболее впечатляющие результаты. Например, масса электрона в настоящее время определяется равной 0,511 МэВ, где 1 МэВ примерно равен $1,78 \times 10^{-27}$ г. Экспериментально исследуются расстояния порядка 10^{-16} см. Без опоры на возрастающую точность измерений и, соответственно, однозначность высказываний научный прогресс невозможен. Использование вероятностного языка в физике микропроцессов также ведет к повышению точности измерений, высказываний, утверждений и прогнозов. Трудности в трактовке вероятности, на наш взгляд, связаны с тем, что раскрытие ее содержания во многом строится на представлениях о простом траекторном движении исследуемых объектов. Последнее видно и из приведенного высказывания Р.Фейнмана. Трактовка вероятности еще слабо связывается с раскрытием представлений о внутренних свойствах и структуре частиц.

2. Идея уровней

Квантовая механика практически является высшим и уточненным проявлением идей и методов вероятности в физике. Идея вероятности здесь обычно используется для понимания самой физической стороны дела. Последнее связано с тем, что концептуальный аппарат квантовой механики разрабатывался без явной опоры на вероятностные представления. Основная характеристика состояний микрообъектов - волновая функция - была введена чисто математическим образом и лишь позднее была разработана ее вероятностная трактовка. Именно здесь вероят-

¹ Фейнман Р. КЭД - странная теория света и вещества. М., 1988. С. 20.

ность помогла разобраться в характеристике физических процессов. Однако, не менее существенны и обратные связи: концептуальная схема квантовой механики дает много и для понимания самой идеи вероятности.

Вероятность связана с трактовкой волновой функции. Смысл волновой функции - как основной характеристики состояний квантовых объектов и систем - состоит не только в том, что она соотносится с вероятностными представлениями, но и в том, что на ее базе характеризуются структурные свойства микрообъектов. Волновые функции описывают собою прежде всего такую определяющую особенность их внутреннего строения, как корпускулярно-волновой дуализм. Собственно квантовые свойства частиц, такие как четность или спин, также в теории выражаются как свойства или параметры волновых функций. Более концентрированным образом развитие структурных представлений выражается в становлении идеи уровней внутреннего строения и детерминации микрочастиц.

Для понимания структуры квантовой механики весьма существенно, что используемые в этой теории понятия (физические величины, характеризующие микрообъекты) делятся на два класса, имеющие различную логическую природу. Первый класс составляют так называемые непосредственно наблюдаемые величины (например, координата и импульс), которые в теории рассматриваются как типично случайные (в теоретико-вероятностном смысле) величины. Второй класс образуют квантовые числа (собственно квантовые величины, типа спина). Различия между этими понятиями заключаются, прежде всего, в "степени близости" к непосредственно данному в опыте. Первые выражают более внешние характеристики микрообъектов, вторые - более глубокие, внутренние. Первые позволяют индивидуализировать квантовые процессы, вторые носят обобщенный характер. Первые тяготеют по своей природе к классическим понятиям, вторые выражают специфичность квантовых явлений. Первые связаны с явлением, вторые - с сущностью, хотя и несомненно, что сущность является, а явление существенно. Естественно, что полнота теоретического описания квантовых процессов достигается, когда используются понятия обоих классов, относящиеся к различным логическим уровням. Установление взаимосвязи, синтеза в рамках единой теории этих двух классов величин оказалось возможным на основе представлений о волновой функции, в чем и состоит одно из важнейших ее значений.

Различия между двумя классами понятий в квантовой теории имеют логическую природу и выражаются в характере свя-

зей и зависимостей между ними. На уровне непосредственно данных прямые зависимости между значениями понятий вообще отсутствуют (царство случайности). На уровне обобщенных понятий (собственно квантовых) зависимости носят вполне однозначный характер. Зависимости между параметрами, относящимися к различным уровням, включают в себя неоднозначность, неопределенность. Соответственно сказанному существенно изменяются и способы характеристики состояний микрочастиц. При их описании основное значение стало придаваться понятиям второго класса (квантовым числам), как выражающим более глубокие, внутренние свойства частиц. Эти характеристики, в зависимости от своих численных значений, вполне строго определяют каждый из видов элементарных частиц, и на основе этих характеристик прежде всего и производится идентификация того или иного рода частиц при опытных исследованиях. Зависимости между параметрами этого класса, как уже отмечалось, носят вполне однозначный характер, что и позволяет вести плодотворные исследования свойств и закономерностей элементарных частиц. При этом зависимости между такими понятиями возвышаются над фоном вероятностных изменений, который представлен полем возможных изменений значений величин, относящихся к исходному уровню кодирования информации.

Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что значение вероятности в квантовой физике заключается прежде всего в том, что она позволяет исследовать закономерности объектов, имеющих сложную, "двух-уровневую" структуру, включающую в себя и определенные черты независимости, автономности. В этой связи со структурой объектов, с методами ее постижения и выражения и заключен важнейший смысл вероятности. Последнее и составляет то существенно новое, что вносит квантовая теория в наше понимание природы вероятности. К сожалению, подобные результаты еще весьма слабо учитываются в методологии науки.

3. Нелинейная природа случайности

Современное развитие науки, происходящие в ней концептуальные преобразования воздействуют и на дальнейшее развитие нашего понимания основ вероятности. Это развитие непосредственно связано с углубленной трактовкой категории случайности, а последняя, как известно, в представлениях ученых неотделима от вероятности. Исходными в данном развитии взглядов на случайность являются идеи А.Пуанкаре. Случайность, отмечал

он, проявляет себя, прежде всего, в состояниях неустойчивого равновесия. Классический пример тому дает уже такая простейшая задача из области механики, как конус, стоящий на вершине. "Если конус стоит на вершине, - пишет Пуанкаре, - то мы знаем, что он опрокинется, но не знаем в какую сторону. Нам представляется, что это полностью зависит от случая. Если бы конус был совершенно симметричен, если бы ось его была совершенно вертикальна, если бы он не был подвержен действию никакой силы, кроме тяжести, то он не упал бы вовсе. Но малейший изъян в симметрии заставил бы его слегка наклониться в ту или иную сторону; наклонившись же, хотя бы и весьма незначительно, он упадет в сторону наклона окончательно. Если бы даже симметрия была совершенна, то самого легкого дрожания, легчайшего дунения ветерка было бы достаточно, чтобы наклонить его на несколько секунд дуги; и этим не только было бы решено его падение, было бы предопределено и направление этого падения, которое совпало бы с направлением первоначального наклона. Таким образом, совершенно ничтожная причина, ускользающая от нас по своей малости, вызывает значительное действие, которое мы не можем предусмотреть, и тогда мы говорим, что это явление представляет собой результат случая"². Подобные примеры можно привести далеко не из одной механики. Результат, который является следствием действия малых причин (флуктационных изменений), характеризующих исходное неустойчивое состояние, и выступает перед нами как случайный.

Случайность в общем виде рассматривается как отсутствие закономерности или же как нечто ей противоположное. Рассмотренная модель и демонстрирует, что на уровне результата (большие следствия) нет непосредственных и "равновеликих" причин, его обуславливающих, а потому он и характеризуется как случайный. Соответственно этому, при определении случайности важны такие понятия и представления, как существенная неустойчивость, неравновесность, малые причины - большие следствия и эффект усиления флуктационно выбранного направления изменений (самодействие). Другими словами, здесь мы имеем дело с нелинейными процессами. Последнее позволяет сделать весьма важный и интересный вывод - случайность есть существенно нелинейная характеристика, есть характеристика нелинейного мира. Тем самым, основания случайности и вероятности оказываются глубоко динамичными. Они возможны в мире, где связи и зависимости весьма сложны, подвижны, мно-

² Пуанкаре А. О науке. М., 1983. С. 322-323.

пократно опосредованы и необычайно "резонируют". Нелинейность "провоцирует" появление случайности. Идея случайности существенно опирается на представления о том, что причины не всегда могут быть разумно соотнесены со своими следствиями, что во взаимосвязях в материальном мире существуют своего рода иррациональные, несоизмеримые элементы. Однако последнее не означает, что случай беспричинен. Трудности здесь скорее связаны с тем, что происходит отказ от модели линейного мира как базовой, что вырабатывается "нелинейное мышление" с его коренной ломкой устоявшихся понятий и представлений. Случайность в ходе этой ломки приобретает новое конструктивное звучание. Ранее, в случае "линейных моделей", случайность была в основном ответственна за наличие постоянных иррегулярных колебаний значений некоторых свойств систем вокруг средних величин. При анализе нелинейных процессов случайность становится ответственной уже за перемены глобальных масштабов.

На взаимосвязь проблем случайности и нелинейности в настоящее время, явно или неявно, обращают внимание многие исследователи. Как пишут одни из ведущих представителей нелинейного мышления в физике А.В.Гапонов-Грехов и М.И.Рабинович, "...и хаос, и порядок есть результат проявления нелинейности. Только хаос наблюдается в системах с неустойчивым поведением, порядок же - в системах с устойчивым поведением"³.

4. Локальность и целостность

Рассмотренные выше новые подходы к трактовке вероятности позволяют пролить дополнительный свет на проблему обоснования квантовых вероятностей, а тем самым и на ее дальнейшие судьбы. Новые подходы опираются на более структурированную и динамичную модель мира. Соответственно этому, в вопросах обоснования квантовых вероятностей первостепенное значение стал играть анализ характера взаимодействия частиц, их "механизмов". Последнее непосредственно связано с проблемами взаимоотношения локальности, сепарабельности и целостности, широко обсуждаемыми в литературе.

³ Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Нелинейная физика. Стохастичность и структуры // Физика XX века. Развитие и перспективы. М., 1984. С. 255.

При анализе процессов взаимодействия в микромире с самого начала стало ясным, что характер квантовых взаимодействий качественно отличается от взаимодействий в классической физике, соответственно чему изменяются и сами способы описания и выражения физического взаимодействия. Эти изменения в описании принципиально важны. Они учитывают как локальные аспекты (взаимодействие индивидуализированных частиц путем "контакта"), так и целостное описание системы взаимодействующих частиц (взаимообусловленность их свойств). В квантовом случае с самого начала механизм взаимодействия трактуется в рамках представлений о составных квантовых системах. "Наиболее важным качеством математического аппарата квантовой механики, с точки зрения физики, - пишет А.С.Холево, - является возможность описания характерных черт взаимодействия микрообъектов, не находящих отражения в классической картине. Тем не менее, первый шаг в квантовомеханическом описании взаимодействия следует в основном рецепту, заимствованному из классики. Именно вводится понятие системы невзаимодействующих "уединенных" компонент, а затем взаимодействие задается в терминах элементов этой составной системы. Таким образом, когда речь идет о взаимодействии, то исходным математическим материалом служит не столько модель уединенной квантовой системы, сколько категория таких моделей с операцией произведения, задающей правило образования составной системы"⁴.

Подобная целостность является крайне существенной для понимания процессов, протекающих в микромире. Именно с нею зачастую связывают "происхождение" специфических черт квантово-механического описания реальности, включая и статистический характер его закономерностей. В конечном счете, здесь ведущими являются представления об открытости любых материальных систем. "Возвращаясь к проблеме квантовых наблюдений, - пишет Ю.И.Манин, - мы приходим к выводу, что неклассичность их математической модели связана в первую очередь с тем, что она является огрублением гораздо более сложной модели, призванной описывать взаимодействие системы с другой системой - "прибором"... После взаимодействия с прибором система может потерять свою индивидуальность, и представление о том, что она начинает новую жизнь в точке новой фазовой кривой в своем пространстве, может потерять всякий смысл. Нако-

⁴ Холево А.С. Статистическая структура квантовой механики и скрытые параметры. М., 1985. С. 27.

нец, поскольку и до взаимодействия с прибором система была частью чего-то, скорее всего она ни в какой момент не имеет индивидуальности, нужной для адекватности модели. Кажется, нет меньшей замкнутой системы, чем весь Мир⁵.

Проведенное рассуждение Ю.И.Манин заканчивает словами: "После всего этого следует считать чудом, что наши модели успешно описывают хоть что-нибудь". Действительно, если связывать все более углубленное и уточненное познание микропроцессов только с движением познания во вне от самих частиц, с охватом все большего "окружения" частиц, то познание "интимных" свойств частиц во многом будет являться чудом. Однако необходимо учитывать не только глобальные, но и весьма локальные аспекты познания частиц вглубь. Обращение к последним также выявляет свои трудности. И эти трудности состоят в том, как понять и объяснить основные, собственно квантовые свойства частиц - корпускулярно-волновой дуализм и статистичность. О корпускулярно-волновом дуализме, и прежде всего - о природе волновых свойств в локальном, сказать весьма трудно. Практически здесь нет продвижения со времени разработки основ квантовой механики. Самое большее, что здесь мы можем сказать, это то, что квантовые частицы далеко не классические и основное их отличие состоит в том, что они одновременно обладают и корпускулярными, и волновыми свойствами. Стремление же понять "механизмы" статистичности на этих путях зачастую приводят к представлениям о скрытых параметрах. Но и здесь много тупиковых подходов. Развитие идей теоремы Неймана уже в сравнительно недавнее время подтвердило заключение, что локальная теория со скрытыми параметрами, воспроизводящая вероятностные предсказания квантовой механики, невозможна (неравенства Белла). Широкое обсуждение этих вопросов зачастую строится исключительно на раскрытии аспекта целостности, в ее феноменологической трактовке, отвлеченной от поисков углубленного ("уровневого") понимания самой идеи локальности.

Проблема локальности в квантовой физике претерпевает изменения. В классической физике представления о локальности непосредственно основывались на представлениях о траекторном движении частиц. В квантовой физике мы отказываемся от самого понятия траектории. Квантовые частицы не ведут себя подобно точечным частицам классической физики, подобно малым идеальным бильiardным шарам. Свойством реальной физической частицы является то, что она имеет волновые свойства. Сле-

⁵ Манин Ю.И. Математика и физика. М., 1979. С. 45-46.

довательно, как уже отмечалось, сам процесс движения (распространения), и, особо, взаимодействия описывается по иному. На базе учета волновых свойств частиц разрабатываются теоретические подходы к раскрытию "механизма" взаимодействия частиц. Как пишет, например, Э.Вихман, "силы, испытываемые частицей, вызваны, разумеется, присутствием других частиц, и согласованная теория требует квантово-механического описания всей системы частиц. Все частицы в данной физической ситуации должны быть описаны волнами де Бройля, и фундаментальная теория взаимодействия частиц должна быть теорией, рассматривающей взаимодействие между этими волнами. Именно такое фундаментальное описание взаимодействия характерно для квантовой теории поля"⁶. И далее: "Классической идее о двух частицах, взаимодействующих с помощью сил, соответствует квантово-механическая идея о взаимодействии волн де Бройля. Это означает, что волна де Бройля одной из частиц влияет на распространение волны де Бройля другой частицы. Такое влияние возможно лишь в том случае, если среда, в которой распространяются волны де Бройля, нелинейна, т.е. если "отклик" среды нелинеен"⁷. Отсюда следует, что теоретические попытки понять взаимодействие частиц в локальном, основанные на существенном учете "паличия" волновых свойств у частиц, приводят к представлениям о нелинейном характере механизма этих взаимодействий.

Подобный подход позволяет лучше понять природу квантовых вероятностей и возможные пути их дальнейших обобщений. Вероятностные вариации в значениях наблюдаемых физических величин, проявляющиеся в результатах взаимодействия квантовых частиц, обусловлены нелинейным характером этих взаимодействий. В этих процессах взаимодействия частицы проходят через области крайне неустойчивых состояний, когда малейшие неуловимые изменения в микро-микро обстановке приводят к наблюдаемым различиям в вероятностных распределениях. Подобная острая неустойчивость непосредственно связана с двухуровневой структурой частиц и их внутренней динамикой. Тем самым, анализ "механизма" взаимодействия частиц упирается в анализ особенностей нелинейных процессов.

⁶ Вихман Э. Квантовая физика (Берклевский курс физики, т. 4). М., 1986. С. 265.

⁷ Там же. С. 368.

5. Новый язык?

Итак, повторим основной вопрос данной статьи - каковы же судьбы вероятности в дальнейшем познании микромира? В ходе развития современных подходов еще более укрепилась мысль, что в фундаменте материи лежат такие свойства, которые непосредственно выражаются на языке вероятности, на языке представлений о случайном. Как сказал И.Пригожин: "Трудные проблемы, некогда находившиеся в центре знаменитой дискуссии между Эйнштейном и Бором об основаниях квантовой теории, начинают обретать новые формы: мы получаем возможность рассматривать вероятностные теории, которые являются полными и объективными. Вероятностный элемент выражает ныне далеко не степень нашего незнания, а новые весьма глубокие особенности структуры динамической теории"⁸.

Концептуальный аппарат физики элементарных частиц непосредственно опирается на вероятностный фон, на фон событий, где царствует случайность. Вместе с тем, в современной науке началось своеобразное диалектическое отрицание случайности, отрицание картины мира, основывающейся на представлениях о чистой случайности. Как мы выше видели, случайность в физике (как в классической, так и в квантовой) связана с раскрытием структуры исследуемых физических систем. Вместе с тем, в качестве базовых моделей, в наибольшей степени воплощающих идею случая, практически выступают модели газа, модели типа газовых. Именно на примере этих моделей строится понимание случайности. Подобные модели представляют, так сказать, простую статистическую, вероятностную парадигму.

С развитием науки усложняются наши представления о случайности. В настоящее время достаточно выяснена ограниченность простой статистической парадигмы, что становилось все яснее по мере перехода науки к исследованиям все более сложных систем.

Наиболее глубокое понимание случайности возможно в рамках анализа оснований ее включенности в структуру не просто физических, а эволюционных процессов. Исходной здесь является дарвиновская модель, которая является наиболее разработанной моделью развития, по крайней мере - что касается наук о природе. Для понимания эволюционных процессов, согласно модели Дарвина, определяющее значение имеют мутационная из-

⁸ Пригожин И. От существующего к возникающему. М., 1985. С. 282.

менчивость, наследственность и естественный отбор. Через представления о случайности характеризуются прежде всего мутации, их отношение друг к другу: они ненаправлены и результат одной мутации не зависит и не определяет собою результаты других, последующих мутаций.

Конструктивная роль случая в дарвиновской модели развития достаточно очевидна. Как говорят, случайность отражает наличие разнообразия в материальном мире, создает неисчерпаемую генетическую изменчивость, которая упорядочивается и канализируется путем отбора⁹. Однако понимание самой природы случайности здесь не столь просто. Зачастую случайность трактуют в духе простой статистической парадигмы: предполагается, что первичные живые структуры возникли в результате случайных столкновений атомов веществ, первоначально находившихся в некотором хаотически распределенном состоянии. Если исходить из того, что жизнь возникла в результате чисто случайных столкновений атомов или же что все существующее многообразие видов живого возникло в ходе простого перебора мутантов, то для создания эволюционным путем наблюдаемого разнообразия существующих видов с их фантастически сложными органами и поведением не хватило бы ни времени существования наблюдаемой Вселенной, ни исходного материала¹⁰. Здесь случайность еще не может продуктивно овладеть временем, еще эффективно не вписывается в структуру эволюционных процессов.

Недостаточность простой статистической парадигмы для объяснения эволюционных изменений, для понимания самого процесса возникновения жизни обусловлена рядом причин. Прежде всего, здесь молчаливо допускается, что биологическая эволюция началась с некоторого хаотического состояния, с некоторой газообразноподобной модели исходного распределения вещества. Представления о первоначальном хаосе зародились еще в глубокой древности, а в сравнительно недавнее время они поддерживались и питались "выводами" о ранней или поздней тепловой смерти Вселенной. Если в наших представлениях об эволюционных процессах делать упор на идее равновесности как базовой, то к иным выводам трудно придти. Подобные представления о хаосе как некотором исходном и основном

⁹ См. в указанной связи: *Чайковский Ю.В.* Разнообразие и случайность // *Методы научного познания и физика.* М., 1986. С. 149 и сл.

¹⁰ См.: *Мора П.* Несоостоятельность вероятностного подхода // *Происхождение предбиологических систем.* М., 1976. С. 47 и след.; *Уоддингтон К.Х.* Зависит ли эволюция от случайного поиска? // *На пути к теоретической биологии.* М., 1970. С. 108 и след.

состоянии материи в литературе получили оценку как один из мифов прошлого, еще владеющем мышлением современного человека. Рассматривая эти вопросы, Ст.Бир пришел к выводу: "Порядок более естественен, чем хаос. Это, мне кажется, весьма неожиданное утверждение, ибо, когда я недавно опубликовал его, ряд читателей написали письма с указанием на "опечатку". Однако это не опечатка. Более того, это утверждение играет для меня действительно важную роль, так как, придя к нему, я порвал с описательными постулатами Гесиода, давившими на мое сознание тяжким грузом почти трехтысячелетней давности. Это утверждение позволило мне совершенно по-новому взглянуть на системы"¹¹. Соответственно меняются и наши представления о роли хаоса в эволюционных процессах: "Если мы конструируем структуру реального мира как переход хаос-порядок-хаос, то таковой она и будет, и наши системы должны будут включать в себя огромные управляющие устройства, способные создать и поддерживать стадию порядка. Но если структуру бытия мыслить как переход порядок-хаос-порядок, то мы получим другое бытие, и наши системы станут в значительной мере самоорганизующимися. Хаотическая стадия в последнем случае - это возмущения, действующие на систему извне; управляющие устройства потребуются здесь только для того, чтобы отфильтровать эти помехи, насколько это возможно, и обеспечить соответствующий запас разнообразия, способный поглотить помехи подобно губке, восстановив тем самым порядок"¹². С такими утверждениями в целом можно согласиться, но с одним существенным замечанием: хаотическая стадия в развитии систем не равносильна лишь внешним воздействиям на нее, а включает в себя и определенные внутренние основания.

Если признать, как это следует из вышесказанного, что эволюционируют сами наши представления о случайном, то это должно сказаться и на физическом мышлении. Современный теоретический анализ процессов в мире элементарных частиц базируется, повторим, на квантовой теории, в основаниях которой лежат вероятность и случайность. Переход от классического способа описания физических процессов к квантовому обусловлен переходом физики к исследованию принципиально нового физического мира, мира физических процессов атомного масштаба. Если далее признать, что процессы, происходящие на уровне

¹¹ Бир Ст. Мифология систем - под сводом сумерек // Бир Ст. Кибернетика и управление производством. М., 1965. С. 285.

¹² Там же. С. 286-287.

элементарных частиц, принципиально отличаются от процессов атомного масштаба, то необходима смена теоретического языка, теоретического видения физических процессов. Другими словами, необходимо обобщение взглядов и подходов, основывающихся на вероятности и случайности. И такие изменения намечаются, как мы видели, на путях разработки идеи нелинейности. При этом идея нелинейности существенна в том отношении, что она не просто отрицает нынешнюю форму идеи случайности, а включает ее в более широкий контекст.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Введение

Данная работа представляет собой попытку методологического анализа конкретного феномена современной теоретической физики высоких энергий, а именно феномена возникновения и развития в течение последних двадцати лет теории суперструн, которая признана на сегодня наиболее перспективной.

Мы будем исходить из той точки зрения, согласно которой теория и метод представляют собой лишь разные стороны одного явления. "Тайна метода рождения теоретического знания заключается в нем самом."¹

Тем самым отбрасывается позитивистское представление о единстве метода, согласно которому цель методологии состоит в установлении конечного набора правил, истинность которых никак не зависит от научной практики.

Диалектика методологии заключается в тесном взаимодействии с научной практикой, так что, с одной стороны, методология может предложить направляющие принципы для научного исследования, а, с другой - современное развитие научной практики может внести изменения в содержание методологии. Такого рода взаимодействие метода и практики обнаруживается не только внутри науки, рассматриваемой как целое, но также и внутри каждой теории или исследовательской программы.

"Научное знание является результатом трех типов деятельности - экспериментальной, специально-теоретической и, наконец, методологической. В соответствии с ними в целостном теоретическом знании можно различать три урортия: 1) поиски эмпирических закономерностей и выдвижение гипотез, 2) создание

¹ Методологические принципы физики. М., 1975. С. 14.

систематически развитых теорий, 3) методологическое исследование".²

Именно такое методологическое исследование, осуществляемое в сфере физического поиска, позволит установить систему методологических принципов, выполняющих роль регулятивов, которыми руководствуются ученые для достижения целей своей научной деятельности. Это означает, что методологические принципы содержат ряд общих ограничений, которые вместе в некоторыми частными ограничениями (такими как вариационный принцип, перенормируемость и т.п.) будут в значительной мере способствовать постановке физических проблем, определять круг возможных гипотез, структуру, эволюцию выдвигаемых теорий и давать им оценку. Детальные, опирающиеся на философские и исторические основания исследования авторов книги "Методологические принципы физики" (см. сноску ¹ данной статьи) убедительно показывают, что такого рода принципы соответствуют научной практике, и подтверждение этому - вся история физики от идей Аристотеля до модели Салама-Вайнберга и квантовой хромодинамики.

Поскольку проведенный в книге анализ является ретроспективным исследованием завершённых теорий, было бы интересно посмотреть: сохраняют ли свою силу ограничения, налагаемые методологическими принципами, при конструировании теории, еще пребывающей в развитии, такой как теория суперструн, - тем более что она считается находящейся "за пределами стандартных представлений".³

В соответствии с нашей точкой зрения относительно существования тесной связи между методом и теорией мы проследим историю развития теории суперструн и сконцентрируем свое внимание в первую очередь на методологических вопросах, которые появляются в связи с развитием этой теории. Несмотря на то, что многие из этих вопросов схожи с теми, с которыми мы сталкивались на предыдущих этапах развития физики, есть указания на то, что процесс развития физики в данной пограничной области может вызвать появление новых методологических проблем. Поэтому наша главная задача состоит в том, чтобы понять то, в какой мере методологические принципы задают последующее развитие теории суперструн.

² Овчинников Н.Ф. Тенденция к единству науки. М., 1988. С. 261.

³ Казаков Д.И. Суперструны, или за пределами стандартных представлений // УФН. Т. 50. Вып. 4. 1986. С. 561.

2. S-матрица versus квантовой теории поля.

"Теория [супер]струн выросла из теории S-матрицы, но в некотором смысле она обладает чертами и теории S-матрицы и квантовой теории поля - специалисты еще не пришли к единому мнению относительно того, что представляет собой теория [супер]струн реально. Действительно, и это одна из причин, которая делает теорию трудной для изучения: не существует двух одинаковых мнений относительно того, что для этого необходимо изучать".⁴

Чтобы как-то оценить это замечание, следует вспомнить, что история физики высоких энергий может быть представлена в виде истории двух конкурирующих исследовательских программ, а именно, квантовой теории поля (КТП) и S-матрицы.⁵ В нескольких словах история соревнования между этими исследовательскими программами такова:

КТП разрабатывалась в конце 20-х годов как квантовая теория взаимодействия между излучением и веществом. Благодаря, в первую очередь, работам Дирака 1927-1928 годов, а также работам Гейзенберга и Паули 1929 года, квантовая теория поля смогла предложить в высшей степени удивительное понимание природы, согласно которому частицы возникали из квантовых полей, а взаимодействие между ними микроскопически описывалось в терминах обмена частицами. Однако, почти сразу же эта первая версия КТП столкнулась с огромными затруднениями. Это была хорошо известная проблема расходимостей, приведшая к двум разным точкам зрения. Сторонники первой полагали, что КТП неверна, и ее следует заменить другой теорией. Приверженцы второй настаивали на неполноте КТП и на том, что тщательное исследование расходимостей могло бы дать способ, как избавиться от них.

Первой точки зрения придерживался Гейзенберг, считая недостатком КТП введение ненаблюдаемых величин, таких как квантовые поля, которые реально нами никогда не могут быть измерены. "Это побудило Гейзенберга, исходившего из общей идеологии об исключении ненаблюдаемых величин, выдвинуть в 1943 году S-матрицу как основной объект теории, полностью характеризующий взаимодействие частиц, который должен строиться непосредственно, без обращения к гамильтониану и свя-

⁴ Weinb. & S. Particle physics: past and future // International Journal of Modern Physics A. 1986. Vol. 1. N 1. P. 142.

⁵ Подробнее см.: Cushing J.T. Models and Methodologies in Current Theoretical High-Energy Physics // Synthese. 1982. Vol. 50. P. 5-101.

занному с детальным пространственно-временным описанием уравнению Шредингера⁶. Это представляло радикальный отход от КТП. В теории S-матрицы не существует явного динамического уравнения: можно лишь сравнивать состояние невзаимодействующих частиц после их столкновения с состоянием этих же частиц до столкновения. Это и позволяет сделать S-матрица, которая должна удовлетворять трем основным условиям, а именно, быть: 1) Лоренц-инвариантной, 2) унитарной, 3) аналитической.

Однако, на начальном этапе своего развития программа S-матрицы была столь общей, что не могла дать значительных результатов. Между тем, благодаря настойчивой работе приверженцев квантовой теории поля в течение почти двадцати лет, в конце 40-х годов Швингер, Томонага и Фейнман осуществили программу перенормировки, которая превратила КТП в одну из наиболее успешных из когда-либо созданных теорий.

Тем не менее, важно отметить, что после нескольких лет очевидного триумфа КТП ее последователи оказались в затруднительной ситуации, когда их попытки улучшить теорию слабого взаимодействия Ферми и теорию сильного взаимодействия Юкава не привели к успеху. Если первая теория не поддается перенормировке, то, очевидно, что для работы со второй теорией, в которой постоянная взаимодействия g порядка 15, не подходит теория возмущений.

Именно при этих обстоятельствах, и благодаря неожиданной поддержке со стороны конкурирующей программы - КТП, а именно, с разработкой теории дисперсии, предложенной в 1954 году Гелл-Манном, Гольдбергом и Тиррингом, развитой, затем, в 1956 году Боголюбовым, вновь оживает интерес к программе S-матрицы. По сути дела теория дисперсии дала возможность теоретикам рассчитывать амплитуды рассеивания и устанавливать связи, не зависящие от конкретного механизма взаимодействия. Это давало поддержку программе S-матрицы, и уже в конце 50-х годов большинство теоретиков, занимающихся проблемами взаимодействия элементарных частиц, видели в программе S-матрицы альтернативный подход, который мог бы полностью избавить нас от концептуальных и математических затруднений КТП. В продолжение 60-х годов программа была дополнена различными вспомогательными предположениями, принесшими впечатляющие результаты, в их числе: правила сумм, асимптотическая теория и т.д. Тем не менее, вплоть до конца 60-

⁶ См.: Матрица рассеяния // Физическая энциклопедия. Т. 3. 1992. С. 71.

х не существовало конкретных предсказаний, которые имели бы положительное экспериментальное подтверждение.

Интересно, что в это же самое время КТП, благодаря успешному развитию калибровочных теорий, вышла из периода стагнации. Здесь КТП ждал второй великий триумф в виде исключительного успеха теории электрослабого взаимодействия Салама-Вайнберга и признания квантовой хромодинамики.

В этот момент казалось, что сражение закончилось. КТП вышла победителем. Большинство сторонников теории S-матрицы отказались от ее программ. Но все же осталась горстка упрямцев, которым удалось внести в программу то последнее, что и определило ее дальнейшую судьбу. Все началось с разработок интересных дуальных моделей, предложенных Венциано на базе теории S-матрицы. А затем в 1969 году Намбу, Нельсон и Сэскинд обнаружили, что дуальные модели могут рассматриваться как описывающие движения релятивистской струны. Это было началом теории струн, которая впоследствии стала основной составляющей теории суперструн (ТСС).

Урок, который можно извлечь из этой истории, состоит в том, что зачастую соревнование между конкурирующими исследовательскими программами можно рассматривать скорее как конструктивное, чем как деструктивное. Это значит, что, во-первых, в процессе соревнования конкурирующие исследовательские программы могут оказывать взаимное позитивное воздействие, совершенствуя друг друга. Так, "при разработке теории S-матрицы как независимой теории зачастую направление дальнейшего движения указывала КТП"⁷, и в то же время, только благодаря разработке теории S-матрицы мы смогли понять, что "КТП сама по себе не имеет содержания; это лишь способ вычисления наиболее общих амплитуд рассеивания, которые удовлетворяют аксиомам теории S-матрицы"⁸. Во-вторых, когда соревнование закончено, т.е. одна из соревнующихся исследовательских программ признана победителем, отсюда не следует с необходимостью, что другая программа уничтожена, как это имплицитно подразумевалось в методологии научных исследовательских программ Лакатоса. Более адекватна в данном случае точка зрения Н.Ф.Овчинникова:

"...В классической науке такое соревнование приводило к победе какой-то одной теории. Считалось, что все остальные необходимо просто отбросить как неистинные. В современной ситу-

⁷ Cushing J.T. Op. cit. P. 56.

⁸ Weinberg S. Op. cit. P. 141.

ации такое соревнование ведет к отбору предпочтительной теории, другие же, как правило, не отбрасываются, но остаются в общей системе знания в качестве структурных элементов предстоящего синтеза. Отбор, таким образом, происходит, но этот отбор выполняет другие функции".⁹

Стоит отметить эту методологическую позицию - "не отбрасывать" потерпевшие поражение гипотезы и теории, поскольку в подходящих условиях эти гипотезы и теории при соответствующем улучшении могут вновь послужить прогрессу науки. Так световые корпускулы Ньютона возродились в форме фотонов Эйнштейна. Более того, в свете современного знания, эфир больше не исключается теорией относительности, и на сегодня имеются достаточные основания, чтобы постулировать его существование.¹⁰

Таким образом, конструктивный взгляд на соперничество теорий оправдывает теоретический плюрализм не только при отборе лучшей теории, но также и при использовании конкурирующих идей.

Более того, этот взгляд может быть обобщен до уровня методологического плюрализма, поскольку, мы фактически действительно являемся свидетелями пролиферации методологий науки. Различные методологии не являются обязательно конкурирующими, они могут обнаруживать дружественные отношения и в этом смысле дополнять друг друга. Тогда мы можем сказать, что методология методологических принципов в физике и методология научных исследовательских программ Лакатоса оказываются взаимодополнительными, поскольку, если первая концентрирует внимание на роли регулятивных принципов, то последняя - подчеркивает важность непрерывности, соревнования и упорства в развитии исследовательских программ в соответствии с регулятивными принципами.

3. Возникновение теории суперструн

Теория суперструн возникла из удивительного объединения трех частных теорий: теории струн, теории Калуцы-Клейна и супергравитации. Такое объединение выглядит потому удивительным, что оно приводит к снятию определенных противоречий, которыми страдали каждая из этих теорий в отдельности.

⁹ Овчинников Н.Ф. Указ. соч. С. 265.

¹⁰ См.: Dirac P.A.M. Is There an Aether? // Nature. 1951. N 168. P. 906.

Что же представляют собой эти противоречия?

Из предыдущего раздела мы знаем, что теория струн выросла из исследования дуальных моделей. В начале 70-х годов Намбу предпринимает попытку через развитие теории струн построить теорию сильного ядерного взаимодействия. Затем понятие струны вводится в квантовую хромодинамику, - при этом субатомные частицы рассматриваются не как точки в пространстве, что характерно для традиционных полевых теорий, а как протяженные объекты или струны. Однако, почти сразу же, теория струн столкнулась с затруднениями: как оказалось, реально эти теории имели смысл только либо при 26 измерениях для бозонных струн, либо при 10 измерениях, если теория включала фермионы. Кроме того, эти теории содержали несуществующие частицы - тахионы - и безмассовые частицы со спином 1 или 2, которые не должны были встречаться при сильных взаимодействиях.

Идея, что пространство-время может в действительности иметь больше 4-х измерений вызывает естественное смущение. Тем не менее, эта идея не нова. Еще в начале 20-х годов при попытке объединить гравитационное и электромагнитное взаимодействия в понятиях пространственно-временной геометрии Калуца и Клейн предложили полевую теорию в $(1+4)$ мерном пространстве-времени, т.е. с дополнительным пространственным измерением. Это дополнительное пятое измерение представлялось компактифицированным, размер его был настолько мал, что не существовало способа наблюдать его непосредственно. Кривизна 4-х мерного многообразия создавала гравитацию, а геометрия группы одномерного компактифицированного многообразия определяла вид калибровочной симметрии, соответствующей полю Максвелла, как группу $U(1)$. Многие десятилетия теория Калуцы-Клейна вызывала чисто академический интерес, пока внезапно не была призвана для спасения теорий струн, которые имели смысл лишь при размерностях 10 или 26. Конечно, это был выход, но оставались нерешенными другие из упомянутых нами противоречий. Как исключить тахионы? И как объяснить появление в области сильных взаимодействий безмассовых частиц со спином 2? В 1974 году Шварц и Шерк сделали решающий шаг вперед, суть которого состояла в новой интерпретации теории: частицы с нулевой массой покоя и со спином 2 рассматривались в качестве гравитонов, а теория струн трактовалась как описывающая квантовую гравитацию. Здесь мы подходим к необходимости представить другого претендента на квантовую теорию гравитации, каким в то время была супергравитация.

Супергравитация является собой синтез принципа общей относительности и суперсимметрии. Суперсимметрия представляет собой радикальное и в то же время изящное расширение пространственно-временной симметрии, объединяющее фермионы и бозоны - т.е. разные при всех других подходах классы частиц. Такой вид симметрии ведет, однако, к удвоению числа фундаментальных частиц, так что каждой частице соответствует ее "суперпартнер". Но в качестве компенсации это дает моделям суперсимметричных калибровочных полей огромное преимущество: упрямые ультрафиолетовые расходимости уничтожают друг друга, так что результаты вычислений в случае теории возмущений оказываются конечными.

"В теориях с размерной константой взаимодействия, к которым принадлежит и гравитация, единственным способом устранения расходимостей является их взаимное сокращение. В супергравитации это было продемонстрировано на одно- и двухпетлевом уровне. В высших порядках теории возмущений такого сокращения бесконечностей скорее всего нет".¹¹ Это было действительно огромным прогрессом в квантовой гравитации. Однако, супергравитация страдала другим недостатком: она не давала сколько-нибудь правдоподобной привлекательной модели, более того, она не давала наблюдаемого нарушения четности в случае низких энергий. И даже, если бы мы представили себе, что супергравитация смогла учесть нарушение четности, то обнаружили бы другую неприятную ситуацию: появление частиц с отрицательной вероятностью.¹²

В этих условиях Шварц и Шерк вводят в теорию струн суперсимметрию с целью снятия некоторых противоречий. Это было началом теории суперструн, в которой не было тахионов, безмассовые частицы со спином 1 и 2 следовало рассматривать как соответственно Янг-Миллс калибровочные бозоны и гравитоны. Как таковая, теория суперструн была выдвинута Шварцем в качестве многообещающего подхода к квантовой теории гравитации. Однако, долгое время, вплоть до 1984 года, этот подход не получал должного внимания. Но этот вопрос мы обсудим позднее. В данный момент сконцентрируем свое внимание на поразительном явлении, вырисовывающемся из всего вышеизложенного: полное отсутствие каких-либо наблюдаемых фактов или эк-

11 Барбашов Б.М., Нестеренко В.В. Суперструны - новый подход к единой теории фундаментальных взаимодействий. //УФН. 1986. Т. 150. Вып. 4. С. 492.

12 Энтони С. Суперструны: всеобъемлющая теория? //УФН. 1986. Т. 150. Вып. 4. С. 581.

спериментальных результатов, которые можно было бы взять в качестве исходного эмпирического базиса теории.

Чтобы понять значение этого феномена, следует вспомнить, что любая теория, хотя бы и в своей n -ой версии, далекой от первоначальной проблемы, должна основываться на наблюдаемых или экспериментальных фактах. Даже в области физики элементарных частиц вплоть до стандартной модели, всегда можно было сказать, что "все реже и реже чистая математика за счет совершенствования используемой техники вычисления способна оказаться вместо самого физического явления источником продвижения".¹³ Тем не менее, в 70-х годах физика высоких энергий находилась в необычном состоянии. С одной стороны, стандартная модель оказалась исключительно успешной в области низких энергий вплоть до 1ТэВ или около того, новые эксперименты продолжают подтверждать ее предсказания, и не возникало никаких неожиданностей. С другой стороны, стандартная модель как теория была далека от удовлетворительной: она не давала объяснения относительно семейства фермионов, содержала слишком много произвольных параметров, оставляла незакрытыми огромные бреши в шкалах и, наконец, не в состоянии была включить гравитацию. Поэтому теоретики были поставлены перед необходимостью выхода за стандартную модель, не имея, однако, при этом возможности "разрешить эти вопросы с помощью эксперимента".¹⁴ Именно из этой ситуации появились теории Великого Объединения (ТВО), которые тем не менее исходили из того экстраполяционного факта, что при энергиях порядка 10^{15} ГэВ величины электрослабого и сильного взаимодействий становятся равными; это предполагало, что при 10^{15} ГэВ три негравитационных взаимодействия могут быть представлены в качестве различных проявлений одного универсального взаимодействия. Однако, несмотря на некоторые обнадеживающие результаты, ТВО сохраняют практически все негативные черты стандартной модели. И поэтому поиски объединяющей теории идут за пределами ТВО. Лучшее всего данная ситуация описывается следующим образом:

"Что же мы имеем на сегодняшний день?"

Эксперимент:

-нет признаков распада протона;

13 *Gavroglu K. Research Guiding Principles in Modern Physics: Case Studies in Elementary Particle Physics // Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie. VII. 1976. S. 226.*

14 *Gross D.J. Heterotic String Theory // Particles and the Universe. New York, 1986. P. 1.*

- нет признаков монополей;
- нет признаков аксионов;
- нет признаков суперсимметрии.

Вывод: нет надежных представлений чего либо, не объясняемого стандартной моделью.

Теория: радикальные изменения и новые идеи.¹⁵

Такой теорией, предполагающей "радикальные изменения и новые идеи", и является теория суперструн, которая пытается изучать новую физику совершенно недостижимых энергий Планка (порядка 10^{19} ГэВ), при которых кварки, фотоны и бозоны представляют собой струны с размером порядка 10^{-33} см. Ясно, что при таких условиях физикам не стоит ждать, пока будут произведены измерения на масштабах энергии Планка, чтобы начать разрабатывать свои теории.

То же самое мы можем сказать и в отношении супергравитации. "Особенностью развития квантовой теории гравитации является то, что она носит пока чисто теоретический характер и не опирается на лабораторные эксперименты или астрономические данные. Это обусловлено тем, что в наблюдаемых процессах во Вселенной и в лабораторных условиях квантовые эффекты, связанные с гравитацией, чрезвычайно малы".¹⁶

Начиная с ТВО вплоть до супергравитации и теории суперструн, со все большей очевидностью проявляется то, что теории физики высоких энергий становятся все более чисто теоретическими. Причина этого заключается в том, что в столь продвинутой области физики, какой является физика высоких энергий, мы сталкиваемся с объектами, чьи размеры, время жизни, массы столь далеки от воспринимаемых в обычных условиях, что не только интерпретация наблюдений становится значительно более тонкой, но еще к тому же и получение новых экспериментальных данных, как правило, требует больших затрат и значительного времени. Так, нейтрино было обнаружено спустя 23 года после опубликования гипотезы Паули, W и Z частицы открыли через 17 лет после опубликования модели Салама-Вайнберга. Возможно, лишь на средних масштабах, между микроскопическим и космическим имеет смысл задаваться вопросом о том, имеет теория в качестве своей изначальной точки экспериментальный факт или не имеет.

¹⁵ Казаков Д.И. Указ. соч. С. 562.

¹⁶ Квантовая теория гравитации // Физическая энциклопедия. Т. 2. М., 1990. С. 245.

4. Развитие теории суперструн

В течение последующих десяти лет теория суперструн рассматривалась как представляющая главным образом академический интерес для нескольких "упрямцев". Прозрение пришло летом 1984 года, когда Шварц и Грин обнаружили, что опасные гравитационные и калибровочные аномалии устраняются в частном случае калибровочной симметрии группы $SO(32)$. С этого времени в физике высоких энергий появляется "мода" на теорию суперструн. Активная разработка в последующее десятилетие теории суперструн приводит к следующим важным результатам:

1. Было показано, что круг самосогласованных суперструнных теорий очень узок: аномалии сокращаются в том и только том случае, когда калибровочная симметрия соответствует группе $SU(32)$ или группе $E_8 \times E_8$. Впервые теория, а не наблюдения определяла ту или иную калибровочную группу как основную.

2. Круг феноменологически привлекательных теорий еще меньше. На сегодня лишь одна теория, "гетерозисная" теория суперструны, предложенная Гроссом, Харвейем, Мартинесом и Ромом на основе группы симметрии $E_8 \times E_8$, подает на это надежды.

3. Впервые теория фиксирует пространство-время десяти измерений, и пытается дать динамическое объяснение четырехмерности нашего обыденного мира.

4. Есть все основания полагать, что теория будет конечной в теории возмущений любого порядка. "В том случае, если такое суперобъединение на базе супергравитационной модели [т.е. суперструны], для которой будет доказано отсутствие УФ-расходимостей, произойдет, то будет построена единая теория всех четырех фундаментальных взаимодействий, свободная от бесконечностей. Тем самым окажется, что УФ-расходимости не возникнут вообще, и весь аппарат исключения расходимостей методом перенормировок окажется ненужным".¹⁷

5. Теория суперструн практически свободна от параметров, т.е. "в идеальном случае теория будет включать всего два фундаментальных параметра: натяжение струны T и одну из констант Янг-миллсовского или гравитационного взаимодействия суперструн".¹⁸

Все эти достижения делают теорию суперструн исключительно привлекательной. Следует, однако, подчеркнуть, что "не

¹⁷ Квантовая теория поля // Физическая энциклопедия. Т. 2. М., 1990. С. 308.

¹⁸ Барбашов Б.М., Нестеренко В.В. Указ. соч. С. 520.

существует даже и тени намек на экспериментальное подтверждение теории струн... Никогда еще столь блестящий математический аппарат не был создан физиками при столь слабой экспериментальной поддержке.¹⁹

И здесь возникает естественный вопрос: чем же все-таки руководствуются теоретики в столь затруднительном предприятии? Это, как мы попытаемся показать, определяется соответствием теории важнейшим методологическим принципам, таким как 1) согласованность, 2) единство, 3) симметрия, 4) простота, 5) математизации, 6) соответствие.

Согласованность: фактически, внутренняя согласованность является движущей силой программы суперструн. Мы уже видели, что впервые теория суперструн была предложена в качестве попытки преодолеть некоторые противоречия обычной теории струн. Позднее она привлекла внимание, когда Шварцом и Грином была предложена полностью самосогласованная модель на основе группы симметрии $SO(32)$. Впервые, и это общепризнано, именно теория суперструн предлагает согласованную и даже конечную теорию гравитации. Вслед за Лакатосом мы можем сказать, что теория суперструн представляет собой исследовательскую программу, которая развивается при полной согласованности в вакууме экспериментальных фактов, в то время, как, например, квантовая теория Бора является исследовательской программой, которая развивается из несамосогласованных оснований, но обладает исключительной экспериментальной подтверждаемостью. Конечно, обе программы соответствуют критерию прогрессивности Лакатоса. Следует однако вспомнить, что вплоть до сегодняшнего дня теория суперструн является прогрессивной в чисто теоретическом плане, и ее можно взять в качестве конкретной иллюстрации утверждения Лакатоса, согласно которому "направление развития науки определяется в первую очередь творческим воображением человека, а не совокупностью окружающих его фактов".²⁰

Единство: Очевидно, что стремление к единству одно из основных мотивов, приведших к созданию теории суперструн. Здесь нам хотелось бы привлечь внимание к двум моментам. Во-первых, хотя ретроспективно мы можем сказать, что идея единства возникла давно: она успешно проводилась в уравнениях Максвелла, играла ведущую роль при разработке Эйнштейном единой теории поля - тем не менее, реальное и последовательное

¹⁹ Weinberg S. Op. cit. P. 143.

²⁰ Lakatos I. Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes // Criticism and the Growth of Knowledge. Cambridge, 1970. P. 187.

воплощение эта идея получила только в последние десятилетия, начиная с неоспоримого успеха теории электрослабого взаимодействия Салама-Вайнберга. Стандартная модель, ТВО, супергравитация, суперструны - все эти различные теории развиваются в одном направлении, к единству. Во-вторых, обычно считалось, что вера в единство носит метафизический характер, не имеющий основания с точки зрения науки. Тем не менее, с возникновением и развитием упомянутого выше стремления к единству можно заключить, что эта метафизическая вера находится в стадии превращения в научную. "Каждый шаг на пути единения требует разрешения конкретных физических проблем и служит поэтому важной цели. Тем самым стремление к единству переводится из религиозной догмы в ранг научного принципа".²¹

Симметрия: Можно сказать, что симметрия это базисная стратегия, выбираемая теоретиками для проникновения в глубины материи, в игру ее составляющих и их взаимодействий. Стратегия симметрии тесно связана с идеей единства. На сегодняшний день общепризнано, что симметрия ведет к единству, а нарушение симметрии к множественности. Поэтому поиск новых симметрий лежит в одном направлении со стремлением к единству. Все это хорошо известно. Здесь хотелось бы подчеркнуть следующий момент: в то время как вера в единство выглядит все более и более научно обоснованной, симметрия оказывается не только средством, но становится скорее целью физики высоких энергий.

"Природа не может быть расписана на отдельные, независимые составляющие и действующие между ними силы. Следует заменить данное представление более общим. Таким представлением, одновременно более фундаментальным и в то же время более абстрактным, являются калибровочные поля... Практически бесконечное число математически возможных калибровочных полей ограничивается формами симметрии этих полей. Поэтому возможно, что первичными элементами описания и понимания природы могут стать скорее не крохотные, неразложимые далее кирпичики материи, а абстрактные представления, такие как симметрии".²²

Если данный взгляд справедлив, то здесь обнаруживается важный сдвиг от представления о фундаментальной частице к представлению о фундаментальной симметрии. Конечно, относи-

²¹ *Beg M.A.B. Scalar Sector of Gauge Theories and the Quest for a Unified Theory // Particles and the Universe. N.Y., 1986. P. 76.*

²² *Schopper H. Elementary Particle Physics: Where Is It Going // CERN Yellow Reports. 82-08. 1982. P. 11.*

тельно этого пункта физики, как и философы, еще не пришли к единому мнению, однако, введение для описания кварков, лептонов и бозонов представления о струнах указывает, что физики озабочены скорее не поиском фундаментальных частиц, а поиском фундаментальных симметрий. Хотя до сих пор остается неясным, какие симметрии лежат в основании теории суперструн. Теоретики еще пока ищут принцип, который был бы аналогом принципа эквивалентности в общей теории относительности, но формулировался в пространстве струнных конфигураций.

Простота: Мы полагаем уместным принять здесь попперовский взгляд на простоту: "Она представляет собой меру отношения вход/выход: некая гипотеза проще другой, если для получения предсказания с заданной точностью ей требуется меньше начальных условий, или если она дает более точное предсказание при фиксированном наборе начальных условий".²³ Именно этот критерий простоты привел ученых к убеждению, что стандартная модель так же как и ТВО в качестве теорий далеки от удовлетворительных. Было ясно, что стандартная модель и ТВО, несмотря на их значительные успехи, потеряли простоту под тяжестью груза слишком большого количества произвольных параметров и объяснений ad hoc. В определенной степени эти соображения заставили теоретиков выйти за пределы данных теорий. Тут мы должны сделать два замечания. Первое, мы имеем здесь случай, когда критерий простоты используется не для сравнения двух существующих теорий, а скорее для сравнения реально существующей теории и другой, "идеальной теории", которую физики рисовали себе в воображении. Второе замечание состоит в том, что в значительной мере, как мы уже видели ранее, именно представления о простоте, а не опровержение или экспериментальный факт указывают нам, что эта теория должна быть заменена. Т.е. в данном конкретном случае кроме своей обычной роли в качестве критерия при отборе теории, простота может играть роль критерия, указывающего на необходимость смены теории. Именно требование простоты направляет ученых к теории суперструн, чья простота кажется неоспоримой (см. указанные выше преимущества теории суперструн).

Математизация: Хорошо известно, что математика является языком подтверждения так же как и языком открытия, однако принято считать, математический аппарат может быть построен только тогда, когда с достаточной ясностью установлены физи-

²³ Цитируется по: *Gavroglu K. Research Guiding Principles in Modern Physics: Case Studies in Elementary Particle Physics // Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftslehre. VII. 1976. S. 244.*

ческие понятия и принципы теории. Такая точка зрения ясно выражена в анализе И.С.Алексеева, когда он представляет развитие научной теории, как состоящей из трех последовательных стадий: эмпирической, математической и онтологической.²⁴ Однако в случае теории суперструн мы сталкиваемся с необычной ситуацией. Теоретики не располагали новыми экспериментальными результатами, еще не были сформулированы исходные физические принципы, лежащие в основании теории, в то время как математический аппарат теории суперструн уже достиг более высокого уровня, чем это имело место в теориях до сих пор.²⁵ Никогда еще до этого математика не играла столь доминирующей роли как в теории суперструн. Настолько доминирующей, что Глэшоу высказывал даже опасение потерять целое поколение исследователей физики высоких энергий, вследствие того, что студенты по его словам уделяли внимание исключительно математическим расчетам, а не экспериментам, хотя именно экспериментальное начало составляет специфику физического познания.²⁶

Как бы то ни было, нельзя отрицать того факта, что для теории суперструн математика дала исключительно много. Можно сказать, что в данном конкретном случае ее "необъяснимая эффективность" проявляется со всей очевидностью. Вероятно этим объясняется следующее замечание Гросса: "До сих пор эти теории были построены несколько в манере *ad hoc*, а формализм, по не до конца понятным основаниям, порождал структуры, кажущиеся сверхъестественными".²⁷

Мы полагаем, что связь между математическим аппаратом и физическим содержанием в теории суперструн заслуживают особого внимания.

Соответствие: Естественно, что "слишком теоретический" характер теории суперструн не был не замечен, теоретики ясно отдавали себе в этом отчет и делали все возможное для установления связи между теорией суперструн и реальным миром. Следовало, в первую очередь, объяснить динамику компактификации, которая закручивает шесть лишних измерений, оставляя

²⁴ Алексеев И.С., Овчинников И.Ф., Печенкин А.А. Методология обоснований квантовых теорий. М., 1984. С. 326.

²⁵ Интересно, что Е.Уиттен, один из пионеров теории струн, был удостоен премии Филда, которая соответствует Нобелевской премии в области математки.

²⁶ Цитируется по: *Shrader-Frechette K.S. Quark Quantum Numbers and the Problem of Microphysical Observation // Synthese. 1982. Vol. 50. P. 18.*

²⁷ *Gross D.J. Op. cit. P. 18.*

лишь привычное четырехмерное пространство-время. Далее следовало объяснить, как происходит нарушение калибровочной симметрии до $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, как происходит нарушение суперсимметрии и т.д., т.е. каким образом обеспечивается согласно принципу соответствия стыковка с теориями низких энергий. Это представляет действительно сложную задачу, и физики активно работают в указанном направлении, особенно в случае многообещающей в феноменологическом плане гетерозисной теории струн с группой $E_8 \times E_8$.

Суммируя сказанное, можно сказать, что между методологическими принципами и теорией суперструн существует определенное взаимодействие. С одной стороны, методологические принципы продолжают выполнять функцию регулятивных принципов в строении теории суперструн. С другой - обстоятельства исследования, так же как и содержание новой физики в недостижимой области планковских энергий, оказывают значительное влияние на роль и взаимоотношения этих принципов.

В итоге, если мы соединим единство, симметрию, простоту в единый критерий, и назовем его красотой, то нам удастся провести другое интересное методологическое рассмотрение, как это было выполнено Е.А.Мамчур в ²⁸. Сосредотачивая свое внимание в основном на некоторых эпизодах из истории физики элементарных частиц вплоть до стандартной модели, Е.А.Мамчур стремится обосновать мысль о том, что имеющая место в науке тенденция к оптимизации теорий независима по отношению к стремлению теории к большей эмпирической адекватности и дополнительна к нему.²⁹

Развитие теории суперструн является свидетельством справедливости этого утверждения.

5. Заключительные замечания

Проведенный анализ позволяет нам поставить ряд вопросов, заслуживающих внимания с точки зрения методологии.

Первый вопрос, представляет ли теория суперструн пример интенсивного развития, или она является продолжением экстенсивного развития основных положений КТП? Напомним, что развитие будет называться экстенсивным, если теория стре-

²⁸ Mamchur E. The Heuristic Role of Aesthetics in Science // International Studies in the Philosophy of Science. 1987. Vol. 1. N 2.

²⁹ Ibid. С. 222.

миться расширить область приложения. В этом случае на определенной стадии теория достигнет предела своей приложимости. Если мы принимаем лакатосовскую методологию научной исследовательской программы, то мы можем сказать, что развитие является экстенсивным, когда оно прогрессирует в рамках основных положений исследовательской программы с "неприкосновенным" твердым ядром. Развитие может рассматриваться как интенсивное, когда исследовательская программа достигает точки своего "естественного насыщения", и от нее отказываются в пользу более молодой и лучшей программы с новым твердым ядром. С этой точки зрения развитие физики высоких энергий от КТП до ТВО является экстенсивным с неизменным твердым ядром, характеризующимся следующими составляющими: операторами квантовых полей, правилами канонической коммуникации, уравнениями движения Лагранжа и локальной калибровочной инвариантностью. Если применить этот критерий к оценке теории суперструн, ситуация оказывается неопределенной. С одной стороны, ее развитие выглядит исключительно экстенсивным, поскольку теоретики продолжают работать в теории суперструн с аппаратом КТП, все еще надеясь найти подходящее вторичное квантование в теории суперструн. С другой стороны, ясно, что с введением суперсимметрии, десятимерного пространства-времени, струн, теория суперструн оказывается примером интенсивного развития, радикального отхода от квантовой теории поля. Поэтому необходимо попытаться дать ответ на поставленный вопрос. Скептическую позицию в этом вопросе занимает Вайнберг: "Хотя и полагают, будто теория струн лучше квантовой теории поля, для меня не является очевидным, что лучшей стратегией в данном случае будет стремление сделать теорию струн как можно более похожей на теорию поля, только со струнами вместо частиц, что и составляет на мой взгляд суть вторичного квантования".³⁰

Второй вопрос состоит в следующем, подходим ли мы вследствие развития теории струн, понимаемой в качестве будущей всеобщей теории, к концу физики частиц? Стоит рассмотреть этот вопрос, поскольку есть физики и философы, верящие в позитивный ответ.

Почти восемьдесят лет тому назад В.И. Ленин предсказывал, что электрон так же неисчерпаем как и атом. Суть его идеи сохраняет свое плодотворное методологическое значение и в отно-

³⁰ Weinberg S. Op. cit. P. 143.

шении теории суперструн. И мы полагаем, что это останется справедливым и для будущего.

В этой связи прав был Поппер, когда говорил, что "наука никогда не преследует иллюзорную цель сделать свои ответы окончательными или даже возможными. Ее движение направлено скорее к бесконечной, но тем не менее достижимой цели дальнейшего открытия новых более глубоких и более общих проблем и преданию своих, даже испытанных, ответов вновь обновленным и еще более жестким проверкам".³¹

И третий вопрос. Игра физики, говоря словами Поппера, управляется наборами правил - методологическими принципами - и эта игра не имеет конца. Если мы обратимся к возникновению и развитию теории суперструн, можно спросить: не пора ли изменить правила игры? Преобразовать их или дополнить? Проведенный анализ показывает, что для того, чтобы методологические принципы смогли справиться с неожиданностями последующего развития науки, необходимо их пересмотреть и дополнить.

Пер. с англ. А.А.Пармонов

³¹ *Popper K.R. The Logic of Scientific Discovery. London, 1959. P. 281.*

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
АКЧУРИН И.А. Концептуальные основания новой - топологической физики	5
АХУИЦОВ М.Б., БАЖЕНОВ Л.Б. Философское понятие материи и развитие физики элементарных частиц.....	24
БРАНСКИЙ В.П. Квантово-полевой и хроногеометрический отходы в теории элементарных частиц.....	42
ГРИБАНОВ Д.П. Эйнштейновская концепция физической реальности.....	58
ДУБРОВСКИЙ В.И. Новая концепция пространства-времени на планковских масштабах расстояний.....	73
ЖДАНОВ Г.Б. Частицы, поля и вселенные.....	87
ИЛЛАРИОНОВ С.В., МАМЧУР Е.А. Принципы симметрии в физике элементарных частиц	104
КОБЗАРЕВ И.Ю. Присутствуем ли мы при кризисе базисной программы парадигмы современной теоретической физики?.....	124
МОЛЧАНОВ Ю.Б. Современные аспекты проблематики ЭПР-парадокса.....	129
ПАХОМОВ Б.Я. Детерминизм, критерий тождества, проблема объективной реальности в квантовой теории.....	147
ПАНЧЕНКО А.И. Теорема Белла и реалистические интерпретации квантовой теории	168
САЧКОВ Ю.В. Вероятность, структура, нелинейность.....	185
ФАМ ДО ТЬЕН Некоторые методологические проблемы современной физики высоких энергий.....	199

Научное издание

**ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
(тридцать лет спустя)**

В авторской редакции
Художник *В.К.Кузнецов*
Корректор *Н.П.Юрченко*

Лицензия ЛР № 020831 от 12.10.93 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 16.08.94.
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 13,62. Уч.-изд.л. 13,33. Тираж 500 экз. Заказ № 052.

Оригинал-макет подготовлен к печати
в Институте философии РАН
Оператор *Л.Д.Бурсулая*
Программист *Т.В.Прохорова*

Отпечатано в ЦОП Института философии РАН
119842, Москва, Волхонка, 14