

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Новая концепция кротовых нор и Мультивселенная

И.Д. Новиков

Рассматривается новая концепция кротовых нор. Проведено разделение кротовых нор на три качественно различные категории: статические, пространственноподобные и времениподобные. Проведён анализ свойств кротовых нор каждого типа. Анализируется связь кротовых нор и чёрных дыр. Исследуются их астрофизические свойства.

Ключевые слова: кротовые норы, общая теория относительности Эйнштейна, Мультивселенная

PACS number: 98.80. – k

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.09.038204>

Содержание

1. Введение (301).
 2. Статические кротовые норы (302).
 3. Модели Мультивселенной с пространственноподобными кротовыми норами (304).
 4. Модели Мультивселенной со времениподобными кротовыми норами (305).
 5. Обсуждение. Заключение (308).
- Список литературы (310).

1. Введение

Кротовые норы теоретически были предсказаны более ста лет назад [1] в рамках общей теории относительности (ОТО) сразу после её создания. Простейшая модель кротовой норы, предложенная в [1], представляет собой два входа в трёхмерном пространстве, похожих на входы в чёрные дыры, соединённых горловиной-мостом, лежащим вне нашего пространства-времени. Этот мост может быть очень коротким, в то время как расстояние между входами во внешнем пространстве может быть очень большим. Таким образом, подобные кротовые норы связывают удалённые области нашей Вселенной коротким мостом. Подобные модели мыслились как статические. Сквозь такую кротовую нору возможны протекание вещества и прохождение лучей света в обоих направлениях.

Первая математическая модель кротовой норы, построенная Эйнштейном и Розеном [2], представляет со-

бой два экземпляра внешнего пространства-времени чёрной дыры (два решения Шварцшильда), обрезанных на гравитационном радиусе (по горизонту) и склеенных вместе. Таким образом, модель представляет два асимптотически плоских пространства, соединённых горловиной-мостом. Авторы полагали, что конструкция, получившая название моста Эйнштейна – Розена, будет статической. Позднее такие мосты стали называть кротовыми норами (wormholes (червоточины) в англоязычной литературе). Однако выяснилось, что предположение о статичности неправильно. Под действием тяготения искривлённого пространства-времени горловина моста очень быстро схлопывается в сингулярность — бесконечную кривизну пространства-времени. Схлопывание происходит настолько быстро, что даже луч света не успевает пройти сквозь кротовую нору из одной части пространства в другую. Такие кротовые норы получили название непроходимых. Мост Эйнштейна – Розена можно стабилизировать, поместив внутри него так называемую экзотическую материю [3] — материю, уравнение состояния которой удовлетворяет условию

$$\varepsilon + p_r < 0, \quad (1)$$

где ε — плотность энергии, p_r — радиальное давление.

Экзотическая материя создаёт антигравитацию, которая уравновешивает тяготение, и мост становится статическим. Типичные примеры статической кротовой норы даны в [4–6]. Многочисленные исследования таких кротовых нор были связаны с проблемой их устойчивости и изучением процессов прохождения материи сквозь них (см., например, [7–12], а также раздел 2). Эти кротовые норы использовались также для построения моделей Мультивселенной [13, 14]. Согласно модели Мультивселенной в мире помимо нашей Вселенной существуют другие вселенные. Кротовые норы служат соединительными тоннелями между вселенными. Статические кротовые норы заведомо проходимы в обоих направлениях. Динамические кротовые норы могут быть непроходимыми, подобно мосту Эйнштейна – Розена (см., например, [15]). Уже давно анализируются решения уравнений

И.Д. Новиков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100, Copenhagen, Denmark; Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Курчатова 1, 123182 Москва, Российская Федерация
E-mail: novikov@asc.rssi.ru

Статья поступила 11 апреля 2017 г.,
после доработки 11 сентября 2017 г.

Эйнштейна, которые тоже могут рассматриваться как возможные связи между разными вселенными, хотя они качественно отличаются от рассмотренных выше кротовых нор. Типичным примером является максимальное аналитическое расширение решения Рейснера–Нордстрёма, которое обычно называют электрически (или магнитно) заряженной чёрной дырой (см., например, [6, 16–18]). Об этом решении мы будем подробно говорить в разделе 4. Мы подчёркиваем, что решение Рейснера–Нордстрёма и ему подобные, по существу, представляют собой модели Мультивселенной, в которых имеются кротовые норы, ориентированные во времени.

То, что максимально расширенное пустое (т.е. содержащее только гравитационное и электромагнитное поле) решение Рейснера–Нордстрёма позволяет путешествовать из одной вселенной в другую, впервые было отмечено в [19] и затем в [20, 21]. В настоящей статье мы специально выделим подобные решения в отдельный класс кротовых нор, играющих основную роль в построении моделей Мультивселенной.

До сих пор мы рассматривали сферически-симметричные решения уравнений Эйнштейна, разумеется, в связи с тем, что они часто поддаются точному аналитическому исследованию. В дальнейшем мы также будем обращаться главным образом к таким решениям. Этого достаточно для исследования многих принципиальных вопросов. Важно отметить, что не все принципиальные проблемы, рассматриваемые в настоящей статье, можно решить, используя только сферически-симметричные модели. В разделах 4 и 5 мы проанализируем ещё одну точную модель в рамках теории Эйнштейна, принципиально важную для рассматриваемых здесь вопросов, а именно максимально аналитически расширенное решение Керра [22], описывающее наличие вращения. Очевидно, что решение Керра представляет собой несферическое стационарное решение уравнений Эйнштейна. В отличие от решения Рейснера–Нордстрёма, включающего в себя электромагнитное поле, решение Керра имеет дело с совершенно пустым пространством, содержащим только гравитационное поле. Это обстоятельство важно для исследования многих принципиальных вопросов (см. подробнее разделы 4 и 5)¹.

В разделе 5 мы кратко обсудим, какие новые возможности открываются при рассмотрении несферических решений, а также скажем о принципиально новых ситуациях, возникающих при рассмотрении неустойчивости сферических решений.

При исследовании движения материи в решении Рейснера–Нордстрёма мы главным образом будем рассматривать эволюцию сферических тонких заряженных материальных оболочек — пузырей с самогравитацией без напряжений в них. Это связано с тем, что такие решения определяют эволюцию поверхности шаровых тел без давления в материи, что особенно важно для нас, кроме того, нет необходимости рассматривать эволюцию материи внутри шара. Эволюция тонких сферических оболочек детально рассматривается, например, в [17] (см. также [23, 24]).

Теоретически кротовые норы были предсказаны так же давно, как и чёрные дыры. Судьбы этих теоретических

открытий в первые десятилетия после их появления были схожими. В лучшем случае на них никто не обращал серьёзного внимания, и даже решительно высказывались мнения, что они являются математическим артефактом решений уравнений Эйнштейна. Лишь с середины 1930-х годов стали появляться серьёзные теоретические работы по этим вопросам. В дальнейшем судьбы этих открытий становятся существенно разными. Чёрные дыры были открыты во Вселенной в двойных звёздных системах и центрах многих галактик (см. [25]). Они детально исследуются и теоретически, и в астрофизических наблюдениях [26]. Чёрные дыры возникают в результате естественной эволюции некоторых астрофизических объектов. Статус кротовых нор совсем иной — они до сих пор являются только гипотетическими теоретическими объектами. Неясно, могут ли кротовые норы действительно существовать во Вселенной. Однако следует отметить, что нет никаких строгих доказательств того, что существование таких объектов невозможно. Рассматриваются различные возможности. Так, о возможности их возникновения из квантовых флуктуаций — квантовой пены, рассматриваемой Дж. Уилером для чрезвычайно мелких масштабов, К. Торн пишет [3]: «Если квантовая пена действительно существует, то тогда, вероятно, некоторые из кротовых нор могут спонтанно разрастаться в ходе какого-нибудь естественного процесса до человеческих или больших масштабов, и такое разрастание могло происходить даже во время чрезвычайно быстрого "инфляционного" расширения Вселенной, когда она была очень-очень молодой»² (см. раздел 5). В настоящее время кротовые норы интенсивно теоретически исследуются. Данная статья посвящена обзору актуальной проблемы — физики кротовых нор, гипотезе Мультивселенной и рассмотрению новых связанных с этим идей.

Итак, кротовые норы следует разделить на три класса:

- 1) статические кротовые норы;
- 2) пространственноподобные кротовые норы;
- 3) времениподобные кротовые норы.

В разделах 2–4 мы проведём анализ свойств каждого из трёх классов. В разделе 5 рассмотрим влияние этих свойств на возможные астрофизические проявления кротовых нор.

2. Статические кротовые норы

Модель кротовой норы, построенная Эйнштейном и Розеном (см. [2] и раздел 1), оказалась нестатической. Если в начальный момент задать мгновенно статическую конструкцию, соответствующую этой модели, то она немедленно начнёт эволюционировать (рис. 1). Система отсчёта, связанная с этой конструкцией, сжимается. Появляются горизонты событий, отделяющие два асимптотически плоских пустых пространства, A и B , представляющих собой внешние решения метрики Шварцшильда, от сжимающихся в T_- -области тоннелей. Сжатие приводит к формированию пространственноподобной сингулярности пространства-времени $r = 0$.

¹ Заметим, что существует обобщение решения Керра для случая присутствия электрического или магнитного поля (см. [27]), однако здесь оно для нас неважно.

² «If quantum foam *does* exist, I hope there is a natural process by which some of its wormholes can spontaneously grow to human size or bigger, and even did so during the extremely rapid "inflationary" expansion of the universe, when the universe was very, very young» [3, Ch. 14].

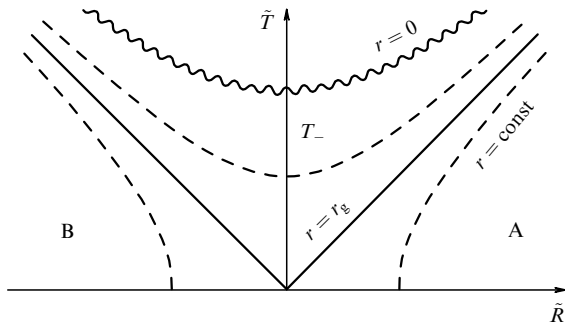


Рис. 1. Сжатие моста Эйнштейна–Розена. \tilde{R} — радиальная пространственная координата, \tilde{T} — временная координата, А и В — внешние одинаковые асимптотически плоские области, r_g — гравитационный радиус, T_- — сжимающаяся T -область. Штриховые кривые — линии $r = \text{const}$, $r = 0$ — пространственноподобная сингулярность пространства-времени.

На рисунке 1 нулевые геодезические изображены линиями, наклонёнными под углом 45° . Из рисунка ясно, что никакой сигнал, движущийся со скоростью, не большей световой, не может пройти из области А в область В и наоборот. Его мировая линия упирается в сингулярность $r = 0$. Таким образом, конструкция представляет собой стремительно сжимающийся под действием тяготения тоннель — непроходимую кротовую нору.

Конструкцию можно сделать статической, если добавить в неё "экзотическую материю", создающую анти-тяготение, уравновешивающее тяготение искривлённого пространства-времени.

Как было сказано в разделе 1, экзотической материей называют материю с уравнением состояния, удовлетворяющим неравенству (1). Простейшим видом экзотической материи является безмассовое скалярное поле Ψ (см. [4]) с отрицательной плотностью энергии ε (см. [4, 5]),

$$\varepsilon < 0. \tag{2}$$

Одной из простейших моделей статических кротовых нор является модель Морриса–Торна (МТ) [4, 5, 28]. Соответствующий линейный элемент для такой кротовой норы даётся формулой

$$ds^2 = -dt^2 + dR^2 + r^2 d\Omega^2, \tag{3}$$

$$r^2 = Q^2 + R^2, \quad d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2,$$

где R принимает значения от $-\infty$ до $+\infty$, Q — характеристика напряжённости экзотического поля Ψ , поддерживающего статичность. Здесь и далее скорость света $c = 1$. Заметим, что МТ-модель обладает нулевой массой. Для наблюдателя, покоящегося в системе отсчёта (3), в любой точке гравитационная сила отсутствует.

Нетривиальная пространственная топология статических кротовых нор приводит ко многим интересным свойствам. Во-первых, такая топология позволяет протекать сквозь кротовые норы веществу, излучению и информации из одних областей пространства в другие или даже из пространства одной вселенной в пространство другой вселенной в модели Мультивселенной (см. об этом далее). Во-вторых, это ведёт к особенностям электродинамики кротовых нор, что впервые отметил Дж. Уилер [29, 30]. Впоследствии эти вопросы рассматривались в целом ряде работ (см. [31] и приведённые там

ссылки). Наиболее интересной является возможность существования электрического поля, силовые линии которого идут по радиусам в "нашем" пространстве А, входят вдоль радиусов в кротовую нору и выходят вдоль радиусов в пространстве В. Поле имеет монополярный характер вблизи каждого входа, хотя источник поля отсутствует. Уилер называл такое решение "заряд без заряда". Разумеется, аналогичное решение возможно и для магнитного поля. Другие возможные конфигурации поля представлены в [31].

Интересно также рассмотреть процессы, возникающие в случае, когда в статическую кротовую нору посылается узкий пучок излучения с положительной энергией. Такая задача рассмотрена в [10]. Для решения необходимо совместно рассмотреть в рамках ОТО эволюцию пространства-времени кротовой норы и физических полей: безмассового экзотического скалярного поля Ψ , первоначально поддерживающего кротовую нору в статическом равновесии, и безмассового поля Φ , описывающего поток излучения энергии сквозь кротовую нору. Для простоты в качестве поля Φ было выбрано безмассовое скалярное поле с положительной плотностью энергии ε . Совместное решение уравнений Эйнштейна и уравнений Клейна–Гордона для полей Ψ и Φ приводит к результатам, представленным ниже. Вычисления удобно проводить в дважды нулевых координатах u и v , в которых сферический линейный элемент выражается в виде

$$ds^2 = -2 \exp(2b(u, v)) du dv + r^2(u, v) d\Omega^2, \tag{4}$$

где $b(u, v)$ и $r(u, v)$ являются функциями координат u, v .

Мы рассматривали впрыскивание в МТ-кротовую нору узкого пучка Φ -поля с относительной амплитудой $A_\Phi = 0,01$ (по отношению к начальной амплитуде поддерживающего поля Ψ) со стороны "нашего" пространства А (см. [10]). Результаты вычислений представлены на рис. 2, 3. На рисунке 2 изображена эволюция струк-

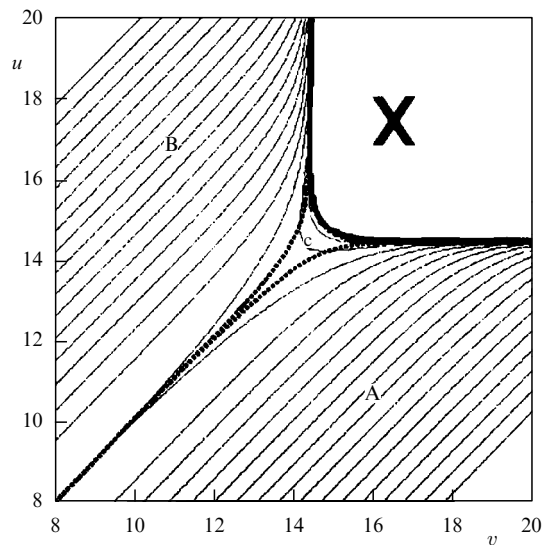


Рис. 2. Эволюция в (u, v) -координатах МТ-кротовой норы после впрыскивания Φ -импульса. А — наша вселенная, В — другая вселенная. Жирная линия — $(r = 0)$ -сингулярность, возникающая в результате сжатия. Пунктирные линии — возникающие горизонты видимости, тонкие сплошные линии — контуры $r = \text{const}$, с — возникающая T_- -область, косой крест — область вне расчёта за $(r = 0)$ -сингулярностью.

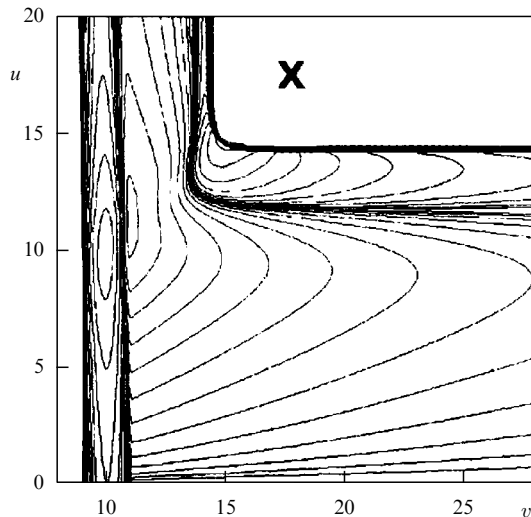


Рис. 3. Прохождение узкого Φ -импульса сквозь МТ-кротовую нору. Тонкие кривые — контуры рассеяния Φ -поля. Косой крест — область вне расчёта. Жирная линия — $r = 0$.

туры пространства-времени после поступления Φ -импульса. "Наше" А-пространство в (u, v) -координатах находится в нижней части рис. 2. После вхождения импульса Φ в кротовую нору добавочная гравитация, вызванная Φ -полем, заставляет кротовую нору начать сжиматься. Возникают горизонты событий с каждой стороны пространства. Затем появляется истинная сингулярность $r = 0$, пространственноподобная, как и в шварцшильдовской метрике. Узкий импульс Φ -поля распространяется вдоль u -направления со скоростью света. Φ -поле взаимодействует с кривизной пространства-времени и частично рассеивается. Из рисунка 3 видно, что, несмотря на возникновение сингулярности $r = 0$, горизонтов и рассеяния, основная часть энергии узкого потока Φ -поля (почти вертикальные линии в левой части рисунка) проходит из "нашего" пространства в другое, неся информацию. Если выпустить другой сигнал со скоростью света из нашего пространства заметно позднее начального импульса (по v -координате), то соответствующая мировая линия упрётся в сингулярность $r = 0$ и не сможет пройти в другое пространство. На рисунке 3 критическое значение v -координаты составляет $v_c \approx 13,5$. В этом смысле МТ-кротовая нора неустойчива. Малое возмущение разрушает её. Однако она успевает пропустить излучение и информацию из одного пространства в другое.

Следует отметить, что возможны заполненные специальным экзотическим веществом кротовые норы, которые устойчивы к малым возмущениям (см. [11, 12, 32]).

Помимо вопросов устойчивости моделей статических кротовых нор существуют другие важные вопросы, связанные с их физическими свойствами. Это прежде всего касается свойств экзотической материи, которой должны быть заполнены статические кротовые норы. Свойства экзотической материи необычны, и далеко не все физики с ними могли согласиться. Полностью приемлемой для всех физиков самосогласованной полевой модели статической кротовой норы до сих пор не существует.

В настоящей статье мы не будем обсуждать детально эту сторону вопроса, поскольку она выходит за рамки нашей задачи. В дополнение к вышеприведённой цитате

из книги К. Торна [3] о возможных путях возникновения кротовых нор во Вселенной приведём ещё одно, более скептическое, высказывание того же автора:

"Несмотря на то что проходимые кротовые норы допустимы с точки зрения законов физики, я считаю их естественное возникновение в реальной Вселенной крайне маловероятным. Хотя должен признаться, что это является скорее догадкой, чем обоснованным предположением"³.

3. Модели Мультивселенной с пространственноподобными кротовыми норами

Обратимся теперь к пространственноподобным моделям кротовых нор и к моделям Мультивселенной. Простейшей моделью Мультивселенной является МТ-кротовая нора, которая соединяет два асимптотически плоских пространства — две вселенные, с бесконечным собственным временем существования каждая, соединённые между собой узким перешейком-горловиной. Разумеется, эта модель, как и две последующие, не имеет прямого отношения к нашей нестатической Вселенной.

Другой простейшей моделью Мультивселенной является метрика Крускала [26] — максимальное аналитическое расширение метрики Шварцшильда (рис. 4). На рисунке 4 (и последующих рисунках) решения изображены в диаграммах Пенроуза–Картера [26], в которых специальными математическими преобразованиями бесконечно удалённые точки пространства-времени переносятся на конечные расстояния. На рисунке 4 также имеются два асимптотически плоских на бесконечности пространства, существующих бесконечно время. Однако здесь они соединены непроходимой динамической кротовой норой — мостом Эйнштейна–Розена. Часто эту модель называют "чёрно-белой дырой" или "вечной чёрной дырой" (см., например, [26]). Однако ясно, что это не дыра в общепринятом смысле — она не возникает как результат коллапса чего бы то ни было. Правильнее

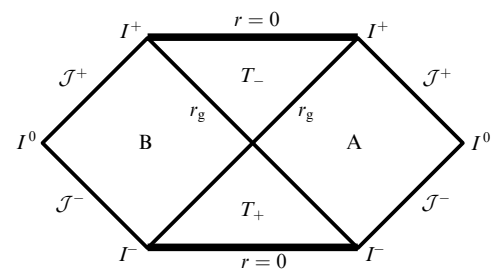


Рис. 4. Диаграмма Пенроуза–Картера для метрики Крускала, изображающая Мультивселенную, состоящую из двух пустых вселенных, А и В, соединённых непроходимым мостом Эйнштейна–Розена. I^0 — пространственная бесконечность, I^+ — бесконечно будущее, I^- — бесконечно прошлое, J^+ — световое будущее, J^- — световое прошлое, T_+ — расширяющаяся T -область, T_- — сжимающаяся T -область, $r = 0$ — сингулярность пространства-времени.

³ "If traversable wormholes are allowed by laws of physics, I think it extremely unlikely they can exist naturally, in real universe. I must confess, though, that this is little more than speculation, not even an educated guess" [3, Ch. 14].

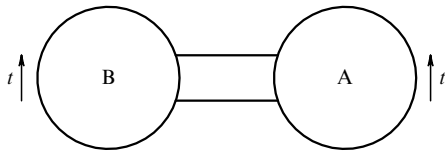


Рис. 5. Две вселенные, А и В, соединённые пространственноподобной кротовой норой.

рассматривать метрику Крускала как модель Мультивселенной.

Ещё одна точная модель статической Мультивселенной построена в [14]. В этой модели присутствует материя трёх типов: центрально-симметричное электрическое (или магнитное) поле, космологический Λ -член и экзотическая пыль с $\epsilon < 0$. Зависимость профиля $r^2 \equiv g_{22}$ от радиальной координаты R даётся выражением

$$r^2(R) = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\Lambda q^2} \cos(2\sqrt{\Lambda}R)}{2\Lambda}. \quad (5)$$

Мультивселенная представляется здесь бесконечной последовательностью статических вселенных, соединённых статическими горловинами.

Наконец, приведём пример Мультивселенной, которая может иметь отношение к реальному миру, включающему в себя нашу Вселенную [33].

Модель представляет собой два почти замкнутых (полузамкнутых) мира [34–37], соединённых динамической кротовой норой. Каждый из полузамкнутых миров вселенных рассчитан в работах [35, 36]. Соединение этих двух миров в одну Мультивселенную представлено в [33] в качестве точного решения уравнений Эйнштейна. В той же работе [33] показано, что подобным образом можно соединять не только полузамкнутые космологические миры Фридмана, но и полузамкнутые вселенные с открытыми пространствами. Возможны и другие комбинации.

В этих моделях возможна в ограниченном виде посылка сигнала из одной вселенной в соединённую с ней другую (скажем, из вселенной А во вселенную В (рис. 5)). Ограничения сводятся к тому, что сигнал для его успешного прохождения из А в В должен быть послан из А на ранних стадиях её расширения, а в В он будет принят достаточно поздно. Возможна посылка сигнала из В в А, но только если из В он выйдет достаточно рано.

Во всех случаях динамическая кротовая нора, связывающая вселенные, является крускаловской пространственноподобной кротовой норой.

Схематически простейшие модели Мультивселенной, рассмотренные до сих пор, изображены на рис. 5. Они представляют собой два мира с различной структурой, соединённых пространственноподобной кротовой норой (проходимой или непроходимой). В этом смысле они схожи с трубопроводами между соседними квартирами. Время внутри каждого мира течёт, как показано на рис. 5, от минус бесконечности до плюс бесконечности независимо в каждой вселенной.

4. Модели Мультивселенной со времениподобными кротовыми норами

Совершенно иной характер имеет структура Мультивселенной со времениподобными кротовыми норами. На

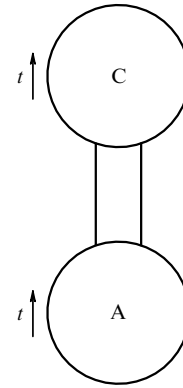


Рис. 6. Две вселенные, А и С, соединённые времениподобной кротовой норой.

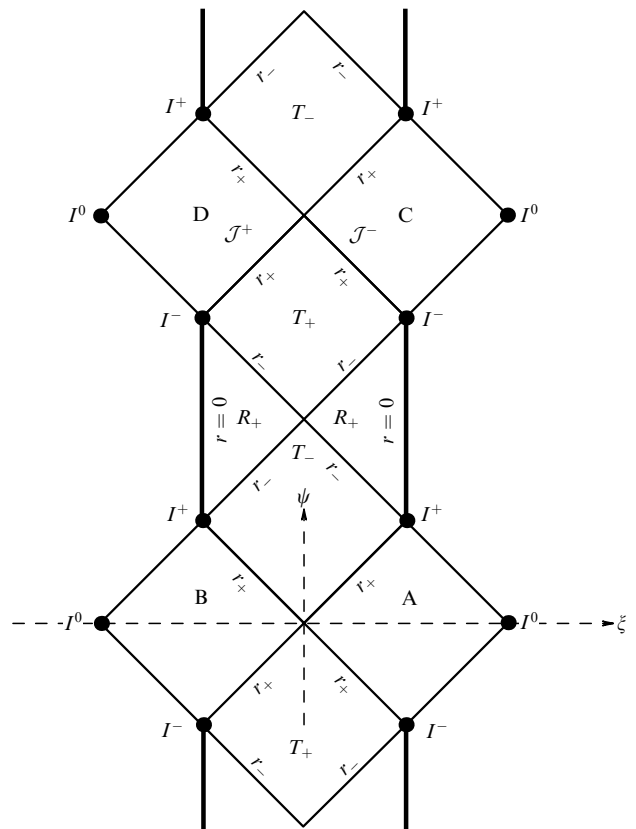


Рис. 7. Метрика Рейснера – Нордстрёма. А, В, С, D – асимптотически плоские вселенные, ψ – временная координата, ξ – пространственная координата, I^0 – пространственная бесконечность, I^+ – бесконечно будущее, I^- – бесконечно прошлое, T_+ – расширяющаяся T -область, T_- – сжимающаяся T -область, $r = 0$ – сингулярность пространства-времени, r_+ – горизонт событий, r_- – горизонт Коши.

рисунке 6 схематично представлена модель такого рода. Время внутри каждого мира течёт, как указано стрелками. Типичным представителем таких моделей является максимальное расширение метрики Рейснера – Нордстрёма, где цепочка миров неограниченно продолжается от прошлого к будущему (рис. 7).

Каждый из асимптотически плоских миров с электрическим полем, А и В, связанных непроходимым пространственноподобным мостом Эйнштейна – Розена, со-

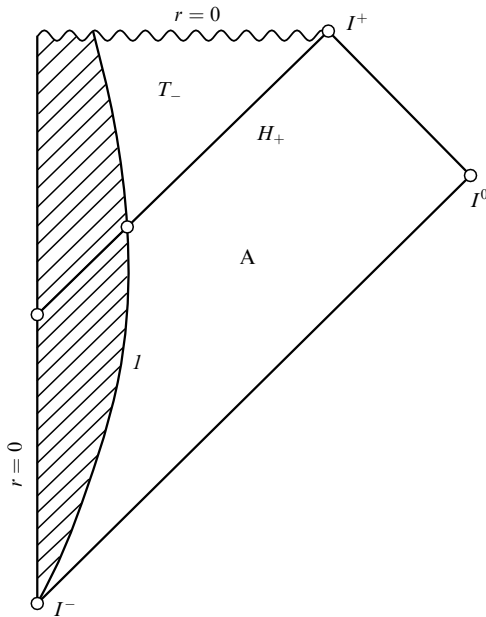


Рис. 8. Коллапс шара из незаряженной материи с образованием чёрной дыры. А — "наша" вселенная, I — мировая линия поверхности шара, H_+ — горизонт событий чёрной дыры, I^0 — пространственная бесконечность, I^+ — бесконечно будущее, I^- — бесконечно прошлое, вертикальная линия $r = 0$ — центр шара, волнистая линия $r = 0$ — сингулярность пространства-времени.

единяется с двумя аналогичными мирами, С и D, времениподобными кротовыми норами.

Путешествие, скажем, из А в С или D возможно, как отмечалось во введении, т.е. это проходимые времениподобные кротовые норы. В обратном направлении такие норы непроходимы. Это было бы движение против направления времени.

Как упоминалось во введении, максимальное расширение решения Рейснера–Нордстрёма часто называют электрически (или магнитно) заряженной чёрной дырой (см., например, [6, p. 23], [10], [16, pp. 8, 12, 37, 115], [17, 26]). На самом деле это, конечно, не чёрная дыра, так как такое решение Рейснера–Нордстрёма описывает не результат коллапса чего-либо, а модель Мультивселенной с бесконечным числом отдельных миров, каждый из которых существует в течение бесконечного собственного времени.

Подобно этому, как подчёркивалось в разделе 3, всюду пустое решение Крускала представляет собой не чёрную дыру (так как не является результатом коллапса вещества), а модель Мультивселенной с двумя пустыми мирами, в каждом из которых собственное время течёт от минус бесконечности до плюс бесконечности⁴.

Если мы хотим обратиться к образованию незаряженной чёрной дыры, необходимо взять только часть метрики Крускала и соединить её с коллапсирующей материей, как показано на рис. 8. Материя сжимается к истинной сингулярности $r = 0$, которая пространственноподобна. Её нельзя рассматривать как следствие — результат сжатия вещества до нулевых размеров, поскольку пространственноподобная ориентация сингуляр-

ности от точки сжатия вещества означала бы её движение со сверхсветовой скоростью. Сингулярность возникает как результат эволюции всей пустой области T_- . Есть система отсчёта, в которой сингулярность появляется одновременно. Возникает естественный вопрос: что произойдёт в результате гравитационного коллапса заряженного сферического вещества под свой гравитационный радиус (свой горизонт событий)? Какой объект при этом возникает? Для исследования этого вопроса и других рассматриваемых ниже проблем проанализируем эволюцию заряженной сферы (оболочки) в рамках ОТО. Исключение из задачи внутренней материи сферического тела упрощает решение (см. [17, 24]). Также для простоты будем рассматривать пылевую оболочку. Рассмотрим решение, когда внутренность оболочки пуста и является пространством-временем Минковского. Метрика вне пузыря описывается решением Рейснера–Нордстрёма и в шварцшильдовских координатах имеет вид

$$ds^2 = -F^2 dt^2 + F^{-2} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (6)$$

где

$$F^2 = 1 - \frac{2m}{r} + \frac{Q^2}{r^2},$$

Q — напряжённость электрического поля, m — полная масса системы. Принято $c = 1$, $G = 1$. В структуре на рис. 7 предполагается $m > |Q|$.

Совокупность уравнений Эйнштейна и Максвелла для данной задачи приводит к следующему уравнению движения оболочки:

$$m = M(1 + \dot{R}^2)^{1/2} - \frac{M^2 - Q^2}{2R}. \quad (7)$$

Здесь R — радиус оболочки в момент собственного времени τ , \dot{R} — производная R по τ , M — полная собственная масса оболочки (т.е. сумма масс составляющих её пылинок).

Решение $R = R(\tau)$ зависит от констант M , m и Q . Качественный анализ решения легко проводится. Нетрудно определить, что при $Q^2 < M^2 < m^2$ решение выглядит, как показано на рис. 9. Здесь траектория $R(\tau)$ начинается в "нашей" вселенной А, пересекает горизонт событий r_+ , что является моментом коллапса заряженной оболочки, уходит под её горизонт событий (о горизонте r_- см. далее) и приходит к истинной сингулярности $r = 0$. Качественно всё происходит так же, как и при коллапсе электрически нейтральной пыли, только сингулярность $r = 0$ оказывается времениподобной! Она не является результатом эволюции к нулевым размерам коллапсирующего заряженного вещества и существует всегда в собственном времени, так же как и в электропустой метрике Рейснера–Нордстрёма. Никаких вселенных в будущем здесь нет. Таким образом, это не кротовая нора, а коллапс (см. рис. 9).

Рассмотрим теперь другое решение уравнения (7) при иных значениях констант. Пусть $M^2 < Q^2 < m^2$. Эволюция качественно показана на рис. 10. Часть эволюционной кривой, лежащая в "нашей" вселенной, выглядит так же, как и предыдущее решение, описывающее коллапс с образованием заряженной чёрной дыры. Но далее сжатия до нулевого размера не происходит, а сжатие сме-

⁴ Хотя отметим, что оба мира, А и В, связаны с эволюцией начальной сингулярности $r = 0$ и они совместно порождают конечную сингулярность $r = 0$.

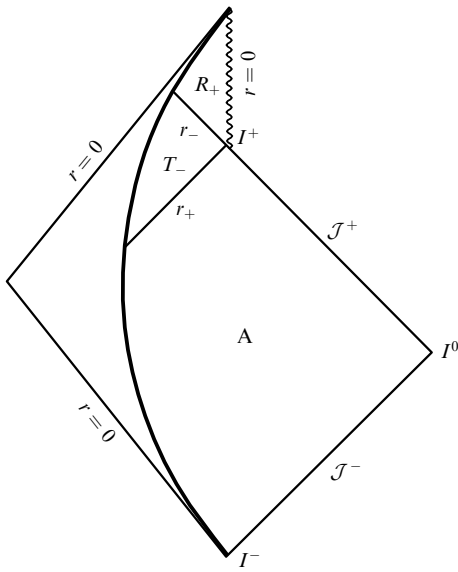


Рис. 9. Коллапс заряженной тяготеющей оболочки (жирная кривая). А — "наша" вселенная, r_+ — горизонт событий, r_- — горизонт Коши, R_+ — внутренняя R-область, сплошная линия $r = 0$ — центр шара, волнистая линия $r = 0$ — сингулярность пространства-времени, I^0 — пространственная бесконечность, I^+ — бесконечно будущее, I^- — бесконечно прошлое, J^+ — световое будущее, J^- — световое прошлое.

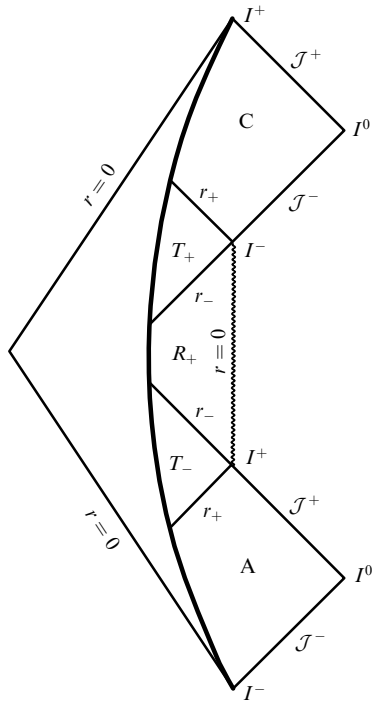


Рис. 10. Пролёт тяготеющей заряженной оболочки из вселенной А во вселенную С — жирная кривая. I^0 — пространственная бесконечность, I^+ — бесконечно будущее, I^- — бесконечно прошлое, J^+ — световое будущее, J^- — световое прошлое, r_+ — горизонт событий, r_- — горизонт Коши, сплошная линия $r = 0$ — линия центра шара, волнистая линия $r = 0$ — сингулярность пространства-времени.

няется расширением в другую вселенную, С, лежащую в абсолютном будущем по отношению к "нашей". Таким образом, решение на рис. 10 — это не коллапс, а кротовая нора между вселенными А и С.

Наконец, заметим, что при $Q^2 < m^2 < M^2$ эволюция, если мы её рассматриваем начиная с "нашей" вселенной, протекает качественно так же, как и в случае $Q^2 < M^2 < m^2$. Эти замечания важны с точки зрения астрофизических проявлений времениподобных кротовых нор (см. раздел 5).

Отметим также следующую важную особенность максимально расширенного решения Рейснера–Нордстрёма: в нём имеются внутренние горизонты — линии r_- на рис. 7. Они соответствуют меньшим корням уравнения $F = 0$. Эти горизонты, называемые горизонтами Коши, отделяют области, эволюция в которых полностью определяется предыдущей эволюцией системы, от областей, на эволюцию в которых влияют дополнительные обстоятельства. Так, горизонт r_- (1) на рис. 7 отделяет область предыдущей эволюции от области R_+ , в которой необходимо рассматривать дополнительное влияние, например, сингулярности $r = 0$.

Наличие горизонтов Коши обуславливает возможность протекания существенно различной последующей эволюции в двух решениях при абсолютной одинаковости предыдущей эволюции в "нашей" вселенной А. Горизонты Коши отделяют область одной вселенной, включая и T_+ -область (относящуюся, по существу, уже к началу кротовой норы), от областей R_+ , относящихся собственно к кротовой норе, и области T_- , являющейся её окончанием, от других вселенных, С, D, лежащих в абсолютном будущем по отношению к А и В. В этих других вселенных протекают свои процессы, в основном независимые от А и В, за исключением некоторого влияния через кротовую нору.

Пример независимого в С процесса приведён на рис. 11, где в С происходит эволюция оболочки, не зависящая в основном от вселенных А и В. Внутри этой оболочки не пустое пространство-время, а метрика Крускала (в верхней правой части рис. 11).

На рисунке 12 представлен процесс во вселенной С, подверженный существенному влиянию вселенной А через кротовую нору. Он является объединением процессов, показанных на рис. 10, 11, и заканчивается столкновением оболочек. Хотя в принципе оболочки, начинающей эволюцию в области С (оболочки I), могло бы и не быть. Начало её эволюции не зависит от А.

В заключение этого раздела напомним, что рассмотренные времениподобные кротовые норы Рейснера–Нордстрёма представляют собой только один из возможных типов кротовых нор этого класса. Существует множество других. Так, другим представителем этого класса является максимальное расширение решения Керра с вращением [22]. Многие топологические особенности этого решения схожи на рассматриваемые здесь. Главное отличие состоит в более сложном строении переходной зоны и более сложном строении сингулярности $r = 0$. Здесь мы на этом останавливаться не будем. Разумеется, керровские кротовые норы с вращением особенно важны с точки зрения обсуждения их астрофизики (см. раздел 5).

Другое заключительное замечание касается особенности топологической структуры кротовой норы Рейснера–Нордстрёма. Как видно из рис. 7, в переходную область T_- ведут два разных входа из двух разных вселенных, А и В, а из области T_+ два разных выхода — в разные вселенные, С и D. Таким образом, можно сказать, что выходящие из А и В два тоннеля сли-

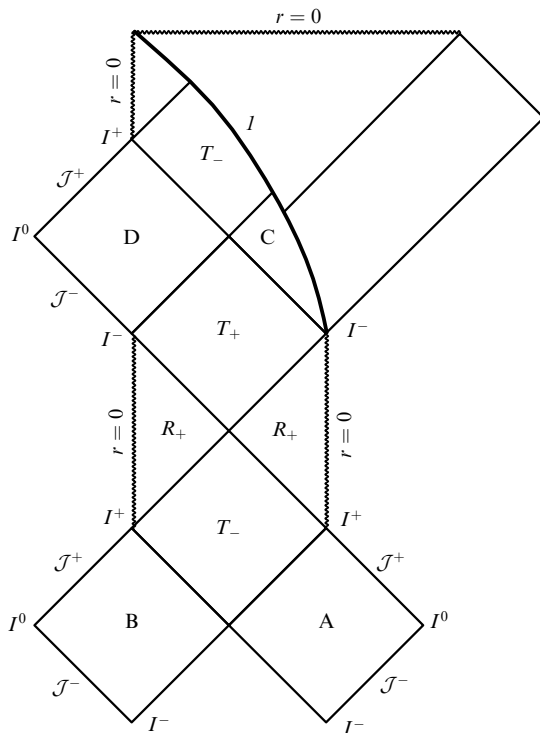


Рис. 11. Эволюция в С-вселенной оболочки I , содержащей внутри себя метрику Крускала (в верхней правой части рисунка). Эта эволюция не является следствием событий во вселенной А. Обозначения те же, что и на предыдущих рисунках.

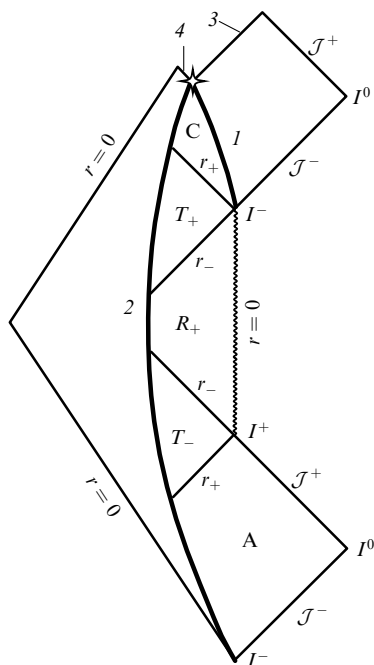


Рис. 12. Эволюции тяготеющих заряженных оболочек 1 и 2 , начала которых независимы друг от друга. Эволюции заканчиваются их столкновением (изображено звездой). 3 и 4 — сигналы от столкновения, распространяющиеся со скоростью света. Остальные обозначения те же, что и на предыдущих рисунках.

ваются в один в R_+ -области, а затем разделяются на два в T_+ -области. Такова "гонкая" структура этой кротовой норы.

5. Обсуждение. Заключение

Прежде всего подчеркнём ещё раз, что кротовые норы до сих пор являются гипотетическими теоретическими объектами. Относительно их возможного существования в реальном мире имеются различные мнения. В дополнение к приведённому в разделе 1 мнению К. Торна относительно возможных путей образования кротовых нор процитируем ещё двух известных авторитетных исследователей.

Так, М. Виссер пишет:

"Что касается моего мнения, то я считаю, что все возможности, обсуждённые в этой монографии (монографии [6]), должны быть исследованы далее... Предварительно, моё мнение таково:

- изменение топологии — плохое предположение;
- проходимые кротовые норы — хорошее предположение;
- путешествие во времени — плохое предположение"⁵.

Другой известный специалист, в том числе по гипотезе Мультивселенной, А. Линде писал [38, р. 625] о свойствах кротовых нор после инфляции: «Типичная толщина "труб", связывающих минивселенные после инфляции, может становиться очень большой»⁶.

Таким образом, исследование кротовых нор имеет важное и теоретическое, и, вероятно, практическое с точки зрения астрофизики значение [39].

Как отмечалось в разделе 4, важнейшую принципиальную роль во времениподобных кротовых норах играет горизонт Коши. Многочисленные работы посвящены исследованию структуры пространства-времени в окрестности горизонта Коши, где переплетается сложная игра взаимодействия разного рода возмущений [26, 40–43]. В результате, по-видимому, здесь возникает истинная сингулярность пространства-времени, однако очень слабая в значительной части своей протяжённости. Сильной сингулярностью называют такую сингулярность (например, $r = 0$ в решении Шварцшильда), при падении в которую любое тело разрушается приливными силами. В рассматриваемой слабой сингулярности (mild singularity) приливные силы также стремятся к бесконечности, однако интеграл от их действия по траектории свободного падения остаётся конечным, т.е. тело не разрушается. Таким образом, пересечение объектом слабой сингулярности может оказаться малозаметным. Тело может двигаться дальше. Окончательный ответ на вопрос о исходе пересечения сингулярности можно дать только после создания квантовой теории тяготения, так как её эффекты будут определяющими в момент прохождения сингулярности. Здесь мы будем предполагать, что слабая сингулярность проходима. Это мнение разделяют многие специалисты.

Рассмотренные особенности слабой сингулярности были выяснены главным образом при исследовании устойчивости горизонта Коши в решении Керра (см.

⁵ "What are my personal choices? I think that all the possibilities discussed in this monograph should be investigated to some extent... Tentatively my own views are

- Topology change is bad.
- Traversable wormholes are good.
- Time travel is bad" [6, p. 374].

⁶ "Typical thickness of 'tubes' connecting mini-universes after inflation may become very large" [38, p. 625].

[16]). Это связано с тем, что, в отличие от гравитационного и электромагнитного полей, возмущения которых надо рассматривать при исследовании решений Рейснера–Нордстрёма, в решении Керра имеется только гравитационное поле, и в некотором смысле задача упрощается. Подытоживая ситуацию, Бурко и Ори пишут [16]: "Более того, ничто в нашем настоящем понимании теории гравитации не указывает на невозможность продолжить геометрию за пределы внутреннего горизонта (горизонта Коши)"⁷. Отсюда они делают вывод о том, что керровский тип причинной структуры (т.е. гравитационный отскок сквозь кротовую нору) не может быть исключён.

Нас интересует структура пространства-времени при наличии горизонта Коши, и мы не будем вообще рассматривать тот факт, что последний может оказаться сингулярным. Согласно заключению [40] горизонт Коши сохраняется. Однако данный вопрос подлежит дальнейшему исследованию, которое мы оставим на будущее.

Мы не будем здесь также обсуждать неясный вопрос о возможных проявлениях неустойчивости выходов из белых дыр (см. [26]).

Учтём, что керровские кротовые норы [26] и, вероятно, многие другие обладают топологическими свойствами, аналогичными обсуждаемым здесь, и поэтому будем рассматривать наши заключения, имеющие общий характер, без дальнейших оговорок, принимая во внимание, что важнейшие из них мы уже сделали. Поэтому замечания, касающиеся наблюдательных проявлений кротовых нор Рейснера–Нордстрёма, относятся и к общему случаю времениподобных кротовых нор.

Заметим, что наблюдательные проявления статических кротовых нор неоднократно детально анализировались (см. [44]). Большинство из этих проявлений связано с возможностью протекания через такие норы материи в обе стороны и с топологическими особенностями строения трёхмерного пространства в этих норах, которые приводят к возможности, например, специальной структуры магнитного поля в их окрестности, носящего монополярный характер. Однако для существования статических кротовых нор требуется их наполнение экзотической материей специальных видов. Поэтому понятно, что даже если кротовые норы существуют, то наиболее вероятно, что они являются динамическими пространственно- и времениподобными.

Предположим, что мы рассматриваем модель Мультивселенной с времениподобными кротовыми норами и аналогичными им объектами, рассмотренными в разделе 4. Каковы будут их наблюдательные проявления? Общим для всех них является асимметрия входа и выхода. Вход находится во вселенной, расположенной во времени раньше, чем другая вселенная, в которой находится выход. Во вход материя и излучение могут только поступать, но не могут выходить из него. В противном случае это было бы движение против направления течения времени. Будем называть такие входы чёрными входами. Они могут либо существовать независимо от какой-либо материи, как в случае метрики Рейснера–Нордстрёма, либо возникать в результате коллапса гравитирующей массы. Это может быть или

вход в чёрную дыру, который ведёт в сингулярность (см. рис. 9), или проход в другую вселенную (см. рис. 10). Заметим, что после пересечения горизонта Коши эволюция определяется не только тем, что происходит в исходной вселенной, но и дополнительными факторами. Таким образом, гравитационный коллапс объекта в нашей Вселенной может приводить к разной последующей эволюции внутри возникающего чёрного входа.

Рассмотрим теперь выходы из кротовой норы — белые дыры. Они могут располагаться в нашей Вселенной и могут являться выходами из времениподобных кротовых нор, исходящими из других вселенных (см. рис. 10), либо быть связанными с процессами в прошлом в переходной зоне, включая процессы с времениподобными сингулярностями. Именно исследование таких выходов — белых дыр — и представляет наибольший наблюдательный интерес, так как они несут информацию о других мирах Мультивселенной. Напомним, что всё сказанное относится не только к решению с электрическим или магнитным полем внутри релятивистских объектов (т.е. к решению Рейснера–Нордстрёма), но и к случаю наличия вращения даже в отсутствие какого-либо электромагнитного поля (т.е. к метрике Керра). Последнее особенно важно для астрофизики. Таким образом, гравитационный коллапс реальных вращающихся масс может приводить к образованию не только чёрной дыры с непроходимой сингулярностью внутри, но и, возможно, прохода сквозь кротовую нору в другие вселенные.

Заметим также, что времениподобные кротовые норы могут связывать области в пространстве-времени не только в разных вселенных, но и в одной и той же вселенной. Тогда они являются одновременно и машинами времени [26]. Кроме того, возможны такие комбинации: кротовая нора, связывающая, скажем, вселенные А и С, и другая кротовая нора, связывающая С и А в обратном направлении. В этом случае также образуется петля времени типа машины времени.

Заметим, что образование машины времени не приводит к каким-либо затруднениям с принципом причинности и не является с этой точки зрения каким-либо дополнительным затруднением для самой проблемы кротовых нор [26].

Разумеется, поиск таких необыкновенных объектов астрофизическими методами представляет исключительный интерес.

Наблюдательная проверка возможности существования кротовых нор, а значит, и существования Мультивселенной входит в программы исследований Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (космические проекты "Радиоастрон" и "Миллиметр").

Внешние части всех рассмотренных кротовых нор могут быть похожи на окрестности чёрных дыр, следовательно, процессы во внешнем пространстве у этих объектов могут быть схожими. Поэтому недавнее обнаружение излучения гравитационных волн, которое интерпретируется как процесс слияния двух чёрных дыр, будет проходить аналогично и при участии кротовых нор, а значит, с определённой интерпретацией следует быть осторожными.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников Астрокосмического центра ФИАН за обсуждение. Работа

⁷ "Moreover, nothing in our present understanding of the theory of gravity indicate to the impossibility of the extension of geometry beyond the inner horizon" [16, p. 6].

частично поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-6595.2016.2, грантом 15-02-00554 Российского фонда фундаментальных исследований и программой фундаментальных исследований Президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике" (1.7П, П-7). Автор благодарен рецензентам статьи за существенные замечания, а также С. Репину за помощь.

Список литературы

1. Flamm L *Phys. Z.* **17** 448 (1916)
2. Einstein A, Rosen N *Phys. Rev.* **48** 73 (1935)
3. Thorne K *The Science of Interstellar* (New York: W.W. Norton and Co., 2014); Пер. на русск. яз.: Торн К *Интерстеллар, наука за кадром* (М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015)
4. Armendáriz-Picón C *Phys. Rev. D* **65** 104010 (2002)
5. Morris M S, Thorne K S *Am. J. Phys.* **56** 395 (1988)
6. Visser M *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (New York: Springer-Verlag, 1996)
7. Shinkai H, Hayward S A *Phys. Rev. D* **66** 044005 (2002)
8. González J A, Guzmán F S, Sarbach O *Phys. Rev. D* **80** 024023 (2009)
9. Bronnikov K A, Grinyok S *Grav. Cosmology* **7** 297 (2001)
10. Doroshkevich A et al. *Int. J. Mod. Phys. D* **18** 1665 (2009)
11. Bronnikov K A et al. *Grav. Cosmology* **19** 269 (2013)
12. Новиков И Д, Шацкий А А *ЖЭТФ* **141** 919 (2012); Novikov I D, Shatskiy A A *JETP* **114** 801 (2012)
13. Carr B (Ed.) *Universe or Multiverse?* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007)
14. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008); Shatskiy A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)
15. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Релятивистская астрофизика* (М.: Наука, 1967)
16. Burko L M, Ori A (Eds) *Internal Structure of Black Holes and Spacetime Singularities* (Annuals of the Israel Physical Society Series, Vol. 13) (Bristol: IOP Publ., 1997)
17. Березин В А, Докучаев В И *Глобальная геометрия пространства-времени с заряженной оболочкой* (М.: ИЯИ РАН, 2013); Пер. на англ. яз.: Berezin V, Dokuchaev V *Global Geometry of Space-Times with Shells* (New York: Nova Science Publ., 2014)
18. Doroshkevich A et al. *Phys. Rev. D* **81** 124011 (2010)
19. Новиков И Д *Письма в ЖЭТФ* **3** 223 (1966); Novikov I D *JETP Lett.* **3** 142 (1966)
20. De la Cruz V, Israel W *Nuovo Cimento A* **51** 744 (1967)
21. Bardeen J M *Bull. Am. Phys. Soc.* **13** 41 (1968)
22. Kerr R P *Phys. Rev. Lett.* **11** 273 (1963)
23. Israel W *Phys. Rev.* **153** 1388 (1967)
24. Boulware D G *Phys. Rev. D* **23** 63 (1973)
25. Черепашук А М *УФН* **166** 809 (1996); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **39** 759 (1996)
26. Frolov V P, Novikov I D *Black Hole Physics, Basic Concepts and New Developments* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998)
27. Новиков И Д, Фролов В П *Физика черных дыр* (М.: Наука, 1986)
28. Ellis H G *J. Math. Phys.* **14** 104 (1973)
29. Wheeler J A *Phys. Rev.* **97** 511 (1955)
30. Wheeler J A *Geometrodynamics* (New York: Academic Press, 1962)
31. Бескин В С и др. *Астрон. журн.* **88** 819 (2011); Beskin V S et al. *Astron. Rep.* **55** 753 (2011)
32. Garcia N M, Lobo F S N, Visser M *Phys. Rev. D* **86** 044026 (2012); arXiv:1112.2057
33. Новиков И Д, Шацкий А А, Новиков Д И *Астрон. журн.* **92** 379 (2015); Novikov I D, Shatskiy A A, Novikov D I *Astron. Rep.* **59** 339 (2015)
34. Klein O, in *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit* (Eds G Beck et al.) (Braunschweig: F. Vieweg, 1961) p. 58
35. Новиков И Д *Астрон. журн.* **40** 772 (1963); Novikov I D *Sov. Astron. Rep.* **7** 587 (1964)
36. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **43** 1037 (1962); Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **16** 732 (1963)
37. Harrison B K et al. *Gravitation Theory and Gravitational Collapse* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1965)
38. Linde A, in *Three Hundred Years of Gravitation* (Eds S W Hawking, W Israel) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987) p. 625
39. Новиков И Д *УФН* **186** 790 (2016); Novikov I D *Phys. Usp.* **59** 713 (2016)
40. Ori A *Phys. Rev. Lett.* **67** 789 (1991)
41. Bonanno A et al. *Proc. R. Soc. Lond. A* **450** 553 (1995)
42. Marolf D, Ori A *Phys. Rev. D* **86** 124026 (2012)
43. Шил М А, Торн К С *УФН* **184** 367 (2014); Scheel M A, Thorne K S *Phys. Usp.* **57** 342 (2014)
44. Kardashev N S, Novikov I D, Shatskiy A A *Int. J. Mod. Phys. D* **16** 909 (2007)

A new concept of wormholes and the Multiverse

I.D. Novikov

Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation; The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100, Copenhagen, Denmark; National Research Center "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation
E-mail: novikov@asc.rssi.ru

A new concept of a wormhole is reviewed. Classification of wormholes into three categories — static, space-like and time-like — is carried out, and the properties of each category are considered. The relation between wormholes and black holes is examined. The astrophysical properties of wormholes are investigated.

Keywords: wormholes, Einstein general theory of relativity, Multiverse

PACS number: **98.80. – k**

Bibliography — 44 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (3) 301 – 310 (2018)

Physics – Uspekhi **61** (3) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.09.038204>

Received 11 April 2017, revised 11 September 2017
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.09.038204>