

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 539.1.01

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ И НОВЫЕ  
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ

А. А. Логунов

*(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)*

## 1. Геометрия и физика

Всем хорошо известно, что геометрия окружающего нас пространства евклидова. Она, конечно, была открыта путем наблюдений, а затем в виде постулатов и аксиом была сформулирована Евклидом свыше двух тысяч лет назад. Постулаты и аксиомы Евклида, лежащие в основе его геометрии, представляют собой очевидные утверждения, принимаемые без доказательства, и они так естественны, что создалось почти абсолютное убеждение в единственности геометрии. Геометрами было затрачено немало сил, чтобы уменьшить число постулатов и аксиом; свести их до минимума. Это иногда удавалось, когда некоторые из них выводились из остальных. Очень много сил потратили математики, чтобы освободиться от пятого постулата (через точку вне данной прямой можно провести только одну прямую, ей параллельную), но этого сделать не удалось, хотя геометры занимались этой проблемой более двух тысяч лет. Начало бурного развития механики как науки о движении тел относится к середине XVII века. Механика того периода была опытной наукой. В результате обобщения громадного количества опытных данных Ньютоном были сформулированы три его знаменитых закона механики и закон тяготения. Это дало возможность решать обширный для того времени круг задач о движении тел. Геометрия Евклида как составная часть нашла воплощение в законах Ньютона. По существу, с этого момента изучение механических явлений стало проверкой не только законов Ньютона, но и евклидовой геометрии. В тот период это еще не было осознано, поскольку в геометрии Евклида, в ее единственности как логической схемы сомнений не было. И только в XIX веке Лобачевский, изучая проблему пятого постулата в геометрии Евклида, пришел к выводу о его замене новым постулатом: через точку вне прямой на плоскости проходят по крайней мере две прямые, не пересекающие данную. Цель его состояла в том, чтобы на основе новой системы постулатов и аксиом построить геометрию. Реализация этой программы привела Лобачевского к величайшему открытию — неевклидовой геометрии. Но современники, даже крупные ученые, его не только не поняли, но заняли враждебную позицию. Позднее исследование Лобачевского явилось толчком к построению других геометрий; это привело к выводу, что геометрий как логических систем может быть построено бесконечное множество и только опыт способен решить, какая геометрия реализуется в окружающем нас мире.

На современном математическом языке структура геометрии полностью задается выражением квадрата расстояния между соседними

бесконечно близкими точками. В декартовых координатах евклидова пространства квадрат такого расстояния имеет вид

$$dl^2 = dX^2 + dY^2 + dZ^2. \quad (1)$$

Здесь  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$  — дифференциалы координат. Это есть не что иное как теорема Пифагора, если бы мы исходили из постулатов и аксиом Евклида. Но это равенство можно положить в основу определения евклидовой геометрии. Если бы мы использовали в евклидовой геометрии не декартовы координаты, а какие-либо криволинейные (например, сферические, цилиндрические и т. д.), то квадрат расстояния между соседними точками в этих координатах принял бы вид

$$dl^2 = \delta_{ik} dx^i dx^k. \quad (2)$$

Величина  $\delta_{ik}$  определяет структуру геометрии и называется метрическим тензором евклидова пространства.

Евклидова геометрия обладает важнейшим свойством: в ней всегда можно ввести во всем пространстве глобальные декартовы координаты, в которых отличны от нуля только диагональные метрические коэффициенты, причем все они равны единице.

Риман, развивая идеи Лобачевского и Гаусса, ввел особый класс геометрий, получивший название римановых, которые только в бесконечно малой области совпадают с евклидовыми. Он обобщил также фундаментальное понятие кривизны пространства. В римановой геометрии квадрат расстояния между двумя соседними точками записывается также в виде

$$dl^2 = \delta_{ik}(x) dx^i dx^k, \quad (3)$$

с той лишь принципиальной разницей, что в ней не существует во всем пространстве глобальных декартовых координат, в которых метрический тензор был бы всюду постоянен и имел бы диагональную форму. Это означает, что кривизна в римановом пространстве всегда отлична от нуля, а ее значение зависит от точки пространства. Кривизна же в евклидовом пространстве в каждой точке равна нулю.

Какая геометрия имеет место в природе? Ответ на этот вопрос можно получить лишь на основании опыта, т. е. путем изучения явлений природы. Пока мы имели дело в физике с относительно малыми скоростями, опыт подтверждал, что геометрия нашего пространства евклидова, а такие понятия, как длина и время, абсолютны и не зависят от системы отсчета.

Изучение электромагнитных явлений, а также движения частиц со скоростями, близкими к скорости света, привело к удивительному открытию: пространство и время образуют единый континуум, роль квадрата расстояния в нем между близкими точками (событиями) играет величина, называемая квадратом интервала, которая в декартовых координатах определяется равенством

$$ds^2 = c^2 dT^2 - dX^2 - dY^2 - dZ^2, \quad (4)$$

здесь  $c$  — скорость света.

Геометрия, определяемая этим интервалом, называется псевдоевклидовой, а четырехмерное пространство с такой геометрией — пространством Минковского. Квадрат интервала может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Это разделение носит абсолютный характер. Время и координаты входят в интервал по внешнему виду почти равноправно, с той лишь принципиальной разницей, что

они входят в него с разными знаками. В этом находит отражение глубокое различие таких физических понятий, как длина и время. Величина интервала не зависит от системы отсчета, тогда как время и длина не являются абсолютными понятиями, они относительны и зависят от выбора системы отсчета. Интервал (4) имеет одинаковый вид в бесконечном классе систем отсчета, движущихся одна относительно другой с постоянной скоростью, меньшей скорости света. Такие системы отсчета являются инерциальными, ибо в них выполняется закон инерции. Преобразования от одной инерциальной системы к другой, сохраняющие вид интервала, называются преобразованиями Лоренца. Теорию, сформулированную в классе инерциальных систем отсчета на основе интервала (4), Эйнштейн называл специальной теорией относительности. Такое узкое понимание специальной теории относительности широко распространилось и проникло практически во все учебники. Удивительно, но Эйнштейн не увидел, что представления, лежащие в основе специальной теории относительности, справедливы и для ускоренных систем отсчета. В этом легко убедиться, если перейти к произвольной неинерциальной системе отсчета, что эквивалентно выбору в псевдоевклидовой геометрии новых координат  $x^i$ :

$$T = f^0(ct, x^1, x^2, x^3), \quad X = f^1(ct, x^1, x^2, x^3) \text{ и т. д.}$$

Учитывая, например, что

$$dX = \frac{\partial f^1}{\partial x^i} dx^i,$$

легко получим

$$ds^2 = \gamma_{ik}(x) dx^i dx^k, \quad \text{где } \gamma_{ik}(x) = \sum \varepsilon_l \frac{\partial f^l}{\partial x^i} \cdot \frac{\partial f^l}{\partial x^k}, \quad \varepsilon_0 = 1, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -1.$$

Это и есть наиболее общий вид интервала в псевдоевклидовой геометрии. Поскольку пространство Минковского однородно и изотропно, то, следовательно, на языке математики оно обладает максимальной десятипараметрической группой движений. Это означает, что всегда можно найти новые переменные  $x'$ , которые являются такими функциями старых переменных  $x$ , что интервал полностью сохранит свой вид (форминвариантность):

$$ds^2 = \gamma_{ik}(x') dx'^i dx'^k.$$

Здесь в новых переменных  $x'$  все метрические коэффициенты те же самые. Таким образом, форминвариантность интервала в пространстве Минковского имеет место не только для класса инерциальных систем отсчета, но и для произвольно выбранного класса ускоренных систем отсчета. Это свойство пространства Минковского формулируется как обобщенный принцип относительности [1]: «Какую бы физическую систему отсчета мы ни избрали (инерциальную или неинерциальную), всегда можно указать бесконечную совокупность других систем, таких, в которых все физические явления (в том числе и гравитационные) протекают одинаково с исходной системой отсчета, так что мы не имеем и не можем иметь никаких экспериментальных возможностей различить, в какой именно системе отсчета из этой бесконечной совокупности мы находимся». Таким образом, имея дело с ускоренными системами отсчета, мы не выходим за рамки специальной теории относительности. Этот принцип и будет далее положен в основу нашей теории.

## 2. Общая теория относительности

Ускорение, которое испытывает свободная материальная точка в неинерциальной системе координат, выражается через первые производные метрического тензора  $\gamma_{ik}$  по координатам и времени. В этом находит отражение универсальность сил инерции, которые вызывают ускорение, не зависящее от массы тела. В точности таким же свойством обладают силы гравитации, поскольку, как показывает опыт, гравитационная масса тела равна его инертной массе. Рассматривая равенство инертной и гравитационной масс как фундаментальный факт, Эйнштейн пришел к выводу, что гравитационное поле, подобно силам инерции, должно описываться метрическим тензором. Это означает, что гравитационное поле характеризуется не каким-либо одним скалярным потенциалом, а десятью функциями, являющимися компонентами метрического тензора. Это был важнейший принципиальный шаг в понимании сил гравитации, который позволил Эйнштейну после многолетних попыток построить теорию гравитации, выдвинуть идею о том, что пространство-время не псевдоевклидово, а псевдориманово (в дальнейшем мы будем говорить просто риманово) и определяется интервалом

$$ds^2 = g_{ik}(x) dx^i dx^k. \quad (5)$$

Гравитационное поле Эйнштейн отождествил с метрическим тензором риманова пространства. Эта идея позволила Гильберту и Эйнштейну получить уравнения для гравитационного поля, т. е. для метрического тензора риманова пространства. Таким путем и была построена общая теория относительности (ОТО). Предсказание Эйнштейна об отклонении луча света в поле Солнца, а затем экспериментальное подтверждение этого эффекта, а также объяснение смещения перигелия Меркурия создали общей теории относительности Эйнштейна подлинный триумф.

Несмотря на успехи, ОТО почти с самого ее рождения столкнулась с трудностями, но исключительная решительность, с которой Эйнштейн отстаивал свою теорию, вера в авторитет не позволили глубоко проникнуть в суть теории. Итак, что же это за трудности?

Эрвин Шрёдингер [2] в 1918 году показал, что соответствующим выбором системы координат все компоненты, характеризующие энергию-импульс гравитационного поля, вне сферически-симметричного тела можно обратить в нуль. Сначала этот результат показался Эйнштейну удивительным, но затем, после анализа, он ответил следующим образом [3, с. 626]: «Что же касается соображений Шрёдингера, то их убедительность заключается в аналогии с электродинамикой, в которой напряжения и плотность энергии любого поля отличны от нуля. Однако я не могу найти причину, почему так же должно обстоять дело и для гравитационных полей. Гравитационные поля можно задавать, не вводя напряжений и плотности энергии». Или еще: «Для бесконечно малой области координаты всегда можно выбрать таким образом, что гравитационное поле будет отсутствовать в ней». Мы видим, что Эйнштейн сознательно отошел от классического понятия поля как материальной субстанции, которую даже локально никогда нельзя уничтожить выбором системы отсчета.

Таким образом, Эйнштейн принес в жертву классическое понятие поля во имя локального принципа эквивалентности сил инерции и гравитации, который он же возвел в ранг фундаментального принципа, хотя физических оснований для этого не было и нет. Именно все это и привело к представлению о невозможности локализации гравитационной энергии в пространстве.

Другая трудность, связанная с предыдущей, относилась к формулировке законов сохранения энергии и импульса. О ней впервые сказал Давид Гильберт. В 1917 году он писал [4]: «Я утверждаю, ... что для общей теории относительности, т. е. в случае общей инвариантности гамильтоновой функции, уравнений энергии, которые... соответствуют уравнениям энергии в ортогонально-инвариантных теориях\*, вообще не существует. Я даже мог бы отметить это обстоятельство как характерную черту общей теории относительности». К сожалению, это высказывание Гильберта было не понято современниками, поскольку ни сам Эйнштейн, ни другие физики не осознали фундаментального факта, что в ОТО в принципе невозможны законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения. Но Эйнштейн ясно понимал фундаментальное значение законов сохранения энергии-импульса вещества и гравитационного поля вместе взятых, а поэтому он никогда не собирался от них отказываться. В 1918 году он провел в рамках ОТО исследование, в котором, как он писал [3, с. 650], «... понятия энергии и импульса устанавливаются столь же четко, как и в классической механике». В том же году Феликс Клейн [5] подтвердил результаты Эйнштейна. С тех пор при изложении данного вопроса буквально следуют Эйнштейну. Таким образом, работа Эйнштейна, казалось бы, полностью решила проблему, что, по-видимому, успокоило его, и к ней он больше не возвращался. Однако внимательный анализ показывает [6], что в рассуждениях Эйнштейна и Клейна содержится простая, но принципиальная ошибка. Суть ее заключается в том, что величина  $J_0$ , компоненты которой Эйнштейн отождествил с энергией и импульсом, просто тождественно равна нулю. Не заметив ошибки, Эйнштейн не смог проникнуть в суть своей общей теории относительности, а последующая фактическая канонизация теории задержала ее критический анализ и, как следствие, затормозила творческое развитие представлений о гравитации. Эйнштейну не суждено было увидеть, что принятие ОТО с необходимостью ведет к отказу от фундаментальных законов сохранения, а последнее, как показано нами, непосредственно приводит к выводу, что инертная масса тела (как она определена в ОТО) не равна его активной гравитационной массе. Но это означает, что ОТО не может объяснить экспериментальный факт равенства этих масс, а ведь Эйнштейн считал, что данный фундаментальный факт — лежит в основе его теории. Но это было неправильное утверждение. Основной причиной отсутствия в ОТО законов сохранения является отсутствие в римановой геометрии, в общем случае, группы движения пространства. Хотя последнее математикам было предельно очевидно, да и физики, по-видимому, знали об этом, тем не менее недостаточно глубокое понимание математических истоков законов сохранения не позволило сделать им единственно правильный вывод об отсутствии законов сохранения в ОТО. Работы Эйнштейна и Клейна, о которых мы писали выше, создали иллюзорную уверенность в наличии законов сохранения в ОТО, которая сохранилась до наших дней. Аппарат римановой геометрии благодаря своей изящности и красоте до такой степени увлек физиков, занимающихся гравитацией, что почти полностью оторвал их от физической реальности. Придание физического смысла математическим построениям (без физических идей) — занятие весьма сомнительное, но широко распространенное и в наше время.

Таким образом, принятие концепции ОТО ведет к отказу от ряда фундаментальных физических принципов, лежащих в основе физики.

\* Имеются в виду теории поля в пространстве Минковского.

Во-первых, это отказ от законов сохранения энергии-импульса и момента количества движения вещества и гравитационного поля вместе взятых, во-вторых, отказ от представления гравитационного поля как классического поля типа Фарадея—Максвелла, обладающего плотностью энергии-импульса. Для многих физиков, занимающихся ОТО, это не ясно и до сих пор, другие же склонны рассматривать отказ от законов сохранения как величайшее достижение теории, низвергнувшей такое понятие, как энергия. Однако ни в макро-, ни в микромире нет ни одного экспериментального факта, прямо или косвенно ставящего под сомнение справедливость законов сохранения материи. Поэтому мы были бы слишком легкомысленны, если бы сознательно отказались от этих законов без должных экспериментальных оснований. Без законов сохранения теория не может быть удовлетворительной. Отказ от ОТО продиктован как логикой физических представлений, так и экспериментальными фактами. Отдавая должное ОТО как определенному этапу в изучении гравитации, мы приступим к построению теории гравитации на основе фундаментальных законов сохранения.

### 3. Релятивистская теория гравитации

В основу релятивистской теории гравитации [7] (РТГ), которая завершила развитие идей, изложенных в работе [6], мы положили следующие физические требования:

I. В теории должны строго выполняться законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения для вещества и гравитационного поля вместе взятых. Под веществом мы понимаем все формы материи (включая и электромагнитное поле), за исключением гравитационной. Законы сохранения отражают общие динамические свойства материи и позволяют ввести единые характеристики для различных ее форм. Общие динамические свойства материи, определяемые законами сохранения, находят воплощение в структуре геометрии пространства-времени. Она с необходимостью оказывается псевдоевклидовой (пространство Минковского). Таким образом, геометрия задается не соглашением, как считал Пуанкаре, а однозначно определяется общими динамическими свойствами материи — законами сохранения. Поэтому физическая геометрия сама по себе не существует. Пространство Минковского обладает четырехпараметрической группой трансляции и шестипараметрической группой вращения. Такая система пространства-времени отражает динамические свойства материи — ее законы сохранения. Данное положение кардинальным образом отличает РТГ от общей теории относительности и полностью выводит нас из дебрей римановой геометрии.

II. Гравитационное поле описывается симметрическим тензором и является реальным физическим полем, обладающим плотностью энергии-импульса. Если этому полю сопоставлять частицы, то они должны иметь нулевую массу покоя. При этом реальные и виртуальные кванты гравитационного поля имеют спиновые состояния 2 и 0.

Это положение возвращает гравитационному полю физическую реальность, поскольку его даже локально нельзя уничтожить выбором системы отсчета, следовательно, нет никакой (даже локальной) эквивалентности между гравитационным полем и силами инерции. Данное физическое требование в корне отличает РТГ от ОТО.

В положениях I и II мы ввели в гравитацию фундаментальные законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения,

а также гравитационное поле типа Фарадея—Максвелла, обладающее плотностью энергии-импульса.

Эйнштейн в ОТО отождествил гравитацию с метрическим тензором риманова пространства, но этот путь привел к отказу от гравитационного поля как физического поля, а также к утрате фундаментальных законов сохранения. Именно поэтому от данного положения Эйнштейна нам необходимо полностью отказаться.

III. На основе понятий пространства Минковского и физического гравитационного поля сформулируем принцип геометризации, суть которого заключается в том, что, в силу универсальности, взаимодействие гравитационного поля с веществом описывается путем «подключения» тензора гравитационного поля к метрическому тензору пространства Минковского. Это всегда можно осуществить, поскольку какую бы форму материи мы ни избрали, в ее исходные физические уравнения войдет метрический тензор пространства Минковского. Иначе и не может быть, так как физические процессы протекают во времени и пространстве. В силу такого универсального гравитационного взаимодействия автоматически возникает эффективное риманово пространство, которое в буквальном смысле имеет полевое динамическое происхождение. Согласно принципу геометризации движение вещества под действием гравитационного поля в пространстве Минковского тождественно его движению в эффективном римановом пространстве. Обсуждая структуру геометрии, Эйнштейн писал в 1921 году: «...вопрос о том, имеет этот континуум евклидову, риманову или какую-либо другую структуру, является вопросом физическим, ответ на который должен дать опыт, а не вопросом соглашения о выборе на основе простой целесообразности». Это утверждение Эйнштейна с принципиальной точки зрения совершенно правильно. Но суть дела оказывается гораздо глубже. Главное — понять, какие физические свойства материи определяют геометрию. Действительно, если определять физическую геометрию на основе изучения движения света и пробных тел, то, допустим, мы таким образом установим риманову структуру геометрии. Означает ли, что эту геометрию мы должны положить в основу теории? Нет, не означает, ибо принятие ее автоматически лишило бы нас фундаментальных законов сохранения энергии-импульса и момента количества движения, поскольку геометрия не обладает группой движения пространства-времени. Все это произошло в ОТО. Следовательно, даже обнаружив опытным путем риманову геометрию, не надо спешить делать вывод о структуре геометрии, которую необходимо положить в основу теории, а нужно прежде всего выяснить, действительно ли это понятие является первичным или оно имеет вторичное происхождение. При этом необходимо исходить из общих динамических свойств материи — ее законов сохранения, именно они и являются теми руководящими принципами, которые освещают пути построения физической теории.

Таким образом, не частные физические проявления движения материи, а ее наиболее общие динамические свойства определяют структуру физической геометрии, которая должна лежать в основе теории. В нашей теории (РТГ) физическая геометрия определяется не на основе изучения движения света и пробных тел, а на основе общих динамических свойств материи — ее законов сохранения, которые не только имеют фундаментальное значение, но и экспериментально проверяемы. При этом движение света и пробных тел обусловлено простым действием гравитационного поля на вещество в пространстве Минковского. Пространство Минковского и гравитационное поле являются исходными первичными понятиями, а эффективное риманово пространство — по-

нятие вторичное, обязанное своим происхождением гравитационному полю и его универсальному действию на вещество. В самой сути принципа геометризации заложено разделение сил инерции и гравитационного поля. Но это разделение только тогда может быть физически реализовано, если в уравнения для гравитационного поля будет явно входить метрический тензор пространства Минковского. В ОТО, как легко убедиться непосредственно из уравнений Гильберта—Эйнштейна, такое разделение невозможно. Принцип геометризации, с одной стороны, полностью исключает идею Эйнштейна об отождествлении гравитации с метрическим тензором риманова пространства, а с другой — развивает его же идею о римановой геометрии.

Если пространство-время полностью определяется метрическим тензором второго ранга, то материя характеризуется тензором энергии-импульса, который имеет для каждой формы материи свой определенный вид. Полный тензор энергии-импульса вещества и гравитационного поля в пространстве Минковского является сохраняющимся тензором. Ввиду универсального характера гравитации он и должен быть в РТГ источником гравитационного поля. Полная система уравнений релятивистской теории гравитации может быть формально получена из уравнений Максвелла для электродинамики, если вместо векторного электромагнитного поля в левой части уравнений мы поставим тензорное гравитационное поле, а сохраняющийся электромагнитный ток заменим плотностью тензора энергии-импульса всей материи. Конечно, такой вывод является эвристическим приемом и ни в какой мере не может претендовать на строгость, но точное рассмотрение на основании изложенных ранее принципов РТГ в соединении с локальной калибровочной инвариантностью приводит именно к такой системе гравитационных уравнений. Вся система содержит четырнадцать уравнений, четыре из них определяют структуру гравитационного поля, обладающего спинами 2 и 0. Вся система уравнений общековариантна, и в нее явно входит метрический тензор пространства Минковского. Это означает, что в РТГ пространство Минковского находит отражение не только в законах сохранения, но и в описании физических явлений\*. Поэтому пространство Минковского является физическим, а следовательно, и наблюдаемым. Характеристики его всегда можно проверить путем соответствующей обработки экспериментальных данных по движению световых сигналов и пробных тел в «эффективном» римановом пространстве. «Что касается того соображения, что прямая, как луч света, более непосредственно наблюдаема, — писал в свое время В. А. Фок, — то оно не имеет никакого значения: в определениях решающим является не непосредственная наблюдаемость, а соответствие природе, хотя бы это соответствие и устанавливалось путем косвенных умозаключений». Наблюдаемость, таким образом, следует понимать не в примитивном, а в более общем и глубоком смысле как адекватность природе. Разумеется, РТГ ни в коем случае не исключает

---

\* Однозначная и глубокая связь законов сохранения (которые экспериментально проверяемы) со структурой пространства Минковского свидетельствует о его физической наблюдаемости. Непонимание этой связи обнаруживается даже у известных специалистов в области ОТО. Например, академик Зельдович еще в 1967 г. в своей книге ошибочно писал о ненаблюдаемости пространства Минковского, позднее та же ошибка повторена им в работе (УФН. 1986. 149, № 4).

Эксперименты с распространением световых сигналов и пробных тел дают сведения лишь об эффективном римановом пространстве, возникающем благодаря действию гравитационного поля на вещество согласно принципу геометризации. В ОТО отсутствуют законы сохранения, следовательно, она и не может содержать понятия пространства Минковского, и поэтому говорить о нем в ОТО просто бессмысленно.



возможности описания движения в эффективном римановом пространстве. Уравнения РТГ (в противоположность ОТО) содержат метрический тензор пространства Минковского, поэтому все функции, описывающие физические поля, записываются в единых координатах для всего пространства-времени Минковского, например галилеевых (декартовых). В соединении с полевыми уравнениями, определяющими структуру гравитационного поля, возникает совершенно новый физический смысл уравнений Гильберта—Эйнштейна, которые при этом изменяются и существенно упрощаются. Законы сохранения вещества и гравитационного поля вместе взятых являются следствиями уравнений РТГ и отражают псевдоевклидову структуру пространства-времени. Решая систему уравнений поля, мы установим зависимость метрического тензора эффективного риманова пространства как от координат пространства Минковского, так и от гравитационной постоянной  $G$ . Собственное время, измеряемое часами (движущимися вместе с веществом), оказывается зависящим от координат пространства Минковского и гравитационной постоянной  $G$ . Таким образом, ход собственного времени зависит от характера гравитационного поля.

Наличие пространства Минковского и явное присутствие его метрического тензора в уравнениях поля позволяют отделить силы инерции от гравитационного поля и всегда найти его влияние на те или иные физические процессы. С другой стороны, все переменные поля могут быть записаны в единых координатах для всего пространства-времени, например, такие координаты можно взять галилеевыми (декартовыми). Всего перечисленного ОТО в принципе лишена, поскольку в римановой геометрии не существует понятия глобальных декартовых координат. Возникает вопрос, что остается от общей теории относительности и в той или иной форме переходит в РТГ? Система из десяти полевых уравнений РТГ, в которой источником является полевой тензор энергии-импульса материи, не совпадает с уравнениями Гильберта—Эйнштейна. Уравнения Гильберта—Эйнштейна лишь при выполнении наших четырех уравнений, определяющих структуру гравитационного поля, совпадают с другой нашей системой десяти уравнений с той принципиальной разницей, что компоненты поля в них являются функциями координат Минковского. Оставаясь же в рамках ОТО, нельзя записать уравнения Гильберта—Эйнштейна в координатах пространства Минковского, поскольку в римановой геометрии, на которой основана ОТО, нет такого понятия. Далее, в принципе геометризации, который определяет характер взаимодействия гравитационного поля с веществом, косвенно нашла отражение идея Эйнштейна о римановой геометрии.

На основании физических положений РТГ и принципа локальной калибровочной инвариантности получается следующая система общековариантных уравнений РТГ для вещества и гравитационного поля\*:

$$\gamma^{\alpha\beta} D_\alpha D_\beta \tilde{g}^{\mu\nu} = 16\pi t^{\mu\nu}, \quad D_\beta \tilde{g}^{\mu\nu} = 0.$$

\* Заметим, что в РТГ как первая система уравнений, так и вторая явно содержат метрический тензор пространства Минковского. Академик Зельдович, как видно из работы (УФН. 1986. 149, № 4), не увидел, что в уравнении (3) метрический тензор пространства Минковского точно сокращается, следовательно, оставаясь в рамках ОТО, нельзя сформулировать теорию в пространстве Минковского, поэтому невозможно и ввести тензор энергии-импульса гравитационного поля. Все рассуждения в этой и других работах по данному вопросу не имеют ни физического, ни математического смысла. Утверждение Я. Б. Зельдовича, что ОТО можно сформулировать в пространстве Минковского, ошибочно, поскольку в римановой геометрии, на которой основана ОТО, не существует понятия пространства Минковского.

Здесь  $t^{\mu\nu}$  — плотность тензора энергии-импульса всей материи в пространстве Минковского,  $D_\mu$  — ковариантная производная по метрике Минковского, а величина  $\tilde{g}^{\mu\nu}$ , согласно принципу геометризации, равна  $\tilde{g}^{\mu\nu} = \sqrt{-g}g^{\mu\nu} = \sqrt{-\gamma}\gamma^{\mu\nu} + \sqrt{-\gamma}\varphi^{\mu\nu} \equiv \tilde{\gamma}^{\mu\nu} + \tilde{\varphi}^{\mu\nu}$ ,  $\varphi^{\mu\nu}$  — тензорное гравитационное поле.

Общековариантные уравнения РТГ по внешнему виду очень напоминают уравнения Максвелла для электродинамики:

$$\gamma^{\alpha\beta}D_\alpha D_\beta A^\mu = 4\pi j^\mu,$$

$$D_\mu A^\mu = 0.$$

В электродинамике электромагнитное поле векторное, а источником его является сохраняющийся электромагнитный ток.

В релятивистской теории гравитации гравитационное поле тензорное, а источником его является сохраняющаяся плотность тензора энергии-импульса всей материи в пространстве Минковского.

Уравнение даже для свободного гравитационного поля нелинейно, поскольку в этом случае само поле является источником. Гравитационная энергия, так же как и другие виды энергии, входит в источник поля равноправно. Заметим, что некоторые аспекты теории гравитации с использованием метрического тензора пространства Минковского были рассмотрены в работах [8]. Но даже те авторы, которые были на правильном направлении, не поняли этого и пошли по другому пути построения теории гравитации, который не привел к чему-то определенному.

#### 4. Физические следствия РТГ

Остановимся теперь на некоторых физических следствиях РТГ. Хорошо известно, что для фридмановской однородной и изотропной Вселенной, согласно ОТО, могут быть три модели Вселенных. Одна из них — замкнутая Вселенная, имеющая конечный объем. Какая плотность вещества во Вселенной в настоящее время? На этот вопрос ОТО не может дать определенного ответа. Согласно РТГ, фридмановская однородная и изотропная Вселенная бесконечна и только «плоская», так как ее трехмерная геометрия евклидова. Это приводит к тому, что плотность энергии вещества во Вселенной должна равняться критической плотности, определяемой на основании измерения постоянной Хаббла. РТГ предсказывает, что во Вселенной должна существовать «скрытая масса», плотность энергии которой почти в сорок раз превышает плотность энергии вещества, наблюдаемой сегодня. Другим важным следствием РТГ является утверждение, что суммарная плотность энергии вещества и гравитационного поля во Вселенной должна равняться нулю.

Мы видим, что предсказание РТГ для развития фридмановской однородной и изотропной Вселенной существенно отличается от выводов ОТО.

Далее из ОТО следует, что массивные объекты с массой, большей трех масс Солнца, за конечный промежуток собственного времени неограниченно сжимаются гравитационными силами, достигая бесконечной плотности. Такой процесс эволюции звезды называют гравитационным коллапсом. Объекты этого типа получили название «черные дыры». Они не имеют материальной поверхности, а поэтому тело, падающее в «черную дыру», при пересечении ее границы не встретит ничего, кроме пустого пространства. Из внутренней области «черной дыры»

через ее границу не может выйти даже свет. Уилер рассматривал гравитационный коллапс и возникающую сингулярность как «один из величайших кризисов всех времен» для фундаментальной физики. С этим согласится каждый, кто проник в сущность ОТО.

Релятивистская теория гравитации в корне изменяет характер гравитационного коллапса. Она приводит к явлению гравитационного замедления времени, благодаря которому сжатие массивного тела в сопутствующей системе отсчета происходит за конечное собственное время, и при этом, и это самое главное, плотность вещества остается конечной и не превышает величины  $10^{16}$  г/см<sup>3</sup>, яркость тела экспоненциально уменьшается, объект «чернеет», но в отличие от «черных дыр», всегда имеет материальную поверхность. Такие объекты, если они возникают, имеют сложное строение, при этом никакого гравитационного самозамыкания не происходит, а поэтому вещество не исчезает из нашего пространства. В РТГ собственное время для падающего пробного тела зависит как от координат пространства Минковского, так и от гравитационной постоянной  $G$ , следовательно, ход собственного времени определяется характером гравитационного поля. Именно это обстоятельство и приводит к тому, что собственное время для падающего пробного тела неограниченно замедляется по мере приближения к шварцшильдовскому радиусу. Таким образом, согласно РТГ, никаких объектов «черных дыр», в которых происходит катастрофически сильное сжатие вещества до бесконечной плотности и которые не имеют материальной поверхности, в принципе не может быть в природе. Все это можно точно установить на примере сферически-симметричной нестационарной задачи для пыли, когда давление полагается равным нулю. Промежуток собственного времени  $d\tau$  для падающего тела связан с промежутком времени пространства Минковского  $dt$  формулой

$$d\tau = dt \left( \frac{\rho - GM}{\rho + GM} \right),$$

где  $\rho$  — радиальная переменная в пространстве Минковского.

Из приведенной формулы непосредственно видно, что, когда  $\rho$  приближается к значению, равному  $GM$ , дифференциал собственного времени  $d\tau$  стремится к нулю, следовательно, все физические процессы в падающем теле неограниченно замедляются. Согласно РТГ, не существует не только статических, но и нестатических сферически-симметричных тел с радиусом, меньшим или равным  $GM$ . Это означает, что никаких дыр в пространстве-времени не может быть. Все это принципиально отличает предсказания РТГ от предсказаний ОТО. Сжатие массивных объектов, когда давление не равно нулю, будет, конечно, слабее, поскольку давление препятствует гравитационному притяжению. Эволюция реальных объектов требует более детального изучения с использованием уравнения состояния вещества и является очень интересной проблемой.

РТГ объясняет всю имеющуюся совокупность наблюдательных и экспериментальных данных для гравитационных эффектов в Солнечной системе. Детальный анализ, проведенный в работе [9], показывает неоднозначность предсказаний ОТО для гравитационных эффектов в Солнечной системе, причем для одних эффектов произвол возникает в членах первого порядка по гравитационной постоянной  $G$ , а для других — в членах второго порядка. В чем причина неоднозначности? В ОТО для определения метрики риманова пространства в каких-либо координатах необходимо задать так называемые координатные условия, которые весьма произвольны и всегда нековариантны (т. е. отно-

сятся только к определенной выбранной системе координат). В зависимости от вида этих условий мы в одних и тех же координатах в общем случае обязательно получим разные метрические тензоры. Но разные метрические тензоры в одних и тех же координатах будут давать и разные геодезические, а это значит, что будут различны и предсказания ОТО для движения света и пробных тел.

Следует отметить, что Вейль и Лоренц показали: при известных уравнениях всех времениподобных и всех изотропных геодезических линий в какой-либо системе координат метрический тензор пространства-времени в этой системе определяется с точностью до постоянного множителя, т. е. с физической точки зрения, изучая движение света и пробных тел, можно экспериментально установить структуру геометрии пространства-времени. Согласно этой теореме, разные метрические тензоры в данной системе координат ведут к разным предсказаниям о движении света и пробных тел.

Рассмотрим один мысленный эксперимент, отчетливо демонстрирующий произвол предсказаний ОТО. Пусть в инерциальной системе отсчета два пробных тела, разнесенных на некоторое расстояние, закреплены в точках  $A$  и  $B$ , а в точке  $O$ , очень близкой к линии  $AB$ , но равноудаленной от  $A$  и  $B$ , укреплен «игла», на которую можно насадить массивное (малых размеров) тело  $M$ . Проведем на этой «установке» два опыта. Сначала, отведя тело  $M$  от «установки» на расстояние, много большее  $AB$  (в бесконечность), определим время  $t_0$  распространения светового сигнала от  $A$  к  $B$  и обратно. Затем, вернув тело  $M$  и «насадив» его на «иглу», повторим измерения. В присутствии тела  $M$  величина времени  $t_0$  заменится на  $t$ , а их разность даст время гравитационного запаздывания  $t - t_0 = \Delta t$ , возникающего из-за действия тела на движение светового сигнала. Если теперь вычислить во втором опыте время распространения  $t$  (пользуясь, например, в одних и тех же координатах гармоническим и шварцшильдовским решениями), а потом вычесть из полученного результата  $t_0$ , то времена запаздывания для таких разных решений в одних и тех же координатах окажутся разными\*. Таким образом, ОТО не дает определенного предсказания для данного опыта.

Перейдем теперь к обсуждению гравитационного излучения. Изучая гравитационные волны, Эйнштейн писал: «Можно было бы предположить, что посредством соответствующего выбора системы отсчета всегда можно добиться обращения в нуль всех компонент энергии гравитационного поля, что было бы в высшей степени интересно. Однако легко показать, что это, вообще говоря, не так» [3, с. 631], [10]. Эйнштейн в полном соответствии со своим принципом эквивалентности ожидал обращения в нуль всех компонент «энергии гравитационного поля», поэтому он и считал этот результат в высшей степени интересным. Однако установить это ему не удалось. Уже совсем недавно в работе [11] было показано, что гравитационное излучение, как оно определено в ОТО Эйнштейном, действительно может быть уничтожено выбором допустимой системы отсчета. Это как раз и есть тот результат, который Эйнштейн считал в высшей степени интересным. Из него следует, что

---

\* Многозначность решений уравнений Гильберта—Эйнштейна в одних и тех же координатах, мягко говоря, ускользнула от внимания академика Зельдовича, а поэтому его утверждение в работе (УФН. 1986. 149, № 4) об однозначности описания просто ошибочно. В данной статье мы затронули только те моменты статьи Зельдовича, которые смогли вписаться в ее общую ткань. Статья Зельдовича содержит и другие неправильные утверждения, но о них будет сказано специально и в другом месте.

последняя фраза в приведенном выше высказывании Эйнштейна неверна. Но если излучение можно уничтожить, оставаясь в рамках ОТО, то из этого следует, что формула Эйнштейна для квадрупольного гравитационного излучения не является следствием его теории. Здесь Эйнштейн скорее руководствовался глубокой физической интуицией, чем логикой своей теории. Она помогла ему получить правильную формулу для излучения, но не позволила раскрыть сущность ОТО. В РТГ гравитационное поле является физическим полем, и оно в принципе даже локально не может быть уничтожено выбором системы отсчета. Она предсказывает существование гравитационных волн, переносящих энергию и импульс, что в принципе отсутствует в ОТО. Утверждение, что ОТО предсказывает существование гравитационных волн, просто ошибочно и основано на непонимании логики теории. Формула Эйнштейна является следствием релятивистской теории гравитации.

Таким образом, на основе законов сохранения и представлений о гравитационном поле как физическом поле, обладающем плотностью энергии-импульса, в соединении с принципами геометризации и локальной калибровочной инвариантности однозначно построена релятивистская теория гравитации, которая объясняет все известные наблюдательные и экспериментальные данные о гравитации и дает новые предсказания о развитии фридмановской Вселенной и гравитационном коллапсе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Логунов А. А. Лекции по теории относительности и гравитации. М., 1985.  
[2] Schrödinger E.//Phys. Zs. 1918. N 19. P. 4. [3] Эйнштейн А. Собр. научных трудов. М., 1965. Т. 1. [4] Hilbert D.//Göttingen Nachrichten. 1917. 4. P. 21.  
[5] Klein F.//Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Klasse, 1918; Эйнштейновский сборник. М., 1985. [6] Денисов В. И., Логунов А. А. Современные проблемы математики. Итоги науки и техники. М., 1982. Т. 21. С. 49. [7] Логунов А. А., Мествиришвили М. А.//ТМФ. 1984. 61. С. 327; Logunov A. A., Mestvirishvili M. A.//Prog. of Theor. Phys. 1985. 74.N1. P. 31; Власов А. А., Логунов А. А., Мествиришвили М. А.//ТМФ. 1984. 61. С. 323; Логунов А. А., Мествиришвили М. А. Основы релятивистской теории гравитации. М., 1985.  
[8] Rosen N.//Phys. Rev. 1940. 57. P. 147; Ann. of Phys. 1963. 22. P. 1; Köhler M.//Zeitschr. für Phys. 1952. 131. P. 571; 1953. 134. P. 286; 1953. 134. P. 306; Papapetrou A.//Proc. Roy Irish Acad. 1948. A52. P. 11; Gupta S.//Proc. Phys. Soc. 1952. A65. P. 608; Thirring W.//Ann. Phys. 1961. 16. P. 69.  
[9] Логунов А. А., Лоскутов Ю. М. Неоднозначность предсказаний общей теории относительности и релятивистская теория гравитации. М., 1986.  
[10] Einstein A.//Sitzungsber. preuss. Acad. Wiss. 1918. 1. P. 154—167. [11] Власов А. А., Денисов В. И.//ТМФ. 1982. 53, № 3. С. 406—418.

Поступила в редакцию  
08.09.86