
К НЕКОТОРЫМ АСПЕКТАМ РЕЛЯЦИОННОГО ПОДХОДА В ФИЗИКЕ

С.В. Болохов

Российский университет дружбы народов

Рассматривается ряд аспектов реляционного подхода к построению теории пространства-времени и физических взаимодействий. Обсуждается круг вопросов, связанных с трактовкой базовых понятий и предпосылок данного подхода. Дается краткий обзор результатов и возможных дальнейших перспектив реляционной теории. Проводится ряд параллелей и аналогий с другими существующими подходами.

Ключевые слова: реляционный подход, пространство-время, гравитация, фундаментальные взаимодействия.

1. Исторический аспект

На рубеже XIX и XX столетий физическая наука претерпела существенный концептуальный перелом, ознаменовавшийся появлением двух главенствующих фундаментальных теорий – квантовой механики и теории относительности, под знаком которых происходило всё дальнейшее развитие теоретической физики в течение последующего столетия. Развитие формализма квантовой теории поля, в конечном итоге приведшее к формулировке Стандартной модели в физике элементарных частиц, позволило достичь существенного прогресса в понимании и описании фундаментальных взаимодействий в масштабах микромира, равно как и успехи специальной и общей теории относительности позволили обнаружить и описать нетривиальные свойства пространства-времени на макро- и мега-(космологических) масштабах.

На волне развития квантовых и релятивистских представлений физика подошла практически вплотную к тому, чтобы содержательным образом поставить вопрос о генезисе пространства-времени и его глубинной связи со структурой физических взаимодействий. Важным шагом на этом пути оказалась идея построения объединенных теорий, в которых все известные виды физических взаимодействий¹ оказались бы предельными случаями некоторой обобщенной конструкции – «единого взаимодействия», будучи частными формами его проявления на тех или иных энергетических и пространственно-временных масштабах.

Первоначально данная идея зародилась в 20-х гг. XX в. в рамках попыток объединения гравитации и электромагнетизма. Речь здесь идет в первую

¹ Исходно подразделяемые на 4 вида: электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное.

очередь о 5-мерной теории Калуцы (и более поздних моделях типа Калуцы–Клейна). Данная теория легла в основу так называемого геометрического подхода к объединению взаимодействий на основе многомерной гравитации, что соответствует расширению парадигмы общей теории относительности на случай негравитационных взаимодействий. Другая линия построения объединенных моделей, восходящая к теоретико-полевой парадигме, – так называемый калибровочный подход – получила развитие во второй половине XX в. с созданием неабелевых калибровочных теорий Янга–Миллса, кульминацией чего явилось построение Стандартной модели сильных и электрослабых взаимодействий Вайнберга–Салама–Глэшоу, основанной на так называемой минимальной калибровочной группе $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Отметим, что получившие в настоящее время большую популярность теория суперструн и М-теория в контексте задачи объединения взаимодействий могут рассматриваться как своеобразные попытки синтеза идей и принципов геометрического и калибровочного подходов.

Отмеченные успехи в развитии парадигмы квантовой теории поля (КТП) и общей теории относительности (ОТО) привели в то же время к более рельефному осознанию ряда концептуальных проблем, присущих этим теориям. Из исторически наиболее значимых трудностей назовем две: проблема расходимостей в КТП, частично решаемая в рамках процедуры перенормировок, а также проблема квантования гравитации, связанная с невозможностью полноценного и самосогласованного применения к ней стандартной рецептуры квантования, хорошо работающей в отношении других видов взаимодействий.

В настоящее время всё большее число ученых склоняется к выводу, что многолетние безуспешные попытки разрешения указанных вопросов в рамках стандартного квантового теоретико-полевого подхода и парадигмы ОТО указывают на то, что мы вплотную приблизились к границам применимости этих теорий. По-видимому, в первую очередь это связано с необходимостью переосмысления традиционных представлений о природе и сущности пространства-времени на микро- (а возможно, и макро-) масштабах.

Идея неприменимости классического понятия пространства-времени в микромире высказывалась достаточно давно [1–3]. Распространенным аспектом этой идеи является понятие планковских масштабов (10^{-33} см, 10^{-43} с), на которых, как считается, классическое понимание пространства-времени как непрерывно-гладкого фонового многообразия теряет смысл из-за присущих ему квантовых флуктуаций, уступая место таким гипотетическим конструкциям, как графы, спиновые сети, пространственно-временная пена и др.

Отметим, что трудности с классическим пространством-временем в микромире начинаются еще до планковских масштабов, уже на уровне попыток приписать элементарным частицам пространственно-временную локализацию. Так, сочетание принципа неопределенности Гейзенберга с релятивистскими ограничениями по скорости света и возможностью спонтанно-

го рождения пар приводит к невозможности приписать универсальный и операционально разумный смысл понятию координаты электрона и фотона [2].

Трудности с диаграммными расходимостями в КТП являются в определенном смысле обратной стороной существенно *локального* формализма данной теории, формулируемого на непрерывном пространственно-временном фоне и вследствие этого содержащего в структуре петлевых диаграмм члены, отвечающие фурье-образам формально бесконечных произведений сингулярных обобщенных функций в совпадающих точках пространства-времени [4].

В связи с этим отметим, что представление о сугубо локальном характере взаимодействий, по-видимому, также требует определенного переосмысления ввиду экспериментально открытых и теоретически обоснованных эффектов квантовой нелокальности (квантовые корреляции, парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена, эффект Ааронова–Бома и др.).

Таким образом, в спектре проблем современной теоретической физики уже достаточно давно назрел вопрос о природе и сущности пространства-времени, возможностях его квантования и выявления пределов применимости традиционных пространственно-временных представлений, опирающихся на геометрию гладких римановых многообразий, при изучении микромира.

2. Реляционный подход: общая проблематика

2.1. Реляция и субстанция

Сложившаяся традиция рассматривать физическое пространство-время как некоторый непрерывный фон, на котором развёртывается динамическая эволюция погруженных в него физических систем, исторически соответствует так называемой *субстанциальной трактовке* пространства-времени. При этом пространство-время мыслится в качестве некоторой онтологически самостоятельной категории (субстанции) – «вместилища» материи и полей. Наиболее четкое воплощение эта идея получила в рамках ньютоновской концепции абсолютного пространства и времени, и позднее, несколько ослабившись и преломившись в релятивистской картине мира, была так или иначе унаследована как в теоретико-полевой, так и в геометрической парадигме (классическая и квантовая теория поля, общая теория относительности, теория суперструн, супергравитация, М-теория и др.).

Иной взгляд, исторически восходящий, в частности, к Лейбницу, предписывает мыслить пространство-время как некоторую специфическую *систему отношений* (relations) между материальными объектами. Данный подход именуется *реляционной трактовкой* пространства-времени. Согласно ей пространство-время уже не является онтологически независимой от материи категорией; оно представляет собой, скорее, некоторый эмерджентный феномен, порождаемый всей совокупностью взаимодействующих материаль-

ных систем. Правда, в такой обобщенно-философской формулировке кроется некоторая проблема, связанная с необходимостью четкого определения понятия материи и его дефинитивного отграничения от того, *что* оно призвано порождать. В рамках физических теорий данная трудность может быть обойдена путем конкретного постулирования перечислимого множества исходных «материальных» элементов (например, систем элементарных частиц) и конструктивным предъявлением механизма, порождающего пространственно-временные характеристики в ансамблях соответствующих систем в некотором усредненно-статистическом пределе, аналогично тому, как в термодинамических системах возникает понятие температуры.

Стоит отметить, что уже в ходе создания специальной теории относительности прослеживается некоторый крен (не тотальный) в сторону реляционного понимания пространства-времени. СТО строится на операционалистской методологии, придавая всем пространственно-временным понятиям (таким как отношение одновременности, расстояния и промежутки времени и т.п.) определенный смысл в рамках конкретных измерительных процедур на множестве событий или материальных объектов, имеющих в рамках заданной системы отсчета наблюдателя. А в общей теории относительности уже появляется идея прямого влияния материи на геометрию пространства-времени, которое, впрочем, пока еще мыслится как гладкое псевдориманово многообразие со своей внутренней кривизной и динамическими степенями свободы. Здесь необходимо также отметить существенную роль принципа Маха, которым руководствовался Эйнштейн при создании ОТО. Напомним, что принцип Маха в одной из его классических формулировок состоит в утверждении, что инертно-гравитационные свойства материальных тел обусловлены влиянием всей остальной материи во Вселенной.

Несмотря на отдельные всплески интереса к реляционной идеологии в разные периоды развития физики, в исторической ретроспективе последовательное и строгое воплощение реляционного подхода к пространству-времени оказывалось затруднительным, уступая позиции субстанциальному подходу. В его рамках достаточно продуктивным показало себя понятие *поля* и сопутствующей ему концепции близкодействия, на основе которой удалось применить мощный аппарат математического анализа и дифференциальных уравнений для построения эффективных физических теорий. Тем не менее на современном витке эволюции научных представлений ввиду вышеописанных концептуальных проблем дальнейшее развитие этих теорий, по-видимому, должно столкнуться с необходимостью учета ряда аспектов реляционной парадигмы.

2.2. Дискретность

Интересным вопросом является то, влечет ли реляционный подход в самой общей постановке, описанной выше, с необходимостью *дискрет-*

ность пространства-времени на микромасштабах?² Возможно, интуитивно ответ на этот вопрос может показаться положительным. Однако внимательный анализ обнаруживает, что здесь возможны варианты.

Если пространство-время объявляется некоторой совокупностью отношений на порождающем множестве объектов (условно названных «материальными»), то вопрос сводится к тому, какого рода независимые комбинации свойств, элементов или подмножеств данного материального множества могут быть расценены как «отношения», релевантные идее пространства-времени и конституирующие его на макроуровне. Неоднозначность в трактовке термина «отношение» порождает здесь целый набор спекулятивных возможностей. Допустим, что множество «материальных объектов» счетно, а понятия «точек» пространства-времени возникают из некоторой процедуры, вовлекающей в себя произвольное подмножество данного материального множества. Известно, что семейство таких подмножеств образует континуум. В итоге мы приходим к логически непротиворечивой картине, когда счетное множество «материальных» объектов, исходя из системы внутренних отношений между совокупностями всех своих подмножеств, порождает континуально-непрерывную структуру под условным названием «пространство-время».

Более того, опираясь всего лишь на *конечное* множество порождающих элементов, но включив в понятие «отношение» их произвольные счетно-бесконечные комбинации, можно сформировать структуру, изоморфную континууму³. Таким образом, одна лишь ничем не ограниченная идея порождения пространства-времени некоторыми мыслимыми конструкциями на множествах материальных объектов, строго говоря, еще не влечет автоматически его дискретности. О таковой можно говорить лишь после конкретизации термина «отношение» и спецификации порождающего множества.

Однако в силу отмеченных выше проблем, связанных с трудностями локальных теорий поля, измеримостью и точечной локализацией элементарных частиц, вероятным существованием планковского предела и т.д., представляется методологически разумным при построении фундаментальной теории абстрагироваться от слишком сильного требования свойства гладкости (континуальности) пространственно-временного многообразия, сосредоточившись на поиске такого класса реляционных моделей, в которых бы указанное свойство не являлось априорным допущением или неизбежным

² В данном случае под дискретностью понимается возможность представить пространство-время как некоторое множество «точек» с мощностью, не большей мощности счетного множества. Иногда термин «дискретность» понимают как синоним квантованности, что, в свою очередь, в применении к пространству-времени трактуют как ситуацию наличия некоторой минимальной измеримой (фундаментальной) длины; этот случай здесь не анализируется.

³ Здесь имеется непосредственная аналогия с тем, что любое вещественное число (каковых, как известно, континуум) можно выразить некоторой в общем случае счетно-бесконечной последовательностью всего лишь из нескольких различных цифр, количество которых определяется основанием системы счисления.

логическим следствием. Это соответствует переориентации на построение *фоново-независимых* физических теорий, не подразумевающих в своих логических основаниях постулата об изначальном наличии пространственно-временного фона (но, возможно, восстанавливающих его в рамках предельных статистических процедур).

Представляется, что термин «реляционный подход» приобретает содержательное смысловое отличие от субстанциального подхода в контексте поиска именно такого рода фоново-независимых теорий.

2.3. Поля

Отказ от априорного наличия гладкого пространственно-временного многообразия влечет необходимость переосмысления понятия классического *поля-переносчика* взаимодействия как непрерывной функции на точках данного многообразия, а вместе с ним и концепции *близкодействия*, неразрывно связанной с представлением о характере распространения взаимодействий через ряд бесконечно близких точек пространственно-временного континуума.

Здесь, однако, также есть свой нюанс. С формально-математической точки зрения понятие *непрерывности* (точнее, непрерывных отображений, частным случаем которых являются полевые функции) можно формулировать для произвольных топологических пространств вне зависимости от того, являются ли они гомеоморфным евклидовым пространством R^n (континуумам) или нет. Известно также, что для задания непрерывной числовой функции достаточно определить её на всюду плотном множестве точек (например, рациональных), которое может быть всего лишь счетным, не образуя континуума.

Поэтому отказ от свойства континуальности пространственно-временного фона, строго говоря, еще не влечет отказа от возможности построения на нем теоретико-полевых конструкций, апеллирующих к языку непрерывных отображений. Кроме того, выглядит допустимой возможность построения варианта теории поля в рамках *конструктивистского* направления математики, не предполагающего актуальное существование континуума. Наконец, на примере так называемой квантовой теории поля на решетке можно проследить достаточно эффективное использование теоретико-полевых представлений в рамках некоторых дискретных аппроксимаций пространства-времени.

Поэтому следует подчеркнуть, что отмеченная необходимость переосмыслить в рамках реляционной парадигмы понятие классического поля-переносчика взаимодействий носит *методологический* характер, будучи сопряженной с назревшей идеей переосмысления всего совокупного контекста физических представлений и теорий XX столетия, опирающихся в своей основе на традиционный формализм классической теории поля на гладких многообразиях. Ключевой установкой при этом должно являться очерчивание границ применимости данного формализма и его возможных расшире-

ний или модификаций на пути к построению фоново-независимой фундаментальной теории.

В этой связи отмеченные выше возможные способы сохранить (наряду с отказом от континуального пространственно-временного фона) стандартные теоретико-полевые конструкции на чисто формальных основаниях, связанные с топологической трактовкой понятия непрерывности, ограничением на счетные множества, привнесением конструктивистских мотивов и т.д., представляются родом спекулятивных приемов, неоправданно сильно ограничивающих потенциальные возможности реляционной парадигмы. Её учет был бы при этом чисто номинальным, во всех же прочих интенциях и следствиях сохранялся бы дух субстанциального подхода с органически присущими ему теоретико-полевыми понятиями, не содержащими существенной концептуальной новизны. Тогда как последовательное раскрытие возможностей реляционного подхода видится прежде всего в таком переосмыслении и модификации теоретико-полевых конструкций, которые бы отвечали центральной идее данного подхода – идее статистической порождённости макроскопических феноменов некоторой фундаментальной системой отношений между элементами взаимодействующих микроскопических систем. Концепция классического поля при этом не является исключением: в последовательном реляционном подходе поле следует трактовать как *вторичный* объект наряду с вторичностью его носителя – пространства-времени. При этом традиционное понятие поля должно восстанавливаться в ходе некоторой предельной статистической процедуры вместе с макроскопическим пространством-временем.

Таким образом, в реляционном подходе на смену понятию классического поля как непрерывной функции точек пространства-времени приходит понятие *эффektivного* поля как функции некоторой системы отношений между взаимодействующими материальными объектами, обретающей привычный полевой смысл лишь в континуально-статистическом пределе. Подчеркнем, что в данном случае речь идет в первую очередь о классических бозонных *полях-переносчиках взаимодействий* (квантами которых являются, например, фотоны, глюоны и калибровочные W^\pm и Z^0 -бозоны). Отмечая этот факт, мы тем самым на данном этапе обходим одну тонкость, состоящую в том, *что* понимать под упомянутыми выше «взаимодействующими материальными объектами». Ведь, к примеру, в рамках стандартного теоретико-полевого подхода не только взаимодействия, но и вообще *всякая* материя есть поле (в частности, электроны суть проявление фермионного поля Дирака). Поэтому с точки зрения КТП попытка представить поле *вообще* как нечто, вторично порожденное системой отношений внутри «материи», которая при этом тоже является полем, выглядела бы тавтологичной. Это вполне отвечает тому, что в квантово-полевой парадигме понятие поля является фундаментальной первичной категорией. Всё это означает, что последовательная реляционная трактовка полей и материи должна строиться на независимых от теоретико-полевого подхода основаниях.

2.4. Теория Фоккера–Фейнмана–Уилера

По-видимому, исторически первой успешной попыткой реализовать идею эффективного поля, совместимую с требованием релятивистской инвариантности, стал подход *прямого межчастичного (электромагнитного) взаимодействия*, предложенный в ранних работах Тетроде, Фоккера, Шварцшильда и позже усовершенствованный Фейнманом и Уилером [5, 6]. В рамках данного подхода в качестве лагранжевого функционала действия для пары взаимодействующих точечных заряженных частиц i и k берется величина, пропорциональная интегралу от произведения $u_{\mu(i)}u^{\mu(k)}$ 4-скоростей этих частиц, умноженных на дельта-функцию Дирака $\delta(s_{ik}^2)$ от квадрата релятивистского интервала s_{ik}^2 между точками мировых линий этих частиц. Интегрирование ведется по элементам ds_i, ds_k мировых линий выбранной пары частиц в пространстве Минковского. Произведение 4-скоростей является отражением известной в физике идеи ток-токового взаимодействия⁴, а роль дельта-функции состоит в ограничении взаимодействия нулевой поверхностью светового конуса, что обеспечивает релятивистскую инвариантность теории и учет эффектов запаздывания, отвечающих «распространению» электромагнитного влияния с конечной скоростью света. Однако подчеркнем, что данная теория принадлежит к классу теорий *прямого* межчастичного взаимодействия, не содержащих в своей структуре независимого понятия поля как локального посредника между взаимодействующими частицами (как это имеет место в концепции близкодействия). Вместо этого в данном классе теорий имеет место своеобразное дальнодействие – прямое влияние удаленных частиц друг на друга, описываемое релятивистски-инвариантным ток-токовым взаимодействием в лагранжиане.

Здесь необходимо особо подчеркнуть, что термин «дальнодействие» в данном случае следует трактовать не в смысле какого-либо мгновенного действия на расстоянии (что противоречило бы релятивистской причинности), а в смысле дальнодействия *на световом конусе*. Актам взаимодействия отвечают лишь те точки-события на мировых линиях частиц, которые находятся в релятивистском «контакте», то есть квадрат пространственно-временного интервала между ними равен нулю: $ds^2 = 0$. Здесь имеется некоторая аналогия с принципом близкодействия, согласно которому акт передачи взаимодействия осуществляется последовательно между точками с бесконечно малым (в пределе нулевым) пространственным расстоянием $dl = 0$. Можно было бы даже теорию прямого межчастичного взаимодействия формально причислить к разряду теорий близкодействия в обобщенном 4-мерном смысле. Однако термин «дальнодействие» здесь всё же является существенным. И не только потому, что релятивистский контакт $ds^2 = 0$ допускает сколь угодно большую пространственную разделённость частиц. Дело еще и в том, что в отличие от отношения пространственного контакта

⁴ Название обусловлено тем, что релятивистская плотность 4-тока заряженной частицы j_{μ} содержит её 4-скорость.

точек, обладающего свойствами транзитивности и отвечающего хорошо определенной окрестностной структуре и топологическому пониманию пространственной близости, отношение релятивистского контакта не обладает данными свойствами из-за псевдоевклидова характера метрики Минковского и поэтому «контактом» может быть названо лишь фигурально.

Можно показать, что функционал действия теории Фоккера, будучи дополненным так называемой теорией абсолютного поглотителя, развитой в работах Фейнмана и Уилера, допускает строгий переход к классической электродинамике Максвелла [7; 9]. При этом роль электромагнитного поля берет на себя определенная конструкция, включающая в себя 4-токи частиц. Важно подчеркнуть, что в рамках этой теории бессмысленно говорить о наличии какого-либо самостоятельного электромагнитного поля в тех точках, где отсутствуют частицы. Тем не менее теория в наблюдательном отношении эквивалентна электродинамике Максвелла, поскольку все утверждения последней (включая утверждения о распределении электромагнитного поля в пространстве, а также присущем ему импульсе, спине и энергии) операционально сводятся к наблюдению за движением отдельных заряженных частиц – и лишь по данной информации только и может быть восстановлена картина классического «поля». И ровно эта информация содержится в действии Фоккера.

В дальнейшем было показано, что весьма широкий класс классических линейных полевых теорий допускает эквивалентную фоккеровскую формулировку. С определенными усилиями это можно сделать и для некоторых нелинейных теорий, в частности для гравитации. Линеаризованное гравитационное взаимодействие может быть записано в фоккеровской форме на основе работ Пантюшина и Грановского [8]. Нелинейная гравитация, отвечающая эйнштейновской ОТО, может быть описана в рамках итерационно-пертурбативной фоккеровской схемы, предложенной Владимировым и Турьгиным [9] на основе разложения по константе G . При этом уравнения Эйнштейна эффективно воспроизводятся в любом нужном порядке точности. Пример еще одного варианта обобщенного функционала Фоккера для гравитации, получаемого из предпосылок некоторого варианта реляционной модели пространства-времени, рассматривался в [10; 11].

Несмотря на успехи подхода Фоккера–Фейнмана–Уилера, у него имеется и ряд трудностей. Оставляя в стороне технические вопросы (например, проблема квантования), укажем на более серьезную концептуальную трудность. Неся в себе очевидную реляционную интенцию, принцип Фоккера является в то же время достаточно эклектичным, поскольку соответствующий ток-токовый лагранжиан записывается в готовом пространстве-времени Минковского и, таким образом, не является отражением последовательно проведенной реляционной парадигмы.

Вместе с тем важность теорий прямого межчастичного взаимодействия состоит в их роли возможного *промежуточного звена* на пути к построению искомой фоново-независимой реляционной теории: в качестве первого шага

они, хоть и не устраняя самого пространства-времени, элиминируют, тем не менее, понятие классического поля-переносчика взаимодействий, сводя его к эквивалентному (эффективному) полю. Можно ожидать, что воспроизведение на каком-то этапе ток-токовой структуры действия Фоккера из гипотетических конструкций реляционной теории может представлять собой шаг к реализации принципа соответствия со стандартной моделью полевых взаимодействий.

3. Реляционная модель пространства-времени и взаимодействий

3.1. Системы отношений

До сих пор, говоря о реляционном подходе, мы не конкретизировали само понятие отношений и исходного множества, на котором задается данная структура отношений. Как было отмечено выше, различная трактовка этих исходных понятий может привести к весьма широкому классу мыслимых моделей. Ниже мы рассмотрим более подробно некоторые аспекты реляционной модели пространства-времени и взаимодействий, развиваемой в работах Ю.С. Владимирова [7].

В рамках данной модели в качестве исходного множества рассматривается некоторое, вообще говоря, дискретное универсальное множество M (либо пара множеств M и N ; о различиях см. ниже) некоторых абстрактных элементов. Физический смысл и интерпретация данных элементов могут меняться в зависимости от контекста. Это могут быть, к примеру, точки пространства, события, элементарные частицы, векторы in- и out-состояний квантовой системы и т.п. Неизменным остается правило, согласно которому все фундаментальные конструкции теории должны быть выразимы в терминах отношений между теми или иными её элементами. Данное правило задает общий концептуальный каркас реляционной схемы, а её физическая реализация в рамках конкретной модели зависит от выбора и интерпретации универсального множества.

Под *отношением* в самом общем случае можно было бы понимать некоторую характеристику на произвольных подмножествах элементов множества M («находящихся в отношении»). В рамках рассматриваемой реляционной модели берется наиболее простой вариант, когда в роли отношения выступает вещественное или комплексное число u_{ik} , ставящееся в соответствие любой *паре* элементов i, k (так называемое *парное отношение*). В зависимости от того, принадлежат ли эти элементы одному и тому же универсальному множеству M или двум разным множествам M и N , говорят об унарной и бинарной системе отношений соответственно. Для простоты парное отношение u_{ik} полагается симметричным: $u_{ik} = u_{ki}$.

Можно было бы аналогичным образом рассматривать отношения типа u_{ikl}, u_{iklm} между тремя, четырьмя и т.д. элементами. Ограничение лишь парными отношениями не является принципиальным, но на первых порах вы-

глядит естественным, тем более что уже в его рамках можно прийти к достаточно нетривиальным конструкциям.

Ограничение области значений парных отношений вещественными или комплексными числами также представляется достаточно естественным базовым допущением, если учесть, что данные числовые множества в силу теоремы Фробениуса являются единственными хорошо определенными алгебраическими полями без делителей нуля, повсеместно используемыми в классической и квантовой теории. Вместе с тем системы отношений со значениями в множестве, например, гиперкомплексных чисел (включая кватернионы, двойные и дуальные числа и т.д.) или в множестве элементов каких-либо иных абстрактных алгебр также могут представлять физический интерес.

Подчеркнем, что введенный выше термин «парное отношение», фактически представляющий собой функционал на декартовом произведении множеств $M \times M$ (или $M \times N$) со значениями в поле вещественных или комплексных чисел, следует отличать от общепринятого в математике термина «бинарное отношение на множестве», которое есть просто подмножество декартова квадрата данного множества.

Постулирование одного лишь факта наличия множеств и парных отношений между их элементами еще не делает теорию содержательной. Разумно ввести какие-либо ограничения на свойства этих отношений. Желательно также, чтобы ввиду изначального равноправия абстрактных элементов искомые ограничения имели бы вид некоторого универсального закона, не привязанного к отдельным выбранным элементам. Одним из весьма сильных по своим содержательным следствиям ограничений является требование наличия алгебраической *связи* между набором всевозможных парных отношений внутри некоторой произвольной выборки фиксированного количества элементов.

Математически это означает, что постулируется существование не равной тождественно нулю функции Φ_r подходящего числа аргументов, которая обращается в нуль при подстановке в нее набора парных отношений, имеющих внутри произвольной выборки из r шт. элементов универсального множества M (в случае унарной системы отношений)⁵. Ввиду произвольности фигурирующих здесь выборок r -элементных подмножеств данное свойство сохраняется при действии группы перестановок на множестве M . Возникающий при этом тип групповой симметрии именуется в реляционной теории *фундаментальной симметрией*.

Конструкция, состоящая из универсального множества M , семейства парных отношений u_{ik} между любыми парами элементов i, k данного множества, а также функции Φ_r , удовлетворяющей свойству фундаментальной симметрии, называется *унарной системой отношений ранга r на множестве*

⁵ В случае бинарных систем отношений берется функция $\Phi_{r,s}$ на множестве всевозможных парных отношений между r элементами из M и s элементами N .

М. Равенство $\Phi_r = 0$ при этом именуется *законом* данной системы отношений⁶.

Возникающая при этом задача поиска наиболее общих классов функций Φ_r (или $\Phi_{r,s}$) в случае вещественнозначных парных отношений первоначально исследовалась в 60–70-х гг. XX в. в новосибирской группе математиков под руководством Ю.И. Кулакова на чисто математических основаниях, безотносительно к реляционному подходу [12]. Такие классы были найдены. При этом оказалось, что содержательные решения получаются лишь на одном или на двух множествах элементов, отвечающих случаю унарных и бинарных систем отношений соответственно.

Дальнейшее приложение этого формализма к физике в рамках реляционного подхода к пространству-времени и описанию взаимодействий (включая комплексификацию унарных и бинарных систем отношений) рассматривается в работах группы Ю.С. Владимирова [7].

Было также показано, что бинарные системы отношений в некотором смысле более фундаментальны, чем унарные, поскольку допускают переход к последним через надлежащую процедуру топологической склейки элементов исходных множеств M и N .

3.2. Геометрическая интерпретация

Если программой-максимумом реляционного подхода является построение теории, в рамках которой макроскопическое пространство-время *выводится* как следствие некоторых фундаментальных систем отношений в микромире, то программа-минимум состоит в установлении принципиальной возможности хотя бы феноменологического *описания* готового пространства-времени (и, возможно, взаимодействий) на основе подходящих реляционных конструкций.

Хорошим иллюстративным примером вышеописанной теории унарных систем отношений здесь может являться так называемая геометрия расстояний [13]. В качестве универсального множества берется произвольное (непрерывное или дискретное) множество M точек евклидова пространства произвольной размерности n , а в качестве отношений u_{ik} – квадраты евклидовых расстояний $(l_{ik})^2$ между любой парой точек i, k . Принцип фундаментальной симметрии при этом приобретает наглядную геометрическую интерпретацию.

Заметим, что площадь треугольника, построенного на трех точках, обращается в нуль, если эти точки лежат на 2-мерной евклидовой прямой. Аналогично объем тетраэдра на любых четырех точках обратится в нуль, если эти три точки лежат на 2-мерной евклидовой плоскости. Рассуждая по индукции, легко получить закономерность: объем симплекса⁷ на любых

⁶ Аналогичная конструкция на парах множеств M, N именуется бинарной системой отношений ранга (r, s) .

⁷ Симплекс – n -мерный тетраэдр, обобщающий понятие треугольника и обычного 3-мерного тетраэдра на случай произвольной размерности. Объем симплекса здесь понима-

$n+2$ вершинах равен нулю, если они лежат в n -мерном евклидовом пространстве. Взяв в качестве функции Φ_r квадрат объема данного симплекса, выраженный через попарные квадраты расстояний $(l_{ik})^2$ между его вершинами⁸, а в качестве ранга r – количество вершин $(n+2)$, мы в точности получим реализацию принципа фундаментальной симметрии: имеется функция Φ_r , которая обращается в нуль на наборе парных отношений внутри произвольной выборки $n+2$ точек (элементов) множества M . Это означает, что на множестве точек n -мерного евклидова пространства задана *унарная система вещественных отношений ранга $n + 2$* .

Данный факт в принципе может быть положен в основу определения размерности плоского пространства в духе реляционного подхода. Заметим, что данная конструкция легко переносится на случай плоских псевдоевклидовых пространств произвольной сигнатуры с соответствующей заменой l_{ik} на псевдоевклидовы расстояния. В случае 4-мерного пространства-времени Минковского речь будет идти о квадратах релятивистского интервала $(s_{ik})^2$ между точками-событиями, образующими 6-симплекс.

Примечательно, что в терминах геометрии расстояний в принципе можно описывать не только объемы симплексов, но и строить полноценную геометрию со всеми присущими ей понятиями углов, площадей и длин, вводить систему координат и даже делать выводы о характере неевклидовости пространства.

Классы функций Φ_r , первоначально найденные в группе Кулакова для абстрактных унарных систем отношений, содержали в себе как описанные выше определители типа Кэли–Менгера, так и конструкции, отвечающие известным геометриям Римана и Лобачевского (постоянной положительной и отрицательной кривизны), симплектическим геометриям и некоторым другим.

Геометрическая интерпретация унарных систем отношений в реляционной теории переносится и на случай бинарных систем отношений. Опираясь на одну из возможных реализаций такой системы для случая симметричного ранга (r, r) , элементам двух множеств M и N можно придать, например, смысл векторов в дуально сопряженных линейных пространствах, а парным отношениям – смысл скалярных произведений этих векторов (при условии задания метрики и установления изоморфизма между дуальными пространствами). При этом вместо определителей Кэли–Менгера в качестве функций $\Phi_{r,r}$ будут фигурировать определители Грама, описывающие квадраты объемов n -мерных параллелепипедов (сводящихся к объемам симплексов) на се-

ется в обобщенном (многомерном) смысле; в двумерном случае такой объем именуется площадью.

⁸ Квадрат объема симплекса выражается через расстояния между его вершинами с помощью определителя Кэли–Менгера, представляющего собой не что иное, как многомерное обобщение известной формулы Герона, выражающей площадь треугольника (2-мерного симплекса) через набор расстояний между тремя его вершинами.

мействах соответствующих векторов и обращающиеся в нуль в случае линейной зависимости последних.

Рассматриваемая в таком ракурсе, развиваемая реляционная модель фактически реализует идею описания характеристик физических систем в унарной или бинарной геометрии через некоторые геометрические инварианты – объемы симплексов в абстрактных линейных пространствах подходящей размерности.

3.3. Пространство-время и взаимодействия

В рамках упрощенной теории унарных вещественных систем отношений рассмотренные конструкции позволяют феноменологически описывать структуру пространства-времени Минковского, вводить реляционный аналог лоренцевых систем отсчета через понятие *эталонного базиса* системы отношений [14], а также вводить прообраз⁹ фоккер-фейнмановского действия для электромагнетизма и эффективной гравитации в низших порядках по G [10; 11] с соблюдением принципа соответствия с выводами ОТО и классической электродинамики в рамках принятых модельных упрощений.

Случаю унарных вещественных систем отношений отвечает классический уровень описания физических явлений. Для обращения к уровню квантовых явлений микромира в рамках рассматриваемой реляционной схемы осуществляется переход к *бинарным* системам комплексных отношений. При этом «элементам» двух универсальных множеств M и N вновь может придаваться различный смысл в зависимости от ранга используемой системы отношений. Это могут быть: множества начального и конечного состояний квантовой системы в духе теории S -матрицы; прообразы векторов импульсного или координатного пространства; векторы состояний элементарных частиц в обычном или изотопическом пространстве; двух- или многокомпонентные спиноры; L - и R -компоненты дираковских фермионов; компоненты мультиплетов и др.

Если придать элементам бинарной системы комплексных отношений ранга $(n+1, n+1)$ смысл векторов n -мерного линейного комплексного пространства и ввести на нем действие линейной группы $SL(n, C)$, оставляющей инвариантными некоторые характерные детерминанты, то оказывается возможным прийти к понятию так называемых *финслеровых* спиноров [15], обобщающих понятие 2-компонентного картановского спинора на n -компонентный случай¹⁰. Данные объекты используются в реляционной модели при описании пространства внутренних изотопических состояний частиц. При этом минимальный невырожденный ранг (3,3) порождает обыч-

⁹ Фактически члены ток-токового взаимодействия, фигурирующие в действии Фоккера, можно описать в терминах некоторых объемов – миноров определителя Грама на скалярных произведениях 4-скоростей частиц. А дельта-функция от квадрата интервала, входящая в интеграл действия, уже представляет собой функцию парного отношения между событиями.

¹⁰ Этот путь отличен от стандартного канала обобщения спиноров, основанного на свойствах алгебры Клиффорда и процедуре блочного удвоения.

ные релятивистские 2-спиноры, отвечающие псевдоевклидовой сигнатуре пространства Минковского (+, -, -, -).

Увеличение ранга бинарной системы отношений до (4,4) или (6,6) позволяет перейти к описанию электрослабых и сильных взаимодействий путем выписывания специальной конструкции – так называемого базового 4x4- (или 6x6-) отношения, которому можно придать смысл некоторой формы объема а бинарной геометрии. Данная конструкция является прообразом функционала действия Стандартной модели, записанного в фоккер-фейнмановском представлении. Термин «прообраз» здесь указывает на то, что полноценное действие в форме Фоккера может быть получено лишь после процедуры перехода к статистическому пределу, в котором воспроизводится макроскопический пространственно-временной фон. Кроме того, на данном этапе развития модели еще предстоит разработать последовательный учет нелинейных членов взаимодействия в неабелевом секторе.

4. Квантовые аспекты и связь с ОТО

Интересным вопросом является то, предполагает ли реляционный подход наряду с выводом закономерностей классического макроскопического пространства-времени также автоматический учет квантовых свойств микромира на основе одних лишь свойств систем отношений. По-видимому, ответ здесь отрицательный. Представляется, что ряд квантовых свойств (таких, как вероятность или принцип суперпозиции) является фундаментальной чертой реальности, не редуцируемой к чему-либо более первичному и в известной мере независимой: в наиболее общих предпосылках реляционного подхода квантовая природа реальности не содержится как неизбежный логический элемент.

Сказанное означает, что реляционное описание пространства-времени и взаимодействий не является априори квантовым до тех пор, пока отдельные конструкты реляционной теории не будут постулативным образом наделены квантомеханической интерпретацией (например, через трактовку элементов бинарной системы комплексных отношений как элементов гильбертова пространства состояний, а самих парных отношений – как прообразов амплитуд вероятности квантовых переходов).

Отметим, что реляционный подход, по-видимому, должен предоставлять весьма богатые возможности для объяснения и описания тех квантовых эффектов, в которых существенную роль играет макроскопическая геометрия опыта, то есть специфический характер вложения квантовых систем в пространство-время. Речь здесь, прежде всего, идет о феноменах квантовой нелокальности (ЭПР-эффекты, квантовая телепортация) и об эффектах, в которых существенную роль играет фаза (Ааронов–Бом). Реляционная схема, не ограниченная постулатом об априорном наличии пространственно-временного фона, может способствовать более глубокому пониманию

нелокального характера взаимной соотнесенности пространственно распределенных квантовых систем.

Интерференционно-фазовые квантовые эффекты теоретически допускают учет в рамках вырожденной бинарной системы комплексных отношений ранга (2,2). С этим связан также один из возможных путей к построению реляционной интерпретации квантовой механики, основанный на воспроизведении конструкции фейнмановского интеграла по путям как совокупности определенных фазовых вкладов в ансамблях систем ранга (2,2).

Обсудив соотнесенность реляционного подхода с квантовой механикой, обратимся к проблематике общей теории относительности. В реляционной теории пространственно-временное многообразие (а значит, и гравитация, если отождествлять ее с кривизной пространства-времени) не является самостоятельной физической сущностью, несущей динамические степени свободы. Поэтому согласование реляционной модели с выводами ОТО представляет собой нетривиальную задачу, заключающуюся в получении эффективной псевдоримановой метрики. В рамках упрощенной реляционной схемы, опирающейся на теорию прямого межчастичного взаимодействия Фоккера–Фейнмана–Уилера, был сформулирован ряд возможных путей решения данной задачи, включая итерационную процедуру разложения по константе G [9], а также метод, основанный на композиции унарных систем отношений [10; 11]. В рамках последнего был указан пример построения приближенной эффективной метрики для простейшего случая сферически-симметричной гравитирующей конфигурации, согласующийся в рамках выбранных модельных приближений с постньютоновским пределом в метрике Шварцшильда.

Однако, как было отмечено ранее, сама по себе теория прямого межчастичного взаимодействия является эклектичной, предполагая уже наличие фонового пространства Минковского. Таким образом, данные результаты следует рассматривать лишь как промежуточный этап на пути дальнейшего поиска последовательной реляционной схемы, в рамках которой либо будет выводиться само фоновое пространство Минковского, либо, минуя данную стадию, из первых принципов независимым образом будет конструироваться эффективная псевдориманова метрика. Последняя возможность в рамках бинарной системы ранга (4,4) была намечена в [16].

Затронем еще один существенный момент, связанный со статусом так называемых вакуумных решений в ОТО, отвечающих отсутствию классической материи, описываемой тензором энергии-импульса в правой части уравнений Эйнштейна. Если в рамках эйнштейновского подхода абсолютно пустое пространство-время является вполне законным решением уравнений гравитации, то в реляционном подходе говорить о пространстве-времени в отсутствие материи, строго говоря, бессмысленно. Это, на первый взгляд, означает, что для довольно широкого класса риччи-плоских решений ОТО, включая даже решение Шварцшильда, в реляционной модели утрачивается осмысленный физический аналог.

На данное обстоятельство можно смотреть либо как на парадигмальное преимущество последовательного реляционного подхода (дающее дополнительный критерий отбора «нефизических» решений ОТО), либо как на удручающую курьезную особенность в сравнении с геометрической парадигмой.

Описанное парадигмальное противоречие можно в некотором смысле снять, если привлечь квантовые соображения, согласно которым *вакуум* на самом деле не является полным отсутствием материи, а, скорее, отвечает некоторому специфическому модусу её существования в форме флуктуирующего моря виртуальных частиц. Надо сказать, что последовательная реляционная теория избегает прямого заимствования квантовополевых понятий наподобие вакуума. С другой стороны, некоторый реляционный аналог последнего всё же должен присутствовать в теории хотя бы в силу необходимости интерпретировать такие физические эффекты (традиционно связываемые с вакуумом), как спонтанное рождение пар, эффект Казимира, лэмбовский сдвиг, поляризация вакуума, эффект Унру, излучение Хокинга и т.д. Но тогда не исключено, что соответствующее реляционное описание «вакуумного» модуса материи приведет к представлению о таких специфических системах отношений в микромире, которые в макроскопическом пределе будут отвечать классическим вакуумным решениям ОТО.

5. Параллели

В заключительном разделе кратко затронем идейные параллели, которые имеет реляционный подход¹¹ с некоторыми существующими физическими теориями и представлениями.

С формальной точки зрения, реляционные мотивы можно усмотреть даже в рамках квантово-полевой парадигмы. Прежде всего, это преимущественный отход от координатного представления в пользу импульсного в задачах описания квантовых процессов рассеяния и расчете соответствующих сечений. Фейнмановская диаграммная техника может быть реинтерпретирована в реляционном духе, если, к примеру, характеристики вершин считать «элементами», а пропагаторы внутренних линий – родом «отношений» между ними. В этом случае дискретный граф, реализующий фейнмановскую диаграмму, можно интерпретировать как своеобразную систему отношений в импульсном пространстве, порождающую наблюдаемые характеристики сечений, минуя координатное представление. Подчеркнем, однако, что такая реляционная интерпретация является достаточно формальной, не устраняя присущие данной схеме расходимости, проистекаю-

¹¹ В этом пункте реляционный подход понимается в обобщенном смысле как методологическая установка на описание пространственно-временных характеристик физических систем, а также их взаимодействий на основе некоторых более первичных конструкций, отражающих наличие тех или иных классов отношений между отдельными элементами или подсистемами данных систем.

щие из неявной отсылки к существованию координатного пространства, концепции близкодействия и принципам локальных теорий поля.

Дальнейший уклон в сторону реляционных мотивов прослеживается в популярной в 60-х гг. прошлого века идее S-матричного подхода, в котором вся динамика квантовой системы заключена в отношении между её начальным и конечным состояниями на бесконечности, осуществляемом посредством матрицы рассеяния. Элементы данного подхода частично наследуются в реляционной теории пространства-времени [7], где одна из возможных трактовок множеств M и N бинарной системы комплексных отношений состоит в придании им смысла множеств in - и out -состояний квантовой системы, в то время как совокупность парных отношений между элементами этих множеств призвана описывать соответствующие S-матричные амплитуды переходов.

К идеям, имеющим несомненное реляционное звучание, следует отнести известный принцип Маха, в обобщенном смысле понимаемый как обусловленность локальных свойств физических систем влиянием их глобального окружения, а также идею А.Д. Сахарова о вторичной (индуцированной) природе гравитации. Данные идеи получили свое отражение в рамках обобщенной трактовки гравитации и электромагнетизма на основе теории унарных систем отношений в работе [10].

Идеологически близко к реляционному подходу стоит твисторная программа Пенроуза, также изначально нацеленная на описание структуры пространства-времени, исходя из некоторых первичных математических конструкций твисторной алгебры. Следует отметить, что пространство твисторов с группой $SU(2,2)$ является частным случаем конструкции финслеровых 4-спиноров [15], порожденных бинарной системой комплексных отношений ранга (5,5) с определенным усеченным подклассом групповых преобразований.

Следует также упомянуть концепцию причинностных множеств (causal sets), в рамках которых пространство-время мыслится как структура частичного порядка, порождаемого отношением причинной связности на дискретных подмножествах событий [17]. В близком к этому направлении лежат работы А. Круглого по динамике дискретных пространственно-временных графов [21].

Среди отечественных исследователей, работающих в русле реляционной парадигмы, упомянем также статистический подход В. Аристова.

Весьма сильное созвучие с принципами реляционной теории пространства-времени обнаруживается в так называемой «механике инвариантности» (Invariance mechanics) [18], суть которой состоит в требовании записи всех физических законов (в частности, соотношений квантовой теории поля, включая амплитуды рассеяния, функции Грина и т.д.), в терминах некоторого конечного набора релятивистских инвариантов, составленных из пространственно-временных или импульсных характеристик взаимодействующих частиц. Как частный случай здесь используется рассмотренная ранее

геометрия расстояний и конструкции определителей Кэли–Менгера, которым придается смысл объемов некоторых симплексов, участвующих в расчете амплитуд рассеяния или в формировании ячеек микроскопической дискретной структуры пространства-времени.

Геометрическая трактовка амплитуд рассеяния как своеобразных объемов в некоторых абстрактных пространствах нашла также свое отражение в относительно недавнем подходе к расчетам процессов в суперсимметричных теориях Янга–Миллса (см. [19]), где для вычисления искомой амплитуды вводится некоторый геометрический объект под названием «амплитуэдр» (Amplituhedron), определяемый в терминах абстрактных грассмановых многообразий. Существенным звеном при этом является использование теории твисторов.

Наиболее масштабная программа по построению фоново-независимой фундаментальной теории разворачивается в последние годы в рамках направления петлевой квантовой гравитации («Loop Quantum Gravity», К. Ровелли, Ли Смолин и др.). В деталях данная теория весьма сложна, однако в ее основе лежит достаточно близкая к реляционному подходу идея, согласно которой гладкое макроскопическое пространство-время есть усредненный предел некоторой первичной порождающей конструкции, представляющей собой дискретный граф на планковских масштабах. Конкретной реализацией такой конструкции является так называемая спиновая сеть (происхождение термина приписывается Р. Пенроузу), определяющая квантовые состояния 3-мерного пространства. В рамках данной конструкции производится квантование площадей и объемов. Реляционная аналогия здесь состоит также в ориентации теории на анализ алгебраических и комбинаторных связей, формирующих структуру эволюционирующей спиновой сети.

В заключение отметим примечательный факт, что один из авторов петлевой квантовой гравитации К. Ровелли является также создателем реляционной интерпретации квантовой механики (Relational quantum mechanics) [20], в рамках которой он в полном соответствии с духом реляционного подхода прямо утверждает: «Квантовая теория – это теория, отвечающая описанию одних физических систем в их отношении к другим системам, и это есть полное описание мира»¹².

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохинцев Д.И. Пространство и время в микромире. – М.: Наука, 1982.
2. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Теоретическая физика. IV. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1974.
3. Chew G. F. The dubious role of the space-time continuum in microscopic physics // Science Progress. – 1963. – Vol. LI. – No. 204. – P. 529–539.
4. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. – М.: Физматлит, 2005.

¹² Оригинал: «Quantum mechanics is a theory about the physical description of physical systems relative to other systems, and this is a complete description of the world».

5. *Wheeler J.A., Feynmann R.P.* Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action // *Rev. Mod. Phys.* – 1949. – V. 24. – P. 425–433.
6. *Wheeler J.A., Feynmann R.P.* Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // *Rev. Mod. Phys.* – 1945. – V. 17. – P. 157–181.
7. *Владимиров Ю.С.* Основания физики – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
8. *Грановский Я.И., Пантюшин А.А.* К релятивистской теории тяготения // *Изв. АН Каз. ССР, сер. физ.-мат.* – 1965. – No. 2. – С. 65–69.
9. *Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю.* Теория прямого межчастичного взаимодействия. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. *Vladimirov Yu.S.* Gravitational Interaction in the Relational Approach // *Grav. Cosmol.* – 2008. – Vol. 14. – P. 41–52.
11. *Bolokhov S.V., Klenitsky A.N.* On the Construction of Effective Metrics in a Relational Model of Space-Time // *Grav. Cosmol.* – 2013. – Vol. 19. – P. 35–41.
12. *Михайличенко Г.Г.* Математический аппарат теории физических структур. – Изд-во Горноалтайского гос. ун-та, 1997.
13. *Blumenthal L.M.* Theory and Applications of Distance Geometry. – Oxford: Clarendon Press, 1953.
14. *Bolokhov S.V.* On the Description of Lorentz Reference Frames in a Relational Model of Space-Time // *Grav. Cosmol.* – 2009. – V. 15. – P. 28–31.
15. *Solov'yov A.V., Vladimirov Yu.S.* Finslerian N-Spinors: Algebra // *Int. J. Theor. Phys.* – 2001. – V. 40(8). – P. 1511–1523.
16. *Владимиров Ю.С.* Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 2: Теория физических взаимодействий. – М.: МГУ, 1998.
17. *Bombelli L., Lee J., Meyer D., Sorkin R.D.* Spacetime as a causal set // *Phys. Rev. Lett.* 59: 521-524 (1987)
18. *Bird P.* Invariance Mechanics – a new direction for quantum gravity. URL: arXiv:0705.2558v2.
19. *Arkani-Hamed et al.* Scattering Amplitudes and the Positive Grassmannian. URL: arXiv 1212.5605.
20. *Rovelli C.* Relational quantum mechanics // *Int. J. Theor. Phys.* – 1996. – V. 35. – No. 8. – P. 1637–1678.
21. *Круглый А.Л.* Модель динамики дискретного пространства-времени. – М.: Монолог, 2000.

SOME ASPECTS OF THE RELATIONAL APPROACH TO PHYSICS

S.V. Bolokhov

The article describes a number of aspects of the relational approach to the construction of the theory of space-time and physical interactions. Some issues related to the interpretation of the basic concepts and prerequisites of this approach is discussed. A brief overview of the results and possible further prospects of the relational theory is given. Carried out a number of parallels and analogies with other existing approaches.

Key words: relational approach, space-time, gravity, the fundamental interactions.