

Возможно ли установление фотонного горизонта в волноводной модели черной дыры вне поля гравитации?

Л.А.Ривлин

На основе фундаментального положения ОТО о равенстве инертной и гравитационной масс и эквивалентности кинематического и гравитационного ускорений дан отрицательный ответ на вопрос, поставленный в заглавии.

Ключевые слова: преобразования Лоренца, волноводная модель фотона, конечная наблюдаемая масса покоя фотона, горизонт в волноводной модели черной дыры, «лифт Эйнштейна».

1. Введение

Многообразные и взаимообусловленные свойства космической черной дыры [1], полностью относящиеся к компетенции ОТО, отображаются ее волноводной моделью [2, 3] лишь в весьма ограниченной степени. Так, гравитационное поле модели постулируется сторонним гравитационным потенциалом Ψ , что существенно отличается от реальной ситуации с собственной гравитацией космической дыры, обуславливаемой ее массой и размером.

Главным признаком, воспроизводимым волноводной моделью космической черной дыры, является установление горизонта H в гравитационном поле при перемещении фотонной волны по волноводу в сторону возрастания потенциала Ψ и при уменьшении ее константы распространения k и групповой скорости u от исходных значений k_0 и u_0 вплоть до их обращения в ноль,

$$u = k/\omega = 0, \quad (1)$$

при критическом приращении потенциала $\Delta\Psi > 0$. Здесь $u = u(\Delta\Psi)$; $k = k(\Delta\Psi)$; потенциал $\Psi < 0$ нормирован на бесконечности на ноль, $\Psi_\infty = 0$; $|\Psi| \ll c^2$; ω – частота; c – скорость света; k_0 и u_0 определены в некоторой системе координат, ни в чем не имеющей преимуществ и условно обозначенной как «лабораторная». Координата $z(\Delta\Psi)$, на которой достигается приращение $\Delta\Psi$ стороннего гравитационного потенциала, задает положение непреодолимого для фотонов горизонта H [3, 4].

В этом мысленном эксперименте причиной изменения константы распространения k фотонной волны являются определяемые ОТО зависимости от потенциала Ψ двух параметров: скорости света $c \approx c_\infty(1 + 2\Psi/c^2)$ и поперечного размера волновода $r \approx r_\infty(1 + 2\Psi/c^2)$, задающих критическую частоту моды $\omega_{\mu\nu}$ и массоподобную величину, так называемую конечную наблюдаемую массу покоя фотона

$$M_{\mu\nu} = \hbar\omega_{\mu\nu}/c^2 \approx M_{\mu\nu\infty}(1 - 3\Psi/c^2), \quad (2)$$

которой присуще реальное физическое (но отнюдь не имманентное) содержание [3].

Таким образом, установление фотонного горизонта в волноводной модели есть следствие некоторых эффектов, описываемых в рамках ОТО.

Между тем представляется, что критическое условие (1) формально может быть удовлетворено и вне какого-либо гравитационного поля и без обращения к ОТО в рамках СТО посредством простого применения преобразования Лоренца, приводящего в альтернативной инерциальной системе координат к равенству нулю групповой скорости: $u = 0$ (1).

Поэтому поставленный в заглавии вопрос имеет более общий характер: ответ на него призван определить, принадлежит ли волноводная модель черной дыры к объектам СТО или же ее адекватное описание требует непрерывного обращения к основам ОТО.

Кроме этой частной мотивации, настоящая методологическая заметка может добавить еще один аргументирующий пример в известную многолетнюю дискуссию о действительной или лишь виртуальной природе фундаментальных эффектов СТО, отраженных преобразованиями Лоренца [5], начало которой положила классическая статья Эйнштейна 1905 г. [6].

2. Фотонный горизонт в волноводной модели черной дыры в присутствии и вне гравитационного поля

Волноводная модель фотона [2, 3] представляет собой потенциальную яму бесконечной глубины для фотонов с полным ограничением поля по поперечным координатам и со свободным распространением волны вдоль оси z . Это распространение определяется правилами СТО преобразования основных кинематических параметров фотонной волны в волновод [3, 7] при переходе в альтернативную инерциальную систему координат, перемещающуюся в исходной лабораторной системе со скоростью $c\beta = V_\beta$, а именно константы распространения

$$k_\beta = k_0(1 - c\beta/u_0)(1 - \beta^2)^{-1/2} \quad (3)$$

Л.А.Ривлин. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), Лаборатория прикладной физики, Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: lev.rivlin@gmail.com

Поступила в редакцию 31 мая 2012 г., после доработки – 19 июня 2012 г.

и частоты волны

$$\omega_\beta = \omega_0(1 - \beta u_0/c)(1 - \beta^2)^{-1/2}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что выполнение критического условия (1), на первый взгляд, вовсе не требует обращения к ОТО, а, опираясь лишь на преобразования Лоренца и оставаясь в рамках СТО, достаточно в мысленном эксперименте наблюдать за поведением фотона в волноводе в альтернативной системе, перемещающейся вдоль оси z со скоростью

$$V_\beta \equiv c\beta = u_0 \equiv k_0/\omega, \quad (5)$$

что в соответствии с (2), (3) приводит к остановке волны и возникновению горизонта H .

Здесь возникает необходимость принципиально важного уточнения сценария мысленного эксперимента, указав на две его кардинально различные версии.

Прогностическая версия эксперимента (даже мысленного) состоит в чисто виртуальной возможности без выхода за рамки СТО дать теоретически безупречное предсказание его результатов (3)–(5).

В другой версии для физического осуществления эксперимента необходимо реально предъявить изучаемый объект (т. е. волноводную модель) для наблюдения в альтернативную систему, т. е. увеличить скорость объекта от $V_0 = 0$ до $V_\beta = c\beta = u_0$.

Это изменение скорости происходит с положительным кинематическим ускорением

$$a = V_\beta^2/(2\Delta z) > 0 \quad (6)$$

и перемещением объекта на расстояние Δz , что означает утрату инерциальности и переход анализа из рамок СТО к основам ОТО (для простоты на малых интервалах принимается $a = \text{const}$).

При этом оказывается, что (в полном согласии с классическим мысленным экспериментом) изолированный в «лифте Эйнштейна» наблюдатель не способен отличить кинематическое ускорение a от гравитационного ускорения g , эквивалентных друг другу с точностью до знака:

$$a = -g. \quad (7)$$

Интегрирование общематематического определения $g = -\text{grad } \Psi = -d\Psi/dz$ приводит к

$$\Delta\Psi = V_\beta^2/2 = a\Delta z, \quad (8)$$

где положительное приращение $\Delta\Psi$ на отрезке $\Delta z > 0$ отсчитывается от исходного значения гравитационного потенциала $\Psi(z_0)$ в точке z_0 .

Таким образом, в соответствии с фундаментальным положением ОТО (7) образование модельной черной дыры происходит отнюдь не вне гравитации, а в гравитационном поле с потенциалом Ψ , а координата, на которой достигается приращение $\Delta\Psi$ (8), есть по определению положение горизонта $H(\Delta\Psi)$.

3. Заключение

Первым результатом проведенного обсуждения является установление необходимости более аккуратной формулировки поставленного в заглавии вопроса.

Если вопрос имеет чисто прогностический смысл, т. е. ограничен лишь обоснованным предсказанием результатов эксперимента, но не его физическим осуществлением (даже мысленным), то ожидаемый ответ *положителен*, а все рассмотрение может быть проведено без выхода за рамки СТО.

Безусловно *отрицательный* ответ следует из попытки даже мысленного экспериментирования с соблюдением условий, присущих действительному эксперименту, в частности состоящему в перемещении модели с конечным ускорением a , т. е. в отказе от инерциальности и в переходе от СТО к основам ОТО. В соответствии с принципом эквивалентности $a = -g$ (7) это автоматически приводит к возникновению гравитационного поля с потенциалом Ψ , определяемым величиной кинематического ускорения a . Таким образом, физически реальное установление горизонта H непременно *происходит в гравитационном поле*. В сущности отрицательный ответ на поставленный в заглавии вопрос является прямым и исчерпывающим следствием фундаментального принципа ОТО о равенстве инертной и гравитационной масс, примененного к конечной наблюдаемой фотонной массе $M_{\text{фн}}$.

Проведенный анализ попутно добавляет еще один аргументирующий пример в упомянутую во Введении дискуссию [5], в которой, несмотря на ее чисто методологический характер (в [5] даже употреблено определение «педагогический»), в разное время приняли участие Г.Лоренц, М.Лауэ, В.Паули, В.Вайскопф, И.Е.Тамм, Л.И.Мандельштам, Л.Д.Ландау, Е.Л.Фейнберг и др., что свидетельствует о важности неформального понимания существа проблемы.

Аргумент в пользу реальности (в противовес виртуальности) изменений как масштабов и часов, так и сил, действующих на них при действительном (а не прогностическом) осуществлении преобразований Лоренца, вполне очевиден: ускоренное перемещение тела с конечной массой покоя требует приложения некоторых сторонних сил, вызывающих соответствующие изменения тел, что Эйнштейну, разумеется, было ясно еще в 1905 г. [5]. «Загадочная» же универсальность природы этих сил и вызываемых ими изменений в ускоряемых телах [5] основана на абсолютной и фундаментальной универсальности гравитационного взаимодействия (по сравнению, например, с электрическим, магнитным и т. п. [5]) любых физических тел и на их столь же единственно универсальном свойстве – конечной массе покоя.

1. Фролов В.П. *УФН*, **118**, 347 (1976).
2. Ривлин Л.А. *УФН*, **167**, 309 (1997).
3. Ривлин Л.А. *Квантовая электроника*, **33**, 777 (2003).
4. Ривлин Л.А. *Квантовая электроника*, **22**, 625 (1995).
5. Фейнберг Е.Л. *Эйнштейновский сборник 1975–1976* (М.: Наука, 1978, с. 43).
6. Эйнштейн А. *Собрание научных трудов* (М.: Наука, 1965, т. 1, с. 7).
7. Ривлин Л.А. *Квантовая электроника*, **30**, 185 (2000).