

Р.М. Нугаев

Генезис общей теории относительности: плодотворный синтез теоретических схем Абрагама, Нордстрема и Эйнштейна

Нугаев Ринат Магдиевич – доктор философских наук, профессор. Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма. Российская Федерация, 420138, г. Казань, ул. Деревня Универсиады, д. 35; e-mail: rinatnugaev@mail.ru

Цель статьи состоит в уточнении и модификации распространенной точки зрения на генезис общей теории относительности (ОТО) с учетом ряда выявленных недавно историко-научных данных. Показано, что отношения между ОТО и ее конкурентами были в 1907–1915 гг. слишком сложными для того, чтобы описывать их в полярных категориях «истина–заблуждение»; на самом деле имела место не только конкуренция, но и взаимопроникновение разных «парадигм». Обосновывается, что генезис и становление ОТО детерминировались прежде всего глубокими противоречиями между такими исследовательскими традициями, как ньютоновская теория тяготения и специальная теория относительности; поэтому встреча названных традиций и их конструктивное взаимодействие привели сначала к созданию целой совокупности гибридных теоретических моделей. Постепенно за счет устранения противоречий между этими моделями и их поэтапного согласования хаотическая совокупность была приведена в систему, ядро которой образует фундаментальную теоретическую схему ОТО. Утверждается, что одной из причин победы программы Эйнштейна над успешно конкурировавшими с ней на первых этапах исследовательскими программами Абрагама и Нордстрема был синтетический характер релятивистской программы, воплощенный в т. н. «принципе эквивалентности». А значит, эйнштейновская ОТО оказалась лучше своих соперниц хотя бы потому, что уже содержала их в «снятом», существенно преобразованном виде. Именно благодаря согласованию и успешному объединению «физического» и «математического» подходов к конструированию глобальной теории, воплощенных в гибридных моделях Абрагама, Нордстрема и Эйнштейна, Эйнштейн смог успешно теоретически воспроизвести аномальное смещение перигелия планеты Меркурий. Основанием данного исследования выступает предположение, что наука развивается не за счет создания ex nihilo (из ничего) новых парадигм, но за счет тернистого и длительного процесса взаимного согласования, «притирки» и взаимопроникновения старых исследовательских традиций.

Ключевые слова: А. Эйнштейн, М. Абрагам, Г. Нордстрем, неметрические теории, гибридные модели, общая теория относительности

Известно, что создание Альбертом Эйнштейном общей теории относительности (ОТО) сопровождалось выдвиганием ее альтернативных версий Гуннаром Нордстремом [Nordstrom, 1912], Максом Абрагамом [Abraham, 1912a], Густа-

вом Ми и другими. До сих пор их работы рассматриваются преимущественно лишь как причудливые фантазии, которые в лучшем случае инициировали дискуссии вокруг ОТО. Однако вскрывшиеся за последнее время историко-научные данные [Norton, 1992; Renn & Sauer, 2007; Renn, 2007a, 2007b] ставят эту точку зрения под сомнение. Переписка Эйнштейна и Нордстрема свидетельствует, что Эйнштейн принимал самое живое участие в создании нордстремовских скалярных теорий.

Далее, следствия «Наброска» (предварительного метрического варианта ОТО, предложенного А. Эйнштейном и М. Гроссманом в 1913 г. [Einstein, Grossmann, 1913]) и ОТО [Einstein, 1915] оказались полностью совпадающими с выводами из теорий Нордстрема и Абрагама в ряде важных частных случаев [Landau & Lifshitz, 1983].

Аналогично т. н. линейное приближение в ОТО [Einstein, 1916], до сих пор используемое для детектирования гравитационных волн (например, в исследованиях по проекту LIGO, проведенных в 2015–2017 гг.), основывается на переходе к такой теории гравитации, в которой гравитационная волна, в полной аналогии с классической электродинамикой, описывается 4-вектором в плоском пространстве-времени, т. е. фактически на переходе к векторной теории Абрагама [Abraham, 1915].

Но особенно важно, что первоначальный подход Эйнштейна к созданию ОТО, с одной стороны, и подходы Абрагама и Нордстрема – с другой, были дополнительны. Эйнштейновская теория статического гравитационного поля [Einstein, 1912a] основывалась на существенно физических предпосылках, обусловленных принципом эквивалентности, в то время как теории Абрагама исходили из сугубо математических соображений, относящихся к формализму Г. Минковского. «Цюрихская тетрадь» – записная книжка, использовавшаяся Эйнштейном в качестве черновика при создании «Наброска», – свидетельствует о том, что Эйнштейн продвигался вперед на основе т. н. двойной стратегии, которая охватывала как физические, так и математические подходы к нахождению конечных полевых уравнений [Janssen & Renn, 2007; Renn & Sauer, 2007; Van Dongen, 2010].

Отмеченные особенности генезиса и функционирования ОТО приводят к следующим заключениям.

(а) Отношения между ОТО и ее конкурентами были в 1907–1915 гг. слишком сложными для того, чтобы описывать их в полярных категориях «истина–заблуждение»; на самом деле имела место не только конкуренция, но и взаимопроникновение разных «парадигм» друг в друга.

(б) Эйнштейновская ОТО оказалась лучше своих соперниц хотя бы потому, что уже содержала их в «снятом», существенно преобразованном виде.

(в) Именно благодаря объединению «физического» и «математического» подходов, воплощенных в гибридных моделях теорий Абрагама, Эйнштейна и Нордстрема, Эйнштейн смог, наконец, объяснить аномальное смещение перигелия Меркурия.

Цель данной статьи – усовершенствовать общепринятую точку зрения на генезис ОТО за счет приведения ее в соответствие с указанными выше историко-научными данными.

Основная идея работы заключается в том, что одна из главных причин победы ОТО над конкурирующими программами Абрагама и Нордстрема – синтетический характер исследовательской программы Эйнштейна. Эта программа вытеснила конкурентов потому, что искусно ассимилировала определенные элементы программы Нордстрема, равно как и разумные предположения программы Абрагама.

Настоящее исследование опирается на простую эпистемологическую модель смены теорий, которая соответствует некоторым современным достижениям философии и истории науки [Stepin, 2005] и описывает структуру и динамику развитых физических теорий. Основанием этой модели выступает предположение, что наука развивается не за счет создания ex nihilo (из ничего) новых парадигм, но за счет тернистого и длительного процесса взаимного согласования, «притирки», взаимопроникновения старых исследовательских традиций [Nugayev, 1999].

Конструирование гибридных моделей при помощи принципа эквивалентности

Создание специальной теории относительности (СТО) и глубокие противоречия между ньютоновской теорией тяготения и СТО поставило Эйнштейна и его современников перед проблемой создания релятивистской теории гравитации. Уже в 1907 г., в обзоре «О принципе относительности и его следствиях» Эйнштейн заложил концептуальные основания такой теории гравитации [Einstein, 1907], которая исходит из предположения о конечной скорости распространения гравитационных взаимодействий. В пятом разделе обзора он впервые сформулировал т. н. принцип эквивалентности, эвристическое значение которого «основывается на том факте, что он допускает замену однородного гравитационного поля равномерно ускоренной системой отсчета, позволяя сделать последний случай доступным теоретическому исследованию» [Einstein, 1907, p. 450].

В первую очередь Эйнштейн был заинтересован не в онтологическом, метафизическом содержании принципа эквивалентности, позволяющем возвести его в ранг некоего «основного закона природы». (Известно [Norton, 1992], что в 1907 г. Эйнштейн не знал об экспериментах Этвеша по установлению эквивалентности инертной и гравитационной масс.) В своих воспоминаниях о выдвижении принципа эквивалентности Эйнштейн обращается прежде всего к собственному опыту создания СТО [Pais, 1982, p. 178]. Для него было вполне рационально использовать в 1907 г. опыт, приобретенный в 1905 г. При создании и СТО, и ОТО он высматривал эвристические компоненты неких общих принципов [Ruckman, 2005]. В частности, в теории тяготения Эйнштейн с самого начала пытался рассматривать явления гравитации и инерции с единой точки зрения [Janssen, 2012, p. 162].

Именно последовательное применение принципа эквивалентности позволяло изобрести последовательность гибридных моделей, объединявших СТО и ньютоновскую теорию гравитации. Для Эйнштейна принцип эквивалентности являлся не столько законом природы, сколько паттерном, шаблоном

конструирования теорий гравитации. Он, в частности, позволял исследовать специальные виды гравитационных полей при помощи изучения ускоренного движения. И до 1911 г. Эйнштейн был в основном занят предварительным рассмотрением при помощи принципа эквивалентности явлений, превосходящих глобальную теорию гравитации, без серьезных попыток сконструировать такую теорию. Только в начале 1912 г. он был поставлен перед вызовом публикацией М. Абрагама и вынужден был пойти дальше и разработать теорию статического гравитационного поля [Norton, 1986].

Для частного случая постоянного ускорения Эйнштейн смог отождествить инерциальные эффекты со скалярным ньютоновским гравитационным полем; это позволяло надеяться, что подобные рассуждения помогут и в более общих случаях – при обобщении понятия гравитационного поля. Парадигмой обобщения служила релятивистская электродинамика. Именно СТО «объединила» электричество и магнетизм за счет рассмотрения электрического поля E и магнитного поля B в качестве компонент единого тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$. Соответственно, для Эйнштейна самым важным достижением ОТО оказалась не «геометризация» гравитационного поля, но «объединение» гравитации и инерции при помощи метрического тензора $g_{\mu\nu}$.

Между 1907 и 1911 гг. Эйнштейн изобретательно применял принцип эквивалентности для получения некоторых важных следствий своей еще не созданной релятивистской теории гравитации. Заметим, что в этих случаях он следовал по пути СТО. Действительно, создание новой теории началось с конструирования гибридных объектов, т. е. введения соотношения между массой и энергией в теорию гравитации. Одно из важных следствий СТО состояло в принципе эквивалентности энергии и массы. Но, согласно Эйнштейну, «этот результат ставит вопрос о том, обладает ли энергия также и тяжелой (гравитационной) массой. Дальнейший вопрос, который закономерно из этого следует, состоит в том, ограничено ли применение принципа относительности случаями неускоренных движущихся систем» [Einstein, 1907, p. 441].

С самого начала Эйнштейн пытался найти такую теорию гравитации, которая охватывала бы воедино знание о гравитации и инерции, представленное в классической механике, и знание о структуре пространства и времени, представленное в СТО. Однако введение гибридного объекта – гравитационной и вместе с тем инертной массы – привело к проникновению методов СТО в ньютоновскую теорию гравитации и к обратному проникновению методов ньютоновской теории гравитации в СТО. В итоге обе теории были как бы «взорваны изнутри», и в них начались необратимые изменения. Эти изменения выразились в появлении соответствующих последовательностей гибридных теоретических моделей, своего рода «осколков» произведенного взрыва.

Формирование исследовательских программ Нордстрема и Абрагама стало неизбежным следствием проникновения методов СТО в ньютоновскую теорию гравитации. Не менее неизбежным – благодаря принципу эквивалентности – было проникновение методов ньютоновской теории гравитации в СТО, которое привело к серии эйнштейновских работ по обобщению принципа относительности и распространению этого принципа не только на инерциальные, но также и на ускоренные системы отсчета. Систематический анализ подобных систем отсчета в свою очередь потребовал применения обобщенных

гауссовых координат. Следующий закономерный этап – введение метрического тензора, когда Эйнштейн сконструировал теоретический объект, способный на единой основе представлять как гравитационные, так и инерционные поля.

К началу 1912 г. Эйнштейн осознал, что должен выйти за рамки скалярной теории гравитации. Его стратегия состояла в постепенном, пошаговом приближении к окончательной динамической теории. Первый шаг программы заключался в конструировании «гравистатической» идеальной модели, т. е. гравитационного аналога электростатики. И он уже подумывал о втором, «гравистационарном» этапе, гравитационном аналоге магнитостатики. Его конечная цель состояла в разработке теории зависящего от времени гравитационного поля.

Отметим, что даже направления создания теорий Нордстрема и Абрагама были обозначены самим Эйнштейном в его основополагающей статье 1907 г. В самом деле, одно из важных следствий СТО гласит: $E = mc^2$. Поскольку в гравитационном поле энергия частицы зависит от значения гравитационного потенциала в месте ее нахождения, эквивалентность массы и энергии означает, что (1) или масса частицы m , (2) или скорость света c , (3) или же обе величины должны быть функциями гравитационного потенциала.

Эти возможности – зависимость гравитационного потенциала или от скорости света, или от инертной массы – были использованы Абрагамом в соответствующих сериях статей [Abraham, 1912b, 1912c, 1915] и Нордстремом [Nordsrom, 1912, 1913a, 1913b], соответственно. Ценный результат гибридных теорий Нордстрема и Абрагама состоял в том, что все они содержали многообещающие намеки на то, как должна быть создана глобальная теория [Norton, 1992].

Генезис «Наброска»

Обратимся к результатам исследования Г. Нордстрема, полученным при помощи работ М. Лауэ. Хотя уже Г. Минковский ввел четырехмерный тензор энергии-импульса в процессе разработки четырехмерных методов в СТО, использование этого тензора ограничивалось специальным случаем электромагнитного поля. Работы Лауэ и были посвящены проблемам обобщения результатов Минковского и на другие случаи [Laue, 1911a, 1911b, 1911c]. В итоге Лауэ пришел к такому выражению для тензора энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$), которое содержало три основных блока:

- (1) первый представлял обычный трехмерный тензор p_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$),
- (2) второй представлял плотность импульса g (g_x, g_y, g_z),
- (3) третий – поток энергии θ ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

Эйнштейновский принцип эквивалентности требовал, чтобы каждый блок давал свой собственный вклад в систему потенциалов гравитационного поля, т. е. чтобы каждый блок относился к своим собственным гравитационным потенциалам. Поэтому должна существовать целая система гравитационных потенциалов – скалярных, векторных и т. д., но не один-единственный потенциал. Общий гравитационный потенциал должен образовывать группу нескольких потенциалов, и в общем случае описываться матрицей, тензором [Abraham, 1915, p. 499], отдельные части которого преобразуются при переходе от одной системы отсчета к другой подобно скалярам, векторам и т. д.

Сразу же было установлено, что в общем случае уравнения «Наброска» нековариантны; они только остаются таковыми по отношению к линейным ортогональным преобразованиям. Но авторов «Наброска» в течение долгого времени это ничуть не смущало, что еще раз указывает на то, что полевые уравнения «Наброска» были созданы отнюдь не на основе т. н. принципа ковариантности [Einstein, 1993], а за счет кропотливого синтеза гибридных теорий Нордстрема и Абрагама при помощи полученных М. Лауэ результатов.

Встал вопрос о математическом аппарате, способном оперировать с такими своеобразными математическими объектами. В частности, основная проблема состояла в нахождении дифференциального оператора второго ранга для метрического тензора, ковариантного по отношению к возможно большему допустимому классу преобразований координат. В августе 1912 г. Эйнштейн покинул Прагу для того, чтобы занять должность профессора в Цюрихском высшем политехническом училище. После возвращения в Цюрих он возобновил сотрудничество со своим другом М. Гроссманом – для решения проблемы математического представления потребовалась его помощь. Гроссман выяснил, что подходящий математический аппарат был разработан в конце XIX в. в работах Римана, Леви-Чивиты, Риччи, Кристоффеля и других.

Но подлинное начало разработки метрической программы может быть отнесено к 1912 г. В опубликованной 15 февраля заметке Абрагам переосмыслил те идеи, при помощи которых он ранее оценивал формализм Г. Минковского, и ввел бесконечно малый линейный элемент с изменяющейся метрикой, распространяя таким образом пространство-время Минковского на более общее, риманово многообразие [Abraham, 1912a].

Абрагам оказался первым, кто использовал ключевую для ОТО математическую репрезентацию гравитационного потенциала при помощи 4-мерного линейного элемента, содержащего переменный метрический тензор. Понятно, что на первых порах абрагамовское выражение оставалось просто математическим курьезом без какого-либо глубокого физического смысла [Einstein, 1993]. Но именно под настойчивым абрагамовским влиянием Эйнштейн в мае 1912 г. понял, что обобщение линейного элемента $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, как это и предлагалось в комментариях Абрагама, сделанных тремя месяцами ранее, является ключом к подлинно метрической теории гравитации [Einstein, 1912].

В итоге, основное достижение второго этапа состояло в изобретении метрического тензора, который был введен в качестве гибридного объекта, объединяющего две существенно различные исследовательские традиции – «физическую» (скалярные и векторные теории Эйнштейна, Нордстрема и Абрагама) и «математическую» (геометрические результаты Римана, Кристоффеля, Леви-Чивита и других). Теперь компоненты g_{ij} играют двойственную роль. С одной стороны, они репрезентируют физические потенциалы гравитационного поля, а с другой – коэффициенты выражения $ds^2 = \sum g_{ij} dx^i dx^j$. За счет изобретения гибридного объекта g_{ij} началось взаимопроникновение геометрии и физики: физика стала геометрической, а геометрия – физической [Zahar, 1989, p. 267].

Сам Эйнштейн, повторим, не рассматривал геометризацию гравитационного поля в качестве главного достижения своей исследовательской программы, подчеркивая, что ОТО не более и не менее «геометрична», чем максвелловская электродинамика [Lehmkuhl, 2014].

Создание окончательной релятивистской теории гравитации

Взаимопроникновение геометрии и физики в конечном счете привело к конструированию фундаментальной теоретической схемы ОТО. В серии статей, представленных прусской академией наук 4, 11, 18 и 25 ноября 1915 г., Эйнштейн постепенно заменил «Набросок» полноценной метрической теорией гравитации, попутно разобравшись, наконец, с проблемой теоретического воспроизведения аномального смещения перигелия планеты Меркурий. Для уяснения подлинных причин перехода от «Наброска» к ОТО мы должны принять во внимание эйнштейновскую синтетическую дуальную стратегию, охватывавшую и примирявшую как физический, так и математический подходы к нахождению окончательной системы уравнений гравитационного поля.

Избранный Эйнштейном «дуальный метод» предполагал, что прежде всего необходимо «индуктивно» продвигаться вперед в соответствии с такими предположениями существенно физического характера, как т. н. «ньютоновский предел» и принцип сохранения энергии и импульса. Вместе с тем «комплементарная», направленная «сверху вниз» (ван Донген) или «дедуктивная» математическая стратегия коренилась в принципе эквивалентности и в обобщении принципа относительности. Эти принципы совместно обеспечивали общую ковариантность уравнений поля. Соответственно, естественным исходным пунктом математического подхода явилось введение и тщательное исследование ковариантного математического объекта, известного из математической литературы.

Сперва возобладал физический подход, что привело с необходимостью к «Наброску»; но затем верх одержал подход математический, что выразилось в окончательной победе ОТО в ноябре 1915 г. При этом «правильные» уравнения ОТО были получены Эйнштейном уже в 1912 г. в «Цюрихской тетради», но они оказались несовместимыми с принципами физического подхода. Прежде всего, они не вели к ньютоновской метрике $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$ в приближении слабого поля. Напротив, одним из очевидных преимуществ уравнений «Наброска» было то, что при переходе к ньютоновскому пределу не было необходимости – для того, чтобы получить уравнения Пуассона, – в принятии печально знаменитых «гармонических» координатных условий.

Тем не менее, в свете дуальной стратегии и синтетического характера, которым релятивистская теория гравитации должна обладать, неудивительно, что общая нековариантность уравнений гравитационного поля подверглась суровой критике как Абрагама [Abraham, 1914], так и Ми [Mie, 1914a, 1914b]. Сам Эйнштейн вначале был глух к этим аргументам, однако вскоре был вынужден отказаться от теории «Наброска». Это случилось после того, как он и Микеле Бессо применили метрику $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$ для подсчета аномального смещения перигелия Меркурия и получили результат, который в 2,4 раза отличался от наблюдаемого значения.

Тем не менее в дальнейшем Эйнштейн нашел-таки выход из затруднения, созданного «Наброском»: он вернулся к полузабытой математической стратегии и к требованию общей ковариантности, так поспешно оставленному при работе над «Цюрихской тетрадью». К концу недели, последовавшей за 11 ноября 1915 г., он вновь проделал расчеты смещения перигелия Меркурия. Эйнштейн

наконец-то осознал, что ковариантное уравнение $R_{\mu\nu} - (R/2)g_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$ не может быть совместимым с ньютоновской метрикой $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$. Теперь он был вынужден признать существенно тензорный характер теории гравитации и, в частности, вынужден был допустить, что пространственные компоненты метрического тензора также являются функциями координат: $g_{\mu\nu} = \text{diag}\{g_{00}(x), g_{11}(x), g_{22}(x), g_{33}(x)\}$. Погрузившись еще глубже в вычисления, Эйнштейн получил, наконец, правильное выражение смещения перигелия: $43''$, что прекрасно согласовывалось с данными наблюдений $-45'' \pm 5''$ за столетие.

В итоге именно возвращение к математическому требованию общей ковариантности «принесло спасение» и освободило Эйнштейна от его предубеждений, относящихся к ньютоновскому пределу $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$. Он ярко описал свои переживания этого воистину выдающегося достижения в знаменитом письме Бессо:

Прочти статьи! Они несут спасение от несчастий. Самая радостная сторона – это *согласие [гармония] между движением перигелия и общей ковариантностью* (курсив мой. – Р. Н.), но тем не менее самая потрясающая – то обстоятельство, что ньютоновская теория поля неверна уже в первом приближении (появляются члены $g_{11}-g_{33}$) [цит. по: Van Dongen, 2010, p. 29].

В свете предложенной реконструкции генезиса ОТО отмеченное выше «согласие [гармония] между движением перигелия и общей ковариантностью» представляется очевидным. Эйнштейн смог выйти на правильное объяснение аномального движения (основанное на понимании, что в этой ситуации имеет место несколько гравитационных сил, действующих не только в плоскости вращения Меркурия вокруг Солнца) только тогда, когда полностью осознал тензорный характер гравитационного поля. То есть тогда, когда он понял, что $g_{\mu\nu}$ – это множество, содержащее не только скалярные компоненты, подобные $g_{00}(r, m)$, но и компоненты g_{11}, g_{22}, g_{33} , каждая из которых также зависит от r и m .

Окончательные уравнения ОТО – «уравнения Эйнштейна» – были получены только в ноябре 1915 г., т. е. с момента обнаружения вопиющего несоответствия между предсказаниями «Наброска» и наблюдательными данными, относящимися к аномальному движению перигелия Меркурия, прошло целых два года. И несмотря на то, что сам Эйнштейн действительно отмечал эту аномалию как одну из действительных причин отказа от «Наброска» и перехода к ОТО (см., например, его известное письмо Арнольду Зоммерфельду от 28 ноября 1915 г. [Einstein, 1998, p. 206–209], на самом деле ситуация была не столь проста. «Набросок» смог объяснить только часть аномального смещения, но не всю аномалию целиком. Но Эйнштейн по вполне разумным причинам не считал это обстоятельство окончательным опровержением «Наброска», поскольку оставшиеся необъясненными части могли быть вызваны другими, существенно негравитационными факторами. Несмотря на то, что указанная аномалия была обнаружена Эйнштейном и Бессо уже в июне 1913 г., целых два года – вплоть до сентября 1915 г. – Эйнштейн постоянно и настойчиво выражал уверенность в справедливости теории «Наброска» [Einstein, 1993] Основной импульс в переходе от «Наброска» к ОТО исходил от дуальной стратегии, побуждавшей Эйнштейна согласовывать физический и математический подходы. И только после того, как он эффективно согласовал эти подходы, т. е. только

после того, как он осознал значение общей ковариантности уравнений гравитационного поля, Эйнштейн смог прийти к правильному объяснению перигелия Меркурия. В итоге решающим фактором при конструировании ОТО стали попытки согласовать физический и математический подходы, представленные гибридными теоретическими схемами Абрагама, Нордстрема и самого Эйнштейна. Достоверное объяснение смещения перигелия Меркурия оказалось побочным продуктом именно этих попыток.

Список литературы / References

- Abraham, 1912a – Abraham, M. “Zur Theorie der Gravitation”, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol. 13, S. 1–4.
- Abraham, 1912b – Abraham, M. “Das Elementargesetz der Gravitation”, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol. 13, S. 4–5.
- Abraham, 1912c – Abraham, M. “Der Freie Fall”, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol. 13, S. 310–311.
- Abraham, 1912d – Abraham, M. “Nochmals Relativität und Gravitation. Bemerkung zu A. Einsteins Erwiderung”, *Annalen der Physik*, 1912, vol. 38, S. 1056–1058.
- Abraham, 1914 – Abraham, M. “Die neue Mechanik”, *Scientia*, 1914, vol. 15, s. 8–27.
- Abraham, 1915 – Abraham, M. “Neuere Gravitationstheories”, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1915, vol. 11, S. 470–520.
- Einstein, 1907 – Einstein, A. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen”, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907, vol. 4, S. 411–462.
- Einstein, 1912 – Einstein, A. “Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes”, *Annalen der Physik*, 1912, vol. 38, S. 443–458.
- Einstein, 1915 – Einstein, A. “Die Feldgleichungen der Gravitation”, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, vol. 48, S. 844–847.
- Einstein, 1916 – Einstein, A. “Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1916, vol. 1, S. 688–696.
- Einstein, 1993 – Einstein, A. *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 5. The Swiss Years: Correspondence, 1902–1914*, ed. by M.J. Klein, A.J. Kox & R. Schulmann. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993. 216 pp.
- Einstein, 1998 – Einstein, A. *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 8. Correspondence 1914–1918*, ed. by R. Schulmann, M. Janssen, J. Illy. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998. 247 pp.
- Einstein, Grossmann, 1913 – Einstein, A. Grossmann, M. “Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation”, *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1913, vol. 62, S. 225–261.
- Janssen and Renn, 2007 – Janssen, M., Renn, J. “Untying the knot: how Einstein found his way back to field equations discarded in the Zurich notebook”, *The Genesis of General Relativity, vols. 1–2*, ed. by J. Renn. Dordrecht: Springer, 2007, pp. 838–926.
- Janssen, 2012 – Janssen, M. “The twins and the bucket: How Einstein made gravity rather than motion relative in general relativity”, *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2012, vol. 43, pp. 159–175.
- Landau & Lifshitz 1983 – Landau, L., Lifshitz, E. *Theory of Fields*. London: Pergamon Press, 1983. 504 pp.
- Laue, 1911a – Laue, M. “Zur Dynamik der Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 1911, vol. 35, S. 524–542.

Laue, 1911b – Laue, M. *Das Relativitätsprinzip*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn, 1911. 366 S.

Laue, 1911c – Laue, M. “Ein Beispiel zur Dynamik der Relativitätstheorie”, *Verhandlungen der deutschen Physikalische Gesellschaft*, 1911, vol. 13, S. 513–518.

Lehmkuhl, 2014 – Lehmkuhl, D. “Why Einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, vol. 46, pp. 316–326.

Mie, 1914a – Mie, G. “Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie”, *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol. 15, S. 115–122.

Mie, 1914b – Mie, G. “Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie. II”, *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol. 15, S. 169–176.

Nordstrom, 1912 – Nordström, G. “Relativitätsprinzip und Gravitation”, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol. 13, S. 1126–1129.

Nordstrom, 1913a – Nordström, G. “Trage und Schwere Masse in der Relativitätsmechanik”, *Annalen der Physik*, 1913, vol. 40, S. 856–878.

Nordstrom, 1913b – Nordström, G. “Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzip”, *Annalen der Physik*, 1913, vol. 42, S. 533–534.

Norton, 1986 – Norton, J. D. “What was Einstein’s Principle of Equivalence Principle”, *Einstein’s Studies*, 1986, vol. 1, pp. 3–87.

Norton, 1992 – Norton, J. D. “Einstein, Nordström and the Early Demise of Scalar, Lorentz Covariant Theories of Gravitation”, in: *Archive for the History of Exact Sciences*, 1992, vol. 45, pp. 17–94 (reprinted in: Jürgen, R. (ed.) *The Genesis of General Relativity. Vol. 3. Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory and Astronomy*. Dordrecht: Springer, 2007, pp. 413–488).

Nugayev, 1999 – Nugayev, R. *Reconstruction of Mature Theory Change: A Theory-Change Model*. Frankfurt am Main: Peter Lang, 1999. 199 pp.

Pais, 1982 – Pais, A. *Subtle is the Lord. The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982. 576 pp.

Renn and Sauer, 2007 – Renn, J., Sauer, T. “Pathways out of Classical Physics: Einstein’s Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations”, in: *The Genesis of General Relativity, vol. 1.*, ed. by J. Renn. Dordrecht: Springer, 2007, pp. 113–312.

Renn, 2007a – Renn, J. Classical Physics in Disarray. The Emergence of the Riddle of Gravitation, in: *The Genesis of General Relativity, vols. 1–2*, ed. by J. Renn. Dordrecht: Springer, 2007, pp. 21–84.

Renn, 2007b – Renn, J. The summit almost scaled: Max Abraham as a pioneer of a relativistic theories of gravitation, in: *The Genesis of General Relativity. Vol. 3. Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory and Astronomy*, ed. by J. Renn. Dordrecht : Springer, 2007, pp. 305–330.

Ryckman, 2005 – Ryckman, T. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915–1925*. Oxford: Oxford University Press, 2005. 330 pp.

Stepin, 2005 – Stepin, V. *Theoretical Knowledge*. Dordrecht-Reidel: Springer, 2005. 744 pp.

Van Dongen, 2010 – Van Dongen, J. *Einstein’s Unification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 213 pp.

Zahar, 1973 – Zahar, E. *Einstein’s Revolution: A Study in Heuristic*. La Salle: Open Court, 1989. 373 pp.

Ze’ldovich, Ja. B., Novikov, I. D. *Stars and Relativity*. L: Pergamon Press, 1973. 654 pp.

The genesis of general relativity: efficacious unification of theoretical schemes of Abraham, Nordstrom and Einstein

Rinat M. Nugayev

Volga Region State Academy. 33 Universiade Village, Kazan, 420138, Russian Federation; e-mail: rinatnugaev@mail.ru

The aim of the paper is to amend the received view on the general relativity (GR) genesis by taking into account some recently discussed history of science data. It is contended that the relations between the GR and its ingenious rivals were far more complicated in 1907–1915 than it may seem from the pestered “truth-falsity” dilemma, so that one can contemplate the interlacement and *interpenetration* of rival “paradigms” into each other. The genesis of GR as an instance of an epistemological model of mature theory change that hinges upon ‘old’ theories encounter and interaction is elucidated. The epistemological model fits some achievements of current philosophy and history of science and deals with mature theory dynamics and structure. The model asserts that the history of physics does not advance through the creation *ex nihilo* of new paradigms, but rather through long-term processes of reconciliation, interpenetration and intertwinement of “old” research traditions. I strengthen arguments in favour of the tenet that the dynamic creation of the GR had been continually governed by internal tensions between two research traditions, that of special relativity and Newton’s gravity. The encounter of the traditions, their deep interpenetration and fanciful intertwinement entailed construction of the hybrid domain at first with an irregular set of theoretical models. The invention of relativistic theory of gravity had commenced with the crossbred object construction in Einstein’s 1907 paper, i. e. with the implantation of mass-energy relation into the theory of gravity. The crossbred object entry – the introduction of inertial and simultaneously gravitational mass – led to a penetration of SR methods into Newtonian theory of gravity and to a reverse penetration of Newtonian gravity methods into the SR. As a result, the both theories were radically rebuilt from within and the corresponding changes in both of them were set up. The changes were epitomized in the peculiar sequences of crossbred models, the byproducts of the transformation performed. Step by step, on eliminating the contradictions between the models contrived, the hybrid set was put into order. It is maintained that one of the reasons for the GR victory over the rival programmes of Abraham and Nordström was a synthetic character of Einstein’s programme. As a result of reconciling and amalgamating the “physical” and “mathematical” approaches, embodied in Abraham, Einstein and Nordström’s crossbred theoretical models, Einstein was able to explain at last the anomalous motion of Mercury. Einstein’s programme did supersede the rival ones because it did deftly assimilate sober premises of the Nordström programme as well as judicious presuppositions of the programme of Abraham. In particular, Einsteinian programme’s convincing victory over its rivals became possible since Einstein had put forward as a basic synthetic principle the Principle of Equivalence.

Keywords: Einstein, Abraham, Nordström, general relativity, nonmetric theories, hybrid models