
Вопросы философии. 2017. № 1. С. ?–?

Генезис общей теории относительности: интертеоретический контекст

Р.М. Нугаев

Эпистемологическая модель смены теорий, апробированная на материалах максвелловской электродинамики и специальной теории относительности, применяется для рациональной реконструкции генезиса общей теории относительности (ОТО). Движущей силой создания релятивистских теорий гравитации явилась встреча и взаимопроникновение специальной теории относительности и ньютоновской теории тяготения. Первоначально эта встреча обусловила создание неупорядоченной совокупности гибридных моделей. Но постепенное их согласование и упорядочение в единую иерархическую структуру привело к конструированию фундаментальной теоретической схемы ОТО.

Эйнштейновский синтетический проект был реализован потому, что его исследовательская программа творчески ассимилировала идеи программ Г. Нордстрема и М. Абрагама. Победа Эйнштейна над соперниками стала возможной потому, что его эвристика содержала принцип эквивалентности инерции и гравитации, интерпретируемый не в онтологическом ключе, но в кантовском эвристическом духе как средство конструирования синтетических теоретических моделей. Утверждается, что созданные до 1915 г. гибридные модели Эйнштейна, Нордстрема и Абрагама представляют собой не только строительные леса, необходимые для конструирования фундаментальной теоретической схемы ОТО, но одновременно являются частными теоретическими схемами, необходимыми для полноценного функционирования этой теории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Эйнштейн, Нордстрем, Абрагам, общая теория относительности.

НУГАЕВ Ринат Магдиевич – доктор философских наук, профессор кафедры социально-экономических и гуманитарных наук Поволжской государственной академии физической культуры, спорта и туризма.

Цитирование: *Нугаев Р. М.* Генезис общей теории относительности: интертеоретический контекст // *Вопросы философии. 2017. № 1. С. ?–?*

Voprosy Filosofii. 2017. Vol. 1. P. ?–?

The General Theory of Relativity Genesis: Intertheoretic Context

Rinat M. Nugayev

The theory-change epistemological model, tried on maxwellian electrodynamics and special relativity, is unfolded to apprehend general relativity genesis. It is exhibited that the dynamics of general relativity (GR) construction was largely governed by internal tensions of special relativity and Newton's theory of gravitation. The research traditions' encounter engendered construction of the hybrid domain at first with an irregular set of theoretical models. However, step by step, on revealing and gradual eliminating the contradictions between the models involved, the hybrid set was put into order with a help of equivalence principle. A hierarchy of theoretical models starting from the crossbreeds and up to usual hybrids was moulded.

The claim to put forward is that Einstein's unification design could be successfully implemented since his programme embraced the ideas of the Nordström research programme, as well as the presuppositions of the programme of Max Abraham. By and large Einstein's victory over his rivals became possible because the core of his research strategy was formed by the equivalence principle comprehended in the light of Kantian epistemology. It is stated that the theories of Nordström and Abraham contrived before November 25, 1915, were not merely the scaffolds to construct the GR basic model. They are still the necessary part of the whole GR theory necessary for its common use.

KEY WORDS: Einstein, Nordström, Abraham, general theory of relativity.

NUGAYEV Rinat M. – DSc in Philosophy, Professor, Volga Region State Academy of Physical Culture, Sport & Tourism.

rinatnugaev@mail.ru

Citation: *Nugayev R. M.* The General Theory Relativity Genesis: Intertheoretic Context // *Voprosy Filosofii. 2017. Vol. 1. P. ?–?*

Генезис общей теории относительности: интертеоретический контекст

Р. М. НУГАЕВ

Долгое время было принято считать, что ОТО занимает исключительное место среди других физических теорий как по особенностям конструирования, так и потому, что ее создание связано с деятельностью только одного человека — Альберта Эйнштейна. В этом случае обстоятельство, что теория, основанная на крайне узком эмпирическом базисе, долгое время содержавшем только три “критических эффекта ОТО”, смогла обеспечить получение целой лавины опытных данных, относящихся к релятивистской астрофизике и космологии, объяснялось указанием на гениальность творца. Тем не менее, несмотря на бесспорность решающего вклада А. Эйнштейна, подобное объяснение успехов ОТО представляется в контексте как философии, так и социологии науки весьма наивным. Переход от старой парадигмы к новой может рассматриваться в качестве такового только тогда, когда он затрагивает в той или иной мере *все* научное сообщество, задействуя соответствующие механизмы функционирования его как целого. И особо значимый характер для понимания любой научной революции будет иметь такое исследование этих механизмов, которое попытается вскрыть закономерности перехода от старой парадигмы к новой так, что большее количество поступков коммуницирующих специалистов может быть рассмотрено как *рациональное*. Известно, что, наряду с предварительным метрическим вариантом ОТО — так называемым “наброском”, созданным А. Эйнштейном и М. Гроссманом в 1913 г. и разрабатывавшимся до ноября 1915 г. (уравнения ОТО), были выдвинуты и всерьез рассматривались в качестве конкурентов теории Г. Нордстрема, М. Абрагама и др. Часто последние рассматриваются лишь в качестве заблуждений, в лучшем случае способствовавших созданию проблемной ситуации и инициированию дискуссий вокруг ОТО. Но полученные за последнее время историко-научные данные заставляют усомниться в справедливости этих выводов. Так, переписка А. Эйнштейна и Г. Нордстрема показывает, что Эйнштейн, прежде чем создать ОТО (ноябрь 1915), и даже после создания ее метрической предшественницы (1913), принимал активное участие в создании ряда скалярных релятивистских теорий гравитации Г. Нордстрема. Последнее выражалось не только в критических комментариях, но и в конструктивных замечаниях по совершенствованию этой теории. Пример — опубликованная в 1914 г. статья А. Эйнштейна и А. Фоккера, посвященная “применению новых математических методов, используемых в статье Эйнштейна и Гроссмана, к теории Нордстрема” [Einstein, Fokker 1914]. В итоге теорию Нордстрема можно смело назвать “теорией Эйнштейна — Нордстрема” [Norton 2007, 413]. Более того, именно в рамках первой теории Нордстрема в 1912 г. впервые было получено уравнение гравитационного поля $R = \kappa T$, где R представляет собой свернутый по всем компонентам тензор Римана — Кристоффеля, а T — след тензора энергии-импульса (κ — константа). Это уравнение является очевидным прообразом итога всей гравитационной активности Эйнштейна — уравнений гравитационного поля, опубликованных 25 ноября 1915 г. [Einstein 1915]. С другой стороны, выводы из ОТО для ряда частных случаев в соответствующих приближениях переходили и в выводы теории Нордстрема, и в выводы теории Абрагама. Напрашивается заключение, которое мы в дальнейшем попытаемся обосновать: *ОТО в “снятом”, преобразованном виде содержит в себе эти теории*, что и явилось причиной ее победы над ними. Например, в ОТО известный переход к ньютоновскому пределу “проходит” через СТО. Но последнее предполагает переход для случая слабых и постоянных гравитационных полей к такой релятивистской теории гравитации, в которой гравитационное поле описывается скаляром в плоском пространстве-времени (в пространстве Минковского), т.е. переход к скалярной теории Нордстре-

ма [Renn, Sauer 2007, 297]. Или: описание гравитационных волн в ОТО в так называемом “линейном приближении” фактически предполагает переход к такой релятивистской теории гравитации, в которой гравитационная волна, в полной аналогии с максвелловской электродинамикой, описывается вектором в плоском пространстве-времени, т.е. к векторной теории Абрагама [Abraham 1915].

Эти данные показывают, что соотношения между ОТО и теориями-конкурентами в 1907–1915 гг. носили гораздо более сложный характер, чем это представляется с точки зрения радикальной дилеммы истина – заблуждение. Активно ведущиеся исследования в области современной философии науки позволили значительно прояснить представления о структуре и развитии научных теорий, с одной стороны, и построить значительно более точные и объемные модели научных революций, с другой. Одним из примеров прогресса в этой области является та эпистемологическая модель, которой придерживается автор данного исследования [Нугаев 1989]. Согласно этой модели научные революции возникают вследствие встречи ряда “старых” парадигм, исследовательских программ или исследовательских традиций, которые не удается согласовать между собой привычным образом – за счет подчинения одной из традиций другой. Выход – создание глобальной теории, содержащей в себе встретившиеся теории в “снятом”, преобразованном виде. Важным предварительным этапом построения синтетической глобальной теории, которой успешно удастся избавиться от “трений”, противоречий между встретившимися традициями, является построение целой серии гибридных теорий. Это построение продолжается до тех пор, пока одна из гибридных моделей (и, возможно, предсказываемые ею новые экспериментальные данные) не укажут на возможный путь построения глобальной модели за счет последовательного обобщения моделей, принадлежащих к низшему уровню построения развитой научной теории. Очевидно, что построение конкретной эпистемологической модели смены теорий невозможно без предварительного прояснения структуры развитой научной теории, без уяснения того обстоятельства, что “развитая научная теория” XIX и XX вв. – это не просто модель и даже не группа моделей, но целая совокупность разных *групп* моделей. Так, согласно В. С. Степину, входящие в физическую (научную) теорию абстрактные теоретические модели организованы как сложная система, включающая подсистемы, связанные между собой по принципу *уровневой иерархии*. Подсистемы низших уровней – подсистемы производных (частных) и эмпирических объектов подчинены базисной модели – подсистеме базисных объектов высшего уровня (так называемой “фундаментальной теоретической схеме”) [Степин 2000]. В итоге создание глобальной теории является постепенным процессом медленного перехода от низшего уровня организации теоретических моделей к высшему. При этом переход к высшему уровню невозможен без заполнения низшего уровня. Но модели, послужившие строительными лесами для построения моделей высшего уровня, никуда не исчезают и не растворяются бесследно в архивах. Они сохраняются в живой практике применения теории (пусть и имплицитно, анонимно), поскольку без них процесс нормального функционирования развитой научной теории невозможен.

Цель данной работы – предложить такую реконструкцию создания и становления ОТО, которая не только позволяет высветить некоторые важные особенности генезиса этой теории, остающиеся в тени в свете других эпистемологических моделей, но и составить более целостную картину интертеоретического контекста эйнштейновской научной революции. Соответственно, в *первом разделе* рассмотрим первый этап создания ОТО (1907–1912), состоявший в предварительном конструировании гибридных моделей релятивистской теории тяготения в работах А. Эйнштейна, Г. Нордстрема и М. Абрагама. Самое значимое событие этого этапа – выдвижение, осмысление и активное использование А. Эйнштейном эвристического фундамента ОТО – так называемого “принципа эквивалентности”.

Второй раздел работы (1912–1915) посвящен разработке, на основе предыдущих достижений, первой метрической теории гравитации А. Эйнштейном и М. Гроссманом. Кульминация этого этапа – синтез теоретических схем Г. Нордстрема и М. Абрагама, а также предварительных результатов Эйнштейна на основе конструирования им “метри-

ческого тензора гравитационного поля” при помощи принципа эквивалентности и работ Г. Нордстрема и М. Лауэ. Третий этап (1913–1915) – переход от теории Эйнштейна и Гроссмана к ОТО, состоявший в модификации уравнений гравитационного поля (подробнее см. [Renn, Stachel 2007]).

Раздел 1. Создание в 1905 г. специальной теории относительности (СТО) сразу же поставило вопрос об отношении базиса этой теории к базису ньютоновской теории тяготения. Очевидное противоречие между этими теориями состояло в том, что согласно ньютоновской теории тяготения скорость гравитационного взаимодействия бесконечна; в то же время СТО запрещает передачу сигналов со скоростью большей, чем скорость света. Неслучайно у истоков релятивистской теории тяготения находится статья А. Эйнштейна “О принципе относительности и его следствиях”, в которой впервые обозначен органичный переход к релятивистской теории тяготения [Einstein 1907, 67]. В статье заложен прочный эвристический фундамент теории тяготения – *принцип эквивалентности* – “счастливейшую в моей жизни мысль”; цит. по: [Пайс 1989, 170]. Принцип эквивалентности гравитации и ускорения “...распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета. *Эвристическая ценность* этого предположения состоит в том, что оно позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению (курсив мой. – *Р.Н.*)” [Einstein 1907, 106].

С нашей точки зрения, то главное, что интересовало Эйнштейна при формулировке этого принципа – это не его натурфилософское значение, позволяющее возвести его в некий абсолютный закон природы, верный всегда и везде с какой угодно степенью точности. (Как известно, в 1907 г. он даже не знал об опытах Этвеша, уточнявших полученные еще в XVIII в. данные Кавендиша; более того, этот принцип в точности не выполняется и в самой ОТО для падающих в гравитационном поле вращающихся тел [Pараретгов 1951]). Важно, что Эйнштейн в приведенных воспоминаниях о создании ОТО апеллирует к опыту создания СТО. Так же, как и тогда, его интересует синтетическая, эвристическая составляющая этого принципа, позволяющая рассматривать различные явления (гравитации и инерции) *с единой точки зрения*. Именно последовательное применение этого принципа в кантовском духе (неслучайно термин “эвристика” восходит к “Критике чистого разума”), как это и было с СТО [Nugayev 2015], обещало позволить Эйнштейну создать систему гибридных моделей, объединяющих элементы СТО и ньютоновской теории всемирного тяготения. В итоге для Эйнштейна принцип эквивалентности – это не столько закон природы, сколько способ, шаблон построения теорий гравитации. Фактически этот принцип позволил Эйнштейну соотнести две до того различных области физики и, в частности, исследовать определенные области гравитационного поля (особенно статические) при помощи привлечения исследований (равно)ускоренного движения. С нашей точки зрения, именно при нахождении и адекватной формулировке принципа эквивалентности особенно ярко высветилось влияние кантовской эпистемологии на Эйнштейна. И наиболее важной кантовской идеей, оказавшей влияние на генезис и СТО, и ОТО, была кантовская идея *систематического единства природы*. Как известно, Эйнштейн прочитал “Критику чистого разума” сначала в 13 лет, затем перечитал в 16 [Пайс 1989, 49]. Уже на студенческой скамье он имел возможность в 1897 г. продолжить знакомство с философией Канта на лекциях А. Штадлера, неокантовца марбургской школы [Einstein 1987]. Этим знакомство с кантовской эпистемологией не ограничилось; Эйнштейн постоянно возвращался к ней всю жизнь. Например, в 1918 г. он писал М. Борну: «Я читаю здесь, помимо всего прочего, кантовские “Прологомены” и начинаю постигать ту невероятную конструктивную мощь, которая исходила и продолжает исходить от этого парня” [Born 1971, 25–26]. Или, уже в конце своего творческого пути, рассуждая о принципах теоретической физики, Эйнштейн отмечал, что “теоретическая позиция, которая здесь отстаивается, отличается от кантовской только в одном отношении, – в том, что мы не рассматриваем категории как неизменные... Они оказываются априорными только в той мере, в какой мышление без общего выстав-

ления общих категорий и понятий было бы так же невозможным, как дыхание в вакууме» [Einstein 1949, 674].

Что ещё привлекало Эйнштейна в Канте? Согласно Канту, именно свобода человека от мира, творческая активность субъекта познания делает последнее возможным. В “Приложении к трансцендентальной диалектике. О регулятивном применении идей чистого разума” [Кант 2006, 486–505] он утверждал, что наука должна рассматривать некоторые идеи разума в качестве *эвристических* (“как если бы”) устройств, обеспечивающих систематическое единство научного знания [Кант 2006, 575]. Эйнштейн, судя по всему, впервые приобщился к “эвристической точке зрения” благодаря своему раннему знакомству с “Критикой чистого разума”. Для него эвристический метод состоял в свободном изобретении тезиса, из которого известные факты следуют с логической необходимостью. Неслучайно самая глубокая и радикальная статья Эйнштейна из опубликованных в 1905 г. называлась “О некоторой эвристической точке зрения, касающейся производства и преобразования света” [Einstein 1905]. Но самым важным понятием эйнштейновской эпистемологии явилась кантовская идея систематического единства природы [Beller 2000]. Это единство вовсе не является для Канта онтологическим принципом. Бессмысленно спрашивать о том, обладает ли Природа подобным единством или нет. Напротив, идея единства обладает важным эпистемологическим значением: “Такие понятия разума не черпаются из природы; скорее наоборот, мы задаем вопросы природе сообразно этим идеям” [Кант 2006, 489].

Систематическое единство природы обеспечивает критерий значимости научной гипотезы, дополняющий критерий ее эмпирического подтверждения: “Гипотетическое применение разума имеет целью систематическое единство рассудочных знаний, а это единство служит критерием истинности правил” [Кант 2006, 490]. Поэтому из множества различных эмпирических закономерностей только такие могут рассматриваться как обладающие законоподобной необходимостью, которые могут быть включены в объединяющую общую систему. Соответственно, “любая система обладает истинным содержанием в соответствии с определенностью и полнотой возможности координации ею всей полноты и целостности опыта. Правильное предсказание заимствует свою ‘истинность’ из истинности той системы, к которой оно относится” [Einstein 1946, 13].

Нельзя не отметить, что именно подобная холистская эпистемологическая позиция позволила Эйнштейну еще в 1906 г. занять скептическую позицию по отношению к “критическим” экспериментам Кауфмана, противоречившим “теории Лоренца-Эйнштейна”. Как отмечал Эйнштейн, конкурировавшие с теорией относительности теории, подобные теории Абрагама, “...обладают достаточно небольшой вероятностью, поскольку их фундаментальные предположения (относительно массы движущихся электронов) необъяснимы в терминах теоретических систем, которые охватывают большее число явлений”; цит. по: [Holton 1968, 253]. В той же работе, в которой Эйнштейн выдвинул принцип эквивалентности, он сразу же был использован для построения первой эйнштейновской релятивистской теории гравитации. Важно, что и здесь мысль Эйнштейна движется по путям, проложенным при построении СТО. А именно: построение теории начинается с конструирования гибридного объекта, которым в данном случае выступает масса-энергия.

Действительно, важнейшим следствием СТО является тезис об эквивалентности инертной массы энергии. Но, как указывал Эйнштейн в цитирувавшемся выше отрывке из статьи 1907 г., “этот результат наводит на мысль о том, не обладает ли энергия также тяжелой (гравитирующей) массой”. Введение гибридного объекта – релятивистской инертной и одновременно гравитирующей массы – приводит к тому, что начинается экспансия методов СТО в ньютоновскую теорию тяготения и одновременно обратная экспансия методов ньютоновской теории тяготения в СТО. В результате эти теории как бы “взрываются” изнутри и происходит изменение и СТО, и ньютоновской теории тяготения, которое выражается в построении своеобразных последовательностей теорий, “осколков” произведенного взрыва. С одной стороны, неизбежная в силу последовательного применения принципа эквивалентности экспансия теории гравитации в СТО привела к серии

работ самого Эйнштейна по обобщению принципа относительности и распространению его не только на инерциальные, но и сначала на равноускоренные, а затем и на другие существенно неинерциальные системы отсчета [Einstein 1911; Einstein 1912^a; Einstein 1912^b].

С другой стороны, следствием экспансии СТО в теорию тяготения явились исследовательские программы Нордстрема и Абрагама. Пути создания этих гибридных теорий были указаны самим Эйнштейном в его основополагающей работе 1907 г. Один из важнейших выводов СТО гласит, что $E = mc^2$. В силу того, что в гравитационном поле энергия частицы зависит от значения гравитационного потенциала в месте ее расположения, эквивалентность массы и энергии требует, чтобы (1) или масса частицы зависела от гравитационного потенциала, (2) или скорость света (или обе вместе). Первая из этих возможностей была исследована Нордстремом [Nordström 1912; Nordström 1913^a, Nordström 1913^b], а вторая – Абрагамом [Abraham 1912^a; Abraham 1912^b] в их сериях статей, посвященных созданию собственных релятивистских теорий гравитации. Самым ценным результатом гибридных теорий Нордстрема и Абрагама явилось то, что именно они содержали многообещающие намеки, ценные указания на то, каким именно образом искомая глобальная теория должна быть построена. Во-первых, было продемонстрировано, что геометрия пространства-времени Минковского должна зависеть от гравитационного потенциала (Абрагам); что сам гравитационный потенциал должен быть представлен не одной функцией, но 10-компонентным объектом вместе с 10-компонентным тензором энергии-импульса в качестве его источника (Лауэ и Нордстрем); что гравитационный потенциал влияет на измерения пространства и времени (Нордстрем).

Раздел второй. В то время как Г. Минковский в 1908 г. ввел 4-мерный тензор энергии-импульса только для электромагнитного поля, Лауэ поставил себе цель распространить его результаты на более общий случай [Laue 1911^a; Laue 1911^b; Laue 1911^c]. В итоге он получил выражение для полного тензора энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$), которое оказалось содержащим три блока.

(1) Первый блок представлял собой обычный 3-мерный тензор натяжений t_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$).

(2) Вторым блоком оказался вектор \mathbf{g} (g_x, g_y, g_z), представлявшим плотность импульса.

(3) Третьим блоком оказался вектор $\boldsymbol{\theta}$ ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$), представлявшим поток энергии.

И, конечно, компонента (T_{44}) тензора энергии-импульса представляла собой энергию. Исходя из принципа эквивалентности, напрашивался вывод о том, что *каждый* блок тензора энергии-импульса давал свой вклад в потенциалы гравитационного поля, что *каждому* блоку соответствовали свои гравитационные потенциалы. Значит, потенциалов гравитационного поля должно быть несколько – скалярный потенциал, векторный потенциал, etc. Следовательно, потенциал гравитационного поля должен являться группой потенциалов и, в общем случае, должен задаваться не числом, не несколькими числами, а матрицей, тензорной величиной. Тензор должен синтезировать, обобщать, содержать в себе и скалярные, и векторные величины и сводиться к тем или иным из них в каких-то частных случаях.

Аналогия, которая, судя по всему, сыграла важную эвристическую роль – это максвелловская электродинамика, в которой общий потенциал электромагнитного поля представлен многокомпонентным 4-вектором $A^\mu = (\mathbf{A}, \varphi)$. Последний, в частном случае статического электромагнитного поля, сводится к статическому потенциалу φ . Это обстоятельство позже было точно подмечено и детально разобрано другим проницательным критиком ОТО, геттингенским знатоком теории поля физиком М. Абрагамом в статье “Современные теории гравитации”, написанной в 1914 г. в разделе, посвященном анализу метрической теории А. Эйнштейна и М. Гроссмана [Abraham 1915]. “Основная идея тензорной теории гравитационного поля может быть понята следующим образом. Плотность энергии, которая в статическом поле определяется дивергенцией градиента гравитационного потенциала, играет в теории относительности всего лишь роль одной компоненты итогового мирового тензора T ; к ней присоединяются девять других тензорных компонент, которые характеризуют как поток энергии, так и натяжения. Тензорная теория предполагает, что подобно плотности энергии T_{44} остающиеся девять компонент $T_{\mu\nu}$

($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$) генерируют гравитационные поля, потенциалы которых $g_{\mu\nu}$ сами, в свою очередь, образуя десятикомпонентный тензор” [Abraham 1915, 499].

Как свидетельствуют и переписка, и сами его работы, Эйнштейн был полностью согласен с нордстремовской оценкой важности полученного Лауэ результата для создания теории тяготения. Более того, отдельные места в его статьях 1912 и 1913 г. (в частности, предложение назвать T “скаляром Лауэ”) свидетельствуют о том, что он лично встречался с Лауэ для обсуждения проблем тензора энергии-импульса. И это неудивительно, если принять во внимание, что в 1912 г. оба исследователя преподавали в Цюрихе; один – в высшей политехнической школе (Эйнштейн), а другой – в цюрихском университете (Лауэ) [Norton 2007]. К этому следует добавить, что в том же году Нордстрем посещал Цюрих, где встречался для дискуссий и с тем, и с другим.

Как же должны быть связаны тензоры $T_{\mu\nu}$ и $g_{\mu\nu}$? Важный намек на способ связи содержится в первой статье Нордстрема по его теории гравитации: $R = T$, где R представляет собой свернутый по всем компонентам тензор Римана – Кристоффеля, – константа, а T – след тензора энергии-импульса. Но если это соотношение характерно для скалярной теории гравитации, то обобщающее его самым простым образом тензорное уравнение должно выглядеть так: $\kappa T_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\nu}$, где $\Gamma_{\mu\nu}$ “контравариантный тензор второго ранга, образованный из производных фундаментального тензора $g_{\mu\nu}$ ”. Именно так и выглядели уравнения гравитационного поля первой метрической теории тяготения – уравнения теории Эйнштейна – Гроссмана [Einstein, Grossmann 1913], опубликованной в 1913 г.! Сразу же выяснилось, что эти уравнения нековариантны в общем случае, т.е. ковариантны только относительно линейных преобразований. Но это долгое время их авторов совсем не смущало, что еще раз доказывает, что произошли они отнюдь не из требований принципа ковариантности, а возникли как обобщение обычных лоренц-ковариантных гибридных теорий гравитации Нордстрема и Абрагама. Эйнштейн отмечал в начале 1913 г. в письме своему другу П. Эренфесту: “Дело тяготения завершилось к моему полному удовлетворению (я имею в виду то, что уравнения гравитационного поля ковариантны лишь относительно линейных преобразований)”; цит. по: [Пайс 1989, 216]. Но, с другой стороны, тот же “принцип эквивалентности... позволяет нам... ввести нелинейные преобразования координат в подобном пространстве; то есть недекартовы (“криволинейные”) координаты, – пишет Эйнштейн. – Тогда псевдоевклидова метрика принимает общий вид: $ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k$, где суммирование производится по индексам i и k (от 1 до 4). Теперь g_{ik} являются функциями четырех координат, которые согласно принципу эквивалентности описывают не только метрику, но также “гравитационное поле”»; цит. по: [Seelig 1955, 55].

Тут же встал вопрос о математическом аппарате для работы с подобными математическими объектами, и вот тут-то понадобилась помощь друга, математика Гроссмана, который обнаружил, что этот аппарат был создан еще конце XIX – начале XX вв. в работах Римана, Леви-Чивиты, Кристоффеля и др. В итоге главное достижение второго этапа, принадлежавшее Эйнштейну и Гроссману, – конструирование метрического тензора, воистину гибридного объекта, который синтезировал две существенно различные исследовательские традиции – физическую (скалярные и векторные теории Нордстрема и Абрагама) и математическую (геометрические работы Римана, Кристоффеля, Леви-Чивиты и др.). Символы g_{ij} начинают играть у Эйнштейна и Гроссмана двойную роль: с одной стороны, они представляют собой физические гравитационные потенциалы, а с другой, коэффициенты в математическом выражении для значения геометрического инварианта $ds^2 = \sum g_{ij} dx^i dx^j$. Через сконструированный гибридный объект g_{ij} началось взаимопроникновение геометрии и физики: “Физика стала геометрической наукой, а геометрия – опытной” [Zahar 1989, 267]. Это взаимопроникновение и привело к становлению фундаментальной теоретической схемы ОТО. Первым его этапом стали уравнения гравитационного поля, полученные в “Наброске”: $R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ с предельно простыми представлениями о том, что потенциалы гравитационного поля представлены обычными частными производными от метрики. Тем не менее, дальнейшее проникновение физики в геометрию привело к некоторому усложнению этой простой схемы, когда Эйнштейн осознал, что грави-

тационное поле должно репрезентироваться не обычными производными от метрики по координатам, но так называемыми “символами Кристоффеля”. Тогда лагранжиан гравитационного поля стал в большей мере напоминать лагранжиан поля электромагнитного, в полном соответствии с эвристикой эйнштейновской исследовательской программы.

Источники

Кант 2006 – *Кант И.* Критика чистого разума (пер. Н. Лосского). М.: Эксмо, 2006 (*Kant I. Kritik der reinen Vernunft.* Riga, 1781).

Ссылки – References in Russian

Нугаев 1989 – *Нугаев Р. М.* Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий. Казань: Изд-во КГУ, 1989.
Пайс 1989 – *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.
Степин 2000 – *Степин В. С.* Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000.

References

Abraham 1912^a – *Abraham M.* Zur Theorie der Gravitation // *Physikalische Zeitschrift.* 1912. № 13. S. 1–4.
Abraham 1912^b – *Abraham M.* Das Elementargesetz der Gravitation // *Physikalische Zeitschrift.* 1912. № 13. S. 4–5.
Abraham 1915 – *Abraham M.* Neuere Gravitationstheories // *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik.* 1915. S. 470–520.
Beller 2000 – *Beller M.* Kant’s Impact on Einstein’s Thought // D. Howard and J. Stachel (eds.). *Einstein: The Formative Years, 1879–1909.* Boston: Birkhauser, 2000. P. 83–106.
Born 1971 – *Born M.* The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955. I. Born translation. N.Y.: Walker and Company, 1971. P. 25–26.
Einstein 1905 – *Einstein A.* Über eine die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // *Annalen der Physik.* 1905. № 17. S. 132–148.
Einstein 1907 – *Einstein A.* Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen // *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik.* 1907. № 4. S. 411–462.
Einstein 1911 – *Einstein A.* Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // *Annalen der Physik.* 1911. № 35. S. 898–908.
Einstein 1912^a – *Einstein A.* Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes // *Annalen der Physik.* 1912. № 38. S. 355–369.
Einstein 1912^b – *Einstein A.* Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes // *Annalen der Physik.* 1912. № 38. S. 443–458.
Einstein, Grossmann 1913 – *Einstein A., Grossmann M.* Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation // *Z. Math. und Phys.* 1913. № 62. S. 225–261.
Einstein 1913 – *Einstein A.* Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems // *Phys. Z.* 1913. № 14. S. 1249–1262.
Einstein, Fokker 1914 – *Einstein A., Fokker A.* Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differentialkalküls // *Annalen der Physik.* 1914. № 44. S. 321–328.
Einstein 1915 – *Einstein A.* Die Feldgleichungen der Gravitation // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 1915. № 48, 2. S. 844–847.
Einstein 1946 – *Einstein A.* Autobiographical Notes. Schlipp et al. (eds.). 1946. P. 1–14.
Einstein 1949 – *Einstein A.* Remarks Concerning the Essays Brought together in this Cooperative Volume // Schlipp P. A. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist.* Vols 1–2. Evanston, IL, 1949. P. 665–688.
Einstein 1987 – *Einstein A.* The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. I. The Early Years, 1879–1902. J. Stachel et al. (eds.). Princeton: Princeton University Press, 1987. P. 45–50.
Holton 1968 – *Holton G.* Mach, Einstein and the Search for Reality // *Daedalus.* 1968. № 97. P. 636–673.

- Laue 1911^a – *Laue M.* Zur Dynamik der Relativitätstheorie // *Annalen der Physik.* 1911. № 35. S. 524–542.
- Laue 1911^b – *Laue M.* Das Relativitätsprinzip. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn, 1911.
- Laue 1911^c – *Laue M.* Ein Beispiel zur Dynamik der Relativitätstheorie // *Verhandlungen der deutschen Physikalische Gesellschaft.* 1911. S. 513–518.
- Nordström 1912 – *Nordström G.* Relativitätsprinzip und Gravitation // *Physikalische Zeitschrift.* 1912. № 13. S. 1126–1129.
- Nordström 1913^a – *Nordström G.* Trage und Schwere Masse in der Relativitätsmechanik // *Annalen der Physik.* 1913. № 40. S. 856–878.
- Nordström 1913^b – *Nordström G.* Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzip // *Annalen der Physik.* 1913. № 42. S. 533–534.
- Norton 2007 – *Norton J. D.* Einstein, Nordström and the early demise of scalar, Lorentz covariant theories of gravitation // *J. Renn (ed.) The Genesis of General Relativity. Vol. 3. Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory and Astronomy.* Springer, 2007. P. 413–488.
- Nugayev 1999 – *Nugayev R. M.* Reconstruction of Mature Theory Change: a theory-change model. Frankfurt am Main: Peter Lang, 1999.
- Nugayev 2015 – *Nugayev R. M.* Immanuel Kant and Einstein's 1905 Revolution // *philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/1634/*, выставлено 25.08.2015 (in Russian).
- Pais A.* Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein. Oxford: Oxford University Press, 1982 (Russian translation 1989).
- Papapetrou 1951 – *Papapetrou A.* Spinning Test Particle in General Relativity // *Proceedings of the Royal Society. London,* 1951. A 209. P. 248–258.
- Renn, Sauer 2007 – *Renn J., Sauer T.* Pathways out of Classical Physics: Einstein's Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations // *J. Renn (ed.) The Genesis of General Relativity. Vol. 1.* Springer, 2007. P. 113–312.
- Renn, Stachel 2007 – *Renn J., Stachel J.* Hilbert's foundation of physics: from a theory of everything to a constituent of general relativity // *J. Renn (ed.) The Genesis of General Relativity. Vols. 3–4. Theories of Gravitation in the Twilight of Classical Physics.* Springer 2007. P. 857–974.
- Seelig 1955 – *Seelig C.* (ed.) *Helle Zeiten – Dunkle Zeiten: In memoriam Albert Einstein.* Zurich; Stuttgart; Wien: Europa Verlag, 1955.
- Stepin V. S.* Theoretical Knowledge. Synthese-Library. Dordrecht: Springer, 2005.
- Zahar 1989 – *Zahar E.* Einstein's Revolution: A Study in Heuristic. La Salle: Open Court, 1989.