

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

530.12:531.51

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ВЕРНА!**Я. Б. Зельдович**, Л. П. Грищук

В статье «Тяготение, общая теория относительности и альтернативные теории»¹ мы рассмотрели современное состояние теории тяготения и обсудили пути ее дальнейшего развития. Была разобрана также критика в адрес общей теории относительности (ОТО), содержащаяся в работах², и проанализирована предложенная там «релятивистская теория гравитации» (РТГ). Вывод статьи¹ состоял в том, что ОТО правильна, а упомянутая критика основана на недоразумениях. Недавно появились новые работы^{3, 4}, содержащие критику ОТО и построение РТГ, с которыми мы подробно ознакомились.

Наше итоговое утверждение состоит в следующем: самое внимательное чтение статьи³ и других работ⁴ не изменило наших взглядов, изложенных в статье¹.

По-прежнему мы считаем, что общая теория относительности, использующая представление об искривленном пространственно-временном континууме (т. е. с метрическими соотношениями, отличающимися от метрики Минковского), является естественным, верным и непротиворечивым способом описания тяготения и тех явлений, в которых тяготение существенно. По нашему мнению, ОТО не имеет математических или физических противоречий или неоднозначностей, прекрасно согласуется со всеми имеющимися к настоящему времени экспериментами.

Как уже говорилось в статье¹, ОТО допускает эквивалентные формулировки: обычную, или геометрическую, и полевою. В геометрической формулировке ОТО присутствуют только компоненты метрического тензора искривленного пространства-времени $g_{\mu\nu}$, которые вместе с тем являются потенциалами гравитационного поля. В полевой формулировке ОТО присутствуют как компоненты метрики $\gamma_{\mu\nu}$ некоторого вспомогательного (фонового) пространства-времени, например пространства Минковского, так и компоненты тензорного гравитационного поля $h_{\mu\nu}$. Удобная связь между этими величинами, предложенная еще в знаменитой работе Дезера⁵, есть

$$(-g)^{1/2} g^{\mu\nu} = (-\gamma)^{1/2} (\gamma^{\mu\nu} + h^{\mu\nu}).$$

Полевая формулировка ОТО имеет вид точной и строгой теории поля на заданном фоне. Она обладает всеми необходимыми атрибутами такой теории — действием и уравнениями движения, тензором энергии-импульса гравитационного поля и законами сохранения, отражающими симметрию фонового пространства-времени, координатной и калибровочной инвариантностью и т. д. Построение полевой формулировки ОТО было предметом многочисленных исследований⁵⁻⁸. К настоящему времени она разработана с ис-

черпывающей полнотой. Совпадая с геометрической формулировкой ОТО во всех экспериментально проверяемых выводах, полевая формулировка ОТО имеет вид традиционной теории поля и удобна в теоретических исследованиях^{9–11}.

Обратимся к критике ОТО, содержащейся в работах^{2–4}. Критика в адрес ОТО концентрируется вокруг двух утверждений. Согласно одному из них ОТО дает неоднозначные предсказания для гравитационных эффектов, согласно другому — в ОТО не имеют места законы сохранения энергии-импульса. Рассмотрим эти утверждения вначале кратко; технические подробности изложены в конце статьи.

Авторы работ^{2–4} полагают, что ОТО страдает серьезнейшим практическим недугом: ее предсказания, касающиеся наблюдательных эффектов в Солнечной системе, будто бы неоднозначны. Мы с этим совершенно не согласны. Для краткого пояснения достаточно напомнить, что в 1985 г. в Ленинграде была проведена представительная международная конференция, специально посвященная релятивистским эффектам в Солнечной системе: «Теория относительности в небесной механике и астрометрии». Было констатировано прекрасное согласие теории (именно общей теории относительности!) с наблюдениями. Труды конференции изданы¹². Этим же вопросам посвящен еще целый ряд публикаций¹³. ОТО давно перестала быть только проверяемой теорией, сейчас она практически используется как рабочая теория для составления астрономических ежегодников, для расчета движения больших планет, Луны и космических аппаратов. Релятивистские эффекты ОТО надежно измерены не только в Солнечной системе, но и за ее пределами — по движению радиопульсара PSR 1913+16, входящего в двойную звездную систему¹⁴. По нашему мнению, ситуация не вызывает ни малейших сомнений в правильности и однозначности ОТО.

Обращение к Солнечной системе и слабым гравитационным полям особенно замечательно тем, что четко указывает причину, по которой получены упомянутые выводы в РТГ. Видно, что дело не в сложных нелинейных гравитационных полях, топологических тонкостях или неосуществленных экспериментах, а в некорректном толковании смысла координат и метрики Минковского, фигурирующей в выкладках РТГ (см. об этом ниже).

Далее, авторы работ^{2–4} видят неисцелимый порок ОТО в том, что плотность энергии-импульса и натяжений гравитационного поля обычно выражается с помощью псевдотензора *) энергии-импульса, а не тензора, как в теории Максвелла. Отсюда делается далеко идущий вывод: в ОТО нет закона сохранения энергии.

В ответ на это, на популярном уровне, можно напомнить, что исторически закон сохранения энергии появился как обобщение огромного числа попыток построить вечный двигатель. Аргумент авторов РТГ против ОТО стал бы серьезным, если бы они показали конструктивно, как в рамках ОТО можно построить вечный двигатель. Ничего подобного в работах этих авторов не предлагается. По нашему мнению, дело не в отсутствии законов сохранения в ОТО, а в том, что авторы РТГ только одну форму записи этих законов считают приемлемой. Поясним это подробнее.

В вопросе об энергии и законах сохранения центральным пунктом критики является самая замечательная черта геометрической формулировки ОТО, а именно, то ее свойство, что потенциалы гравитационного поля $g_{\mu\nu}$ являются вместе с тем компонентами метрического тензора $g_{\mu\nu}$ пространства-времени. Этим геометрическая формулировка ОТО отличается от традиционных теорий поля, в которых есть порознь компоненты метрики и поле-

*) Термин «псевдотензор» в данном контексте означает, что эта величина ведет себя как тензор не по отношению ко всем произвольным преобразованиям координат, а только по отношению к некоторому достаточно широкому классу преобразований, к числу которых принадлежат и преобразования Лоренца.

вые переменные. По этой причине в геометрической формулировке ОТО тензор энергии-импульса гравитационного поля, вычисляемый путем варьирования по метрике пространства-времени $g_{\mu\nu}$ (а следовательно, по полевым переменным), оказывается тождественно равным нулю в силу уравнений поля. По этой причине запись ковариантных уравнений в форме, содержащей традиционную обычную (а не ковариантную) четырех-дивергенцию, неизбежно приводит к псевдотензору энергии-импульса гравитационного поля, а не к тензору. По этой причине могут возникнуть сомнения в интегральных законах сохранения, поскольку искривленное пространство-время с метрикой $g_{\mu\nu}$ в общем случае не допускает группы движений *). По этой причине анализ асимптотического поведения поля изолированной системы переплетается с анализом асимптотического поведения определяемой компонентами $g_{\mu\nu}$ координатной системы и становится технически сложным.

Все эти особенности геометрической формулировки ОТО хорошо осознаны и объяснены¹⁵⁻¹⁷, они ни в коей мере не препятствуют решению практических задач. Например, изолированная двойная звезда, «погруженная» в асимптотически плоское пространство-время, имеет все 10 обычных интегралов движения в приближении до $(v/c)^4$ включительно, где система еще консервативна (v — характерная орбитальная скорость). В приближении $(v/c)^5$ сказывается излучение гравитационных волн, система теряет свою (ньютоновскую) энергию, и параметры кеплеровской орбиты вековым образом изменяются. Все эти выводы в последние годы получены¹⁸ путем решения только уравнений Эйнштейна без всякого использования псевдотензора энергии-импульса. Убыль энергии в точности равна той, которая описывается знаменитой эйнштейновской квадрупольной формулой. В двойной системе с пульсаром PSR 1913+16 эти выводы блестяще подтверждены радиоастрономическими методами со всей доступной к настоящему времени точностью — лучше 4 %¹⁴.

По мнению авторов работ²⁻⁴ упомянутые особенности геометрической формулировки ОТО являются принципиальными недостатками ОТО. Утверждается, что они полностью устраняются в РТГ, исходящей из понятий поля, заданного в плоском мире Минковского с 10-параметрической группой движений. Другими словами, авторы РТГ видят решение проблемы энергии и законов сохранения только на пути возврата к концепциям поля в глобальном мире Минковского.

По этому поводу мы хотим напомнить, что представление ОТО в форме обычной теории поля на фоне некоторого вспомогательного пространства-времени и, в частности, на фоне пространства Минковского, известно с исчерпывающей полнотой и называется полевой формулировкой ОТО. Тщательное изучение работ²⁻⁴ показывает, что математическое содержание РТГ целиком сводится к математическому содержанию ОТО в полевой формулировке, снабженной некоторыми допустимыми (но не обязательными) дополнительными условиями. Решение проблемы энергии и законов сохранения в РТГ ее авторы считают вполне удовлетворительным. Поскольку в этом вопросе вся аргументация и выкладки РТГ повторяют то, что имеет место и уже было показано в рамках полевой формулировки ОТО (см., например,⁸), то, по нашему мнению, упреки в адрес ОТО со стороны авторов РТГ автоматически снимаются. (Технические детали критики ОТО разобраны ниже.)

Такова наша принципиальная точка зрения на общую теорию относительности Эйнштейна, изложенная подробнее в статье¹, от которой, как уже сказано, мы несколько не отрезаемся.

Следует еще раз отметить, что утверждение «общая теория относительности верна» не исключает само по себе ни одного из следующих пунктов:

*) Наличие группы движений свидетельствует о симметрии пространства-времени или поверхности. Например, плоскость или сфера могут «скользить» сами по себе — они допускают группу движений, а, скажем, измятое крыло автомобиля не допускает группы движений.

а) большого числа нерешенных задач в ОТО; б) возможного существования каких-то количественных пределов правильности ОТО; в) существования другой или других теорий, которые были бы полностью эквивалентны ОТО во всех наблюдаемых предсказаниях.

Начнем с первого пункта. Хорошо известно, что далеко не все задачи решены даже в рамках классической небесной механики, тем более это относится к задачам релятивистской теории тяготения. ОТО является живой и активно развивающейся наукой. Представление о нерешенных задачах ОТО, об огромном объеме выполняемых теоретических и экспериментальных работ, о практических приложениях ОТО можно получить, например, из отдельных статей¹⁹, из сборников, вышедших в связи со 100-летием со дня рождения Эйнштейна²⁰, из трудов разнообразных международных конференций.

Теперь о пункте б). В настоящее время широко распространено мнение (и мы также его поддерживаем), что в близком будущем возникнет некая «всеобщая теория», «theory of everything», кратко ТОЕ, как ее называют в англоязычной литературе. Эта теория объединит тяготение с другими силами природы — электромагнетизмом, слабым взаимодействием и хромодинамикой (теорией кварков, глюонов и ядерных сил). Более того, общее мнение состоит в том, что ТОЕ предскажет новые частицы и поля, до сих пор не обнаруженные в лабораторных опытах. Эти частицы и поля могут играть существенную роль в космологии. Далее, ряд авторов полагают, что в основе ТОЕ лежит пространство более чем четырех измерений (например, $D = 10, 11$ или $26?$), из которых «выживают» как время и пространство только 4.

Все эти соображения ограничивают область применимости ОТО. ОТО оказывается в этом смысле низкоэнергетическим пределом общей теории, ОТО заведомо неприменима на планковских масштабах массы, длины, времени, где существенны квантово-гравитационные эффекты.

Отметим специально, что ОТО является релятивистской теорией и поэтому ограничений по скорости или величине гравитационного потенциала (размерность квадрата скорости) в ОТО нет. В частности, ни теория больших черных дыр, ни космология классического периода расширения не потребуют изменения. Более общая теория (включающая ОТО как предельный случай) может в полной мере потребоваться лишь для мини-черных дыр, с массой порядка планковской, и для проблем типа спонтанного рождения Вселенной.

Наконец, обратимся к последнему пункту — о существовании теорий, эквивалентных ОТО. Как уже сказано, общая теория относительности, являясь обобщением специальной теории относительности, безусловно, допускает эквивалентную (полевою) формулировку, использующую понятие тензорного гравитационного поля, заданного на фоне плоского мира Минковского. В таком подходе метрика Минковского играет чисто вспомогательную роль. Искусственный, формальный характер метрики Минковского виден уже из того, что распространение света при наличии тяготения происходит не по нулевым геодезическим плоского мира Минковского, а по нулевым геодезическим метрики искривленного мира. Другими словами, конус причинности определяется метрикой искривленного мира, а не плоского. При этом конус причинности и мировые линии реальных тел могут располагаться как внутри, так и вне светового конуса, формально определяемого метрикой Минковского. В таких условиях попытка интерпретации метрических соотношений плоского мира в качестве наблюдаемых означала бы признание того, что в реальном физическом процессе причина и следствие могут поменяться местами. (Тем не менее в статье³ говорится об «объективности и наблюдаемости тех свойств, которые присущи пространству Минковского»; с. 393.)

Как уже говорилось выше, полевая формулировка ОТО была детально разработана и опубликована до появления в 1984 г. в работах А. А. Логунова и его сотрудников «релятивистской теории гравитации» (РТГ). Поскольку

ку математическое содержание РТГ сводится к математическому содержанию ОТО (в полевой формулировке), то при корректной интерпретации смысла метрики Минковского — выводы РТГ совпадают с выводами ОТО, при некорректной — противоречат эксперименту. А тогда: «Зачем же эта улица, если она не ведет к храму?» («Покаяние», фильм Т. Абуладзе.)

Остановимся на нескольких технических моментах, относящихся к критике ОТО и содержании РТГ.

1) Авторы работы³ говорят, что в рассуждения Эйнштейна, а также и Клейна «вкралась простая, но принципиальная ошибка». Утверждается, что величина J_σ , которой Эйнштейн придавал смысл энергии и импульса изолированной системы, «оказывается при более внимательном рассмотрении величиной, тождественно равной нулю». Сходные утверждения приводятся и в других работах⁴, в том числе научно-популярных. Подробности этого утверждения содержатся в статье²¹. Там вначале авторы цитируют Эйнштейна²²:

«Интегральные законы сохранения импульса и энергии получаются из уравнения (1) [Уравнение (1) в этой работе есть следствие уравнений Эйнштейна, записанное в виде

$$\frac{\partial U_\sigma^\nu}{\partial x_\nu} = 0. \text{ — Я. З., Л. Г.]}$$

путем интегрирования последнего по x_1, x_2, x_3 по области V . Поскольку на границах этой области все U_σ^ν равны нулю, то

$$\frac{d}{dx_4} \int U_\sigma^4 dx_1 dx_2 dx_3 = 0. \tag{3}$$

Эти четыре уравнения и выражают, по моему мнению, законы сохранения импульса ($\sigma = 1, 2, 3$) и энергии ($\sigma = 4$). Обозначим входящий в уравнение (3) интеграл через J_σ . Я утверждаю теперь, что величины J_σ не зависят от выбора координат для любой системы координат, совпадающей вне области V с одной и той же галилеевской системой».

Авторы работы²¹ затем пишут:

«Однако легко убедиться, что, следуя Эйнштейну, мы приходим к равному нулю значению энергии и импульса любой изолированной системы.

Чтобы это показать, запишем уравнения Гильберта — Эйнштейна в виде

$$U_\sigma^\nu = T_\sigma^\nu + \tau_\sigma^\nu = \partial_\mu \sigma_\sigma^{\mu\nu}, \tag{6.4}$$

где $\sigma_\sigma^{\mu\nu} = -\sigma_\sigma^{\nu\mu}$ — плотность антисимметрического (псевдо)тензора третьего ранга.

Подставляя уравнение (6.4) в выражение для четырех-импульса изолированной системы, имеем

$$J_\sigma = \int dv U_\sigma^4 = \int dv \partial_n \sigma_\sigma^{n4} = \int dS_n \sigma_\sigma^{n4}. \tag{6.5}$$

Так как поверхность интегрирования S находится вне области V , где все компоненты тензора $g_{\mu\nu}$ постоянны и имеют галилеевские значения, то величины σ_σ^{n4} равны нулю всюду на поверхности S . Поэтому из выражения (6.5) следует, что $J_\sigma = 0$.

Поскольку Эйнштейн не заметил, что $J_\sigma = 0$, данное выше определение он считал корректным, устанавливающим понятия энергии-импульса замкнутой системы столь же четко, как и в классической механике. Подобные ошибочные утверждения почти дословно повторяются и в ряде других книг (см., например, ...).

Сравнение этих двух отрывков показывает, что имеет место недоразумение. При переходе от (1) к (3) Эйнштейн отбросил объемный интеграл от

трехмерной дивергенции $\partial U_\sigma^n / \partial x_n$, сводящийся к поверхностному интегралу:

$$\int dv \frac{\partial U_\sigma^n}{\partial x_n} = \int dS_n U_\sigma^n.$$

Это действительно можно сделать, так как э асимптотическое поведение метрики изолированной системы есть

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + O\left(\frac{1}{r}\right), \quad g_{\mu\nu, \sigma} = O\left(\frac{1}{r^2}\right).$$

Оно таково, что поверхностный интеграл $\int dS_n U_\sigma^n$ стремится к нулю при $r \rightarrow \infty$. Авторы работы²¹, видимо по аналогии, отбрасывают и поверхностный интеграл в правой части (6.5) и, таким образом, приходят к выводу, что $J_\sigma = 0$. Однако для той же изолированной системы, с тем же асимптотическим поведением метрики, этот поверхностный интеграл, т. е. $\int dS_n \sigma_\sigma^{n4}$, отнюдь не стремится к нулю, и его отбрасывать нельзя. Таким образом, тождественное равенство нулю величины J_σ не имеет места.

В другом месте статьи³ фактически вычисляется величина J_σ из (6.5), однако речь уже идет не о тождественном равенстве нулю, а о неоднозначностях. Авторы РТГ пишут на с. 373, что они вычисляют P^0 , «пользуясь определением ОТО для инертной массы тела (или его полной энергии)

$$P^0 = \lim_{r \rightarrow \infty} \oint ds_k h^{00k},$$

в котором $ds_k = \dots$. При этом в³ не учитывается, что данное выражение и истолкование его в качестве массы предполагает использование определенных асимптотических значений метрики $g_{\mu\nu}$. Иными словами, принятое в геометрической формулировке ОТО определение массы включает в себя требование использования определенных асимптотических координат. Это обстоятельство специально подчеркивается в книге Ландау и Лифшица «Теория поля»¹⁵, в книге Мизнера, Торна и Уилера «Гравитация»¹⁶ и др., а также в обзоре Л. Д. Фаддеева²³. Например, в книге¹⁶ сказано:

«Требование того, чтобы пространство-время было асимптотически плоским, — не только замечательная, но и решающая особенность интегральных потоков (20.9). (Имеются в виду формулы для P^0 и других интегральных величин, записанные в виде поверхностных интегралов. — Я. З, Л. Г.). Даже координаты должны асимптотически переходить в координаты Минковского, иначе большинство формул этой главы не верны или требуют изменения». И далее: «Резюме: попытки использовать формулы (20.9), не учитывая граничных условий Минковского (и, в частности, попытки просто применять их без изменений в криволинейных координатах), легко и неизбежно ведут к абсурду».

Таким образом, полученный авторами РТГ неоднозначный результат для массы в произвольных координатах объясняется использованием формулы для P^0 вне области ее применимости.

Этот вопрос формально и строго рассматривается в статье Фаддеева²³. Содержащиеся в ней выводы и анализ критики в адрес ОТО в работе³ не обсуждаются. Следует указать также работы, в которых явно используются симметрии во всем искривленном пространстве-времени или на его бесконечности и которые приводят к координатно-независимым выражениям^{17, 24}.

Со своей стороны заметим следующее. Как видно из обсуждения, предметом критики со стороны авторов РТГ являются трансформационные свойства величин типа P^0 и, в частности, вопрос о возможности использования произвольных пространственных координат. Для ответа на эти вопросы как раз и оказывается удобной полевая формулировка ОТО. Как подчеркивалось в¹, в полевой формулировке ОТО фигурирует тензор (а не псевдотензор) энергии-импульса гравитационного поля, никоим образом не «сворачиваю-

щийся» к функции только от $g_{\mu\nu}$ и существенным образом содержащий фоновую метрику $\gamma_{\mu\nu}$. Явный вид этого тензора, обсуждение его свойств, анализ координатных и калибровочных преобразований, доказательство существования законов сохранения, отражающих симметрию фонового пространства-времени, и примеры использования этого тензора можно найти в статье «Точная теория (эйнштейновского) гравитационного поля на фоне произвольного пространства-времени»⁸. В частности, для изолированных систем полевая формулировка ОТО автоматически приводит к ковариантному относительно пространственных преобразований выражению для P^0 и других величин (ограничение на выбор пространственных координат полностью снимается), причем численное значение сохраняющихся величин совпадает со стандартным (см.¹¹). Настоятельно подчеркнем, что речь идет об ОТО, а не какой-либо другой теории. Поскольку по этому вопросу все доводы и соображения, высказанные в рамках РТГ, повторяют то, что известно и сделано в ОТО (в полевой формулировке), то признание удовлетворительности решения этих проблем в РТГ означает признание удовлетворительности их решения в ОТО.

Можно еще добавить, что для решения практических задач, например для описания движения тяготеющих тел в Солнечной системе, обсуждаемые вопросы вообще не имеют никакого значения. Нет никаких динамических уравнений, сверх уравнений Эйнштейна, куда надо было бы независимо подставлять то или иное определение или значение P^0 . Из числа произвольных координатных преобразований (а в полевой формулировке — произвольных калибровочных преобразований) есть такие, которые меняют члены, входящие в P^0 , но при этом изменяются и другие члены в уравнениях, так что сами уравнения все равно не меняются. Ничего, кроме уравнений Эйнштейна, решать не нужно. А из уравнений Эйнштейна, как хорошо известно, окончательные уравнения движения тяготеющих тел получаются однозначно и в полном согласии с наблюдениями. Как мы уже говорили выше, ОТО давно стала рабочей теорией в релятивистской небесной механике Солнечной системы и эфемеридной астрономии²⁸.

2) Утверждение авторов РТГ о неоднозначности предсказаний ОТО «для гравитационных эффектов» основано на недоразумении. Если под «гравитационными эффектами» подразумеваются такие величины, как энергия и импульс движущейся пробной частицы, то они, конечно, определены только по отношению к какой-либо системе координат и от нее зависят, но здесь ОТО ничем не отличается от специальной теории относительности и от других теорий. Если же имеется в виду неоднозначность предсказаний для таких «гравитационных эффектов», которые по смыслу не зависят от того, какая координатная сетка используется для маркировки событий, то такие эффекты, конечно, от системы координат не должны зависеть, и аппарат ОТО эту независимость обеспечивает. Например, время распространения сигнала между планетами в поле тяготения Солнца, измеряемое на одной из них, не зависит от типа той или иной координатной сетки, которая покрывает Солнечную систему. Полученный авторами РТГ противоположный результат для этого примера (и для мысленного эксперимента, в котором «массивное тело насаживается на иглу») объясняется тем, что они настаивают на одном и том же численном значении буквы r — радиальной координаты, описывающей положение планет r_e , r_p в разных координатных сетках. Но тогда при переходе к другой координатной сетке планеты оказываются на сферах другой площади, т. е. на других орбитах, на физически отличающихся расстояниях. Инварианты тензора кривизны в точках отправления и приема (или отражения) сигнала теперь также принимают другие значения. По существу, авторы РТГ предлагают вычислять время распространения сигнала между другой парой планет. Естественно, что в этом случае отличие во временах распространения сигнала есть и обязательно должно быть. Если же источник и приемник не сдвигаются умышленно, то численные значения величины r

(радиальной координаты) в разных сетках отличаются, а значения инвариантов тензора кривизны и время распространения, конечно, остаются неизменными. (Конкретно, для одной и той же пары планет значения величины R в формулах (1.12a) и (1.13a)³ разные, а не одинаковые, как предполагают авторы РТГ.) Как мы уже говорили в¹, об одинаковости положений тел в разных координатных сетках судят по инвариантным, операционно определяемым характеристикам, а не по численным значениям координаты r , даже если она мыслится как «первичная переменная в заранее обусловленной арифметизации пространства». Отсюда видно, что неоднозначностей в наблюдательных предсказаниях ОТО или противоречий с ОТО нет. В частности, их нет в эффекте задержки сигнала, как это подробно выяснено в целом ряде работ²⁵.

3) Весь набор уравнений РТГ в терминах метрики искривленного пространства-времени $g_{\mu\nu}$ можно свести к уравнениям Эйнштейна плюс гармоническое координатное условие, столь успешно использовавшееся Фоком²⁶.

Действительно, как подчеркивалось в¹, полевые переменные $h^{\mu\nu}$ полевой формулировки ОТО (в работе³ они обозначаются $\Phi^{\mu\nu}$) можно подчинить за счет калибровочной свободы дополнительному условию

$$h^{\mu\nu}_{;\nu} = 0,$$

где точка с запятой обозначает ковариантную производную по фоновой метрике (в работе³ эта производная обозначена символом D_{μ} , а соответствующее уравнение есть уравнение (2.1)). В силу связи между $h^{\mu\nu}$, $\gamma^{\mu\nu}$ и $g^{\mu\nu}$, приведенной в самом начале этой статьи,

$$(-g)^{1/2} g^{\mu\nu} = (-\gamma)^{1/2} (\gamma^{\mu\nu} + h^{\mu\nu})$$

(в работе³ эта связь названа «принципом геометризации» и вводится уравнениями (2.2), (2.3)), это условие можно переписать в виде

$$((-g)^{1/2} g^{\mu\nu})_{;\nu} = 0$$

(в работе³ это — уравнение (2.40), дополнительное к уравнениям Эйнштейна (2.39)). Фоновую метрику Минковского удобнее всего представлять себе записанной в лоренцевых координатах, т. е. в виде

$$d\sigma^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Тогда дополнительное условие приобретает вид

$$((-g)^{1/2} g^{\mu\nu})_{,\nu} = 0,$$

где запятая обозначает обычную производную. Полученное условие и есть так называемое гармоническое условие на компоненты $g^{\mu\nu}$ ²⁶. Таким образом, уравнения Эйнштейна дополняются условием гармоничности.

Все сказанное можно перефразировать так: в терминах полевых переменных $h^{\mu\nu}$ уравнения РТГ сводятся к уравнениям полевой формулировки ОТО плюс обязательное выполнение определенных дополнительных условий, возможность выбора которых заранее предусмотрена в полевой формулировке ОТО в виде калибровочной симметрии. (Разрушая калибровочную симметрию, дополнительные условия, естественно, будут содержать метрику фонового пространства-времени. На этом основании говорится в статье³, что это «делает метрику $\gamma^{\mu\nu}$ пространства Минковского неустранимой из теории» и что «метрика пространства Минковского, благодаря полевому уравнению (2.1), органически входит в теорию. В этом состоит принципиальная разница РТГ и ОТО».)

Мы не видим никаких оснований называть общую теорию относительности, снабженную допустимыми (но не обязательными) дополнительными условиями как в полевой, так и в геометрической формулировке, новым именем и тем более утверждать, что теперь она «приводит к качественно

отличным от ОТО физическим следствиям» (с. 386). Поскольку авторы РТГ настаивают на том, что РТГ «приводит к ряду кардинально отличных от следующих из ОТО выводов»²⁻⁴, то возникает вопрос о том, насколько эти следствия получены корректно.

4) Одним из таких следствий является утверждение, согласно которому в силу уравнений РТГ «фридмановская однородная и изотропная Вселенная может быть только бесконечной и плоской»³. Чтобы убедиться в том, что это не так, достаточно ознакомиться с § 94 книги Фока²⁶, где в явном виде обсуждается, например, метрика пространственно открытой (а не пространственно плоской) однородной и изотропной фридмановской Вселенной в гармонических координатах, т. е. метрика, удовлетворяющая всему набору уравнений РТГ.

5) Еще одно принципиальное отличие РТГ от ОТО состоит, по мнению авторов РТГ, в том, что «РТГ в корне меняет представление об эволюционном характере гравитационного коллапса». Это утверждение приводится и в популярной литературе. Цитируем из журнала «Природа»⁴: «В РТГ... собственное время для падающего пробного тела неограниченно замедляется по мере приближения к так называемому шварцшильдовскому радиусу. Таким образом, согласно РТГ, никаких черных дыр ... в принципе не может быть в природе. Все это можно проиллюстрировать на примере сферически симметричной нестационарной задачи для пыли ... Промежуток собственного времени $d\tau$ для падающего тела связан с промежутком времени пространства Минковского dt простым соотношением

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

где ρ — радиальная переменная в пространстве Минковского.

Из приведенной формулы непосредственно видно, что по мере приближения ρ к значению GM дифференциал собственного времени $d\tau$ стремится к нулю. Это означает, что все физические процессы в падающем теле неограниченно замедляются».

В приведенном отрывке дается весьма специфическое изложение того хорошо известного факта, что собственное время τ падающего тела остается конечным по мере приближения к шварцшильдовскому радиусу, т. е. $\tau \rightarrow \tau_c$ при $t \rightarrow \infty$. Поведение пробных частиц в метрике Шварцшильда, специально записанной в гармонических координатах, исследовано в²⁶. Соответствующие формулы РТГ, разумеется, совпадают с формулами ОТО. Физика происходящих явлений также хорошо выяснена (см., например, 7.15–17). Однако в РТГ параметр t мыслится как первичная переменная пространства Минковского и поэтому при $t \rightarrow \infty$ и $\tau \rightarrow \tau_c$ весь анализ останавливается. От рассмотрения дальнейшей судьбы падающего тела РТГ отказывается. Вряд ли можно удовлетвориться отказом от рассмотрения всей эволюции падающего тела по той лишь причине, что для описания части этой эволюции потребовалось исчерпать бесконечность значений некоторой буквы-параметра t , которая авторами РТГ мыслится как первичная переменная. Ясно, что с падающим наблюдателем ничего не произойдет и его время не остановится по той лишь причине, что переменная $t \rightarrow \infty$.

Впрочем, в статье³ уже соседствуют два утверждения. Для рассматриваемого случая, в котором обсуждается падающая пробная частица или коллапс пылевидного шара (а не ситуации, где коллапс останавливается давлением или размеры шара столь малы, что на его судьбе сказываются квантовые процессы), эти два утверждения невозможно согласовать. С одной стороны, в статье⁸ говорится: «Таким образом, согласно РТГ решения (2.47) — (2.49) оказываются при $\tau \geq \tau_c$ физически непригодными». А через две страницы читаем: «Стало быть, согласно РТГ временная эволюция коллапси-

рующего объекта не завершается с окончанием его сжатия (за конечное собственное время и конечное время внешнего наблюдателя), а переходит на новую стадию с нормальным дальнейшим течением как собственного времени, так и времени внешнего наблюдателя».

Завершая эту заметку, хочется отметить подтверждение силы и красоты ОТО, проявляющееся также и в том, что целенаправленные попытки найти ей замену, возвращают опять к ОТО, как это и видно на рассматриваемом примере сопоставления РТГ и ОТО.

Государственный Астрономический институт
им. П. К. Штернберга (МГУ)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я. Б., Грицук Л. П. // УФН, 1986. Т. 139. С. 695.
2. Логунов А. А., Мествиришвили М. А. Основы релятивистской теории гравитации. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985.
Логунов А. А., Лоскутов Ю. М. // ДАН СССР. 1985. Т. 285. С. 615; ТМФ. 1986. Т. 66. С. 150; Противоречивость ОТО и релятивистская теория гравитации. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
3. Логунов А. А., Лоскутов Ю. М., Мествиришвили М. А. // УФН, 1988. Т. 155. С. 369 (этот номер).
4. Власов А. А., Логунов А. А. Отличие гравитационного коллапса в релятивистской теории гравитации от коллапса в ОТО. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
Логунов А. А., Лоскутов Ю. М., Мествиришвили М. А. Релятивистская теория гравитации и критика ОТО. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987; Релятивистская теория гравитации. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
Логунов А. А., Лоскутов Ю. М. Неоднозначность предсказаний ОТО. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
Логунов А. А. // Наука и жизнь. 1987. № 3. С. 60; Природа. 1987. № 1. С. 36.
5. Deser S. // Gen. Relat. and Gravit. 1970. V. 1. P. 9.
6. Parrott A. // Proc. Roy. Irish Acad. Ser. A. 1948. V. 52. P. 11.
Kraichnan R. H. // Phys. Rev. 1955. V. 98. P. 1118.
Gupta S. N. // Rev. Mod. Phys. 1957. V. 29. P. 334.
Thirring W. // Ann. of Phys. 1961. V. 16. P. 96.
Rosen N. // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 147; Ann. of Phys. 1963. V. 22. P. 1.
Feynman R. P. // Acta Phys. Polon. 1963. V. 24. P. 697.
Halpern L. // Bull. Acad. Roy. Belg. Cl. Sci. 1963. T. 49. P. 226.
Бурланков Д. Е. // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. С. 1941.
Ogievetsky V. I., Polubarinov I. V. // Ann. of Phys. 1965. V. 35. P. 167.
Weinberg S. // Phys. Rev. Ser. B. 1965. V. 138. P. 988.
7. Вейнберг С. Гравитация и космология. — М.: Мир, 1975.
Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд. — М.: Наука, 1971. — С. 87.
8. Grishchuk L. P., Petrov A. N., Porova A. D. // Comm. Math. Phys. 1984. V. 94. P. 379.
9. Грицук Л. П., Петров А. Н. // Письма Астрон. ж. 1986. Т. 12. С. 439.
Grishchuk L. P., Porova A. D. // Class. and Quantum Grav. 1986. V. 3. P. 679.
10. Grishchuk L. P. // Proc. of the 11th Intern. Conference GRG/Ed. M. MacCallum. — Cambridge, England: Cambridge Univ. Press, 1987. — P. 86.
11. Грицук Л. П., Петров А. Н. // ЖЭТФ, 1987. Т. 92. С. 9.
12. Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry/Eds J. Kovalevsky, V. A. Brumberg. — Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1986.
13. Will C. M. Theory and Experiment in Gravitation Physics. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981; перевод: Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. — М.: Электроатомиздат, 1985; Phys. Rep. 1984. V. 113. P. 345.
Брумберг В. А. // Вестн. АН СССР. 1986. Т. 1. С. 89; УФН. 1987. Т. 151. С. 716.
Alleу С. О. // Quantum Optics, Experimental Gravity and Measurement Theory/Ed. P. Meystre, M. O. Scully. — New York: London: Plenum Press, 1983. — P. 429.
14. Taylor J. H. // ¹⁰. — P. 209.
Taylor J. H., Weisberg J. M. // Astrophys. J. 1982. V. 253. P. 908.
Weisberg J. M., Taylor J. H. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 1348.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М.: Наука, 1973.
16. Мизнер И., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — М.: Мир, 1975.
17. Wald R. M. General Relativity. — Chicago: Univ. Chicago Press, 1984.

18. Damour T. // *Gravitational Radiation*/Eds N. Deruelle, T. Piran.— Amsterdam: North-Holland, 1983.
Грищук Л. П., Копейкин С. М. // *Письма Астрон. ж.* 1983. Т. 9. С. 436; 12.— Р. 19.
Damour T., Deruelle N. // *Ann. Inst. H. Poincaré.* 1985. Т. 43. Р. 107.
19. Шоке-Брюа И. // *УМН.* 1985. Т. 40. С. 3.
Penrose R. // *Seminar of Differential Geometry.*— Princeton: Princeton Univ. Press, 1982.— Р. 631.
Damour T. // *Proc. of Cargese School «Gravitation in Astrophysics»*/Eds B. Carter, J. V. Hartle.— Plenum Press (to appear).
20. а) *General Relativity and Gravitation.* V. 1, 2/Ed. A. Held.— New York; London: Plenum Press, 1980.
б) *General Relativity*/Eds S. W. Hawking, W. Israel.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979.
21. Денисов В. П., Логунов А. А. // *Итоги науки и техники. Сер. «Современные проблемы математики».*— М.: ВИНТИ, 1982.— Т. 21. С. 49.
22. Эйнштейн А. *Собрание научных трудов.*— М., Наука, 1965.— Т. 1. С. 652.
23. Фаддеев Л. Д. // *УФН.* 1982. Т. 136. С. 435.
24. Isenberg J., Nester J. // ^{20a}— V. 1. Р. 23.
Goldberg J. N. // *Ibidem.*— Р. 469.
Komar A. // *Phys. Rev.* 1959. V. 113. Р. 934.
25. Shapiro I. I. // *Phys. Rev. Lett.* 1964. V. 13. Р. 789; *Phys. Rev.* 1966. V. 141. Р. 1219.
Ross D. K., Schiff L. I. // *Ibidem.* Р. 1215.
Anderson J. D., Esposito P. B., Martin W., Thornton C. L., Muhleman D. O. // *Astrophys. J.* 1975. V. 200. Р. 221.
Reasenberg R. D., Shapiro I. I. // *Ibidem.* 1979. V. 234. Р. L219; *Proc. of the 9th Intern. Conference of GRG*/Ed. E. Schmutzer.— Jena, DDR, 1983.— Р. 149.
Брумберг В. А. *Релятивистская небесная механика.*— М.: Наука, 1972; *Астрон. ж.* 1981. Т. 58. С. 181.
26. Фок В. А. *Теория пространства, времени и тяготения.*— М.: Гостехиздат, 1955.
27. Новиков И. Д., Фролов В. П. *Физика черных дыр.*— М.: Наука, 1986.
28. *Астрономический ежегодник, 1986*/Под ред. В. К. Абалакина.— Л.: Наука, 1986.
Japanese Ephemeris, 1985: Basis of the New Japanese Ephemeris.— Tokyo, 1985.