

## О черных дырах и червоточинах

Обзор подготовил М.Х. Шульман ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru), [www.timeorigin21.narod.ru](http://www.timeorigin21.narod.ru) )

(13.08.2020)

В 1916 году Шварцшильд предложил [**Schwarzschild, 1916**] решение уравнений Эйнштейна, описывающее гравитационное поле статической сферически симметричной невращающейся массы  $m$ , *коллапсирующей в черную дыру (ЧД)*:

$$ds^2 = (1 - r_s / r) c^2 dt^2 - \frac{1}{1 - r_s / r} dr^2 - r^2 [d\theta^2 + (\sin^2 \theta) d\phi^2],$$

где  $r_s = 2Gm / c^2$  – т. н. радиус Шварцшильда, совпадающий с радиусом горизонта событий невращающейся ЧД,  $G$  – гравитационная постоянная,  $c$  – скорость света в вакууме.

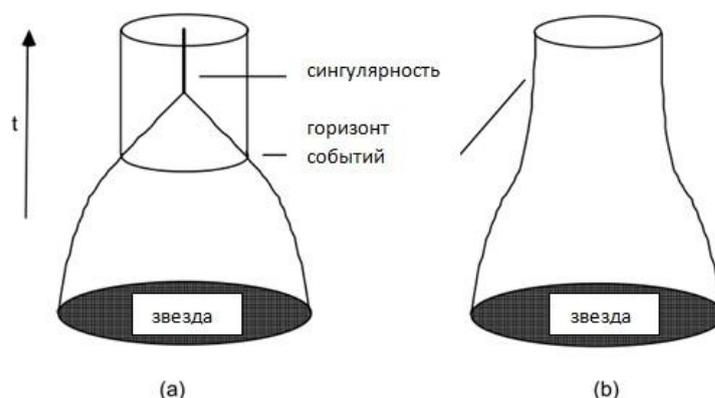


Рис. 1. Формирование ЧД с точки зрения (а) наблюдателя на поверхности коллапсирующей звезды и (б) удаленного внешнего наблюдателя. [**Stewart, 2008**]

Внешний удаленный наблюдатель видит только горизонт событий с радиусом  $r_s$ , который отделяет область, откуда свет может выйти, от области, которую нельзя видеть извне. ЧД прячется внутри горизонта событий. Продолжительность коллапса тела с массой  $m$  не превышает  $\pi Gm / c^3$  с [**Мизнер, Торн, Уилер, 1977**]. Например, для ЧД с массой в 10 солнечных масс это время составит  $\sim 1.54 \cdot 10^{-4}$  с.

При  $r = r_s$  (на горизонте событий) второе слагаемое обращается в бесконечность, но эта особенность – фиктивная, связанная с выбором координаты  $r$ . В 1935 году Эйнштейн и Розен опубликовали работу<sup>1</sup> [**Einstein and N. Rosen, 1935**], в которой преобразовали вышеприведенное уравнение. Заменяя  $r$  новой переменной согласно соотношениям

$$u^2 = r - 2m, \quad \text{т.е.} \quad r = u^2 + 2m, \quad dr^2 = (2udu)^2 = 4u^2 du^2,$$

они получили

$$ds^2 = \frac{u^2}{u^2 + r_s} c^2 dt^2 - 4(u^2 + r_s) du^2 - (u^2 + r_s)^2 [d\theta^2 + (\sin^2 \theta) d\phi^2].$$

<sup>1</sup> Эйнштейн и Розен попытались представить элементарные частицы как “червоточины” (wormholes), т.е. пары из соединенных короткой перемычкой ЧД и БД, причем ЧД находится в нашей Вселенной, а БД – в некоей другой Вселенной (или в нашей же Вселенной, но на огромном расстоянии от ЧД).

Это новое уравнение симметрично во времени и в пространстве. Его решение в четырехмерном пространстве  $\{r, \theta, \phi, t\}$  можно интерпретировать следующим образом: оно описывается математически двумя конгруэнтными частями или “листами”, соответствующими  $u > 0$  и  $u < 0$ , которые примыкают к точкам сингулярности  $u = 0$ . Решение, отвечающее  $u < 0$ , называется белой дырой (БД). Эйнштейн и Розен назвали соединение между двумя этими листьями “мостом”.

На рис. 2 обычный горизонт событий представляет собой барьер, через которые частица не может выйти; симметричному решению отвечает горизонт событий, через который частица не может войти, впрочем, иногда частицы туннелируют через барьер. Таким образом, со стороны БД дыра проявляет себя, как неожиданный взрыв, в ходе которого рождается материя [Stewart, 2008].

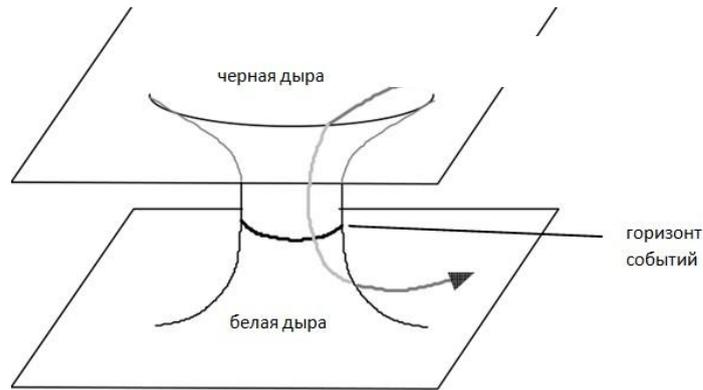


Рис. 2. Мост Эйнштейна - Розена [Stewart, 2008]

ЧД рождается в нашей Вселенной при коллапсе достаточно плотной материи. Рождение БД, как кажется, противоречит принципу причинности. Но объяснение лежит за пределами нашей Вселенной. Следует исходить из того, что математически БД возможны. Если бы мы знали, как изготовить БД, мы могли бы “приклеить” ее к нашей Вселенной. Мы можем также склеить ЧД и БД вместе, соединив их горизонты событий. Тогда материя могла бы двигаться лишь в одном направлении: входить в ЧД и выходить из БД, следуя по времениподобной мировой линии [Stewart, 2008].

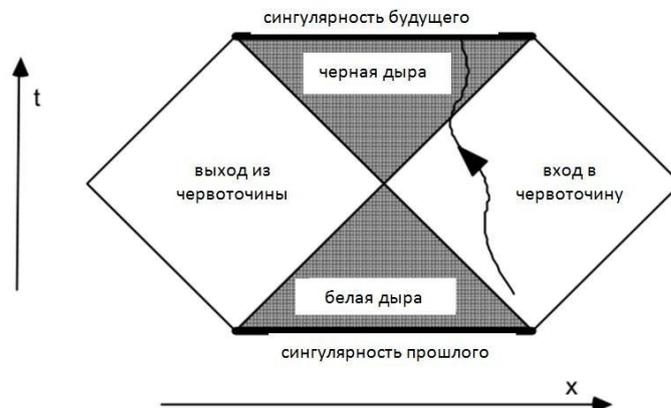


Рис. 3. Диаграмма Пенроуза для червоточины, состоящей из неврашающихся ЧД и БД [Stewart, 2008]

Любая такая линия, начинающаяся на входе червоточины, должна упереться в сингулярность будущего. Нет способа выйти из червоточины, не превысив скорость света. Однако сделать червоточину открытой гипотетически можно было бы, пропустив через нее т. н. “экзотическое вещество” (которое имеет отрицательную среднюю плотность энергии, подобно вакуумным флуктуациям в искривленном пространстве-времени) [Торн, 2007].

Более сложная картина (рис. 4) возникает, если ЧД и БД вращаются и/или имеют электрический заряд. В 1962 году Рой Керр решил уравнения Эйнштейна для вращающейся ЧД. Имеются также решение Рейсснера – Нордстрёма для невращающейся электрически заряженной ЧД и общее решение Керра – Ньюмена для вращающейся и электрически заряженной ЧД.

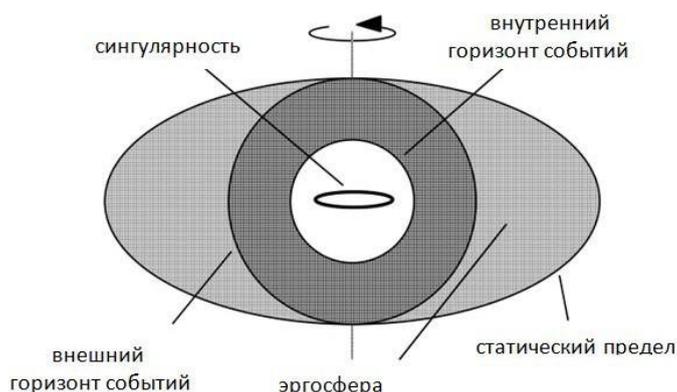


Рис. 4. Структура вращающейся ЧД [Stewart, 2008]

Теперь (рис. 4) сингулярность оказывается не точкой, а кольцом нулевой толщины. Если для статичной ЧД вся материя неизбежно устремляется в центральную сингулярность, то в случае *вращающейся* ЧД это не обязательно. Можно двигаться либо в экваториальной плоскости, либо пройти через кольцевую сингулярность. Горизонт событий в общем случае расщепляется на два – внешний и внутренний. Сигнал или материя, проникающие через *внешний горизонт событий*, не могут вернуться назад; сигналы или материя, исходящие из сингулярности, не могут идти в прошлое через внутренний горизонт событий. Дальше идет эргосфера, внешняя поверхность которой ограничивает *статический предел* (на полюсах он касается внешнего горизонта событий). Вне статического предела частицы могут еще покинуть эргосферу, двигаясь в произвольном направлении. Между статическим пределом и внешним горизонтом событий они могут сделать это, двигаясь радиально.

“Если ЧД не вращается (решение Шварцшильда или Рейсснера-Нордстрёма), то всякий, направляющийся к ее центру, наталкивается на сингулярность. Однако в случае вращающейся ЧД в сингулярность попадает только тот космонавт, который летит к дыре в *экваториальной* плоскости. Двигаясь же под любым *иным* углом, космонавт не заметит бесконечного искривления пространства-времени и не будет разорван на части бесконечно большими приливными силами. Он сможет пройти невредимым через это кольцо и (в этом, и только в этом случае!) попадет в новую, странную область пространства-времени. Это – “отрицательное” пространство. Космонавт окажется на отрицательном расстоянии от центра ЧД.

Некоторые физики отвергают саму мысль об отрицательном расстоянии. В поисках другого истолкования этой новой области они обнаружили, что здесь реализуются все свойства антигравитации – по другую сторону кольцевой

сингулярности тяготение превращается в отталкивание (и вещества, и лучей света). Существование миров антигравитации – самое удивительное свойство вращающихся ЧД в отличие от дыр заряженных.” [Кауфман, 1981]

Фантастично выглядит диаграмма Пенроуза для решения Керра (рис. 5). Белые ромбы представляют асимптотически плоские области пространства-времени: одну в нашей Вселенной, другие (возможно, несуществующие) - в иных Вселенных. Сингулярности показаны в виде черных перегородок, через которые (т.е. сквозь кольцо) возможно проникнуть. За сингулярностями лежат антигравитационные Вселенные, где расстояния отрицательны и вещество взаимно отталкивается (а не притягивается). Любое тело в этой области отбрасывается от сингулярности на бесконечное расстояние. Показаны некоторые допустимые траектории (где не превышает скорость света). Они ведут через червоточину к любому из альтернативных выходов из нее. Наиболее интересным свойством является то, что это только часть полной диаграммы, которая повторяется бесконечное число раз по вертикали, образуя бесконечное число входов и выходов.

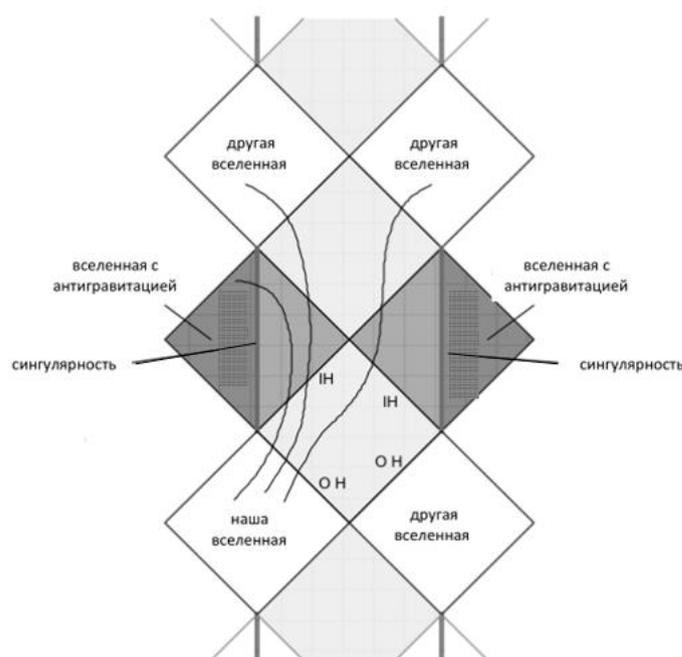


Рис. 4. Структура вращающейся ЧД [Stewart, 2008]

IH – внутренний горизонт событий, OH – внешний горизонт событий

## Ссылки

[Einstein and N. Rosen, 1935] A. Einstein and N. Rosen. The particle problem in the General Theory of Relativity. Phys. Rev, July 1, vol. 48, 1935.

[Schwarzschild, 1916] K. Schwarzschild. Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einstein'schen Theorie. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 1 (1916) 189—196.

[Stewart, 2008] Ian Stewart. Forward to the Future. Parts 1, 2.

[http://dev.whydmath.org/Reading\\_Room\\_Material/ian\\_stewart/ForwardtotheFuture1.pdf](http://dev.whydmath.org/Reading_Room_Material/ian_stewart/ForwardtotheFuture1.pdf)

[http://dev.whydmath.org/Reading\\_Room\\_Material/ian\\_stewart/ForwardtotheFuture2.pdf](http://dev.whydmath.org/Reading_Room_Material/ian_stewart/ForwardtotheFuture2.pdf)

[Кауфман, 1981] У. Кауфман. Космические рубежи теории относительности. М., -Мир, 1981.

[Мизнер, Торн, Уилер, 1977] Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер. Гравитация. Том 3. М., Мир, 1977.

[Торн, 2007] Кип С. Торн. Черные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна. М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. 616 с.