

# О ГЕОМЕТРИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Борис Ихлов

## Введение

Как известно, Эйнштейн изначально утверждал, что гравитационное поле является физическим, однако позднее отошел от этого утверждения, гравитационное поле стали отождествлять с геометрией пространства-времени. Критика данного отождествления была предпринята группой А. А. Логунова (Фролов, Лоскутов, Мествершвили и др. Защищали «геометрическую» точку зрения Зельдович, Гинзбург и др. Критика Логунова отчасти верна, однако его теория не менее геометризована, в ней нет черных дыр, Большого взрыва и т.д. Полевая теория гравитации до Логунова была развита Л. П. Грищуком (ГАИШ).

## Геометризация

Сильный принцип эквивалентности формулируется следующим образом: в каждой точке пространства-времени в произвольном гравитационном поле можно выбрать «локально-инерциальную систему координат», такую, что в достаточно малой окрестности рассматриваемой точки законы природы будут иметь такую же форму, как и в не ускоренных декартовых системах координат. Движение в равномерно ускоренной системе отсчета эквивалентно однородному постоянному гравитационному полю. В классической механике уравнения движения получаются с помощью лагранжева формализма, реализуемого путем приравнивания к нулю вариации действия, где в подинтегральном выражении – функция Лагранжа, в которую входят кинетическая и потенциальная энергии системы. Соответственно, тензор энергии-импульса выражается через функцию Лагранжа и ее производные. В теории относительности функция Лагранжа заменяется геометрической конструкцией, метрическим тензором  $g_{ik}$ , под интегралом стоит  $g^{1/2}$ . Между тем физическое пространство не субстанционально (например, нельзя приписать точкам пространства собственное движение и самоидентичность). Точно такая же замена функции Лагранжа на геометрию – в теории струн, в действии Гото – Намбу. Однако изначально Эйнштейн исходил не из принципа наименьшего действия, а из уравнения Пуассона, где правая часть уравнения – не скалярная плотность, а реальный, не геометрический тензор энергии-импульса, в который входит тензор механических энергии-импульса и тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Относительно левой части можно доказать, что все подобные дифференциальные тензоры могут быть образованы алгебраически из тензора Римана, откуда и возникает уравнение Эйнштейна.

## Электромагнитное поле

Чтобы понять, насколько возможно считать гравитационное поле не физическим, сравним его с электромагнитным полем.

Электромагнитное поле как физическое имеет энергию и импульс, энергия поля в каждом элементарном объеме пространства пропорциональна квадрату напряженности поля. Выбором системы отсчета можно изменить величины электрического и магнитного полей, например, выбрав систему отсчета, движущуюся вместе с зарядом, можно свести к нулю его магнитное поле. Однако никаким выбором системы отсчета нельзя полностью уничтожить электромагнитное поле в точке, где с точки зрения другой системы отсчета оно не равно нулю.

В основаниях ОТО лежит мысленный эксперимент с лифтом, падающим в гравитационном поле. Утверждается, что наблюдатель в лифте не сможет отличить падение в гравитационном поле от пребывания вне каких-либо полей. То есть в системе отсчета свободно падающего наблюдателя гравитационное поле полностью исчезает. Отсюда делают вывод, что гравитационное поле ОТО не является обычным физическим полем, имеющим определенную плотность энергии в пространстве. Выбор системы отсчета может менять пространственное распределение его энергии.

Точно так же нельзя выбором системы отсчета свести к нулю гравитационные волны.

Однако можно ли «аннулировать» электростатическое поле, в котором падает пробный заряд?

Законы тяготения и электрического взаимодействия сходны, в законе Кулона вместо масс – заряды, силы обратно пропорциональны радиусам. Однако сходство гравитационного поля и

электромагнитного взаимодействий на классических законе Кулона и законе тяготения Гука - Ньютона заканчивается.

- 1) Магнитное поле порождается зарядами, движущимися прямолинейно, гравимагнитное (эффект Лензе-Тирринга) – вращающимися массами.
- 2) Электрическое поле отталкивает заряды одноименного знака, гравитационное – притягивает; пока не обнаружены частицы с отрицательными массами, хотя уравнения Дирака допускают их существование.
- 3) Электрический заряд не искривляет пространство-время, часы в присутствии заряда не замедляются, электростатическое поле не отклоняет луч света.
- 4) Гравитационное поле – тензорное, электромагнитное – векторное.
- 5) Заряд входит в ТЭИ через свою энергию, при этом не существует критического заряда, т.к. силы отталкивания всегда будут превалировать над гравитационными, наоборот, есть экстремальный заряд (как и экстремальный момент импульса), выше которого черная дыра не образуется.

В метрике Рейснера-Нордстрема заряд и масса входят симметрично, но заряд в электрическом поле не движется по геодезической.

Для закона Кулона нет сопутствующего 2-го закона Ньютона, в который бы вместо массы входил заряд. Для такого принципа эквивалентности необходимы еще три дополнительных пространственных измерения.

Если физическое действие масс осуществляется не за счет частиц, как сильное, слабое и электромагнитное, а путем искривления пространственно-временной формы, то квантование гравитации возможно лишь путем квантования формы, т.е. в представлении о дискретных пространстве и времени. Однако такой подход в петлевой гравитации не имел успеха, в петлевой гравитации отсутствует бозон Хиггса, обнаруженный в эксперименте.

Можно лишь предполагать, что это квантование может быть осуществлено в других «собственных» трехмерных пространствах: сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий, где опять же нужно предполагать наличие законов, аналогичных 2-му закон Ньютона, то есть, с дополнительными измерениями, тогда пространство-время должно быть 13-мерным.

Учитывая, что слабое взаимодействие хотя и осуществляется за счет векторных бозонов, не имеет силовых (трехмерных) характеристик и потому может быть сведено в одному измерению, то  $13 - 2 = 11$ . Если следовать данной версии, при компактификации дополнительных размерностей гравитация не может проявлять квантовые свойства.

Аналогично рассуждал Дэвис: «... трехмерный мир наших чувственных восприятий дополняется семью невидимыми пространственными измерениями, что и составляет вместе со временем 11 измерений. Невидимые вам дополнительные 7 измерений определяются как силы или взаимодействия. Напр., электромагнитное взаимодействие в действительности представляет собой некое невидимое, пространственное измерение. Геометрия 7 дополнительных измерения отражает симметрии. Присущие взаимодействиям. Из этой теории следует, что в действительности силовых полей нет вообще, а существует только свернутое определенным образом пустое 11-мерное пространство-время» [1].

Подмена абстракциями, соответствующими материальным объектам, самих объектов, не нова и возникла задолго до геометродинамики Уилера.

«Сперва создают абстракции, отвлекая их от чувственных вещей, а затем желают познавать эти абстракции чувственно, желают видеть время и обонять пространство. Эмпирик до того втягивается в привычное ему эмпирическое познание, что воображает себя все еще находящимся в области чувственного познания даже тогда, когда он оперирует абстракциями» [2].

Если гравитация не является физическим полем, проквантовать ее невозможно в принципе.

Казалось бы, воздействие масс на пространственно-временную форму и обратное влияние этого воздействия (содержательность формы) на движение масс – прекрасная иллюстрация диалектического материализма. Однако возникает вопрос: почему массы обладают такой привилегией – менять форму, а электрические или барионные заряды – нет? Заряды могут ее менять лишь опять же посредством массы, выраженной через энергию электростатического поля.

## Парадокс Лоренца

Предположим, имеется бесконечный прямой провод с током. Вдоль проводника на расстоянии  $r$  со скоростью  $v$  движется заряд. На заряд действует сила Лоренца. Утверждается, что в системе, где заряд покоится, в силу электронейтральности провода сила на заряд не действует.

Однако в ИСО, связанной с зарядом, движется проводник – вместе с зарядами, образующими ток, которые в месте расположения заряда создают точно такое же магнитное поле.

Тем не менее, эффект принято называть парадоксом Лоренца, который объясняют следующим образом: из СТО вытекает, что поля, электрическое и магнитное, неразрывно связаны друг с другом. При переходе от одной системы отсчёта к другой полная сила остаётся прежней, а изменяется лишь соотношение компонент:

$$F = q(E + [v, B]) \quad (1)$$

В неподвижной системе отсчёта проводник электрически нейтрален, и электрическая компонента равна нулю. Ток создаёт магнитное поле, и на движущийся заряд действует магнитная компонента, направленная по правилу левой руки к проводнику. В ИСО, связанной с зарядом, магнитная компонента не действует, т.к. электрон покоится. Её роль играет появившаяся электрическая сила Лоренца. В этой системе отсчёта проводник оказывается заряженным положительно из-за релятивистского сокращения длины, поскольку в этой системе он движется со скоростью  $v$ :  $l = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ .

В результате объём проводника также уменьшается, концентрация положительных ионов увеличивается и уже не компенсируется отрицательным зарядом электронов. Проводник приобретает суммарный положительный заряд, и на заряд  $q$  действует электрическая компонента.

Таким образом, при переходе к движущейся системе отсчёта, связанной с зарядом, из-за разных скоростей электронов и ионов в проводнике их линейные плотности заряда преобразуются по-разному. Это приводит к тому, что в неподвижной относительно заряда  $q$  системе проводник оказывается заряженным положительно, и возникает электрическое поле. Фейнман количественно доказал, что обе силы в обеих системах отсчёта одинаковы. Сила в системе заряда не исчезла, изменилось лишь её описание. В одной системе отсчёта это поле может выглядеть как только магнитное, в другой — как только электрическое, в третьей присутствует и магнитное, и электрическое [3, 4].

Однако данное объяснение хотя и выглядит достоверно, неудовлетворительно. Дело в том, что электроны в проводнике движутся не равномерно, а ускоренно, под действием разности потенциалов, лишь их средняя скорость является постоянной.

Максвелл считал, что его уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Галилея, Фейнман, наоборот, полагал их галилеевски неинвариантными.

В [5] утверждается, что уравнения Максвелла инвариантны относительно произвольных невырожденных линейных преобразований пространственно-временных переменных, включая не только преобразования Лоренца, но и преобразования Галилея – в силу того, что могут быть записаны в 4-тензорной форме.

Неясно, каким образом одни и те же уравнения могут быть одновременно инвариантными относительно двух типов преобразований. С другой стороны, преобразование Галилея подразумевает, что существует система покоя, соответствующая наблюдателям с произвольными скоростями. Это позволило бы, например, двигаться так, чтобы электромагнитная волна покоилась, что явно запрещено теорией Максвелла. В теории Максвелла нет решения, для которого флуктуации электромагнитного поля находились бы в состоянии покоя относительно наблюдателя.

Инвариантность относительно преобразований Галилея возникает лишь в том случае, если постулировать зависимость скорости света от скорости движения источника света, что противоречит эксперименту.

Но и постулирование максимальной и инвариантности скорости света не обязательно. Используя групповой анализ, можно найти в классе линейных функций наиболее общие преобразования между ИСО, которые оказываются зависящими от двух фундаментальных констант, имеющих размерность скорости. Добавление аксиомы изотропии пространства переводит эти преобразования в преобразования Лоренца, аксиома абсолютности времени ( $t = t'$ ) — в преобразования Галилея [6].

Покажем в дополнение в парадоксу Лоренца, что уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца, но не инвариантны относительно преобразований Галилея.

В законе Ампера и в формуле для силы Лоренца фигурирует внешнее магнитное поле.

$$F = IBdl\sin\alpha = Nq[v, B]; N = nSdl$$

В законе Ампера для двух проводников внешнее магнитное поле отсутствует:

$$F \sim LI_1I_2/r$$

Магнитное поле возникает в результате изменения во времени электрического поля. При движении заряда с постоянной скоростью его электрическое поле утрачивает сферическую симметрию и становится осесимметричным:

$$E \sim (q/r^2)(1 - v^2/c^2)/[1 - \sin^2\alpha (v^2/c^2)]^{3/2} \quad (2)$$

Однако даже при малых скоростях, когда электрическое поле практически неизменно, возникает магнитное поле, не содержащее множитель Лоренца:

$$B \sim q [v, r]/r^3 \quad (3)$$

То есть, магнитное поле вследствие изменения электрического поля лишь добавляется к магнитному полю (3), которое имеет самостоятельное значение.

Считают, что магнитное поле является релятивистским эффектом [3, 7], так ли это? Ответ на вопрос увидим ниже.

Наличие (т.е. не обязательно величина) силы между двумя проводниками регистрируется прибором, поэтому не может зависеть от выбора системы отсчета.

В законе Ампера для двух токов и в законе Био-Савара-Лапласа фигурируют проводники, которые выделяют систему отсчета, кроме того, хотя ток выбирается постоянным, т.е. средняя скорость электронов постоянна, их движение ускоренно, под действием напряженности (разности потенциалов):

$$j \sim qnv \sim E$$

То есть, не ускорение, а плотность силы тока и, соответственно, средняя скорость электронов пропорциональна приложенной силе. Заметим, что в вакууме, например, в диодах, зависимость плотности тока от приложенной силы нетривиальна:

$$j \sim E^{3/2}$$

В законе Био-Савара-Лапласа

$$B \sim Idl\sin\alpha \sim nqv\sin\alpha \sim nq[v, r]/r^3$$

Отсюда обычно делается вывод, что движущийся заряд эквивалентен элементу тока:

$$qv = Idl \quad (4)$$

То есть: устанавливается своего рода принцип эквивалентности между током в среде и движущимся зарядом.

Однако ток в законе Био-Савара-Лапласа и движущийся равномерно и прямолинейно заряд – это два существенно разные типы движения. Наличие тока нельзя устранить выбором системы отсчета, но при переходе к системе отсчета, связанной с электроном, магнитное поле исчезает.

Возникает парадокс, отличный от парадокса Лоренца: в ИСО, в которой два движущихся равномерно, прямолинейно и параллельно друг другу электрона, они притягиваются с силой

$$F \sim q^2 v^2/r$$

наличие которой и искривление прямолинейного движения электронов регистрируются приборами.

Однако при переходе в систему отсчета, связанную с электронами, эта сила исчезает.

Одно из уравнений Максвелла, в которое входят ротор магнитного поля (вихрь), ток и производная по времени электрической индукции, ничего не объяснит, т.к. электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое, но не постоянное магнитное поле.

Отметим также, что сила притяжения между двумя движущимися зарядами зависит от выбора ИСО.

Разрешение парадокса возможно лишь в том случае, если сила взаимодействия между зарядами, перпендикулярная движению, не меняется при переходе в другую систему отсчета, то есть, если для неподвижного наблюдателя при появлении притягивающей магнитной составляющей силы в формуле (1) увеличивается кулоновское отталкивание:

$$E_v - E_0 = q[v, B]$$

То есть, магнитное поле – действительно, чисто релятивистский эффект, даже малые изменения электрического поля порождают заметное магнитное поле. В заочном споре Майкельсона и Фейнмана последний оказался прав: уравнения Максвелла не инвариантны относительно преобразований Галилея. При малых скоростях, разлагая (2) в ряд Тейлора, в направлении, перпендикулярном движению зарядов получим:

$$F_{\text{magn}} = q[v, B] = E_0 v^2 / 2c^2 \quad (5)$$

Оценим: увеличение модуля скорости вдвое согласно (3) приводит к увеличению в 4 раза магнитной силы и в 4 раза – правой части уравнения.

Разумеется, формула приближенная, для малых отрезков траектории, т.к. заряды движутся не равномерно и прямолинейно, но ускоренно и по кривым.

Заметим, что в «магнитном» принципе эквивалентности роль ускорения играет скорость.

## Равенство инертной и гравитационной масс

Электростатическое поле заряда также можно «аннулировать», если пробный заряд падает в этом поле с ускорением, определенным законом Кулона. Ускоренный заряд излучает электромагнитные волны, но то же самое относится и к пробной массе, падающей в поле тяготения – гравитационные волны вызываются любым массивным телом, движущимся с асимметричным ускорением, в т.ч. в задаче двух тел [8].

В первом приближении, если третья производная тензора квадрупольного момента масс системы отлична от нуля, то система будет излучать гравитационные волны [там же].

В системе отсчета, связанной с движущимся в электростатическом поле пробным зарядом электростатическое поле равно нулю:

$$qE = ma = 0$$

«Электрическая» эквивалентность относится к массе пробного заряда, но не к заряду.

Однако может ли это быть препятствием? Геодезические можно получить и на других математических структурах, не только на псевдоримановых многообразиях, достаточно иметь многообразие со связью. Можно ли представить электростатическое поле метрическим тензором? Нельзя. Гравитационное поле можно в классической физике заменить ускоренной системой отсчета именно потому, что его напряженность не зависит от двигающейся в нем массы.

Электростатическое поле нельзя заменить ускоренной системой, т.к. ускорение зависит от заряда, который может быть выбран произвольно.

Однако насколько в этом плане гравитационное поле отлично от электростатического?

В настоящее время наиболее точный результат в проверке слабого принципа эквивалентности в форме равенства инертной и гравитационной масс дал эксперимент «MicroSCOPE» с двумя полыми коаксиальными цилиндрами, свободно подвешенными в невесомости на борту спутника [9]:

$$(m_{inert} - m_{grav})/m_{inert} = 1 - m_{grav}/m_{inert} < 10^{-14} \quad (6)$$

Сильный принцип эквивалентности включает нелинейность уравнений гравитации – собственную гравитационную энергию. Ввиду исключительной слабости гравитации, пробные тела для проверки сильного принципа гравитации должны иметь астрономические размеры. На сегодняшний день система Земля-Луна-Солнце представляется наилучшей моделью. Исследовалось отражение лазерных лучей от массива угловых отражателей, установленных на Луне астронавтами программы «Аполлон» и советскими. Эксперимент установил, что возможное неравенство инертной и гравитационной масс для Земли и Луны не превышает  $(0.8 \pm 1,3) \times 10^{-13}$

В альтернативных теориях гравитации сильный принцип эквивалентности нарушается [10-12].

Однако есть соображения помимо альтернативных теорий.

Во-первых, измерения сделаны только для малых масс в земных или околоземных условиях. Нет гарантий, что для масс, в  $10^{12}$  -  $10^{36}$  раз больших (для звезды R136a1), тем более, для звездных скоплений, соотношение (6) не увеличится на 30-100 порядков. Измерения соотношения (6) для звезд сегодня невозможны в виду относительно большой погрешности измерений их масс.

Во-вторых. Для двух электронов соотношение электростатической и гравитационной сил –  $10^{42}$ , для электрона и протона –  $10^{39}$ , для двух протонов –  $10^{36}$ . То есть, чтобы между гравитацией и электричеством была разница в смысле наличия и отсутствия принципа эквивалентности, точность, с которой устанавливается равенство инертной и гравитационной масс, должна быть порядка  $10^{40}$ . Та точность, с которой установлено равенство инертной и гравитационной масс, слишком низка. В виду этого на сегодняшний день можно говорить лишь о приближенной эквивалентности гравитации и ускоренной системы отсчета.

Кроме того, принцип эквивалентности не выполняется для такой квантовой системы, как вакуум, вакуум не обладает инертной массой, его гравитационная масса не равна нулевой инертной.

## Заключение

Разница между гравитационным и электромагнитным взаимодействиями не может служить логическим основанием считать гравитационное поле не физическим.

С другой стороны, сведение гравитационного поля к геометрии наталкивается на парадокс: если поместить в равноускоренный лифт заряженную частицу, она будет излучать независимо от того, где находится наблюдатель – внутри лифта или вне его в инерционной системе (ИСО). С точки зрения ОТО наблюдатель, находящейся в ИСО вне лифта, который регистрирует излучение равноускоренной заряженной частицы, будет регистрировать фотоны, а тот, который находится в лифте – не будет. В ОТО заряженная частица, покоящаяся в гравитационном поле на поверхности Земли, должна поддерживаться силой, чтобы предотвратить ее падение. Согласно принципу эквивалентности, она должна быть неотличима от частицы в плоском пространстве-времени, ускоряемой силой. Согласно уравнениям Максвелла ускоренный заряд должен излучать электромагнитные волны, но такое излучение для неподвижных частиц в гравитационных полях не наблюдается.

Разрешение парадокса Фултоном и Рорлихом [13], основанное на утверждении о неправомочности использования уравнений Максвелла в неинерциальных системах отсчета, не является удовлетворительным.

Во-вторых, принцип эквивалентности применим лишь к материальной точке, для протяженного тела он несправедлив.

В сильном принципе эквивалентности вопрос о физическом источнике ускорения, о тождестве инертной и гравитационной масс подменяется - по аналогии с СТО - вопросом о системе отсчета, о наблюдателе.

Ньютоновский предел ОТО достигается в приближении слабой гравитации. Если же считать гравитационное поле искривлением пространства, то при кривизне Вселенной, равной нулю, в плоском пространстве Минковского, классическое гравитационное тяготение Гука – Ньютона не должно действовать, межгалактическое взаимодействие должно отсутствовать.

В любом случае: из того, что гравитационное поле локально эквивалентно ускоренной системе координат, не следует, что гравитационное поле и есть система координат, а не физическое поле.

## Литература

1. Дэвис П. Суперсила. М.: Мир, 1989, С. 12.
2. Энгельс Ф. Диалектика природы. Соч., Т. 20. С. 292.
3. Верховзин А. Н. Можно ли считать магнитное поле релятивистским эффектом. Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2016. №8. С. 149-156.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. М.: Мир, 1966. С. 266-273.
5. Миллер М. А., Сорокин Ю. М., Степанов Н. С. Ковариантность уравнений Максвелла и сопоставление электродинамических систем. УФН. 1977. Т. 121, вып. 3. С. 525-538.
6. Frank P., von, Rothe H. Über die Transformation der Raumzeitkoordinaten von ruhenden auf bewegte Systeme», Ann. der Physik, Ser. 4, Vol. 34, No. 5, 1911, pp. 825—855/
7. Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 3-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 496 с. С.120.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. Теоретическая физика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. Т. II. С. 475.
9. Бауров Ю. А., Соболев Ю. Г., Менегуц Ф. Фундаментальные эксперименты по Обнаружению анизотропии физического пространства и их интерпретация. Известия РАН, серия физическая, Т. 79, №7, 2015.
10. Will C. M., Living Rev. Relat., 9 (2006), 3.
11. Турышев В. Г. , Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований - М: УФН, Т. 179, №1 (2009).
12. Brans C., Dicke R. H., Phys. Rev., 124 (1961), 925.
13. Fulton, T., Rohrlich, F. (1960). Classical radiation from uniformly accelerated charge. Annals of Physics. 9 (4): 499–517. [Bibcode:1960AnPhy...9..499F](#). [doi:10.1016/0003-4916\(60\)90105-6](#)