

Чёрные дыры, кротовые норы и машины времени

И.Д. Новиков

Рассмотрены история исследования и современное состояние исследования трёх важнейших теоретических открытий общей теории относительности Эйнштейна: чёрных дыр, кротовых нор и машины времени.

Ключевые слова: чёрные дыры, кротовые норы, машины времени, общая теория относительности Эйнштейна

PACS number: 98.70.Vc

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037768

Общая теория относительности Эйнштейна — величайшая научная теория современности — была создана столет тому назад. Сразу после этого были сделаны три замечательных теоретических открытия:

- 1) чёрные дыры;
- 2) кротовые норы;
- 3) машины времени.

Чёрные дыры в рамках общей теории относительности были предсказаны в 1915 г. (разумеется, в то время эти объекты так не назывались; название "чёрные дыры" было предложено Дж. Уиллером в 1968 г. [1] (см. детали в [2])) немецким физиком и астрономом К. Шварцшильдом (см. об этом в [3, 4]), решившим уравнения Эйнштейна для случая сферической чёрной дыры в вакууме. Свойства этого решения были крайне необычными. Прежде всего, оказалось, что чёрная дыра не обладает материальной поверхностью, но имеет границу в пустоте — сферу так называемого гравитационного радиуса $r_g = 2GM/c^2$, где M — масса, G — постоянная тяготения, c — скорость света. На границе r_g сила тяготения обращается в бесконечность. Тела и излучение могут проникнуть внутрь этой сферы, но ничто не может вылететь наружу. Время для неподвижного наблюдателя вблизи r_g замедляет свой бег и на r_g вовсе замирает. Геометрия пространства отличается от евклидовой, приобретает характер трёхмерной воронки.

Эти свойства были настолько необычными, что никто из физиков не рассматривал тогда чёрные дыры всерьёз.

К. Торн пишет: «Чёрные дыры "дурно пахли", они были слишком противостественны. В то время никто не рассматривал чёрные дыры как серьёзное предсказание теории» [3, с. 130].

Шли годы, но существенного прогресса в исследовании чёрных дыр не было.

«В тридцатые годы появилась тенденция к серьёзному рассмотрению чёрных дыр... [но] "признанные ав-

торитеты" начали недвусмысленно выражать своё отрицание этих ужасных объектов...» (К. Торн, [3, с. 131]).

Что было причиной столь резко отрицательного отношения некоторых корифеев науки, в том числе создателей релятивистской теории, к проблеме чёрных дыр? По-видимому, главной причиной были упомянутые выше удивительные свойства нематериальной границы чёрной дыры, называемой теперь горизонтом событий. Эти необычные свойства вели к эмоциональному отрицанию самой возможности возникновения в вакууме горизонта событий. Приведём ниже несколько высказываний, звучащих иногда фантастически.

"Есть некоторый магический круг, и никакие измерения не могут привести нас к его внутренним точкам. Весьма естественно предположить, что есть что-то, мешающее нам подойти ближе; мы скажем, что частица вещества заполняет всё внутреннее пространство". (Эддингтон [5], 1920 г.)

"Каждая гравитирующая частица имеет вокруг себя кольцо-забор, через который другая частица не может проникнуть". (Уиттекер [6], 1949 г.)

"Шварцшильдовская сингулярность отсутствует, так как вещество нельзя концентрировать произвольным образом; в противном случае частицы, образующие скопления, достигнут скорости света". (Эйнштейн [7], 1939 г.)

С течением времени ситуация с предсказанием чёрных дыр постепенно менялась. Недоразумения, связанные с ошибочной интерпретацией некоторых решений уравнений общей теории относительности, разяснялись. Наконец, в 1960-е годы чёрные дыры стали объектами серьёзных исследований. Стало ясно, что чёрные дыры являются дверью в новую, очень широкую область изучения физического мира.

Чёрные дыры были обнаружены во Вселенной астрофизическими методами, и с тех пор они являются объектами и теоретических, и наблюдательных исследований. Дальнейшие теоретические исследования обнаружили целый ряд новых свойств чёрных дыр, по необычности не уступающих тем свойствам, которые были известны с начальных периодов их изучения. Мы остановимся на некоторых из них. Как уже подчёркивалось, чёрные дыры не имеют материальной поверхности. Их горизонт событий является условной границей в пространстве-времени между областью, из которой излучение и тела могут улететь на бесконечность, и областью, из которой это невозможно. Тем не менее эта пустая граница во многих случаях ведёт себя как материальная

И.Д. Новиков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: novikov@asc.rssi.ru;
The Nielse 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

Статья поступила 1 апреля 2016 г.

поверхность, наделённая определёнными механическими, электромагнитными, тепловыми свойствами (см. [8]).

Начнём с электродинамики. Оказывается, чёрная дыра в определённых условиях может вести себя как динамо-машина. Представим себе металлический шар, в целом электронейтральный, в пустом пространстве, без каких-либо чёрных дыр. Что будет, если поместить этот шар в магнитное поле между полюсами магнита и заставить его вращаться вокруг оси, параллельной силовым линиям магнитного поля? Свободные электроны на поверхности шара при её движении относительно магнитных силовых линий под действием сил Лоренца будут перемещаться по поверхности и в зависимости от направления вращения соберутся либо у полюсов вращающегося шара, либо у экватора. В другом месте появится избыток положительного заряда. В результате такой поляризации возникнет электрическое поле квадрупольного типа. Если теперь соединить проводником полюс и экватор, то по проводнику побежит ток. Это общеизвестный униполярный индуктор, работающий как динамо-машина.

Вернёмся теперь к чёрным дырам. Предположим, что имеется вращающаяся чёрная дыра, находящаяся в упорядоченном магнитном поле, например в пространстве между двумя газовыми облаками. Для простоты считаем, что чёрная дыра вращается вокруг оси, параллельной силовым линиям поля. Решение уравнений Эйнштейна совместно с уравнениями Максвелла для электромагнитного поля даёт следующий результат. Во-первых, вращающаяся чёрная дыра вовлекает в сонаправленное вращение вокруг неё слои пространства, примыкающие к горизонту событий. Это приводит к тому, что и силовые линии магнитного поля вовлекаются в то же круговое движение. Движение магнитных силовых линий вызывает появление электрического поля квадрупольного типа, аналогичного электрическому полю вокруг металлического шара, вращающегося в магнитном поле. В результате, если соединить проводником полюс с экватором, то в проводнике потечёт ток. Вращающаяся чёрная дыра работает как динамо-машина, аналогично вращающейся материальной металлической сфере. Роль проводника в астрофизических условиях может играть разрежённая плазма. Не исключено, что подобный механизм действительно работает в ядрах активных галактик, содержащих чёрные дыры, вызывая наблюдаемые эффекты в ядрах таких галактик [2, 8, 9].

Теперь о термодинамике чёрных дыр. Прежде всего вспомним о некоторых квантовых свойствах пространства-времени в отсутствие чёрных дыр. Если в пустом пространстве осуществляется ускоренное движение жёсткой системы отсчёта с постоянным ускорением, то для наблюдателей в этой системе есть область пространства-времени, из которой они никаких сигналов получить не могут. Границу такой области можно назвать горизонтом. Квантовая физика утверждает, что в результате потери возможности получения части информации этими наблюдателями возникает тепловое излучение в пространстве с температурой

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi k c} = 10^{-42} (a[\text{см с}^{-2}]) [\text{К}], \quad (1)$$

где a — ускорение, \hbar — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, c — скорость света.

В то же время наблюдатель в инерциальной системе отсчёта не видит никакого излучения. Он видит обычные квантовые флуктуации с рождением и уничтожением пар частиц и античастиц.

Обратимся теперь к чёрным дырам. Здесь тоже имеется горизонт — горизонт событий. С. Хоукинг [10] в 1974 г. показал, что из-за этого наблюдатель, покоящийся относительно чёрной дыры, видит вблизи горизонта тепловую атмосферу, температура которой зависит от расстояния над горизонтом Z :

$$T = \frac{\hbar c}{2\pi k Z} = 10^{-7} \frac{M_{\odot}}{M} \left(\frac{r_g}{Z} \right) [\text{К}], \quad (2)$$

где M — масса чёрной дыры, M_{\odot} — масса Солнца. Большинство частиц атмосферы удерживается силами гравитации и падает на горизонт, вместо них возникают другие. Очень малая часть частиц улетает на бесконечность. Это знаменитое хоукинговское излучение, которое в принципе можно наблюдать. Мощность излучения

$$P = 10^{-20} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2} [\text{эрг с}^{-1}]. \quad (3)$$

Свободно падающий наблюдатель не видит тепловой атмосферы. Он видит обычные квантовые флуктуации виртуальных частиц. Тепловую атмосферу чёрной дыры можно использовать для исчерпания энергии чёрной дыры. Вообразим контейнер с зеркальными стенками и крышкой, который на подвесе можно поместить близко к горизонту чёрной дыры. Опустим контейнер с открытой крышкой почти до самого горизонта, он заполнится горячим излучением, закроем крышку, вытащим контейнер и удалим его на большое расстояние от горизонта. Теперь энергию горячего излучения можно использовать.

Обратимся теперь ко второму открытию, сделанному сразу после создания общей теории относительности, — к теоретическому открытию возможности существования кротовых нор. Это открытие принадлежит австрийскому физическому Л. Флааму [11]. Простейшую кротовую нору можно представить следующим образом. Имеется два входа в кротовую нору, снаружи похожих на чёрные дыры. Однако они не имеют горизонтов событий и соединяются коридором. Этот коридор лежит вне нашего пространства-времени в суперпространстве. Расстояние между входами во внешнем пространстве может быть произвольным. Длина коридора также произвольна. Кротовые норы могут соединять через коридор удалённые области нашей Вселенной. Если кротовая нора пуста, то под действием тяготения коридор быстро коллапсирует в сингулярность. Это непроходимые кротовые норы. Проходимость может быть обеспечена введением в кротовую нору так называемого экзотического вещества, обладающего огромным отрицательным давлением. Такое вещество создаёт антигравитацию, стабилизирующую кротовую нору. Сквозь проходимую кротовую нору возможны протекание вещества и прохождение излучения в обоих направлениях.

В то время как происхождение чёрных дыр известно и они давно обнаружены во Вселенной, происхождение кротовых нор и возможность их существования находятся под вопросом. Тем не менее мы выдвинули гипотезу о том, что кротовые норы реально существуют. Например, возможно, ядра некоторых галактик являются не сверхмассивными чёрными дырами, а входами в кротовые норы.

Заметим ещё раз, что наружные части кротовых нор очень близки к чёрным дырам. Поэтому, что касается процессов во внешнем пространстве, то для объектов обоих классов они похожи. В связи с этим подчеркнём, что недавнее обнаружение сигналов излучения гравитационных волн, которое интерпретируется как процесс слияния двух чёрных дыр, будет выглядеть похожим

образом и при слиянии кротовых нор или слиянии кротовой норы и чёрной дыры. Поэтому с однозначной интерпретацией следует быть более осторожными.

Из многих интересных свойств кротовой норы отметим следующие.

Особая топология пространства кротовой норы допускает существование необычной конфигурации статического магнитного поля: магнитные силовые линии входят по радиусу в один вход, проходят через коридор и выходят по радиусу из другого входа. Вблизи каждого входа поле имеет монополярный характер. Подобное невозможно в случае чёрных дыр.

Наконец, отметим, что имеется гипотеза о существовании многих вселенных. Тогда возможно, что кротовые норы соединяют разные вселенные и может происходить перетекание материи, излучения и информации из других вселенных в нашу. Кроме того, возможны более сложные структуры кротовых нор. Таковы, например, динамические кротовые норы, соединяющие нашу Вселенную с другими, находящимися в будущем или прошлом. В этом случае через коридор возможно движение во времени только в одном направлении. Такие кротовые норы могут обладать ветвящимися коридорами. Очевидно, что поиск кротовых нор во Вселенной весьма важен. Установление возможности существования других вселенных имело бы огромное мировоззренческое значение.

Поиск кротовых нор во Вселенной входит в научную программу действующего космического проекта "Радиоастрон" и будущего проекта "Миллиметр" [12].

Теперь обратимся к третьему теоретическому открытию в рамках общей теории относительности — к открытию принципиальной возможности существования машины времени. А. Эйнштейн писал, что сразу после создания общей теории относительности он понимал, что искривление пространства-времени может приводить к возникновению замкнутых линий времени, а значит, к существованию машины времени, позволяющей путешествовать из будущего в прошлое, и эта возможность его сильно беспокоила. На первый взгляд, такая возможность может нарушить принцип причинности, поскольку, вернувшись в прошлое, можно изменить начальные условия и заставить эволюцию протекать по совершенно другому сценарию, противоречащему первому варианту. Однако это не так. Как показано в [13], имеется принцип самосогласования. В случае существования петель времени будущее с самого начала влияет на прошлое вдоль петли времени, обуславливая ход событий, полностью согласованный вдоль всей петли. То есть будущее влияет на прошлое с самого начала, но ничего в прошлом изменить нельзя. Прошлое зависит от буду-

щего и полностью согласовано с ним. Физика становится более сложной (и интересной!), но никаких противоречий не возникает. В работах [14, 15] доказано, что принцип самосогласования является прямым следствием принципа наименьшего действия — основного принципа физики.

В книге [2] разобраны конкретные примеры различных способов построения машины времени. Неоднократно высказывались сомнения в осуществимости такого построения, например, из-за квантовых процессов, которые могут возникнуть. Однако точного доказательства невозможности создания машины времени до сих пор нет. Общее мнение сводится к тому, что окончательный ответ может быть дан только после создания квантовой теории тяготения.

Работа поддержана грантом РФФИ 15-02-00554, Программой президентства РАН П-7, грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ 6595.2016.2.

Список литературы

1. Wheeler J A *Am. Scientist* **56** (1) 1 (1968)
2. Frolov V P, Novikov I D *Black Hole Physics. Basic Concepts and New Developments* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998)
3. Thorne K S *Black Holes and Time Warps. Einstein's Outrageous Legacy* (New York: W.W. Norton, 1994); Пер. на русск. яз.: Торн К С *Чёрные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна* (Под ред. В Б Брагинского) (М.: Издательство физико-математической литературы, 2009)
4. Schwarzschild K *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wiss. Berlin Phys. Math. Kl.* 189 (1916); Пер. на англ. яз.: physics/9905030
5. Eddington A S *Space, Time and Gravitation. An Outline of the General Relativity Theory* (Cambridge: Univ. Press, 1920) p. 98; Пер. на русск. яз.: Эддингтон А *Пространство, время и тяготение* (Одесса: Mathesis, 1923) с. 99
6. Whittaker E T *From Euclid to Eddington. A Study of Conceptions of the External World* (Cambridge: Univ. Press, 1949) p. 124
7. Einstein A *Ann. Math.* **40** 922 (1939); Пер. на русск. яз.: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 2 (М.: Наука, 1966) с. 514
8. Thorne K S, Price R H, Macdonald D A *Black Holes. The Membrane Paradigm* (New Haven: Yale Univ. Press, 1986)
9. Новиков И Д, Фролов В П *УФН* **171** 307 (2001); Novikov I D, Frolov V P *Phys. Usp.* **44** 291 (2001)
10. Hawking S W *Nature* **248** 30 (1974)
11. Flamm L *Phys. Z.* **17** 448 (1916)
12. Кардашёв Н С и др. *УФН* **184** 1319 (2014); Kardashev N S *Phys. Usp.* **57** 1199 (2014)
13. Новиков И Д *Эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1983); Пер. на англ. яз.: Novikov I D *Evolution of the Universe* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1983) p. 169
14. Carlini A et al. *Int. J. Mod. Phys. D* **4** 557 (1995)
15. Carlini A, Novikov I D *Int. J. Mod. Phys. D* **5** 445 (1996)

Black holes, wormholes and time machines

I.D. Novikov

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Astro Space Center,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
E-mail: novikov@asc.rssi.ru;

The Nielse 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

Three major predictions of Einstein's general relativity — black holes, wormholes, and time machines — are reviewed for their development and current status.

Keywords: black holes, wormholes, time machines, Einstein relativistic theory

PACS number: 98.70.Vc

Bibliography — 15 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (7) 790–792 (2016)

DOI: 10.3367/UFN.2015.12.037768

Received 1 April 2016

Physics – Uspekhi **59** (7) (2016)

DOI: 10.3367/UFN.2015.12.037768