

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Д2-95-331

В.Н.Стрельцов

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
КАК СЛЕДСТВИЕ ЗАКОНА ИНЕРЦИИ
ЭНЕРГИИ. ЛОРЕНЦ-КОВАРИАНТНАЯ
ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

1995

Общая теория относительности как следствие закона инерции энергии. Лоренц-ковариантная теория тяготения

Отмечается, что закон инерции энергии (ЗИЭ) послужил в свое время причиной отказа от лоренц-ковариантной или релятивистской теории тяготения и стал основой при построении общей теории относительности (ОТО). Обусловленный им тензорный характер гравитационного потенциала позволил отождествить последний с метрическим тензором. ОТО стала одновременно теорией неэвклидова пространства-времени. Ранее было установлено, что ЗИЭ противоречит лоренц-ковариантности. Этот факт, как показано, ставит под сомнение справедливость положения о тензорном характере потенциала тяготения. Тем самым становится актуальной дальнейшая разработка лоренц-ковариантной теории тяготения, основой которой является релятивистский (4-векторный) потенциал Ньютона.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1995

Перевод автора

Strel'tsov V.N.

D2-95-331

General Relativity Theory as a Consequence of the Law of Energy Inertia. The Lorentz-Covariant Theory of Gravity

It is noted that the law of energy inertia (LEI) served at one time as a cause of refusal the Lorentz-covariant or relativistic theory of gravity and has become a base when constructing the general relativity theory (GTR). The tensor nature of the gravitational potential, conditioned by it, makes it possible to identify the latter one with the metric tensor. GTR has become simultaneously a theory of non-Euclidean space-time. It has been ascertained earlier that LEI contradicts the Lorentz covariance. This fact, as it is shown, doubts the justice of position on the tensor nature of the gravitational potential. A further working out of the Lorentz-covariant theory of gravity is becoming actual, the base of which is Newton's relativistic (4-vector) potential.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1995

ВВЕДЕНИЕ

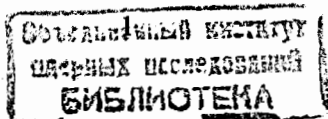
Первые попытки релятивизации гравитации в рамках специальной теории относительности (СТО) восходят еще к Пуанкаре [1] и Минковскому [2]. Однако так случилось, что лоренц-ковариантная или релятивистская теория тяготения (РТТ) как таковая фактически была отвергнута уже в период своего становления. Дело в том, что нековариантное представление о росте массы* со скоростью привело, в частности, к выводу о невозможности описания потенциала тяготения с помощью 4-вектора [3, с.219]. Больше того, это представление послужило основой так называемого закона (принципа) эквивалентности массы и энергии, или закона инерции энергии (ЗИЭ). Вообще, как замечает Эйнштейн, «масса и энергия, согласно следствиям СТО, представляют собой одно и то же» [3, с.613].

Ниже мы попытаемся, насколько это вообще возможно, проследить соображения, приведшие к отказу от РТТ и построению общей теории относительности (ОТО). Обратим внимание на особую роль ЗИЭ в этом процессе. Мы остановимся также на характерных особенностях ОТО, ее отличии в нерелятивистском пределе от теории Ньютона. Покажем несостоятельность известных аргументов в пользу тензорного характера потенциала тяготения и неэвклидовой 4-геометрии во вращающихся системах отсчета. Кроме того, мы приведем характерные формулы лоренц-ковариантной теории тяготения, опирающиеся на 4-векторный потенциал, временную компоненту которого представляет «собственно ньютонов» потенциал.

1. ТРУДНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РТТ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОТО

Начнем со статьи Эйнштейна 1912 г. [3, с.219], где мы читаем: «Одним из важнейших результатов теории относительности является утверждение, что всякая энергия E обладает пропорциональной ей массой (E/c^2). Поскольку же всякая инертная масса является, насколько нам известно, в то

*Являющейся лоренцевым скаляром (инвариантом).



же время тяжелой массой, мы не можем не приписать всякой энергии E также и тяжелую массу E/c^2 . Отсюда немедленно следует, что сила тяжести действует на движущееся тело сильнее, чем на то же самое тело, но покоящееся.

Если поле тяжести может быть истолковано в смысле нашей теперешней теории относительности, то это может быть сделано, вероятно, только двумя способами. Вектор гравитационного поля можно представить либо как 4-вектор, либо как 6-вектор... Однако при этом получаются результаты, которые противоречат указанным выше следствиям из положения о тяжелой массе энергии. Таким образом, вектор гравитационного поля (т.е. упомянутые 4-вектор и 6-вектор напряженности, а значит, скалярный либо векторный потенциал. — В.С.), по-видимому, не может быть введен без противоречий в схему теперешней теории относительности».

Подтверждение сказанному можно найти и в последующих воспоминаниях Эйнштейна 1933 г. [4, с.404], где читаем: «Первый шаг на пути решения этой задачи я впервые сделал, пытаюсь рассматривать закон тяготения в рамках СТО... Путь к этому был не столь очевиден, поскольку инертная масса могла зависеть от гравитационного потенциала. Этого даже следовало ожидать в силу ЗИЭ.

Однако эти исследования привели к результату, который вызывал у меня глубокое недоверие. Согласно классической механике, ускорение тела в вертикальном поле тяготения не зависит от горизонтальной составляющей скорости. С этим связано то обстоятельство, что ускорение механической системы или ее центра тяжести в подобном поле тяготения не зависит от ее внутренней кинетической энергии. Согласно же разрабатывавшейся мною теории, ускорение падения зависело от горизонтальной скорости и, следовательно, от внутренней энергии системы.

Это противоречило давно известному опытному факту, что все тела падают в поле тяжести с одинаковым ускорением. Этот закон, который иначе можно сформулировать как закон равенства инертной и тяжелой масс... Тогда я отказался от попытки рассматривать упомянутым выше образом проблему гравитации в рамках СТО».

В сущности, то же самое пишет Эйнштейн в «Автобиографических заметках» 1948 г. [5, с.282]. Конструируемая теория, как он полагал, «должна была соединять в себе следующие вещи:

1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что инертная масса физической системы при увеличении полной энергии... должна возрастать;

2) из очень точных опытов в особенности из опытов Этвеша... было эмпирически известно с очень большой точностью, что тяжелая масса тела в точности равна его инертной массе...

Однако выяснилось, что в рамках намеченной программы это элементарное положение вещей не может быть учтено надлежащим образом... Это убедило меня в том, что в рамках СТО нет места для удовлетворительной теории тяготения».

Как видно из приведенных высказываний, именно представление о зависимости массы от скорости послужило причиной отказа от РТТ. Больше того, ЗИЭ обусловил фактически возникновение ОТО и стал основой ее построения. В частности, это выразилось в том, что гравитационному потенциалу были приписаны свойства тензора, что позволило отождествить его с метрическим тензором, отражающим геометрическую структуру пространства-времени. Тем самым ОТО стала наряду с теорией гравитации одновременно теорией пространства-времени.

2. ОСОБЕННОСТИ ОТО

Безусловно, самой характерной особенностью ОТО надо считать прямую связь потенциала тяготения с метрическим тензором. Это, в свою очередь, является следствием фундаментального положения, что гравитационные свойства любой системы должны определяться ее энергетическими свойствами [3, с.271]. Само же положение, как известно, непосредственно опирается на ЗИЭ. В результате в уравнении Пуассона плотность массы заменяется на плотность энергии — компоненту тензора энергии-импульса [3, с.489]. И как замечает Эйнштейн [4, с.64]: «Если в ОТО существует уравнение, аналогичное уравнению Пуассона, то оно должно быть тензорным уравнением для тензора гравитационного потенциала g_{ik} ».

Таким образом, в рамках ОТО гравитационный потенциал является 10-компонентной величиной, при этом символы Кристоффеля, или аффинная связность Γ_{kl}^i играют роль напряженностей гравитационного поля [4, с.63]. В общем случае это 40 величин.

Для характерного центрально-симметричного гравитационного поля решения уравнений тяготения Эйнштейна задают метрику Шварцшильда

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\varphi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - r^2 (\sin^2 \vartheta d\varphi^2 + d\vartheta^2) - \left(1 + \frac{2\varphi}{c^2}\right)^{-1} dr^2, \quad (1)$$

где φ — потенциал Ньютона. В частности, в ньютоновом приближении имеем [4, с.69]

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\varphi}{c^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2\varphi}{c^2}\right) (dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (2)$$

При этом метрический тензор представляют в виде

$$g_{ik} = \eta_{ik} + h_{ik}, \quad (3)$$

где η_{ik} — тензор Минковского.

Как следует из (2), в ньютоновом приближении гравитационный потенциал имеет по крайней мере 4 компоненты $h_{00} = h_{\alpha\alpha} = 2\varphi/c^2$ и 6 величин напряженностей. Однако, как замечает Эйнштейн [4, с.68]: «Это не было обнаружено ранее, поскольку в уравнения движения материальных тел в первом приближении входит только одна компонента g_{00} ». Тем не менее здесь мы имеем весьма существенное отличие от всех других релятивистских теорий, которые при малых скоростях тождественно переходят в прежние «дорелятивистские» теории*. Характерным примером здесь может служить релятивистская механика: в нерелятивистском пределе она полностью совпадает с классической механикой. В случае же ОТО, как видно, нельзя говорить о строгом выполнении принципа соответствия. Хотя, как следует из приведенного замечания Эйнштейна в низшем приближении по $\beta(\beta^0)$, где β отношение скорости движения к скорости света, «лишние» компоненты потенциала и напряженности не проявляются (остаются скрытыми).

3. АРГУМЕНТЫ ПРОТИВ ТЕНЗОРНОГО ХАРАКТЕРА ПОТЕНЦИАЛА ТЯГОТЕНИЯ

Насколько можно судить, решающим фактором в пользу описания гравитационного потенциала с помощью 4-тензора послужило представление о росте массы со скоростью: $m_v = m\gamma$. Приведем мыслимые здесь рассуждения (см., напр., [6]). Начнем с того, что потенциалы Кулона и Ньютона имеют аналогичный вид. При этом электрический потенциал преобразуется как компонента 4-вектора. Если учесть, что «гравитационный заряд» (масса) в отличие от электрического, растет со скоростью, то гравитационный потенциал за счет дополнительного лоренц-фактора должен вести себя подобно тензору 2-го ранга. Другие, но по существу схожие с предыдущими, рассуждения основываются на том, что в соответствии с ЗИЭ источником гравитационного поля становится энергия. А поскольку энергия является компонентой 4-вектора, то это же качество приобретает и «гравитационный заряд» и т.д.

*Тем самым в согласии с принципом соответствия обеспечивается преемственность теорий.

Однако в рамках СТО масса, как и электрический заряд, является инвариантом (лоренцевым скаляром). Поэтому приведенные соображения в пользу тензорного характера потенциала тяготения теряют смысл. В результате аналогия с электродинамикой, казалось бы, должна сохраниться.

С другой стороны, как мы знаем, в числителе выражения для электрического потенциала Лиенара — Вихерта фигурирует произведение $e\gamma$ заряда на временную компоненту 4-скорости, или лоренц-фактор. Поэтому при больших скоростях можно говорить об эффективном росте заряда, что по сути дела сродни представлению о росте массы. Тем не менее для электромагнитного потенциала мы имеем только 4-вектор (кстати, как раз благодаря указанному произведению). Таким образом, даже оставаясь в рамках нековариантного представления о зависимости массы от скорости, мы не имеем никаких оснований для введения тензорного потенциала тяготения.

Наконец, третий аргумент связан с релятивизацией уравнения Пуассона. Ввиду нековариантности ЗИЭ замена плотности массы (ρ) на плотность энергии (ϵ) в правой части уравнения также является нековариантной, а следовательно, незаконной операцией. Тем самым фигурирующий в левой части гравитационный потенциал должен представлять собою (как и ρ) компоненту 4-вектора [7].

4. СОМНИТЕЛЬНОСТЬ АРГУМЕНТОВ В ПОЛЬЗУ НЕЭВКЛИДОВОЙ 4-ГЕОМЕТРИИ

Представленные выше аргументы уже фактически означают с точки зрения математики незаконность отождествления гравитационного потенциала с метрическим тензором, а тем самым введение римановой геометрии. Существуют, однако, по крайней мере еще два соображения, которые также рассматриваются как аргументы в пользу неевклидовой геометрии. Напомним их.

В равномерно вращающейся системе отсчета вследствие лоренцева сокращения отношение длины окружности к диаметру должно отличаться от π [3, с.190]. Отсюда делается вывод, что при вращении законы конфигурации твердых тел «не согласуются с теми законами конфигурации твердых тел, которые соответствуют евклидовой геометрии» [4, с.47].

Однако здесь необходимо подчеркнуть, что, вообще говоря, в СТО мы также не имеем евклидовой геометрии, поскольку пространственная часть интервала утрачивает свойства инварианта. Поэтому, строго говоря, и в случае вращения речь может идти только о справедливости псевдоевклидовой геометрии во всем 4-пространстве [8].

С другой стороны, рассматривают переход к равномерно вращающейся системе на основе преобразования (см., напр., [9])

$$x = x^* \cos \omega t - y^* \sin \omega t, \quad y = x^* \sin \omega t + y^* \cos \omega t, \quad z = z^*. \quad (4)$$

В результате получают выражение для интервала, которое уже не является суммой квадратов дифференциалов. На основе этого заключают [9]: «По какому бы закону ни преобразовывалось время, это выражение не может быть приведено к сумме квадратов дифференциалов четырех координат». Это дает основание для заключения о неевклидовости геометрии в неинерциальных системах отсчета.

Вместе с тем, как было показано ранее [10,8], форминвариантность интервала, записанного в цилиндрических координатах

$$ds^2 = c^2 dt_*^2 - r_*^2 d\varphi_*^2 - dr_*^2, \quad (5)$$

будет обеспечена, если вместо приближенных формул (4) мы возьмем следующие точные (тангенциальные) преобразования

$$t^* = [t - (\beta^2/\omega)\varphi] \gamma_\omega, \quad \varphi^* = (\varphi - \omega t) \gamma_\omega, \quad r^* = r = \text{const}, \quad (6)$$

где $\gamma_\omega = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = \omega r/c$ (z -координата опущена). Очевидно, что по своему смыслу преобразование (6) должно описывать релятивистское вращение, т.е. включать случаи, когда произведение ωr близко к скорости света c .

ЛОРЕНЦ-КОВАРИАНТНАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ [11,12]

Напомним, что релятивистское обобщение уравнения Пуассона имеет вид

$$\square g^i = 4\pi G J^i. \quad (7)$$

Здесь справа фигурирует 4-вектор плотности тока массы, откуда следует, что релятивистский потенциал тяготения также должен описываться 4-вектором. Выражение g^i для может быть получено с помощью лоренц-преобразования потенциала Ньютона [7] и имеет вид

$$g^i = -\frac{M V^i}{R^i V_i}. \quad (8)$$

Здесь M — масса движущейся частицы, V^i — ее 4-скорость, R^i — запаздывающее расстояние.

Для релятивистской силы тяготения Ньютона будем иметь

$$F^i = -m G^{ik} u_k, \quad (9)$$

где G^{ik} — тензор напряженности гравитационного поля, u^i — 4-скорость «пробной» частицы массы.

В соответствии с тем, является ли G^{ik} антисимметричным или симметричным тензором для напряженности гравитационного поля, в отсутствие ускорения получим

$$G^{ik} = G \frac{M c^2}{(R^i V_i)^3} (R^i V^k \mp R^k V^i). \quad (10)$$

В результате на основании (10) для релятивистской силы Ньютона найдем

$$F = -G \frac{m M \Gamma^{-2} \gamma}{R^2 (1 - \beta n)^3} [n(1 + \beta V) \mp V(1 + \beta n)], \quad (11)$$

где $n = R/R$, $\beta = u^a/u^0$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $V = V^a/V^0$, $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$.

Конечно, даже несмотря на достаточную убедительность представленных выше соображений нам не избежать вопроса относительно объяснения четырех известных гравитационных эффектов. В этой связи отметим предварительно следующее.

Три из упомянутых эффектов фактически связаны с изменением (уменьшением) скорости света в гравитационном поле. И можно сказать, что здесь мы имеем определенную аналогию с уменьшением скорости света в среде за счет электромагнитного взаимодействия согласно формуле $c_n = c/n$, где n — показатель преломления. В случае (слабого) гравитационного поля, как представляется, мы будем иметь $n = 1 + \alpha r/c^2$. Главная же трудность, по-видимому, будет заключаться в объяснении смещения перигелия Меркурия. В этой связи заметим следующее. Как нам кажется, в любом случае ОТО должна была объяснять не весь наблюдаемый эффект, а только разницу между экспериментальным значением и предсказанием лоренц-ковариантной теории тяготения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЗИЭ считается одним из важнейших результатов СТО. Насколько можно судить, в свое время он послужил причиной отказа от РТТ. С другой стороны, он стал одной из основ ОТО. Именно, на основании ЗИЭ гравитационному потенциалу были приписаны свойства 4-тензора 2-го ранга. Это позволило отождествить гравитационный потенциал с метрическим тензором, а ОТО стало одновременно теорией неевклидова пространства-времени. Установление того, что ЗИЭ противоречит лоренц-ковариантности ста-

вит под сомнение справедливость положения о тензорном характере потенциала тяготения. С другой стороны, детальный анализ показывает несостоятельность и известных аргументов в пользу неевклидовой геометрии во вращающихся системах отсчета. Все это заставляет нас обратиться к лоренц-ковариантной теории тяготения, основой которой является релятивистский (4-векторный) потенциал тяготения Ньютона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Poincaré H. — Rend. Circ. Mat. Palermo, 1906, 21, p.129.
2. Minkowski G. — Phys. Z., 1909, 10, p.104.
3. Эйнштейн А. — Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1965, т.1.
4. Ibid., 1966, т.2.
5. Ibid., 1967, т.4.
6. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. — Теория тяготения и эволюция звезд. М.: Наука, 1971, с.87.
7. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-94-326, Дубна, 1994.
8. Idem — Сообщ. ОИЯИ Р2-11385, Дубна, 1978.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. — Теория поля. М.: Наука, 1988, с.294.
10. Strauss M. — Intern. J. Theor. Phys., 1974, 11, p.107.
11. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Р2-95-216, Дубна, 1995.
12. Idem — Сообщ. ОИЯИ Д2-95-223, Дубна, 1995.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1995 года.