

DOI: 10.22363/2224-7580-2023-4-101-109

EDN: WYWWUY

ПРОБЛЕМА ПЕРЕНОСА ИНФОРМАЦИИ ТРАУТМАНА, ПРОБЛЕМА ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ И СТАТУС ПУАНКАРЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ

О.В. Бабурова¹, Б.Н. Фролов²

*¹Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет*

Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64

*²Институт физики, технологии и информационных систем
Московского педагогического государственного университета
Российская Федерация, 119435, Москва, М. Пироговская ул., 29/7*

Аннотация. Перенос информации представляет собой одну из проблем распространения гравитационных волн в связи с перспективой возможного использования высокочастотных гравитационных волн для создания космических средств связи. Требования к переносу информации сформулированы в виде проблемы Траутмана, определяющей условия, при которых гравитационные волны инвариантным образом переносят содержащуюся в них информацию. Вторая проблема распространения гравитационных волн – это проблема переноса энергии-импульса, что не решается в общей теории относительности, но может быть решено в Пуанкаре калибровочной теории гравитации, для которой сформулирован «критерий сильной локализуемости энергии-импульса гравитационного поля». Обсуждены особенности двух подходов в Пуанкаре калибровочной теории гравитации.

Ключевые слова: перенос информации и энергии гравитационными волнами, проблема Траутмана, Пуанкаре калибровочная теория гравитации, сильная локализуемость энергии

Самым важным фундаментальным экспериментальным научным открытием последнего времени стало, без всякого сомнения, недавнее открытие гравитационных волн. Это открытие, безусловно, имеет надежду на практическое применение в сравнительно отдаленном будущем, связанное с тем, что высокочастотные гравитационные волны могут стать технологической основой для создания новых космических средств связи. Гравитационные волны, в отличие от электромагнитных волн, являются более эффективными для коммуникации, так как электромагнитные волны, согласно закону Бугера – Ламберта, легко поглощаются почти любым веществом.

В связи с этим основная задача, стоящая перед использованием гравитационных волн, – это перенос информации, что ставит необходимость решения следующих задач. Во-первых, обоснование возможности инвариантного

переноса информации без искажения и, во-вторых, переноса энергии гравитационными волнами. Последнее важно, так как несомненно произошло экспериментальное открытие переноса гравитационной энергии, поскольку при фиксации гравитационной волны происходит обмен энергией между волной и фиксирующим волну прибором.

В связи с этим вопросом необходимо принять во внимание активно обсуждаемые в прошлом известные трудности, связанные с невозможностью построения в ОТО удовлетворительного ковариантного тензора энергии-импульса гравитационного поля, составленного из компонент метрического тензора [1]. В 1964 году автором статьи было построено из тетрад общековариантное выражение тензора энергии-импульса гравитационного поля [2], но оно оказалось не ковариантным относительно локализованных преобразований Лоренца (с параметрами, являющимися произвольными функциями координат).

Общепринято, что физической теорией, адекватно описывающей гравитационное взаимодействие, является общая теория относительности А. Эйнштейна (ОТО). Однако, хотя на основе ОТО в пространстве Римана были разработаны многие астрофизические и космологические модели, описывающие многие структуры наблюдаемой Вселенной, тем не менее многие авторы полагают, что ОТО не является полностью завершенной теорией. Кроме отсутствия удовлетворительного выражения для тензора энергии-импульса гравитационного поля, в ОТО до сих пор существует целый ряд проблем, требующих своего решения. Это проблемы наличия сингулярностей, проблема определения начальных данных, проблема космологической постоянной и ряд других. Кроме того, несмотря на то, что (как уже указывалось) имеется ряд экспериментальных подтверждений эффектов ОТО, в то же время существует ряд астрофизических и гравитационных явлений, не имеющих своего объяснения ни в рамках теории гравитации Ньютона, ни в рамках теории гравитации Эйнштейна [3]. В связи с этим многие специалисты по гравитации пришли к необходимости поиска обобщения и модификации ОТО. Одним из возможных направлений такого обобщения является предположение о более сложной, чем пространство Римана, геометрической структуре пространства-времени. Поиск такого рода обобщений происходил весь XX век и привел к открытию большого разнообразия новых геометрических структур.

В связи с этим в настоящей работе авторы обращают внимание на тот аспект, связанный с проблемой гравитационного излучения, что построены геометрические структуры возникают при калибровочной трактовке гравитационного взаимодействия. В Пуанкаре калибровочной теории гравитации (ПКТГ) [4–7] возникает пространство Римана – Картана с кривизной и кручением, а в Пуанкаре – Вейля калибровочной теории гравитации (ПВКТГ) [8–10] возникает аффинно-метрическое пространство с кривизной, кручением и неметричностью, наделенное дополнительным условием Вейля, то есть пространство Картана – Вейля.

Первая из указанных выше проблем, связанных с возможностью передачи информации гравитационными волнами инвариантным образом без искажений, была сформулирована А. Траутманом [11] (см. также [12]), который указал, что для передачи информации гравитационными волнами соответствующие решения уравнений гравитационного поля должны содержать произвольные функции, с помощью которых может быть записана необходимая для распространения информация. Авторы статьи дополнили это утверждение А. Траутмана требованием необходимости распространения информации инвариантным образом без искажений [13; 14]. Эти два требования к распространению гравитационных волн авторами были названы проблемой Траутмана, что оправдано ввиду важности указанной проблемы.

Ранее авторами, в связи с разрешением требований проблемы Траутмана, был проведен ряд исследований [15–17], в которых были доказаны следующие теоремы.

Теорема 1. 2-форма кручения пространства Римана – Картана типа плоской волны имеет следующую структуру: бесследовая часть зависит от двух произвольных функций запаздывающего аргумента, а след и псевдослед зависят каждый от одной произвольной функции.

Теорема 2. 1-форма неметричности аффинно-метрического пространства типа плоской волны имеет следующую структуру: три ее неприводимые части, инвариантные относительно преобразований Лоренца, а именно вейлевская 1-форма, следовая 1-форма и 1-форма спина 3, определяются по одной произвольной функции каждая, а 1-форма спина 2 определяется двумя функциями.

Приведенные теоремы указывают на то, что тензор кручения в пространстве Римана – Картана и тензор неметричности в общем аффинно-метрическом пространстве содержат достаточное число произвольных функций для переноса информации плоскими гравитационными волнами кручения и неметричности, что решает первую часть проблемы Траутмана для этих пространств.

Вторую часть Проблемы Траутмана решают две доказанные авторами следующие теоремы [13; 14].

Теорема 3. Действие производной Ли на 2-форму кривизны плоской гравитационной волны в пространстве Римана в направлении вектора, генерирующую 5-параметрическую группу G_5 инвариантности этой волны, тождественно равно нулю.

Теорема 4. Действие производной Ли на 2-форму кривизны плоской гравитационной волны в пространстве Римана – Картана в направлении вектора, генерирующего 5-параметрическую группу G_5 инвариантности этой волны, тождественно равно нулю.

Данные теоремы содержат доказательство (с помощью аппарата производных Ли и метрики Кундта [18] плоских гравитационных волн) того, что тензор кривизны пространства Римана в ОТО и тензор кривизны пространства Римана – Картана инвариантны относительно действия группы G_5 симметрии плоских электромагнитных и гравитационных волн [19]. Тем самым

обе теоремы обосновывают, что тензор кривизны этих пространств инвариантен при переносе информации плоскими волнами и тем самым сохраняет эту информацию, что обосновывает возможность передачи информации гравитационными волнами инвариантным образом без искажений.

Для выполнения оставшихся требований проблемы Траутмана необходимо доказательство инвариантности тензора кривизны аффинно-метрического пространства относительно действия группы G_5 симметрии плоских гравитационных волн, что будет выполнено в последующих работах.

Обратимся теперь ко второй из указанных ранее проблем, а именно к обоснованию возможности переноса энергии гравитационными волнами. Исследования показывают, что в Пуанкаре калибровочной теории гравитации возникает возможность ковариантного описания энергии-импульса гравитационного поля.

Впервые калибровочная теория поля на примере локализации группы $SU(2)$ была изложена Янгом и Миллсом в 1954 году [20]. Довольно скоро была найдена геометрическая интерпретация этой теории на основе математической теории расслоенных пространств, или, в других терминах, теории G -структур. При этом калибровочная производная в теории Янга – Миллса была сопоставлена оператору обобщенного внешнего дифференциала, ковариантность которого обеспечивается наличием линейной связности. Такая возможность обеспечивается совпадением при калибровочных преобразованиях трансформационных свойств линейной связности и полей Янга – Миллса. Это, в свою очередь, приводит к отождествлению при геометрической интерпретации линейной связности расслоенного пространства и потенциалов полей Янга – Миллса.

Затем в 1956 году Р. Утияма [21] предложил на основе локализации группы Лоренца калибровочную интерпретацию формул ОТО, что получило название калибровочной теории гравитации (КТГ) (см. также [22]). Однако КТГ не соответствовала калибровочной теории в полной мере, так как в этой теории была осуществлена калибровочная интерпретация только связности и тензора кривизны, но в качестве потенциалов гравитационного поля использовалась не линейная связность, как в теории Янга – Миллса, а метрический тензор (следуя А. Эйнштейну).

Указанный недостаток калибровочного подхода Утиямы к ОТО был преодолен открытием Пуанкаре калибровочной теории гравитации (ПКТГ), в которой локализации подвергалась не группа Лоренца, а группа Пуанкаре [4–7], являющаяся группой изометрий пространства-времени Минковского, включающая все сдвиги и псевдовращения этого пространства.

Но при этом возникает видимость противоречия, связанного с тем, что в соответствии с принципом соответствия ПКТГ должна при определенных условиях переходить в ОТО как свой предельный случай. Но в ОТО потенциалом гравитационного поля является, следуя А. Эйнштейну, метрический тензор, в то время как в ПКТГ потенциалом гравитационного поля должна быть связность, как в теории Янга – Миллса.

Указанная видимость противоречия разрешается тем, что группа Пуанкаре является минимальной подгруппой аффинной группы. Поэтому при геометрической интерпретации ПКТГ возникает *аффинное* расслоенное пространство, в котором потенциалам гравитационного поля сопоставляется *аффинная* связность, а не линейная связность, как в теории Янга – Миллса.

Аффинная связность в аффинном расслоенном пространстве разлагается на сумму линейной связности и 1-формы припайка, которая может быть выражена через тетрады. В этом случае аффинная связность называется связностью Картана. Как следствие, структуры группы Пуанкаре в ПКТГ в качестве потенциалов гравитационного поля присутствуют как линейная связность, так и метрический тензор через тетрады. При этом существенно, что ПКТГ обобщает ОТО в том плане, что требует наличия в пространстве-времени не только кривизны, но и кручения. В качестве вариационного принципа используется обобщенный формализм Палатини [23], означающий независимое варьирование по линейной связности тетрад.

Следует отметить, что ПКТГ была сформулирована в двух подходах, различающихся тем, что именно рассматривается в качестве источника поля кручения. В работе [4] в качестве лагранжиана теории рассматривался скаляр кривизны, а в качестве источников поля кручения рассматривались спины элементарных частиц. Позднее А. Траутман сформулировал данный подход как теорию Эйнштейна – Картана [24].

В работах автора [5–7] (и в последующих [25–31], см. также ссылки в [28]) ПКТГ рассматривалась исключительно как классическая теория без апелляции к теории элементарных частиц и была ориентирована на использование квадратичных по кривизне лагранжианов. В основе данного подхода лежит доказанная в [5] (см. также [28; 30]) *Теорема об источниках калибровочного поля*.

Теорема 5. Источником калибровочного поля, вводимого локализованной группой $\Gamma(x)$, служит инвариант теоремы Нётер, соответствующий нелокализованной группе Γ .

Согласно этой теореме в ПКТГ при локализации группы Пуанкаре возникают два типа калибровочных полей. Первое из них (h -поле) порождается инвариантом теоремы Нётер, соответствующим подгруппе трансляций, то есть тензором энергии-импульса внешних полей. Другое калибровочное поле (r -поле) порождается инвариантом теоремы Нётер, соответствующим подгруппе 4-вращений, а именно собственным моментом вращения тела совместно с орбитальным угловым моментом, зависящим явно от координат тела [28–31]. Эта явная зависимость от координат вызвала ряд критических замечаний [32]. Однако данное нековариантное уравнение поля удается с использованием первого уравнения поля преобразовать к явно ковариантному виду с источником только в виде собственного момента вращения тела.

Это ковариантное уравнение предсказывает возможное существование в обсуждаемом подходе ПКТГ дополнительного r -взаимодействия, осуществляющего возможное изменение движения центра масс тела как следствие изменения скорости его вращения, возникающего вследствие взаимодействия с

другим r -полем. О возможности существования r -взаимодействия авторами указывалось в ряде работ [28–31], где указывалось на возможные эффекты такого рода взаимодействия. В ряде опубликованных работ [33–36] можно найти указание на существование эффектов (типа изменения веса при изменении вращения тела), которые могут найти свое объяснение существованием r -взаимодействия. С этим же эффектами связаны известные работы Н.А. Козырева [37].

Еще одно возможное предсказание ПКТГ связано с энергией-импульсом гравитационного поля. В работе [38] был предложен принципиально новый подход для ковариантного описания энергии-импульса гравитационного поля, который может быть реализован в более общих, чем ОТО, постромановых геометрических структурах, в том числе в ПКТГ. Данный подход получил название «критерий сильной локализуемости энергии-импульса гравитационного поля». Суть этого подхода состоит в выполнении следующих требований:

- локальное распределение плотности энергии-импульса (в точке пространства-времени) должно быть общековариантно, но может быть не ковариантно относительно локализованных преобразований Лоренца;

- полное интегральное значение энергии-импульса *в любом объеме* должно быть как общековариантно, так и ковариантно относительно локализованных преобразований Лоренца;

- тензор энергии-импульса гравитационного поля должен сохраняться в сумме с выражением для энергии-импульса внешнего поля, представляющим собой физически достоверное обобщение на искривленное пространство тензора энергии-импульса в плоском пространстве-времени.

Фундаментальные взаимодействия в природе, такие как кварк-глюонное и электрослабое взаимодействия, носят калибровочный характер, и поэтому для них может быть реализована геометрическая интерпретация на языке расслоенных пространств, осуществляя тем самым *принцип геометризации фундаментальной физики*.

ПКТГ при своей геометрической интерпретации является адекватной аналогией геометрическим интерпретациям калибровочных теорий других фундаментальных физических полей, в которых проблемы законов сохранения, в том числе проблема закона сохранения энергии-импульса, решаются вполне успешно.

В качестве примера рассмотрим сохранение тока, например, в хромодинамике при калибровочной трактовке. В этом случае сохраняющийся ток из-за явного наличия калибровочных потенциалов также калибровочно инвариантен, как и в случае гравитационного поля в ОТО. Но полное интегральное выражение заряда в любом объеме калибровочно инвариантно, так как оно выражается через напряженность поля, являющуюся тензором.

Поэтому следует ожидать, что в ПКТГ проблема закона сохранения энергии-импульса гравитационного поля должна быть решена столь же успешно, как и в остальных калибровочных теориях фундаментальной физики.

Литература

1. *Владимиров Ю. С.* Классическая теория гравитации. М.: ЛЕНАРД, 2015. 304 с.
2. *Фролов Б. Н.* Об истинном тензоре энергии-импульса гравитационного поля // Вестник Моск. ун-та, сер. физ., астроном. 1964. № 2. С. 56–63.
3. *Iorio L.* Gravitational anomalies in the solar system? // Int. J. Mod. Phys. D. 2015. Vol. 24, no. 6. P. 1530015, 37 p. (arXiv:1412.7673v3 [gr-qc]).
4. *Kibble W.B.* Lorentz invariance and gravitational field // J. Math. Phys. 1961. Vol. 2. P. 212. Перевод в сб. «Элементарные частицы и компенсирующие поля». М.: Мир, 1964. С. 274–298.
5. *Фролов Б. Н.* Принцип локальной инвариантности и теорема Нётер // Вестник Моск. ун-та, сер. физ., астроном. 1963. № 6. С. 48–58.
6. *Фролов Б. Н.* Принцип локальной инвариантности и теорема Нётер // Проблемы гравитации: тезисы докладов Второй советской гравитационной конференции. Тбилиси, 1965. С. 154–160.
7. *Фролов Б. Н.* Принцип локальной инвариантности и теорема Нётер // Современные проблемы гравитации: сборник трудов советской гравитационной конференции». Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1967. С. 270–278.
8. *Babourova O. V., Frolov B. N., Zhukovsky V. Ch.* Gauge Field Theory for Poincaré Weyl Group // Phys. Rev. D. 2006. Vol. 74. P. 064012–1–12 (gr-qc/0508088, 2005).
9. *Бабурова О. В., Жуковский В. Ч., Фролов Б. Н.* // Теоретич. матем. физ. 2008. Т. 157, № 1. С. 64–78.
10. *Babourova O. V., Frolov B. N., Zhukovsky V. Ch.* Theory of Gravitation on the Basis of the Poincaré Weyl Gauge Group // Gravit. and Cosmol. (Гравитация и космология). 2009. Vol. 15, no. 1. P. 13–15.
11. *Trautman A.* On the propagation of information by waves // In: Recent Development in General Relativity (Pergamon Press, Oxford–London–New York–Paris, PNN–Polish Scientific Publishers, Warszawa, 1962). P. 459–464.
12. *Крамер Д., Штефани Х., Мак-Каллум М., Херльт Э.* Точные решения уравнений Эйнштейна / под ред. Х. Шмутцера; пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 416 с.
13. *Babourova O. V., Frolov B. N., Khetzeva M. S., Kushnir D. V.* The structure of the curvature tensor of plane gravitational waves // J. Phys: Conf. Ser. 2021. Vol. 2081. P. 012014.
14. *Babourova O. V., Frolov B. N., Khetzeva M. S., Kushnir D. V.* Trautman problem and its solution for plane waves in Riemann and Riemann–Cartan spaces // Gravit. Cosmol. 2023. 29 (2). P. 103–109.
15. *Babourova O. V., Frolov B. N., Klimova E. A.* Plane torsion waves in quadratic gravitational theories in Riemann–Cartan space // Class. Quantum Grav. 1999. Vol. 16. P. 1149–1162 (gr-qc/9805005).
16. *Babourova O. V., Frolov B. N., Scherban' V. N.* Study of Plane Torsion Waves in the Poincaré Gauge Theory of Gravity // Gravit. Cosmol. 2013. Vol. 19. P. 144.
17. *Babourova O. V., Frolov B. N., Khetzeva M. S., Markova N. V.* Structure of plane gravitational waves of nonmetricity in affine-metric space // Class. Quantum Grav. 2018. Vol. 35. P. 175011–175018.
18. *Ehlers J., Kundt W.* Exact solutions of the gravitational field equations // Gravitation / ed. by L. Witten. John Wiley, New York, 1962. P. 49–101.
19. *Bondi H., Pirani F. A. E., Robinson I.* Gravitational Waves in General Relativity. III. Exact Plane Waves // Proc. R. Soc. London, A. 1959. Vol. 251. P. 519–533.
20. *Yang C. N., Mills R. L.* Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance // Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 191–195. Перевод в сб.: Элементарные частицы и компенсирующие поля. М.: Мир, 1964. С. 28–38.

21. *Utiyama R.* Invariant Theoretical Interpretation of Interaction // *Phys. Rev.* 1956. Vol. 101. P. 1597–1607. Перевод в сб.: *Элементарные частицы и компенсирующие поля.* М.: Мир, 1964. С. 250–273.
22. *Бродский А. М., Иваненко Д. Д., Соколик Г. А.* Новая трактовка гравитационного поля // *ЖЕТФ.* 1961. Т. 41. С. 1307–1309.
23. *Frolov B. N.* Tetrad Palatini Formalism and Quadratic Lagrangians in the Gravitational Field Theory // *Acta Phys. Polon.* 1978. Vol. B9. P. 823–829.
24. *Trautman A.* Einstein–Cartan theory // *Encyclopedia of Mathematical Physics;* François, J.-P., Naber G. L., Tsou S. T., Eds.; Elsevier: Oxford, UK, 2006. P. 189–195.
25. *Фролов Б. Н.* Об уравнениях гравитационного поля в квадратичной теории гравитации // *Изв. высш. учебн. завед. Физика.* 1977. № 3. С. 154–155.
26. *Фролов Б. Н.* Задача Шварцшильда в квадратичной теории гравитации // *Изв. высш. учебн. завед. Физика.* 1977. № 3. С. 155–156.
27. *Фролов Б. Н.* Задача Фридмана в квадратичной теории гравитации // *Изв. высш. учебн. завед. Физика.* 1978. № 5. С. 148–149.
28. *Фролов Б. Н.* Пуанкаре-калибровочная теория гравитации. М.: МПГУ. Прометей, 2003. 160 с.
29. *Frolov B. N.* On the physical field generated by rotating masses in Poincare-gauge theory of gravity // *International Scientific Meeting “Physical Interpretations of Relativity Theory PIRT-2003”* (Moscow, Liverpool, Sunderland, 2003). P. 213–219. arXiv:gr-qc/0702004v1.
30. *Frolov B. N.* On foundations of Poincare-gauge theory of gravity // *Gravit. Cosmol.* 2004. Vol. 6, no. 4 (24). P. 116–120.
31. *Babourova O. V., Frolov B. V.* Interaction of the 4-rotational gauge field with orbital momentum, gravitomagnetic effect, and orbital experiment «Gravity Probe B» // *Physical Review D.* 2010. Vol. 82, Iss. 2. P. 027503–027505.
32. *Hehl F. W., Heyde P. von der, Kerlick G. D., Nester J. M.* General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects // *Rev. Mod. Phys.* 1976. Vol. 48. P. 393–416.
33. *Hayasaka H., Takeuchi S.* Anomalous weight reduction on a gyroscope’s right rotations around the vertical axis on the Earth // *Phys. Rev. Lett.* 1989. Vol. 63. P. 2701.
34. *Роцин В. В., Годин С. М.* Экспериментальное исследование физических эффектов в динамической магнитной системе // *Письма в ЖЭТФ.* 2000. Т. 26, вып. 24. С. 70–75.
35. *Волков Ю. В.* Естественные и технические науки. 2002. № 1. С. 19.
36. *Mao Yi., Tegmark M., Guth A., Cabi S.* Constraining Torsion with Gravity Probe B // *Phys. Rev. D.* 2007. Vol. 76. 104029 (26). ArXiv:gr-qc/0608121v3, 2007.
37. *Kozyrev N. A.* Selective Works. Leningrad: Leningrad Univ. Publishing House, 1991.
38. *Фролов Б. Н.* Критерий сильной локализуемости энергии и кручение // *Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации: тезисы докладов». X Российской гравитационной конференции.* Владимир, 20–27 июня 1999 г. М., 1999. С. 81.

THE TRAUTMAN PROBLEM OF INFORMATION TRANSFER, THE PROBLEM OF ENERGY TRANSFER BY GRAVITATIONAL WAVES AND THE STATUS OF THE POINCARÉ GAUGE THEORY OF GRAVITY

O.V. Babourova¹, B.N. Frolov²

*¹Department of Physics, Moscow Automobile and Highway
State Technical University (MADI)*

64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation

*²Department of Theoretical Physics, Institute of Physics, Technology
and Information Systems, Moscow Pedagogical State University (MPGU)
29/7 M. Pirogovskaya St, Moscow, 119435, Russian Federation*

Abstract. The transfer of information is one of the problems of the propagation of gravitational waves in connection with the prospect of the possible use of high-frequency gravitational waves for the creation of space communications. The requirements for information transfer are formulated in the form of the Trautman problem, which defines the conditions under which gravitational waves invariantly transfer the information contained in them. The second problem of the propagation of gravitational waves is the problem of energy-momentum transfer, which is not solved in general relativity, but can be solved in the punch of the gauge theory of gravity, for which the “criterion of strong localization of the energy-momentum of the gravitational field” is formulated. The features of two approaches in the Poincaré gauge theory of gravity are discussed.

Keywords. Transfer of information and energy by gravitational waves, Trautman problem, Poincaré gauge theory of gravity, strong localization of energy