
К ВОПРОСУ СООТНЕСЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО И РЕЛЯЦИОННОГО ПОДХОДОВ

С.В. Болотов

*Институт гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов*

Рассмотрены возможные идейные пересечения геометрического и реляционного подходов к построению физических теорий в ряде ключевых аспектов: принцип Маха, взаимосвязь свойств пространства-времени и материи, описание электромагнетизма и гравитации в теориях прямого межчастичного взаимодействия, а также в моделях Калуцы–Клейна.

Ключевые слова: реляционный подход, геометрический подход, пространство-время, гравитация, теории Калуцы–Клейна, принцип Маха.

Введение

На волне развития теоретической физики последних десятилетий значительный интерес представляет собой осмысление и анализ фундаментальных оснований нашей физической картины мира. Анализ развития физических идей позволяет выделить три ключевые физические парадигмы, в рамках которых шло развитие фундаментальных теорий XX столетия: теоретико-полевая, геометрическая и реляционная парадигма [1].

Напомним, что в основе *теоретико-полевой парадигмы* лежит фундаментальная концепция поля, определенного на заданном пространственно-временном многообразии. Последнее трактуется как априори существующий субстанциальный фон. Классическое поле предполагает процедуру дальнейшего квантования, в ходе чего возникает представление о квантах материи и полей – переносчиков взаимодействий.

Основу *геометрической парадигмы* составляет общая теория относительности А. Эйнштейна (ОТО) и различные ее обобщения. Пространство-время становится искривленным псевдоримановым многообразием и приобретает динамические степени свободы, описывающие гравитационное взаимодействие. Геометрический подход может быть расширен и на описание других видов взаимодействий. Это достигается либо введением дополнительных геометрических степеней исходного 4-мерного многообразия (кручение, конформные преобразования, неметричность), либо увеличением размерности пространства-времени. В последнем случае говорят о так называемых моделях типа Калуцы–Клейна. Пространство-время в данном подходе по-прежнему трактуется в субстанциальном ключе.

Многими авторами достаточно давно высказываются соображения в пользу того, что традиционная трактовка пространства-времени имеет суще-

ственные ограничения в микромире [1–3], а на планковских масштабах вообще теряет смысл. В связи с этим особую роль приобретает третья, *реляционная парадигма*, в рамках которой пространство-время имеет вторичный статус и трактуется как специфическая система отношений между объектами микромира. Наблюдаемые макроскопические свойства пространства-времени (протяженность, размерность и сигнатура) мыслятся как усредненно-статистический итог от наложения свойств ансамблей взаимодействующих микрочастиц.

Как отмечается в работах Ю.С. Владимирова [1], последовательный реляционный подход содержит три составляющие: реляционную трактовку понятий классического пространства-времени; описание физических взаимодействий на базе релятивистски-инвариантной концепции дальнего действия; принцип Маха. Ниже мы коснемся этих составляющих и покажем, что отдельные их элементы можно проследить также и в геометрическом подходе, равно как и элементы геометрического подхода имеют определенное звучание в некоторых вариантах реляционных моделей. Это делает данные подходы в ряде аспектов созвучными друг другу. Более подробное обсуждение идей и особенностей реляционного подхода можно найти в [1; 4].

Общая методология реляционного подхода предполагает такой способ построения теории, при котором физические и геометрические характеристики взаимодействующих систем выражаются в терминах определенных отношений между элементами некоторых множеств. Элементами могут служить точки, события, частицы, 4-токи, импульсы и другие объекты более абстрактной природы. Заметим, что определенные мотивы реляционного понимания пространства-времени прослеживаются уже в *геометрическом подходе*: так, теория относительности, в отличие от ньютоновской концепции абсолютного пространства, строится на операционалистской методологии, придавая смысл всем пространственно-временным понятиям в рамках измерительных процедур на множестве событий или материальных объектов.

1. Взаимосвязь пространства-времени и материи

Одной из центральных идей реляционного подхода является обусловленность свойств макроскопического пространства-времени свойствами материи. Идею вторичности пространства-времени иногда иллюстрируют мысленной ситуацией, восходящей к Лейбницу и Маху, согласно которой пространство-время должно исчезать при удалении всех материальных объектов¹. В геометрическом подходе (прежде всего в ОТО) свойства пространства-времени также связаны со свойствами вложенной в него материи, что

¹ С подобными мысленными ситуациями следует быть осторожными ввиду трудностей их верификации/фальсификации: устранение материи означало бы принципиальную невозможность реализовать наблюдателя и эмпирически удостовериться наличие или отсутствие пространства-времени. Поэтому подобные рассуждения имеют в значительной мере метафизический статус.

отражено в уравнениях Эйнштейна. Однако в ОТО возможны и чисто вакуумные решения, что отвечает общей интенции геометрического подхода трактовать пространство-время как онтологически автономную категорию. Возникает проблема, связанная с принципом соответствия между теориями: для широкого класса геометрических вакуумных решений в реляционных моделях утрачивается осмысленный физический аналог. Для соблюдения принципа соответствия в таком случае следовало бы либо признать вакуумные решения ОТО нефизической идеализацией, либо допустить, что в реляционном подходе возможно смоделировать ситуацию отсутствия классической материи. В последнем случае роль субстрата пространственно-временных отношений мог бы выполнять некий эквивалент вакуума, трактуемого в реляционном духе как специфический модус материи (флуктуирующее море виртуальных частиц) [4].

2. Принцип Маха

Одним из ключевых элементов реляционного подхода является принцип Маха. В литературе имеется достаточно много трактовок данного принципа. Формулировка, восходящая к Маху, состоит в утверждении, что инертные свойства тел определяются влиянием глобального распределения удаленных масс. Известно, что в рамках *геометрического подхода* данный принцип был использован Эйнштейном при построении ОТО. В дальнейшем принцип Маха неоднократно подвергался ревизии и возникал в целом ряде геометрических теорий. В статье Г. Бонди с соавт. приводятся десять различных формулировок принципа Маха [5].

В *реляционном подходе* принцип Маха трактуется в широком смысле как идея обусловленности локальных свойств систем глобальным распределением окружающей материи. В такой формулировке, безусловно, имеется созвучие и с геометрическим подходом, где распределение материи, согласно уравнениям Эйнштейна, влияет на геометрию пространства и на характер инерциального движения пробных частиц. Однако столь общая формулировка принципа Маха может показаться тривиальной: очевидно, любая физическая система не является абсолютно изолированной и с течением времени естественным образом испытывает влияние всё более отдаленного окружения в пределах своего причинного конуса прошлого. Чтобы придать обобщенной трактовке принципа Маха содержательность, следует подчеркнуть, что в реляционном подходе влияние частиц друг на друга реализуется нелокальным образом, то есть по принципу *дальнодействия*. Причина в том, что отсутствие на фундаментальном уровне гладкого пространственно-временного фона делает невозможным введение классического понятия поля, реализующего локальную передачу взаимодействий.

Одним из следствий реализации принципа Маха в реляционной модели, развиваемой в работах Ю.С. Владимирова, является, например, возможность вывести эффективное действие свободной частицы как результат ее взаимодействия с окружением [6].

3. Прямое межчастичное взаимодействие

Концепция дальнего действия в реляционном подходе должна быть совместима с принципами релятивистской инвариантности и причинности. Здесь в первую очередь следует назвать теорию прямого межчастичного электромагнитного взаимодействия [7], предложенную в работах Тетроде и Фоккера 1920-х гг. и усовершенствованную Фейнманом и Уилером в 1940-х гг. [8]. В данной теории среди первичных понятий отсутствует понятие поля – переносчика взаимодействий. Действие взаимодействия пары частиц выражается непосредственно через их токовые характеристики и дельта-функцию от квадрата интервала между точками на мировых линиях частиц, а электромагнитное поле приобретает вторичный («эффективный») характер. В работах Я. Грановского и А. Пантюшина и других авторов [9] было предложено обобщение принципа Фоккера на случай линеаризованного гравитационного взаимодействия, соответствующее первому порядку разложения по константе G в ОТО.

Нелинейные гравитационные вклады в рамках теории прямого межчастичного взаимодействия можно описывать различными способами. В работе [7] была предложена пертурбативная схема, обобщающая гравитационный принцип Фоккера на случай тройных, четверных и т. д. взаимодействий, что соответствует следующим порядкам разложения по G . Иной способ – в рамках реляционной теории пространства-времени Ю.С. Владимирова – исследован в работах [6; 10], где исходный лагранжиан Фоккера рассматривается как композиция двух систем отношений², заданных на пространстве 4-токов и на пространстве событий. Строится обобщенное действие Фоккера путем замены ток-токовых членов на произведения токов большего количества взаимодействующих частиц и в более сложных комбинациях, отвечающих минорам некоторых характерных детерминантов типа Грама, задающих структуру систем отношений. Учет диагональных миноров 2-го ранга приводит к фоккеровскому лагранжиану линеаризованной гравитации, а учет миноров 3-го ранга дает первую нелинейную гравитационную поправку в действие, позволяющую описывать эффекты ОТО в постньютоновском приближении [10]. Характерным свойством данной реляционной схемы является объединенный способ описания гравитации и электромагнетизма путем выбора миноров нужного порядка в обобщенном действии Фоккера. При этом в рамках реляционного подхода гравитация имеет характер *вторичного взаимодействия*, фактически порожденного композицией элементарных ток-токовых отношений электромагнитного типа [6].

² Основы теории систем отношений под названием «теория физических структур» были заложены в 1960–1970-х гг. в трудах новосибирских математиков под руководством Ю.И. Кулакова и в дальнейшем приложены к физике пространства-времени и взаимодействий в работах Ю.С. Владимирова.

4. Многомерные теории

В рамках *геометрического подхода* связь гравитации и электромагнетизма носит иной характер. Так, в многомерных геометрических теориях типа Калуцы первичным объектом выступает гравитационное действие, записанное в 5-мерном искривленном пространстве-времени. В ходе процедуры 4+1-расщепления и размерной редукции из скалярной кривизны 5-мерного многообразия выделяется кривизна 4-мерного сечения и добавок, отвечающая лагранжиану электромагнитного поля, которое, таким образом, в геометрическом подходе является вторичным по отношению к 5-мерной гравитации.

Обобщение теории Калуцы на случай других видов взаимодействий может идти двумя путями. Первый путь состоит в привлечении калибровочного принципа: на пространство дополнительных измерений накладывается симметрия той калибровочной группы, которая отвечает рассматриваемому взаимодействию. Вторым путем разрабатывался в работах группы Ю.С. Владимирова, где в качестве пространства дополнительных измерений выбирался n -мерный тор без наложения калибровочной симметрии [11; 12]. При этом возникает концепция ступенчатой размерной редукции, позволяющая трактовать различные каналы взаимодействий как результаты последовательного спуска от исходной многомерной теории к 4-мерной через цепочку промежуточных размерностей [13].

Возможная реализация идей многомерных геометрических теорий в рамках *реляционного подхода* также может идти несколькими путями. Первый способ состоит в постулировании действия линеаризованной гравитации фоккеровского типа на плоском 5-мерном фоне. После процедуры 4+1-расщепления получается эффективное действие, содержащее 4-мерную линеаризованную фоккеровскую гравитацию, фоккеровский электромагнетизм и вклад прямого межчастичного скалярного взаимодействия. Иной возможный способ реализации многомерия в реляционном подходе может состоять в обобщении пертурбативной схемы Владимирова–Турыгина, разработанной в [7], на случай многомерной гравитации. Если за основу взять модель Калуцы–Клейна и построить для нее данную схему, то гравитационные степени свободы, отвечающие полям – переносчикам взаимодействий, получают характер эффективных полей в духе прямого межчастичного взаимодействия, что открывает возможность реляционного описания неабелевых калибровочных полей. Сказанное наглядно демонстрирует, что принципы многомерных теорий могут быть успешно синтезированы с методологией реляционного подхода в рамках теорий прямого межчастичного взаимодействия.

Наконец, идейное содержание многомерных теорий можно перенести на случай геометрий иного класса – основанных на бинарных системах отношений [1]. Для описания различных каналов взаимодействий используется та же

идея, что и в многомерных геометрических моделях: бинарная система отношений подходящей размерности (ранга) трактуется как композиция систем отношений меньших рангов, отвечающих геометрии 4-мерного пространства и внутренним степеням свободы взаимодействующих частиц.

5. Эмпирический сектор

Еще одним примечательным аспектом соотнесения реляционного и геометрического подходов являются их возможные эмпирические следствия, для которых не было найдено достаточно веских обоснований в рамках общепринятого теоретико-полевого подхода. В частности, можно назвать гипотетический эффект сверхмалой зарядовой асимметрии легких и тяжелых частиц (гипотеза, высказанная еще в ранних работах А. Эйнштейна). В рамках *реляционной теории* подобный эффект возникает при анализе обобщенного фоккер-роковского функционала взаимодействия пары частиц, содержащего недиагональные миноры 2-го ранга. После процедуры суммирования по частицам окружающего мира в эффективном действии электромагнитного взаимодействия появляются малые добавки, сводящиеся к перенормировке зарядов взаимодействующих частиц и зависящие от их масс [14]. Аналогичный эффект возникает в рамках *геометрического подхода* при рассмотрении 6-мерной модели типа Калуцы–Клейна с двумя абелевыми векторными полями [15]: при определенном способе размерной редукции у заряженных частиц индуцируется дополнительный зарядовый вклад, определяемый массой. Данный вклад ввиду чрезвычайной относительной малости ($\sim 10^{-21}$) ненаблюдаем в лабораторных условиях, однако на астрофизических масштабах может приводить к дополнительным факторам генерации магнитного поля планет [15].

Заключение

В заключение выскажем несколько слов о перспективах реляционного подхода. Есть все основания предполагать, что общепринятая субстанциальная трактовка пространства-времени, сыграв важную и плодотворную роль в построении фундаментальных физических теорий XX в., постепенно исчерпывает свои концептуальные ресурсы ввиду отмеченных выше проблем с применимостью традиционных пространственно-временных представлений на микромасштабах. Более того: теории субстанциального типа, по-видимому, следует счесть феноменологическими в сравнении с реляционными теориями, поскольку в последних не ограничиваются постулативно-описательным заданием свойств пространства-времени, а предпринимают попытки их вывода из более глубоких конструкций. Исходя из этого, можно спрогнозировать, что на дальнейших витках эволюции наших научных представлений физическая наука должна неизбежно столкнуться с необходимостью учета реляционной парадигмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимиров Ю.С.* Основания физики. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
2. *Блохинцев Д. И.* Пространство и время в микромире. – М.: Наука, 1982.
3. *G. F. Chew*, The dubious role of the space-time continuum in microscopic physics // *Science Progress*. – 1963. – Vol. LI. – № 204. – P. 529–539.
4. *Болохов С.В.* К некоторым аспектам реляционного подхода в физике // *Метафизика*. – 2014. – № 2 (12) – С. 29–48.
5. *Bondi H, Samuel J.* The Lense-Thirring effect and Mach's principle // *Physics Letters A*. – 1997. – Vol. 228 (3). – P. 121–126.
6. *Vladimirov Yu. S.* Gravitational Interaction in the Relational Approach // *Grav. Cosmol.* 2008. – Vol.14. – P. 41–52.
7. *Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю.* Теория прямого межчастичного взаимодействия. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. *Wheeler J.A., Feynmann R.P.* Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // *Rev. Mod. Phys.* – 1945. – V. 17. – P. 157–181.
9. *Грановский Я.И., Пантюшин А.А.* К релятивистской теории тяготения // *Изв. АН Каз. ССР, сер. физ.-мат.* – 1965. – No. 2. – С. 65–69.
10. *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.
11. *Владимиров Ю.С.* Геометрофизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
12. *Vladimirov Yu.S., Bolokhov S.V.* The mechanism of generating fermion masses in the 8-dimensional geometric theory // *General Relativity and Gravitation*. – 2005. – V. 37. – № 12. – P. 2227–2238.
13. *S. V. Bolokhov.* On Stepwise Dimensional Reduction in Kaluza–Klein Models // *Gravitation and Cosmology*. – 2012. – Vol. 18. – № 1. – P. 61–64.
14. *Владимиров Ю.С., Болохов С.В.* К теории прямого межчастичного электро-гравитационного взаимодействия // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. – 2016. – № 2. – С. 27–37.
15. *Владимиров Ю.С.* Происхождение магнитного поля астрофизических объектов // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2000. – № 2. – С. 6–8.

TO THE ISSUE OF RELATIONSHIP BETWEEN GEOMETRIC AND RELATIONAL APPROACHES

S.V. Bolokhov

Institute of Gravitation and Cosmology of RUDN University

Possible ideological correlations are considered between geometric and relational approaches to the construction of physical theories in a number of key aspects: Mach's principle, interrelation of properties of spacetime and matter, description of electromagnetism and gravity in the "action-at-a-distance" theories as well as in the multidimensional Kaluza – Klein models.

Keywords: relational approach, geometric approach, spacetime, gravitation, Kaluza – Klein theory, Mach's principle.