

ОТО ограничивает собственные времена и предсказывает застывшие звёзды вместо чёрных дыр

Захид Закир¹

Аннотация

В статическом гравитационном поле пересечение мировой линии частицы с глобальной гиперповерхностью одновременности $t=const$ даёт инвариантное уравнение связи, жёстко связывающее собственное время этого события с данным значением t . Поскольку при любом конечном t так связанные интервалы собственного времени будут меньше значения, требующейся для пересечения горизонта, то общая теория относительности предсказывает замораживание собственных времён сверхплотных звёзд с времениподобными или нулевыми геодезическими во всём объёме. Эффект замедления собственного времени стабилизирует коллапсирующую массивную звезду путём гравитационного замораживания, степень которого максимально, но конечно в центре, а поверхность застывает около гравитационного радиуса. Гравитационно-замороженные звёзды (фрозары) медленно «оттаивают» из-за излучения и внешних взаимодействий, а внутренние фазовые переходы могут инициировать обратное «размораживание» с вспышками и взрывами на конечной стадии.

PACS: 04.20.Dg; 04.70.-s; 97.60.-s, 98.54.-h

Ключевые слова: фрозары, релятивистские звёзды, квазары, активные ядра галактик, коллапс, чёрные дыры, горизонт, сингулярности

Содержание

Введение.....	1
1. Физические координаты и глобальная одновременность в статическом поле.....	2
2. Уравнения связи для собственных времён частиц и падающее тонкое сферическое пылевое облако.....	4
3. Общие свойства гравитационно-замороженных звёзд.....	7
Заключение.....	9
Литература.....	9

Введение

Массивная холодная звезда не в состоянии удержаться от гравитационного сжатия. В ньютоновской теории это ведёт к быстрому коллапсу вовнутрь гравитационного радиуса $r_g = 2GM$. В общей теории относительности (ОТО) для удалённого наблюдателя поверхность такой звезды застывает около r_g .

Однако когда поверхность сжимается, интервал собственного времени τ_g , необходимый для пересечения r_g , конечен и теория должна объяснить этот факт. Исходя из этого обстоятельства в гипотезе чёрных дыр (ГЧД) предска-

¹Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент Узбекистан;
zahidzakir@theor-phys.org

зываются реальные чёрные дыры (ЧД) [1-2]. Однако, одним из неявных предположений в ГЧД является то, что эволюция в терминах собственных времён может рассматриваться независимо от моментов мирового времени.

Недавно в статье [3] была предложена новая трактовка массивных релятивистских звёзд, где используется тот факт, что в статических полях ОТО позволяет определить глобальную одновременность событий в терминах мирового времени t . Было показано, что на базе гиперповерхностей одновременности $t=const$ ОТО позволяет построить новую теорию компактных звёзд как гравитационно-замороженных объектов (фрозаров), имеющих некую внутреннюю структуру в каждый фиксированный момент $t < \infty$.

В данной статье будет показано, что в ОТО тождество $r(t) = r(\tau)$ для радиальной координаты события на мировой линии ведёт к *инвариантной связи* для собственных времён падающих частиц $\tau = \tau(t)$, ограничивающей ход собственных времён путём связывания их с моментами мирового времени t . Кратко обсуждаются некоторые наблюдаемые свойства таких замороженных звёзд (фрозаров), предсказываемых ОТО вместо чёрных дыр.

1. Физические координаты и глобальная одновременность в статическом поле

В системе покоя центрально-симметричного источника сферическая симметрия ведёт к трём ключевым *физическим* свойствам гравитационного поля *вокруг* такого источника, что оно:

- 1) статическое;
- 2) не меняет длину стандартных стержней, перпендикулярных к радиусу;
- 3) позволяет определить глобальную одновременность событий на гиперповерхности $t=const$ с помощью совокупности координатных часов, идущих синхронно с часами удалённых наблюдателей.

В большинстве координатных систем различных систем отсчёта эти физические свойства поля оказываются *скрытыми* из-за несущественных гео-метрических или кинематических усложнений. Координаты кривизны (t, r, θ, φ) , построенные на гиперповерхности одновременности $t = const$, простейшим и физически обоснованным образом учитывают эти физические свойства и симметрии статического поля. В терминах координат кривизны метрика вне сферического тела $r > R$ (здесь $R > r_g$) есть вакуумное решение Шварцшильда, а метрика внутри источника ($r < R$), как материальное решение, регулярна в каждой точке тела.

Гравитационное замедление времени, определяемое компонентой метрики $g_{00}(r) = 1 - r_g / r$, во-первых, ведёт к хорошо известному гравитационному красному (фиолетовому) смещению собственных частот уходящих (падающих) фотонов, почти совпадающем с ньютоновским значением.

Однако, *второй* наблюдаемый эффект, прямо показывающий замедление стандартных часов при сравнении с удалёнными часами после долгого пребывания в поле, не так известен, хотя является более важным, так как *он*

отсутствует в ньютоновской теории. В самом деле, в ньютоновской гравитации ход стандартных часов не зависит от времени пребывания в поле T . В ОТО же накопленное отставание $\delta\tau$ стандартных часов в гравитационном поле по сравнению с такими же часами на высоте h пропорционально длительности пребывания T и даётся формулой $\delta\tau = T \cdot g h / c^2$ (здесь g – гравитационное ускорение). Этот интегральный эффект с большой точностью подтверждён на экспериментах с часами, долго находившимися в самолётах и спутниках [4-6]. Поэтому, далее будем следовать эйнштейновской трактовке собственных времён как действительно замедляющихся в гравитационном поле (см. [6]).

В ОТО, из-за различного хода стандартных часов, покоящихся в разных точках поля, можно ввести дополнительную совокупность покоящихся *координатных часов*, скорость хода которых быстрее стандартных так, чтобы часы всегда шли синхронно с часами удалённого наблюдателя (см. [2]) и в каждой точке поля показывали мировое время t . Следовательно, каждое событие в r нумеруется не только собственным временем $\tau(r)$, но и глобально определённым временем t находящихся рядом координатных часов. Таким образом определённая глобальная гиперповерхность $t = const$ разделяет каждую мировую линию на три части, содержащие события *до*, *одновременно* и *после* момента времени t удалённого наблюдателя. Хотя при координатных преобразованиях гиперповерхность может деформироваться, разделение событий на эти три группы остаётся неизменным из-за инвариантного характера мировых линий.

Итак, в ОТО относительные скорости хода стандартных (покоящихся) часов зависят от их расположения с абсолютным отставанием собственных времён часов в более сильном поле и эта экспериментально подтверждённая [4-6] зависимость является инвариантным фактом с которым согласны все наблюдатели. Отметим, что существование в ОТО глобально синхронизованной совокупности координатных часов снимает трудности информирования удалённого наблюдателя, так как момент мирового времени t каждого события в поле определяется локально координатными часами. Поэтому, если уравнения движения ОТО требуют $t_g \rightarrow \infty$ для пересечения r_g , то это событие не произойдёт даже тогда, когда координатные часы как около источника, так и везде покажут $t_g \rightarrow \infty$.

Отметим, что наблюдатели около массивной звезды детектируют фиолетовое смещение фотонов, испущенных удалённым наблюдателем и они согласны, что часы удалённого наблюдателя идут быстрее их собственных часов. Это значит, что замедление времени в гравитационном поле, также как эффект близнецов в ускоренных системах, является *необратимым, асимметричным* относительно наблюдателей и абсолютным. Этот вид замедления времени является принципиально иным, чем *симметричное* относительно наблюдателей и *относительное* кинематическое замедление времён в инерциальных системах в плоском пространстве-времени. Попытки же трактовать гравитационное замедление времени как относительный эффект, основаны на ложной аналогии с замедлением времени в инерциальных системах.

Также широко распространено *предположение*, что координаты кривизны в статическом поле не имеют особого физического смысла и могут быть заменены более приемлемыми. Действительно, большинство произвольных координатных систем содержат «координатные эффекты», не присущие свойствам реального многообразия. Однако, если координатная система построена как физическая, т.е. если координаты означают число взаимно *покоящихся* стандартных стержней и показания *глобально синхронизованных* часов, то соответствующая метрика описывает физические свойства многообразия.

Поскольку гравитационное поле не меняет длину стандартных стержней на двумерных сферах вокруг источника, то координаты кривизны на гиперповерхностях одновременности $t = const$ являются именно такими физическими координатами. Соответствующая метрика Шварцшильда поэтому описывает истинные *физические свойства* статического гравитационного поля, «очищенные» от геометрических и кинематических эффектов. В самом деле, при $r \rightarrow r_g$ собственные времена действительно замедляются относительно t , радиально-ориентированные стандартные стержни действительно сокращаются по сравнению с плоским случаем и эти физические эффекты экспериментально подтверждены. Поэтому игнорирование физического характера координат кривизны несовместимо как с ОТО, так и с экспериментами.

2. Уравнения связи для собственных времён частиц и падающее тонкое сферическое пылевое облако

Рассмотрим теперь тонкое сферическое пылевое облако радиуса R , падающее радиально в собственном гравитационном поле. Метрика вне и на сфере $r \geq R$ есть метрика Шварцшильда, а компоненты внутренней метрики в каждый момент постоянны (однородны). Для частиц сферы, свободно падающих из состояния покоя на пространственной бесконечности, координатная скорость при конечных r есть $v(r) = dr / dt$, для которой затем получают уравнения движения ОТО. Если при какой-то большой, но конечной радиальной координате $r_1 \gg r_g$ начальные времена взяты как нулевые: $\tau_1 = t_1 = 0$, то при $r < r_1$ решения уравнений движения дают стандартное уравнение ОТО для траектории $r(t)$ (обращённое):

$$t = C(r_1) - 2\left(r r_g\right)^{1/2} - \frac{2}{3} \frac{r^{3/2}}{r_g^{1/2}} + r_g \ln \left| \frac{r^{1/2} + r_g^{1/2}}{r^{1/2} - r_g^{1/2}} \right|, \quad (1)$$

где константа $C(r_1) = const$ выбрана так, чтобы было $t(r_1) = 0$. Эта же мировая линия, параметризованная через собственное время, также может быть описана в виде уравнения для траектории:

$$\tau(r) = \frac{2}{3r_g^{1/2}} \left(r_1^{3/2} - r^{3/2} \right), \quad r(\tau) = r_1 \cdot \left(1 - \tau / \alpha_1 \right)^{2/3}, \quad (2)$$

где $\alpha_1 = 2r_1^{3/2} / 3r_g^{1/2}$. Поскольку две формы уравнения для траектории (1) и (2) описывают одну и ту же частицу в одной и той же точке r в терминах двух

типов времён, они связывают каждый момент собственного времени $\tau[r(t)]$ с соответствующим моментом мирового времени t через значение $r(t)$ как параметра. Следовательно, *тождество*:

$$r(t) \equiv r(\tau) \quad (3)$$

является, в действительности, *уравнением связи* $\tau = \tau(t)$, строго связывающим моменты собственного времени события на инвариантной мировой линии частицы с моментами мирового времени. Вставив значения $r(\tau)$ из (2) в (1), получим выражение для зависимости $\tau(t)$ (Рис. 1) (тоже обращённое):

$$t = C(r_1) - 2(r_1 r_g)^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{\alpha_1}\right)^{1/3} - \alpha_1 \left(1 - \frac{\tau}{\alpha_1}\right) + r_g \ln \left| \frac{(1 - \tau / \alpha_1)^{1/3} + (r_g / r_1)^{1/2}}{(1 - \tau / \alpha_1)^{1/3} - (r_g / r_1)^{1/2}} \right|. \quad (4)$$

Частицы почти достигают гравитационного радиуса $r \rightarrow r_g$ только при $t \rightarrow \infty$, хотя и соответствующий момент собственного времени τ_g остаётся конечным. Однако, в каждый конечный момент мирового времени $t < \infty$ мы имеем $r(t) > r_g$ и собственные времена $\tau(r)$ частиц будут меньше, чем τ_g , требующееся для достижения r_g :

$$\tau_g - \tau(t) = \frac{2}{3r_g^{1/2}} (r^{3/2}(t) - r_g^{3/2}) > 0, \quad (5)$$

$$\tau_g = \alpha_1 [1 - (r_g / r_1)^{3/2}].$$

При $r \rightarrow r_g$ имеем $r = r_g + h$, где $h \ll r_g$ и поэтому уравнения для мировой линии и связь между двумя временами упрощаются:

$$\tau \simeq \tau_g - h, \quad (6)$$

$$t \simeq C' + r_g \ln \left| \frac{2r_g}{h} \right| = C' + r_g \ln \left| \frac{2r_g}{\tau_g - \tau} \right|,$$

где $C' = C(r_1) - 8r_g / 3$. Выражая h как:

$$h(t) \simeq \tau_g - \tau(t) = b \exp(-t / r_g) \quad (7)$$

где $b = 2r_g \exp(C' / r_g)$, получим *инвариантную* форму уравнений связи для $\tau(t)$ вблизи r_g :

$$\tau(t) = \tau_g - b e^{-t/r_g} < \tau_g. \quad (8)$$

Итак, при любом $0 \leq t < \infty$ будем иметь $\tau(t) < \tau_g$, т.е. уравнения связи (4) или (8) ограничивают темп хода собственных времён темпом хода мирового времени на глобально определённых гиперповерхностях одновременности (Рис.1). Мировая линия $r(\tau)$, кажущаяся «обрывающейся» около r_g , на самом деле непрерывна и описывают полную историю частицы в любой момент

времени реального мира t . Препятствия «продолжить» эту мировую линию «во внутрь» области r_g были вызваны непониманием физических основ ОТО.

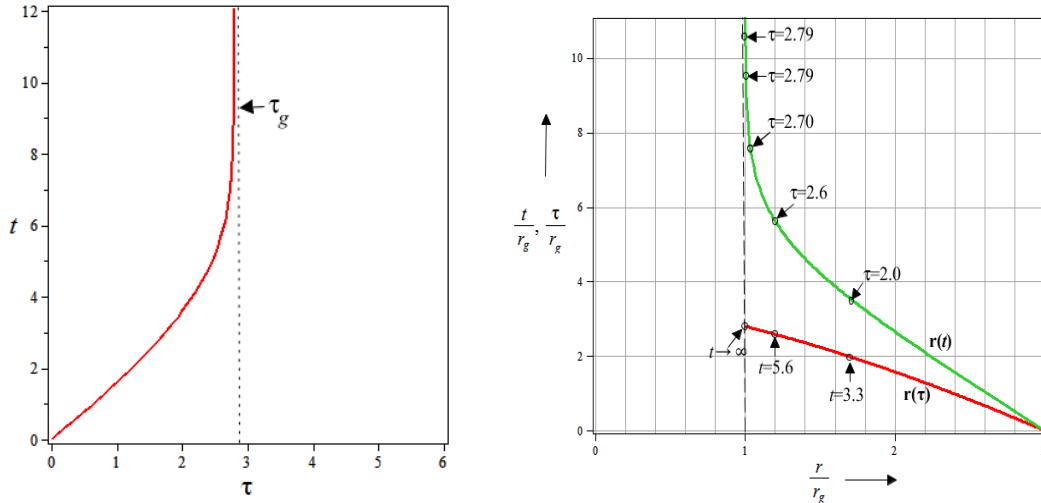


Рис.1. а) Собственное время $\tau = \tau(t)$ свободно падающей частицы пылевой сферы, ограниченное связью с мировым временем (левый график). Тожество $r(t) = r(\tau)$ связывает два вида времён и даёт инвариантное ограничение $\tau = \tau_g - b \exp(-t/r_g) < \tau_g$ для любого конечного момента t (τ_g – пунктирная линия). Для глобальной сети синхронизованных координатных часов интервалы Δt эквидистантны, а локальные собственные времена замедлены $\tau(t) < t$. Начальные значения $t_0(r_1) = \tau_0(r_1) = 0$ взяты при $r_1 = 3r_g$, времена в единицах r_g/c .

б) Одна и та же мировая линия частицы пылевой сферы в двух параметризациях – в мировом (t) и собственном (τ) временах (правый график). Если на оси ординат t , то τ вдоль мировой линии принимает неэквидистантные значения $\tau(t)$ – его интервалы около r_g всё более и более растягиваются. Если же на оси ординат τ , то t вдоль мировой линии принимает неэквидистантные значения $t(\tau)$ – его интервалы около r_g всё более и более сжимаются. Из-за единственности и инвариантности мировой линии частицы, если она не пересекает r_g в одной параметризации, то не пересекает r_g и в другой. Интервалы τ эквидистантны лишь в локально-инерциальных системах отсчёта около частицы и глобально-определённой оси τ не существует, так что графики с осями (τ, r) условны и физически корректными являются только (t, r) графики.

Поскольку t есть (с малыми поправками на локальные скорости) ни что иное, как среднее время эволюции Вселенной (в системе покоя микроволнового фона) и интервалы t эквидистантны для основной массы вещества Вселенной, то собственные времена вблизи массивных источников действительно абсолютно замедлены по сравнению с глобальным временем эволюции Вселенной.

Итак, для любого наблюдателя на глобальной гиперповерхности $t = \text{const}$ пылевая сфера не пересекает свой гравитационный радиус ($r(t) > r_g$) и переход к собственным временам или к любой иной параметризации не меняет этот факт.

Так как пылевая сфера не достигает r_g при любом $t < \infty$, то во внутренней области сферы, где метрика однородна и коэффициент замедления времени такой же, как и на поверхности, горизонт событий также не появится.

Следовательно, для частиц ненулевой массы пространственно-временной интервал остаётся времениподобным $ds^2 > 0$, а временная и радиальная компоненты метрики регулярны везде $r \geq 0$, как вне и на сфере, так и внутри.

Такие же свойства будет иметь и система вложенных пылевых сфер, а их свободное падение также не приведёт к формированию горизонта ни вне, ни внутри системы таких сфер. Действительно, каждая пылевая сфера изменяет коэффициент замедления времени $g_{00}^{-1}(R_n)$ всех других сфер на конечную величину и при конечной массе он остаётся конечным везде: $1 \leq g_{00}^{-1}(R_n) < \infty$.

В случае заряженных и вращающихся источников стационарного гравитационного поля также имеются две формы уравнений движения в терминах мирового времени или собственных времён падающих пробных частиц. Эти уравнения снова дадут уравнения связи для собственных времён $\tau = \tau(t)$, так что при любом $t < \infty$ поверхность пылевой сферы будет вне области, где коэффициент замедления времени стремится к бесконечности.

3. Общие свойства гравитационно-замороженных звёзд

Сжимающаяся массивная звезда с радиусом поверхности $R > r_g$ может быть представлена в первом приближении как сеть вложенных друг в друга пылевых сфер с радиусами $r \leq R$. Рассмотрим общие свойства таких звёзд, становящихся гравитационно-замороженными при $R = r_g + h$, $h \ll r_g$ из-за эффекта сильного замедления собственных времён во всём объёме, максимального в центре и минимального на поверхности. Их характерные свойства могут быть объединены в следующие группы [3]:

1. Большое замедление времени на поверхности ведёт к большому красному смещению фотонов, излучаемых веществом *вблизи* застывшей поверхности. Излучаемая энергия концентрируется на длинноволновом участке спектра и такие звёзды будут мощными радио источниками. Красные смещения массивных звёзд, активных ядер галактик и квазаров, вдобавок к космологическому красному смещению, содержат также вклад гравитационного красного смещения и необходимо выделение вклада каждого из этих механизмов.

2. Некоторые объекты, включённые в каталоги как квазары, могут быть замороженными звёздами нашей Галактики, красное смещение вещества вокруг которых имеет полностью гравитационную природу.

3. Поскольку для внегалактических источников часть их красного смещения будет вызвана сильной гравитацией, то чистое космологическое

смещение становится меньше, чем непосредственно наблюдаемое. Такое уменьшение космологической части красных смещений некоторых квазаров может привести к уменьшению оценок их светимостей, расстояний и масс.

4. Большое замедление времени вблизи поверхности также ведёт к отсутствию резких изменений параметров и очень гладкому, растянутому во времени характеру всех пиков интенсивности излучения. В частности, это приведёт к специфическому характеру падения вещества на поверхность в форме мягкого и продлённого торможения около застывшей поверхности.

5. Стационарные компактные объекты не рождают частиц, так как все мировые линии времениподобны, а энергии положительны. Поэтому гипотетическое квантовое испарение сколлапсировавших объектов в ОТО запрещено.

6. Нестационарные же процессы вокруг этих объектов, энергии для которых имеют внешний источник, а также подпитываются энергией вращения или внешнего поля объекта, могут приводить к обычным процессам рождения частиц. При этом, некоторые из частиц упадут на объект и будут заморожены, а другие могут удаляться. В терминах t уходящие частицы должны описываться матрицей плотности, описывающей смешанные состояния при различных значениях собственных времён квантов. Такое частичное усечение информации из-за замораживания части квантовых флуктуаций вблизи поверхности, взаимодействующей с «термостатом», приведёт к появлению энтропии и соответствующей температуры. Отметим, что этот процесс приводит не к испарению звезды, а к *увеличению её массы* за счёт поглощения части энергии термостата или внешнего поля, обеспечивающих такое рождение пар.

7. Гравитационно-замороженные звёзды имеют более высокие локальные температуры, чем нейтронные звёзды и, из-за (горизонтальных) взаимодействий практически соприкасающихся адронов, до застывания они на краткое время станут мощными источниками фотонов и нейтрино. Потери энергии из-за различных подобных эффектов, вспышки и взрывы при внутренних фазовых переходах (относительно продлённых во времени) могут привести к «размораживанию» такой звезды.

8. Теория квазаров и ядер галактик теперь может быть создана на новой фундаментальной основе с учётом связи с компактными объектами в их центрах, что может частично прояснить их происхождение. Гравитационно-замороженное вещество будет сверхплотным только в компактных центральных частях квазаров и активных ядер галактик. В областях ближе к поверхности плотность вещества может быть обычной, хотя и вещество будет сильно замороженным в терминах t . Поэтому, такие объекты будут иметь сложную внутреннюю структуру с веществом в различных фазовых состояниях.

9. Некоторые «кандидаты в чёрные дыры» являются более «тихими», чем нейтронные звёзды и у них не наблюдаются термоядерные вспышки от падения вещества на поверхность. Некоторые компактные сверхмассивные объекты, такие как ядра некоторых галактик также «тихие». Эти факты могут подтвердить новую картину, поскольку «вспышки» при падении вещества и другие локально-быстрые явления становятся сильно замедленными в терминах t . Такие «замедленные вспышки», длящиеся часы и дни действительно наблюдаются у большинства таких «тихий» объектов. Хотя и механизмы

этого явления могут быть сложными, тем не менее, замедленные вспышки вероятно дают вклад в общий эффект. Более того, такая замедленность может использоваться для измерения коэффициента замедления времени на поверхности таких компактных объектов.

10. ОТО открывает новые перспективы для теорий взрывов сверхновых звёзд и, особенно, для теории нуклеосинтеза тяжёлых элементов, который теперь может происходить не только при обычных вспышках сверхновых, но также и при вспышках в ходе размораживания сверхплотных или сверхмассивных релятивистских объектов.

Заключение

В ОТО уравнения движения и тождество $r(t) \equiv r(\tau)$ вдоль инвариантных мировых линий ведут к ограничению моментов собственного времени из-за зависимости от моментов мирового времени $\tau = \tau(t)$. В результате, при любом $t < \infty$ имеет место неравенство $\tau(t) < \tau_g$, т.е. уравнения связи (4) или (8) ограничивают моменты собственного времени, связывая их с моментами на глобально-определённых гиперповерхностях $t = const$, с которыми пересекается мировая линия частицы. Поверхность звезды не пересекает гравитационный радиус ни в мировом, ни в собственном времени, так как моменты этих времён в ОТО не являются независимыми. Это означает, что в сжимающейся звезде падающие частицы гравитационно замораживаются так, что в каждый конечный момент мирового времени t , протекающего эквидистантно, замедление собственных времён максимально в центре и минимально на поверхности.

Итак, в любой конечный момент мирового времени ОТО предсказывает гравитационно-замороженные сверхплотные и/или сверхмассивные звёзды с некоторой внутренней структурой, где пространственно-временной интервал вещества времениподобен (светоподобен для безмассовых частиц) и регулярен во всём пространстве. Гравитационно-замороженное состояние есть новое фазовое состояние вещества, имеющее новые, необычные и в принципе наблюдаемые свойства [3].

В противоположность к чёрным дырам, являющимся полностью изолированными объектами, формирующимися только в рамках ньютоновской гравитации, предсказываемые ОТО гравитационно-замороженные объекты (фрозары) наблюдаемы в любой момент мирового времени и могут быть достаточно активными. В ходе очень медленного сжатия замороженная звезда излучает со всё более растущим красным смещением и при внутренних фазовых переходах с большим выделением энергии могут наблюдаться вспышки и взрывы.

Литература

1. Oppenheimer J.R., Snyder H. (1939) *Phys. Rev.* **56**, p. 455.
2. Мизнер Ч., Торн К., Уиллер Дж. (1977) Гравитация. тт. 1-3, Мир. М.
3. Закир З. (2006) *Теор. физ., астрофиз. и космол.*, **1**, 3, с. 45, Т.
4. J. Haefele, R. Keating, *Science* **117** (1972) 168, 170.
5. Alley C. et al, *Experim. Gravim., Proc. Conf. at Pavia* (1976) N.Y., Acad. Press.
6. Окунь Л.Б. и др. (1999) *УФН*, **169**, 10, с.1110; arXiv, physics/9907017.