
ФИЗИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ, ГРАВИТАЦИЯ И РЕГУЛЯРНАЯ УСКОРЕННОСТЬ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

А.В. Минкевич

Белорусский национальный университет (Минск)

Рассмотрены возможности решения проблем космологии и релятивистской астрофизики в рамках теории Эйнштейна–Картана (геометрии с кручением).

Ключевые слова: Континуум Римана–Картана, кручение, теория Эйнштейна Картана, ускоренное расширение Вселенной, космологическая постоянная.

К числу фундаментальных проблем современной теоретической физики следует отнести проблемы, связанные с природой физического пространства-времени и гравитации. В соответствии с общей теорией относительности (ОТО), являющейся в настоящее время общепринятой основой теории гравитации, физическое пространство-время представляет собой псевдориманов континуум, а гравитационное поле, имеющее в качестве своего источника тензор энергии-импульса, описывается уравнениями тяготения Эйнштейна. В нерелятивистском приближении ОТО приводит к закону всемирного тяготения Ньютона, а наблюдательное подтверждение в рамках Солнечной системы отклонений от закона Ньютона, а также построение изотропной космологии Фридмана явились основой для триумфа теории тяготения Эйнштейна. Удовлетворительное описание в рамках ОТО различных астрофизических объектов, а также информация об обнаружении гравитационных волн свидетельствуют о важнейшем месте ОТО в теории гравитационного взаимодействия.

В то же время известны принципиальные проблемы, присущие ОТО и возникающие на космологическом и астрофизическом уровне. К их числу прежде всего следует отнести проблему космологической сингулярности (ПКС) или проблему начала Вселенной во времени. Еще в 50-е годы XX века академик Л.Д. Ландау указывал на ПКС как на одну из наиболее принципиальных физических проблем. Невзирая на значительные успехи в выяснении природы космологической сингулярности в ОТО [1], ПКС остается одной из наиболее принципиальных проблем теории Эйнштейна. Другая проблема ОТО связана с невидимыми составляющими материи – темной материей и темной энергией. Их введение необходимо для согласования наблюдательных данных с космологическими и астрофизическими следствиями ОТО. В результате подавляющая часть энергии во Вселенной (около 95%) оказывается связанной с темной материей и темной энергией, природа которых неизвестна.

Предпринималось множество попыток с целью решения указанных проблем ОТО на основе различного рода альтернативных теорий тяготения. Некоторые обобщения ОТО связаны с принципиальными изменениями стандартной теории (теория струн, многомерные теории, М-теория); в настоящее время известен ряд альтернативных теорий тяготения, построенных в рамках обычной полевой схемы (например, различные скалярно-векторно-тензорные теории, $f(R)$ -теории и т.д.). Следует отметить, что многие существующие альтернативные теории тяготения базируются на вводимых *ad hoc* гипотезах, не имеющих солидного теоретического обоснования. В то же время известна теория тяготения, являющаяся естественным и в определенном смысле необходимым обобщением теории тяготения Эйнштейна, открывающая пути для решения проблем ОТО и приводящая к появлению некоторых принципиально новых особенностей физической теории, связанных с гравитационным взаимодействием. Речь идет о калибровочной теории тяготения в 4-мерном пространстве-времени Римана–Картана U_4 (ТТРК). ТТРК с необходимостью появляется в рамках калибровочного подхода при включении группы тетрадных лоренцевых преобразований (наряду с 4-параметрической группой трансляций) в состав калибровочной группы, соответствующей гравитационному взаимодействию. Если принять во внимание принципиальное значение принципа локальной калибровочной инвариантности в теории фундаментальных физических взаимодействий, а также важнейшую роль группы Лоренца в физике, следует отметить особое место ТТРК в теории гравитационного взаимодействия. Роль переменных поля тяготения в ТТРК играют тетрада и неголономная лоренцева связность, соответствующие им напряженности – тензоры кручения и кривизны, а при использовании минимальной связи гравитационного поля с материей в качестве источников поля тяготения выступают тензоры энергии-импульса и спинового момента материи. После появления в начале 60-х годов XX века первых работ, посвященных ТТРК (Т.В.В. Kibble, Д.Д. Иваненко, D.W. Sciama), дальнейшие исследования ТТРК проводились многими исследователями и в настоящее время насчитывают огромное количество работ, включающих в себя изучение как общей структуры ТТРК, так и физических аспектов ТТРК. Заметим, что первые работы по ТТРК были связаны с изучением теории Эйнштейна–Картана, базирующейся на выборе гравитационного лагранжиана L_g в виде скалярной кривизны пространства-времени U_4 и занимающей особое положение с точки зрения калибровочного подхода [2].

В рамках калибровочного подхода лагранжиан калибровочного поля обычно задается как функция, квадратичная относительно напряженностей калибровочного поля. Отличительная особенность ТТРК состоит в наличии ряда инвариантов, квадратичных относительно напряженностей поля тяготения, а также существовании линейного по кривизне инварианта. В настоящее время в литературе известны различные ТТРК, отличающиеся выбором L_g как функции напряженностей гравитационного поля. Поскольку детальная структура L_g неизвестна, представляет интерес изучение ТТРК при выборе достаточно общего выражения L_g , включающего помимо скалярной

кривизны всевозможные квадратичные относительно тензоров кривизны и кручения инварианты с неопределенными параметрами (см. напр. [7; 8]), ограничения на которые устанавливаются исходя из рассмотрения физических следствий теории. Гравитационные уравнения при таком выборе гравитационного лагранжиана представляют собой сложную систему дифференциальных уравнений в частных производных, их изучение упрощается в случае систем, обладающих высокой пространственной симметрией.

Наиболее высокой симметрией обладают пространственно однородные изотропные модели (ОИМ), изучаемые в рамках изотропной космологии. Исследование изотропной космологии, построенной в рамках ТТРК, и приводит к установлению важных особенностей гравитационного взаимодействия, непосредственно связанных со структурой физического пространства-времени в вакууме в отсутствие материальных источников. Действительно, если допустить, что пространство в отсутствие материи является однородным и изотропным, установление геометрической структуры пространства-времени в вакууме должно базироваться на уравнениях для ОИМ. Без наложения каких-либо ограничений на неопределенные параметры гравитационного лагранжиана космологические уравнения изотропной космологии ТТРК, обобщающие фридмановские космологические уравнения ОТО, а также уравнения для функций кручения ОИМ были получены в [3]. Данные уравнения приводят к принципиальному выводу: пространство-время в вакууме имеет структуру континуума Римана–Картана с метрикой де Ситтера. Данный вывод существенно отличается от того, что мы имеем в ОТО, где в отсутствие космологической постоянной пространство-время в вакууме в случае плоских ОИМ представляет собой мир Минковского. В рамках стандартной Λ CDM-модели пространство-время де Ситтера появляется в ОТО как результат введения в уравнения Эйнштейна космологической постоянной, которая ассоциируется с вакуумом квантованных полей. При этом возникает так называемая проблема космологической постоянной, связанная с невозможностью обоснования на основе стандартной теории элементарных частиц малой величины космологической постоянной, которая соответствует среднему значению плотности энергии во Вселенной в современную эпоху.

В рамках ТТРК подобная проблема отсутствует, поскольку эффективная космологическая постоянная индуцируется кручением, а вакуумные значения метрики, а также двух функций кручения выражаются через неопределенные параметры гравитационного лагранжиана. Появление в космологических уравнениях ТТРК, имеющих в асимптотике структуру космологических уравнений Фридмана с эффективной космологической постоянной, приводит к эффекту вакуумного отталкивания, что позволяет объяснить наблюдаемое ускоренное космологическое расширение без введения понятия темной энергии. Это означает, что гравитационное взаимодействие в ТТРК имеет характер отталкивания, когда плотность энергии мала и сопоставима с величиной эффективной космологической постоянной. Заметим, что данный эффект проявляется в космологических масштабах и не суще-

ственен в астрофизическом масштабе (галактики, скопления галактик) благодаря малости эффективной космологической постоянной. Если пространство-время в вакууме имеет структуру пространства-времени де Ситтера с кручением, концепция вакуума как физического понятия претерпевает существенные изменения в рамках классической теории поля. Вместо вакуума как пассивного вместилища физических объектов и процессов вакуум приобретает динамические свойства как гравитирующий объект, обладающий кривизной и кручением. Это приводит к принципиальным отличиям гравитационного взаимодействия по сравнению с другими фундаментальными физическими взаимодействиями. Поскольку свойства вакуума в ТТРК получены на основе рассмотрения ОИМ, в случае которых среднее значение спинового момента гравитирующей материи равно нулю, кручение вакуума никоим образом не связано со спином. В то же время взаимодействие вакуумного кручения со спиновым моментом гравитирующей материи может проявляться в астрофизике [2].

При соответствующих ограничениях на неопределенные параметры в уравнениях для ОИМ взаимодействие вакуумного кручения с вращательными моментами звезд в галактиках, а также галактик в скоплениях галактик приводит к появлению дополнительной гравитационной силы, которая вместе с ньютоновской силой гравитационного притяжения может оказывать влияние на их движение в нерелятивистском приближении. Характер данной силы (притяжение или отталкивание) зависит от взаимной ориентации собственного вращательного и орбитального моментов импульса рассматриваемого объекта. Наличие дополнительной силы гравитационного притяжения может оказаться существенным при формировании кривых вращения в галактиках, что представляет интерес в связи с проблемой темной материи [2]. В то же время дополнительная гравитационная сила, вызванная взаимодействием вакуумного кручения с вращательными собственными моментами астрофизических объектов, в случае ее существования является пренебрежимо малой и не проявляет себя в Солнечной системе при рассмотрении движения планет. В случае космологических ОИМ данная сила вовсе отсутствует.

Влияние кручения пространства-времени на гравитационное взаимодействие проявляется не только благодаря существованию вакуумного кручения. Его влияние проявляется в экстремальных условиях – в случае систем с экстремально высокими плотностями энергии и давлениями. При некоторых ограничениях на неопределенные параметры гравитационного лагранжиана уравнения изотропной космологии приводят к появлению предельной (то есть максимально допустимой) плотности энергии [4], которая в рамках классической теории должна быть меньше планковской плотности энергии. В результате все космологические решения для ОИМ являются регулярными относительно параметра Хаббла с его временной производной, а также относительно кручения и кривизны. Данные решения соответствуют модели Big Bounce (а не Big Bang) и включают стадию космологического сжатия, предшествующую стадии космологического расширения. Регулярный пере-

ход от сжатия к расширению оказывается возможным благодаря тому, что гравитационное взаимодействие при плотностях энергии, близких к предельной плотности энергии, имеет характер отталкивания, а не притяжения; важнейшую роль при этом играет кручение пространства-времени, порождаемое бесспиновой материей. Существование предельной плотности энергии должно предотвращать коллапс массивных звезд, приводя к регуляризации черных дыр. В случае гравитирующих систем с плотностями энергии, значительно меньшими предельной плотности, но существенно превышающими плотности энергии, соответствующие эффективной космологической постоянной, в отсутствие спина у материи описание гравитационного поля в ТТРК и ОТО практически совпадают [2; 5].

Мы видим, что решение проблем ОТО в рамках ТТРК существенно связано с изменением характера гравитационного взаимодействия в определенных условиях, что обусловлено более общей структурой физического пространства-времени, а именно его кручением. Важнейшую роль при этом играет физический вакуум, имеющий существенно нелинейную природу. Локально в пределах Солнечной системы отличие структуры физического пространства-времени в вакууме от пространства-времени Минковского не проявляет себя благодаря малости соответствующих поправок метрики, а также кручения [2]. Однако в космологическом, а также астрофизическом масштабах данные различия имеют принципиальное значение и приводят к наблюдаемым физическим следствиям. Хотя калибровочная теория тяготения в 4-мерном пространстве-времени Римана–Картана строится в рамках обычной полевой схемы с использованием общепринятых принципов, включая принцип локальной калибровочной инвариантности, некоторые физические следствия данной теории выводят нас за рамки существующих представлений. В частности, это касается законов сохранения энергии, импульса, момента импульса для пространственно ограниченных систем. Интегральная формулировка данных законов сохранения не имеет места в случае систем, где существенную роль играет физический вакуум с его геометрической структурой континуума Римана–Картана.

Наибольший интерес в настоящее время представляет обнаружение наблюдательных данных, относящихся к обсуждавшимся выше физическим следствиям ТТРК. В первую очередь, это относится к возможным проявлениям дополнительной гравитационной силы, связанной со взаимодействием вакуумного кручения с вращательными моментами астрофизических объектов, в частности в скоплениях звезд с большими угловыми скоростями вращения, таких как пульсары (см. [6]). Несмотря на малость соответствующих эффектов в пределах Солнечной системы, представляет интерес их обнаружение при наблюдении движения гироскопов, запущенных в космос. Имеется ряд теоретических проблем, связанных с изучением ТТРК, в частности исследование состава по частицам данной теории, при котором учитывалось бы отличие физического пространства-времени в вакууме от мира Минковского; динамика массивных объектов с предотвращением коллапса и др. Следует заметить, что обсуждавшиеся выше физические следствия получе-

ны при наложении вполне определенных ограничений на параметры гравитационного лагранжиана, установленные по мере исследования ТТРК. Уточнение этих ограничений имеет важное значение, если полагать, что калибровочная теория тяготения в 4-мерном пространстве-времени Римана-Картана соответствует реальной Вселенной¹.

Исследования ТТРК продолжаются более полувека (ряд работ представлен в [10]), вначале основное внимание было связано с изучением возможной принципиальной роли спина и связанного с ним кручения в теории гравитации, при этом считалось, что в соответствии с теорией Эйнштейна-Картана кручение исчезает в случае бесспиновой материи. Однако, как следует из вышеизложенного, именно кручение, порождаемое бесспиновой материей, и вакуумное кручение приводят к важным физическим следствиям. Большой вклад в развитие ТТРК внесли отечественные ученые: Д.Д. Иваненко со своей группой, В.Н. Пономарев с сотрудниками, Ю.Н. Обухов, Б.Н. Фролов, В.А. Рубаков с сотрудниками. Деятельность ряда иностранных ученых посвящена изучению ТТРК, среди них: польская школа во главе с А. Trautman, коллектив во главе с F.W. Hehl, К. Hayashi and Т. Shirafuji, М. Blagojevic, J.M. Nester, S. Capozziello и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Belinski V.A.* On the cosmological singularity // *Int. J. Mod. Phys. D.* – 2014. – V. 23. – P. 1430016 (30 p.). URL: arXiv:1404.3864.
2. *Minkevich A.V.* Torsion and gravitational interaction in Riemann-Cartan space-time. URL: arXiv:1709.09035 [gr-qc] (in press).
3. *Minkevich A.V.* De Sitter spacetime with torsion as physical spacetime in the vacuum and isotropic cosmology // *Mod. Phys. Lett. A.* – 2011. – V. 26 – P. 259–266. URL: arXiv:1002.0538 [gr-qc].
4. *Minkevich A.V.* Limiting energy density and a regular accelerating Universe in Riemann-Cartan spacetime // *JETP Letters.* – 2011. – V. 94 – P. 831–836.
5. *Minkevich A.V.* Relationship of gauge gravitation theory in Riemann-Cartan space-time and General relativity // *Grav. Cosmol.* – 2017. – V. 23 – P. 311–315. URL: arXiv:1609.05285 [gr-qc].
6. *Бисноватый-Коган Г.С.* Двойные и подкрученные радиопульсары: через 30 лет после наблюдательного открытия // *УФН.* – 2006. – Т. 176 – С. 1–17.
7. *Minkevich A.V., Garkun A.S., Kudin V.I.* On some physical aspects of isotropic cosmology in Riemann-Cartan spacetime // *Journal of Cosmology and Astropart. Physics.* – 2013. – 03. – 40 (16 p.). URL: arXiv:1302.2578 [gr-qc].
8. *Hayashi K., Shirafuji T.* Gravity from Poincare gauge theory of the fundamental particles // *Progr. Theor. Phys.* – 1980. – V. 64. – P. 866–896, 1435–1452, 2222–2241.
9. *Baekler P., Hehl F.W., Nester J.M.* Poincare gauge theory of gravity: Friedman cosmology with even and odd parity modes. Analytic part // *Phys. Rev. D.* – 2011. – V. 83. – 024001.
10. *Blagojevic M., Hehl F.W.* Gauge theories of gravitation, A Reader with Commentaries, World Scientific, 2013. – P. 156.

¹ При использовании дискриминантного тензора Леви-Чивита при построении гравитационного лагранжиана гравитационные уравнения усложняются, и соответствующая ТТРК представляет собой теорию без сохранения пространственной четности (см., например, [9]).

PHYSICAL SPACE-TIME, GRAVITY AND REGULAR ACCELERATION OF THE UNIVERSE EXPANSION

A.V. Minkevich

The article examines the possibilities of solving the problems of cosmology and relativistic astrophysics within the framework of the Einstein-Cartan theory (torsion geometry).

Key words: Riemann-Cartan continuum, torsion, Einstein Cartan theory, accelerated expansion of the universe, cosmological constant.