ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС БЕЗ ЧЕРНЫХ ДЫР.

Trevor W.Marshall

Абстракт.

Современное понятие чёрной дыры берет свое начало в статье Оппенгеймера и Снайдера 1939 «О безграничном гравитационном сжатии" (Phys Rev. 56:. 455, 1939). В частности, Пенроуз (Phys. Rev. Lett. 14:57, 1965) показал, что их метрика породила ловушечные поверхности, то есть области пространства, из которого световые лучи не могут уйти, и доказал, что в пределах таких поверхностей неизбежно образование чёрных дыр. Раздел "Нет ловушечных поверхностей" этой статьи показывает, что простая модификация метрики Оппенгеймера-Снайдера, полностью в соответствии с Общей Теории Относительности, может быть проделана так, что все радиальные световые лучи, возникающие внутри, выходят наружу. Там нет ловушечных поверхностей и нет чёрных дыр; наоборот существует стабильное конечное состояние с конечной плотностью, содержащая в себе сферу Шварцшильда. В заключительном разделе обсуждаются последствия для интерпретации общей теории относительности, а также для экспериментального наблюдения сверхмассивных объектов и проекта «Телескоп Горизонта Событий.

Ключевые слова. Гравитационный коллапс ■ Каузальность ■Гравитационное поле ■ Застрявшие поверхность ■Оппенгеймера-Снайдера ■ Телескоп Горизонта Событий.

Введение

Оппенгеймером и Снайдером (1939) (ОС) была построена сферически - симметричная метрика для описания гравитационного коллапса идеализированного материала, или «пыль», в котором нет никаких сил кроме гравитационных и при нулевом давлении.

Они не пытались проследить траектории отдельных частиц пыли, но при выборе названия своей статьи, "О безграничном гравитационном сжатии", а также в стартовой статье их метрика подтвердила заключение Оппенгеймера и Волкова (1939) (ОВ), а именно, что ни один объект тяжелее двух масс Солнца не сможет избежать полного коллапса, они открыли дорогу для своих преемников, которые утверждали, что ОС доказали неизбежность чёрных дыр.

Они показали, что, в их метрике, есть области пространства, из которых ни один световой луч не может выйти, что привело Пенроуза (1965) к понятию ловушечной поверхности и был сделан вывод, что внутри такой поверхности образуется сингулярность. Вскоре такие сингулярности привели к понятию чёрных дыр (Thorne 1994). Настоящая статья устанавливает, что лишь небольшая модификация ОС требуется для того, чтобы удалить ловушечную поверхность. Кроме того, эта модифицированная метрика, в полном соответствии с общей теории относительности (ОТО), даёт стабильное состояние, когда координатное время стремится к плюс бесконечности. Эти результаты указывают на существование устойчивых сверхмассивных объектов конечной плотности; на самом деле, чем более массивные они, тем меньше их плотность. Обратите внимание, что были и другие недавние критические замечания статьи ОС, некоторые из которых приведены в настоящей статье, а именно нарушение причинности Гильберта (Логунов и Мествиришвили 2012) и признание ловушечных поверхностей как наиболее радикальный отход от причинности (Mitra 2011). Моё исследование показывает, однако, что подход ОС имеет смысл, когда их метрика соответствующим образом изменена, и идет вразрез с ранней статьей ОВ. Именно последняя, таким образом, является наиболее уязвимой для критики на основе причинности.

Т.В. Маршалл Букингемский Центр астробиологии, Университет Букингемский, Букингемский МК18 1Eg, Великобритания электронная почта: trevnat@talktalk.net

2. Нет ловушечных поверхностей.

В безразмерном виде (r в единицах $2m$, R в единицах R_0) метрика ОС может быть записана:

$$ds^2 = \left(\sqrt{R}dR - \sqrt{r}dr\right)^2 - \left(\frac{R}{r}\right)dR^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 d\varphi^2) \ (1)$$

Для $R > 1$ и

$$ds^2 = \frac{r^3}{R^3}\left(\frac{dR}{R} - \frac{dr}{r}\right)^2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 dR^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 d\varphi^2) \ (2)$$

Для $R < 1$.

Здесь координата R сопутствующая, так для $R > 1$ соответствует свободнопадающей пробной частице, а для $R < 1$ пылевые частицы, движущиеся по геодезическим, чье уравнение $R = const$. Во внешней области $R > 1$, метрика ОС может быть преобразована в метрику Шварцшильда:

$$ds^2 = \frac{r-1}{r}dt^2 - \frac{r}{r-1}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 d\varphi^2) \ \ (3)$$

$$(R > 1)$$

С помощью преобразований:

$$t = \frac{2}{3}R^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}r^{\frac{3}{2}} - 2\sqrt{r} + \ln\frac{\sqrt{r}+1}{\sqrt{r}-1} \ (R > 1) \quad (4)$$

ОС нашли выражение для перехода от внутренней метрики к внешней с помощью:

$$t = \frac{2}{3}R^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3}y^{\frac{3}{2}} - 2\sqrt{y} + \ln\frac{\sqrt{y}+1}{\sqrt{y}-1} \ (R < 1) \quad (5)$$

и $y(R, r)$ удовлетворяет $y(1, r) = r$ вместе с $\frac{\partial y}{\partial R}$ при $R = 1$ выбираются так, чтобы метрика была непрерывна[1], и таким образом:

$$g_{tt} = \frac{r-1}{r}, \quad g_{tr} = 0, \quad g_{rr} = -\frac{r}{r-1} \quad (R = 1) \quad (6)$$

Заметим, что все θ, $\boldsymbol{\varphi}$ компоненты $g_{\mu\nu}$ остаются нетронутыми и непрерывны под картой от R к t . Однако без каких-либо объяснений , ОС предложили добавочное условие, что:

$$g_{tr} = 0 \quad (R < 1)$$

---

[1] В членах (R, r) у тензора g появляется разрыв на $R = 1$, но разрыв устраняется, когда мы учитываем разные определения $t(R, r)$ в двух областях. Мы указали некорректно на этот разрыв как на «фатальную ошибку» ОС в ранних статьях (Маршалл 2007, 2009 , Маршалл и Уоллис 2010). Реальная фатальная ошибка ОС была их в использовании условия (7).

и получили «единственное» решение:

$$y = \frac{r}{R} + \frac{R^2}{2} - \frac{1}{2} \qquad (8)$$

Внутренняя метрика для этого выбора y получается подстановкой

$$dR = \frac{R}{r - R^3}\left(\frac{R(y-1)}{y^{\frac{3}{2}}}dt - dr\right) \ (9)$$

в (2), давая:

$$ds^2 = \frac{(y-1)^2 r^2}{Ry^3(r - R^3)}dt^2 - \frac{r}{r - R^3}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 d\varphi^2) \qquad (10)$$

Я покажу, что этот выбор y отвечает ловушечной поверхности Пенроуза. С другой стороны, простая модификация:

$$y = \frac{r}{R} - \frac{5}{4} + \frac{3R}{2} - \frac{R^2}{4} \qquad (11)$$

Дает внутреннюю метрику:

$$ds^2 = \frac{4(y-1)^2}{(2r + R^3 - 3R^2)} * [\frac{r^2(r - R^3)}{Ry^3}dt^2 - \frac{rR}{y-1}dr^2 + \frac{r^2(1-R)}{y^{\frac{3}{2}}(y-1)}drdt] - r^2(d\theta^2 + \sin^2 d\varphi^2) \qquad (12)$$

и она удовлетворяет (6), но *не имеет ловушечных поверхностей.*

Чтобы установить последний результат, рассмотрим радиальные лучи, проходящие через $(R, r) = (1, y_1)$ с $y_1 > 1$. Во внутренней области уравнение нулевых геодезических:

$$\frac{dR}{R} - \frac{dr}{r} = \sqrt{\frac{R}{r}}dR \qquad (13)$$

имеет решение:

$$r = R\left(\sqrt{y_1} + \frac{1-R}{2}\right)^2$$

Совмещая (11) и (5) , мы получаем r как монотонную функцию от t. Так как внутренняя и внешняя метрики удовлетворяет (6), она плавно переходит к внешней нулевой геодезической удовлетворяя:

$$dr = \frac{r-1}{r}dt$$

которое при интегрировании даёт:

$$t = r - y_1 + \ln\frac{r-1}{\sqrt{y_1}-1} + \frac{2}{3} - \frac{2}{3}y_1^{\frac{3}{2}} - 2\sqrt{y_1} + \ln\frac{\sqrt{y_1}+1}{\sqrt{y_1}-1} \qquad (16)$$

Таким образом, каждое событие (t, r) с $r > 0$, внутри и вне лежит на единственной нулевой геодезической определяемой y_1 , и световой луч может из $r = 0$ выйти за конечный временной интервал.

Мы таким образом установили, что метрика ОС с модификацией (11) коллапсирует к конечному состоянию без сингулярности и без ловушечных поверхностей. Конечное состояние $(t \to \infty)$ соответствует $y = 1$, так что:

$$r_{lim}(R) = \frac{R}{4}(3-R)^2 \quad (R < 1) \qquad (17)$$

Это не показывает концентрацию звездного материала при $r = 0$, как намекают в названии статьи ОС и заявляют в явном виде последующие комментаторы. Скорее она показывает концентрацию около $r = 1$, что можно продемонстрировать, учитывая, что шар радиуса $R = 2^{-\frac{1}{3}} = 0.7973$, содержит половину общего материала на ранней стадии коллапса, а в конечной стадии радиусу $r = 0.9658$. Так как $R = 1$ достигается при $r_{lim} = 1$, это означает, что половина звездного материала сосредоточено в тонкой сферической оболочке.

На рис.1 Я нарисовал некоторые из частиц и нулевые геодезические для изменённой метрики ОС. Одна из особенностей состоит в том, что хотя все лучи следуют изнутри к внешней области за конечное время, скорость света стремится к нулю, когда величина t стремится к плюс бесконечности, также как и скорость свободно падающих пробных частиц по мере приближения поверхности к $r = 1$. Оба приводят к бесконечному красному смещению на поверхности, как уже отмечалось у ОС. Полученные результаты подтверждают выводы Пенроуза о связи между ловушечной поверхностью и сингулярностью. Ловушечные поверхности обязаны своим происхождением факту, что последний луч света избегает попадания во внешнюю область нулевой геодезической через $(R, r) = (1,1)$, которое остается на $r = 0$ при соотношении $r/R = 9/4$. Это соответствует $y = 7/4$, если мы используем выражение (8) ОС, но $y = 1$ если мы используем модифицированное выражение (11). Последний случай соответствует $t \to +\infty$ и означает, что все лучи выходят наружу, в то время как в старых результатах в наших единицах, $t = -1.5491$, означает, что все лучи, испущенные после этого времени, оказываются в ловушке. Так в последней модификации нет сингулярности, а в прошлой она имеется.

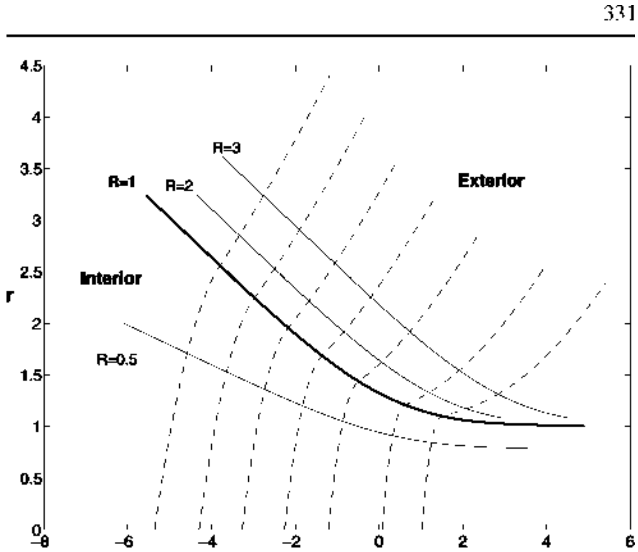

Рис. 1 Карта пространства-времени для изменённой метрик ОС, с частицами геодезическим, изображенных непрерывными и легкими геодезическими ломаными линиями. Геодезический $R = 1$ является границей между внешней и внутренними областями. Все точки пространства причинно связаны во все времена, и, в частности, любой радиальной световой луч, происходящих во внутренней области в конце концов выходит во внешнюю область.

Предполагается, что наложение условий (7) в ОС продиктованы некоторыми требованиями на тензор натяжений материала $T^{\mu\nu}$ и сопутствующей природой координаты R. Это были ключевые особенности при построении метрики (2), которая выражена в координатах $(\tau, R, \theta, \varphi)$, $\boldsymbol{\tau}$ собственное время частицы, в этих координатах метрический тензор $g^{\mu\nu}$ и $T^{\mu\nu}$ диагональные, но они не диагональные в (t, r, θ, φ).

Кроме того, как отмечалось в моей предыдущей статье (Marshall 2007), функция ОС $t(r, R)$ в (8) даёт независимость от r и R при t на плюс бесконечности, очень похоже на то, о чём мы уже писали выше, используя (11), это предполагает, что даже с выбором метрики ОС в (t, r) координатах, более полное исследование тензора $T^{\mu\nu}$ даст стабильное конечное состояние, тем самым конфликтуя с ранним анализом Оппенгеймера и Волкова (1939).

3. Заключение.

Помимо перечисленного выше краткого обзора тензора напряжений, мой анализ до этого момента был чисто в рамках дифференциальной геометрии; но даже в строго геометрической интерпретации ОТО есть основания для оспаривания универсальности теоремы Пенроуза (Penrose 1965).
Но каковы последствия этого для экспериментальной астрономии? Сверхмассивный объект в центре нашей галактики предлагает простое изучение структуры гравитационного коллапса, предложенной в этой

статье. Проект «Телескопа горизонт событий», для исследования световых лучей, проходящие близко к радиусу Шварцшильда, также обнаружит любые лучи, которые проникают через поверхность оболочки.
У объективного читателя, возможно, будет соблазн сказать, что выбор между выражениями (8) и (11) имеют одинаковую силу, и что мы можем выбирать между ними только на основе такого экспериментального наблюдения. Или он снова может объявить симпатии к той или другой из них на основе интуиции. Последнее, как известно, субъективно, но, тем не менее, когда интуиция ученого сообщества совпадает с эпитетом "противоречит здравому смыслу" это звучит довольно сильно. Любой из предложенных вариантов может быть классифицирован как противоречащие здравому смыслу, в зависимости от нашей точки зрения.

Примерно с 1970 г. стало привычным, следуя руководством Хокинга (Hawking и Ellis, 1973), для обозначения множества событий, лежащих на захваченных лучах, как внутренность *абсолютного горизонта*, и целый набор таких понятий - ловушечные поверхности и горизонты - приводит к отказу от причинности и замене его телеологией (эффект предшествующей причинности, см Торн 1994, С. 414-418.). Таким образом, если мы сильно привязаны к причинности в качестве основы научного анализа, мы должны отказаться от (8) на том основании, что это противоречит здравому смыслу. С другой стороны, есть анализ, сделанный многими поколениями, восходящий к статье Оппенгеймера и Волковым (1939), что выше определенной плотности, "никакая сила не может уравновешивать силу тяжести". Ясно, что ОС должны быть в плену этой интуиции, в противном случае они бы наверняка обнаружили альтернативу (11). Но последняя приводит нас к выводу, что существует сильная концентрация пыли вблизи поверхности, так что, какая сила толкает её туда? Так как нет силы, кроме силы тяжести, должно быть она и толкает её туда; и при достаточно высокой плотности гравитации становится отталкивающей. Значит ли это, что мы должны отказаться от (11), потому что это противоречит здравому смыслу?

Мы утверждали в другом месте (Marshall 2007, 2009, 2011, Маршалл и Уоллис 2010), что требуется довольно сильное изменение интуиции. Мы должны вернуться к идее, что сила тяжести, как электромагнетизм, является полем, то есть это больше, чем просто модификация геометрии плоского пространства. Как у поля, у него есть тензор энергии-импульса (не псевдотензор); его плотность энергии может быть отрицательным, а так как энергия массы, и вся масса притягивается, *высокая концентрация гравитационной энергии приводит к гравитационному отталкиванию.* До тех пор пока мы настаиваем, что ОТО является чисто геометрическая теория, выполняется сильный принцип эквивалентности, который не допускает привилегированной системы координат, такие идеи исключены. Существует, однако, давно установленная полевая интерпретация ОТО, которая исходит из статьи Эйнштейна о гравитационных волнах (Эйнштейна 1918) и развитая в тексте Вайнберга (Weinberg, 1972), особенно в предисловии и ("геометрическая аналогия") на стр. 147. Есть некоторые более поздние разработки интерпретации поля, которые выступают за привилегированную систему координат; они могут быть представлены либо как в самой теории (Бабак и Грищук 1999) так и вне ОТО (Логунова 2001).
Если мы примем, что полевая интерпретация ОТО верна, то это означает (Marshall 2011), что выбор метрики (11) является существенным . Переход от (8) к (11) полностью согласуется с ОТО, но нам, возможно, придется выйти за пределы ОТО, чтобы решить, какой из них является менее нелогичным!

Acknowledgements I wish to express my thanks to Dr Max Wallis for valuable discussion and suggestions.

References

Babak, S.V., Grishchuk, L.P.: Phys. Rev. D **61**, 024038 (1999)
Einstein, A.: Sitz.ber. Preuss. Akad. Wiss. Berl. Philos.-Hist. Kl. **1**, 154-167(1918)
Hawking, S.W., Ellis, G.F.R.: The Large Scale Structure of SpaceTime. Cambridge U. P., Cambridge (1973)
Logunov, A.A.: Theory of Gravity. Nauka, Moscow (2001)
Logunov, A.A., Mestvirishvili, M.A.: Theor. Math. Phys. **170**(3), 413419 (2012)
Marshall, T.W.: Gravitational waves versus black holes. arXiv:0707. 0201 (2007)
Marshall, T.W.: The gravitational collapse of a dust ball. arXiv:0907. 2339 (2009)
Marshall, T.W.: Fields tell matter how to move. arXiv:1103.6168 (2011)
Marshall, T.W., Wallis, M.K.: J. Cosmol. **6**, 1473-1484 (2010)
Mitra, A.: Astrophys. Space Sci. **332**, 43-48 (2011)
Oppenheimer, J.R., Snyder, H.: Phys. Rev. **56**, 455 (1939)
Oppenheimer, J.R., Volkoff, G.: Phys. Rev. **54**, 540 (1939)
Penrose, R.: Phys. Rev. Lett. **14**, 57 (1965)
Thorne, K.S.: Black Holes and Time Warps. Norton, New York (1994) Weinberg, S.: Gravitation and Cosmology. Wiley, New York (1972)