Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. С. Герштейн, Памяти А. А. Логунова. Общая теория относительности и релятивистская теория гравитации, *ТМФ*, 2017, том 191, номер 2, 185–188

DOI: <https://doi.org/10.4213/tmf9174>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.80.253.173

26 апреля 2023 г., 08:47:28

© 2017 г.

С. С. Герштейн*

ПАМЯТИ А. А. ЛОГУНОВА.
ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ

Дан краткий обзор вклада А. А. Логунова в понимание общей теории относительности и теории гравитации; особое внимание уделено возможности катастрофического сжатия звезды, приводящего к образованию черной дыры.

Ключевые слова: гравитация, общая теория относительности, релятивистская теория гравитации, черная дыра.

DOI: <https://doi.org/10.4213/tmf9174>

А. А. Логунов занялся проблемами гравитации и общей теории относительности (ОТО) в семидесятые годы прошлого века. До этого он получил фундаментальные результаты в области квантовой теории поля и теории элементарных частиц. Основные результаты А. А. Логунова в области гравитации изложены в последнем издании его книги [1], там же читатель найдет ссылки на оригинальные работы, которые обсуждаются в настоящей статье). Основополагающей идеей для него было высказывание Эйнштейна о недопустимости отличия поля гравитации от других полей, создаваемых веществом. Однако именно в ОТО такое отличие существовало. В ОТО отсутствовала возможность локализации энергии и импульса поля, которая имеет место для полей типа Фарадея–Максвелла, и отсутствовали законы сохранения этих величин. Попытки построить теорию гравитации на основе полевого подхода не встречали поддержки со стороны Эйнштейна. Примером отрицательного отношения большинства физиков к полевой гравитации служит тот факт, что лекции Р. Фейнмана по гравитации, которые он читал в 1961–1962 гг. на основе полевых представлений, были изданы лишь в 1995 г., а до этого они существовали в виде ротационного издания, о котором многие (в том числе Логунов) не знали.

При построении полевой теории гравитации Логунов исходил из того, что гравитационное поле, подобно другим полям материи (электромагнитному и квантово-хромодинамическому), можно рассматривать как калибровочное поле, источником которого является сохраняющаяся величина. Как известно из калибровочной теории Янга–Миллса (1954), в случае, когда симметрия, соответствующая сохраняемой величине, носит *локальный* характер, сохраняющаяся величина должна быть

*Институт физики высоких энергий, НИЦ “Курчатовский институт”, Протвино, Московская обл., Россия. E-mail: Semen.Gershtein@ihep.ru

источником калибровочного поля. В случае электродинамики и квантовой хромодинамики сохраняющиеся электрический и цветовой заряды с их токами являются источниками *векторных* калибровочных полей. Вместе с тем если учесть, что в пространстве Минковского сохраняющейся величиной является полный тензор энергии-импульса (включающий гравитационное поле), то можно заключить, что он должен являться источником *тензорного* калибровочного поля, которое можно отождествить с гравитационным полем. Благодаря тому, что гравитационное поле описывается симметричным тензором второго ранга, теорию, как показал Логунов, можно *геометризовать*, приняв сумму плотностей контравариантных компонент гравитационного поля $\tilde{\phi}^{\mu\nu}$ и метрического тензора пространства Минковского $\tilde{\gamma}^{\mu\nu}$ равной плотности ковариантных компонент некоторого “эффективного” риманова пространства $\tilde{g}^{\mu\nu}$:

$$\tilde{\gamma}^{\mu\nu} + \tilde{\phi}^{\mu\nu} = \tilde{g}^{\mu\nu},$$

где

$$\tilde{\gamma}^{\mu\nu} = \sqrt{-\gamma}\gamma^{\mu\nu}, \quad \gamma = \det \gamma_{\mu\nu}, \quad \tilde{\phi}^{\mu\nu} = \sqrt{-\gamma}\phi^{\mu\nu}, \quad \tilde{g}^{\mu\nu} = \sqrt{-g}g^{\mu\nu}, \quad g = \det g_{\mu\nu}.$$

Здесь $\gamma_{\mu\nu}$ и $g_{\mu\nu}$ – метрические коэффициенты соответственно в пространстве Минковского и в римановом пространстве, а $\phi^{\mu\nu}$ – компоненты гравитационного поля.

При этом Логунов доказал, что движение материальных тел и электромагнитных волн в присутствии гравитационного поля будет происходить так, как если бы они двигались в римановом пространстве ОТО. Вместе с тем риманово пространство является лишь “эффективным”, построенным на основе пространства Минковского, в котором соблюдаются все законы сохранения энергии-импульса и момента. Такой подход позволил Логунову однозначно построить теорию гравитационного поля как калибровочную теорию, в отличие от “геометрической” теории ОТО, в основе которой лежит принцип эквивалентности. При этом, однако, для сохранения связи эффективного риманова пространства с пространством Минковского понадобилось ввести в теорию член, отвечающий ненулевой массе гравитона.

Это привело в теории к дополнительным уравнениям, аналогичным условиям Фока–Дедондера:

$$D_\mu \tilde{g}^{\mu\nu} = 0, \tag{1}$$

где D_μ – ковариантная производная в пространстве Минковского. При учете уравнений (1) система полученных уравнений становится полной и общековариантной, а в инерциальной системе координат – лоренц-инвариантной. В ней полностью выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента. Уравнение (1), как было предсказано А. А. Логуновым и М. А. Мествиришвили в 1985 г., приводит к тому, что Вселенная должна обладать плоской пространственной геометрией, а плотность вещества в ней должна совпадать с критической плотностью $\Omega_{\text{tot}} = 1$. Таким образом, предсказывалось наличие во Вселенной большого количества темной материи.

Отличная от нуля масса гравитона, как было показано Логуновым, могла бы устранить космологическую особенность и привести к осциллирующему характеру эволюции Вселенной даже при очень сильном ограничении сверху на ее величину: из космологических данных Логунов и др. определили, что масса гравитона $m_g \leq 10^{-66}$ г, а его комптоновская длина сравнима с размерами Вселенной ($\sim 10^{28}$ см).

Вместе с тем, однако, возможна совсем другая точка зрения на роль массы гравитона. Как было показано Боголюбовым [2], получить выражение для *спонтанного* нарушения симметрии можно, введя в теорию дополнительный член с малым

параметром, нарушающий симметрию, а после получения результатов “нарушенной” теории положить параметр нарушающего члена равным нулю. Масса гравитона в релятивистской теории гравитации (РТГ) могла бы быть таким параметром, приводящим к спонтанному нарушению калибровочной теории и к уравнению (1). В этом случае масса гравитона играла бы чисто методическую роль и отпал бы ряд проблем, которые пришлось решать в РТГ при $m_g \neq 0$.

Таким образом, РТГ не утратит своего значения, если даже уточняющиеся со временем экспериментальные оценки будут давать все более низкий (совместимый с нулем) верхний предел на массу гравитона.

Важное значение в работах Логунова заняла проблема катастрофического безостановочного сжатия вещества, которое он считал противоречащим основным фундаментальным принципам физики. Исторически эта проблема возникла еще в нерелятивистской ньютоновской теории гравитации в связи с установлением Чандрасекаром (и независимо Ландау) верхнего предела массы звезд – белых карликов: $M_{\text{Ch}} \approx 1.5M_{\odot}$ (где $M_{\odot}$ – масса Солнца). Согласно этому результату при достижении белым карликом массы M_{Ch} (например, за счет аккреции на него вещества в двойной системе) звезда должна была терять устойчивость и сжиматься в точку. Эддингтон посчитал этот вывод абсурдным. Точно так же считал его абсурдным и Ландау. В работе 1932 г. он готов был даже заключить, что *“все звезды, тяжелее чем $1.5M_{\odot}$, содержат область, в которой нарушаются законы квантовой механики и тем самым квантовой статистики”* (см. [3], с. 103). В действительности отказываться от квантовой механики, чтобы избежать абсурдного сжатия белых карликов, не пришлось. Выяснилось, что белые карлики при приближении их размера к чандрасекаровскому пределу M_{Ch} становятся неустойчивыми по отношению к тепловому взрыву. Дело в том, что гравитационное сжатие в них уравновешивается эффективным давлением вырожденного электронного газа, которое намного больше теплового. Поэтому при повышении температуры в центре звезды умеренной массы ее расширение (с последующим охлаждением) происходит только тогда, когда ее температура и давление, повышающиеся за счет увеличения скорости термоядерных реакций, достигнут температуры и давления вырожденного газа. За этот промежуток времени, как показывают расчеты В. С. Имшенника и Д. К. Надежина [4], [5], успевает сгореть большая часть остающегося ядерного топлива и звезда (возможно, после нескольких осцилляций) полностью разрушится в виде взрыва сверхновой SN1a с выделением большой энергии. Благодаря близости значений массы M_{Ch} для различных белых карликов сверхновые SN1a, возникающие в результате их взрыва, имеют приблизительно равную энергию, что позволяет использовать их в качестве стандартных “свечей” Вселенной.

Таким образом, “абсурдного” сжатия белых карликов, против которого возражал Эддингтон, не происходит. Однако абсурд возник в ОТО, когда Шварцшильд обнаружил в точном решении уравнений Эйнштейна–Гильберта для точечной массы M существование в вакууме (!) особенности на сфере радиуса $r_g = 2GM/c^2$ (где G – гравитационная постоянная, а c – скорость света). При строгом математическом подходе к уравнениям ОТО из этого факта можно было бы сделать фундаментальный вывод.

Действительно, поскольку уравнения ОТО для гравитационного поля содержат в себе также и уравнения для самой материи, которая создает это поле, *“распределение и движение материи, создающей гравитационное поле, отнюдь не могут*

быть заданы произвольным образом. Напротив, они должны быть определены ... одновременно с самим создаваемым этой материей полем" (см. [6], с. 373). Поэтому, чтобы в вакууме не возникала сингулярность на сфере Шварцшильда, следовало бы, естественно, заключить, что согласно ОТО вещество нельзя сконцентрировать в объеме сферического тела с радиусом, меньшим радиуса Шварцшильда. Именно такое заключение и было сделано А. Эйнштейном в 1939 г.: "*Основным результатом проведенного исследования является четкое понимание того, что в реальном мире отсутствуют "шварцшильдовские сингулярности". И далее: "шварцшильдовская сингулярность отсутствует, так как вещество нельзя концентрировать произвольным образом; в противном случае частицы, образующие скопления, достигают скорости света"*". Из этих высказываний ясно, что существование "черных дыр" не следует из ОТО (как думают многие), а противоречит ей.

Причиной появления в теории гравитации "черных дыр" явилось то, что внутреннее давление вещества внутри массивных звезд, исчерпавших свои запасы ядерного топлива, не способно при их охлаждении сдерживать гравитационное сжатие звезды, которое принимает катастрофический характер, и звезда вследствие этого оказывается внутри сферы Шварцшильда. Моделью для такого заключения, сделанного в 1939 г. Ю. Р. Оппенгеймером и Г. Снайдером, явилось точное решение задачи о коллапсе пылевого шара, полученное Р. Толменом. Однако, как было доказано А. А. Логуновым, решение Толмена внутри сферы Шварцшильда противоречит принципу причинности Гильберта, который считал выполнение этого принципа необходимым условием справедливости решений уравнений ОТО. Таким образом, чтобы избежать нарушения принципа причинности, необходимо найти физический механизм, останавливающий коллапс звезды и не позволяющий ей уйти внутрь сферы Шварцшильда.

В последних своих работах А. А. Логунов указал на такой возможный механизм. Вычислив в РТГ тензор энергии-импульса гравитирующего тела, он показал, что внутренняя энергия тела неограниченно растет по мере стремления радиуса звезды к радиусу Шварцшильда (такой же результат получается в ОТО, если вычисления проводятся в гармонической системе координат). Таким образом, причиной, останавливающей коллапс, может быть эффект аккумуляции избыточной энергии звезды, который в результате различных неустойчивостей может привести к ее взрыву. Конечно, этот результат нельзя считать строгим доказательством существования механизма, препятствующего неограниченному коллапсу, но он, возможно, явится первым шагом для отыскания этого механизма.

Список литературы

- [1] А. А. Логунов, *Релятивистская теория гравитации*, М., 2011.
- [2] Н. Н. Боголюбов, "О принципе компенсации и методе самосогласованного поля", *УФН*, **67:4** (1959), 549–580.
- [3] Л. Д. Ландау, *Собрание трудов*, т. 1, Физматлит, М., 2008.
- [4] Л. Н. Иванова, В. С. Имшенник, В. М. Чечеткин, "Пульсационный режим термоядерного взрыва плотного углеродного ядра звезды", *Astrophys. Space Sci.*, **31:2** (1974), 477–495.
- [5] В. С. Имшенник, Д. К. Надежин, "Конечные стадии эволюции звезд и вспышки сверхновых", *Итоги науки и техн. Сер. Астрономия*, **21** (1982), 63–129.
- [6] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика*, т. 2: *Теория поля*, Физматлит, М., 2008.