

Э. Т. Ахмедов

О рождении и смерти черных дыр

Электронное издание

Москва
Издательство МЦНМО
2015

УДК 524
ББК 22.632
А95

Ахмедов Э. Т.
О рождении и смерти черных дыр
Электронное издание
М.: МЦНМО, 2015
46 с.
ISBN 978-5-4439-2469-4

В этой книге сделана попытка рассказать о том, что такое черные дыры: как они устроены, какие у них свойства, как они образуются и как их наблюдают астрономы. Дано доступное и простое объяснение многим физическим свойствам черных дыр.

Для старшеклассников и студентов младших курсов, увлекающихся физикой и математикой.

Подготовлено на основе книги: Ахмедов Э. Т. О рождении и смерти черных дыр. — М.: МЦНМО, 2015. — 48 с. ISBN 978-5-4439-0267-8

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11,
тел. (499)–241–08–04.
<http://www.mcsme.ru>

ISBN 978-5-4439-2469-4

© Ахмедов Э. Т., 2015.
© МЦНМО, 2015.

Содержание

О чем эта книга и на кого она рассчитана	4
Как наглядно представить пространство–время и его искривление?	6
Что такое черная дыра?	15
Какие свойства у черных дыр?	19
Как образуются черные дыры?	23
Как можно «увидеть» черную дыру?	30
Что такое квантовое поле?	35
Излучение Хокинга, или как распадаются черные дыры?	40
Заключение	46

О чем эта книга и на кого она рассчитана

(Вместо предисловия)

Чтение научно-популярной литературы — мое любимое занятие с детства. Как, наверное, и многие ее любители, я заметил, что в то время как книжки по математике и по общей физике приводят материал с объяснением, доступным старшеклассникам, книги о современной фундаментальной физике, как правило, ведут обсуждение в повествовательной форме, сообщая лишь факты и не объясняя их происхождение. Безусловно, есть исключения, но, именно в силу этой причины, имеется некоторая мистическая аура вокруг, например, квантовой физики и гравитации. Эта аура скорее вредит привлекательности науки в глазах пытливого и здравомыслящего читателя, а не возбуждает его любознательность. При этом несомненно, что некоторые элементы упомянутых двух областей науки можно изложить наглядным и простым образом, доступным для интересующегося математикой и физикой старшеклассника. Именно на такого читателя и рассчитана данная книга.

Разумеется, наглядное изложение столь сложных предметов требует некоторой работы над способом преподнесения излагаемого материала. Необходимо было сделать какие-то упрощения или подобрать простые аналоги из повседневной жизни для явлений квантовой физики и гравитации. При этом было очень трудно избежать вульгаризации. Получилось ли у меня — судить искушенным читателям, но, несмотря на упрощения и наглядность, материал здесь изложен достаточно строго.

Лучшее, чего можно добиться при таком изложении, — это иллюзии понимания у любознательного читателя. Настоящее понимание, вернее глубокое непонимание, приходит только после кропотливых вычислений и рассмотрения наиболее общих и совсем не наглядных ситуаций. Цель же данной книжки заключается лишь в том, чтобы самые любознательные читатели приобрели впечатление о том, как устроены черные дыры и почему они имеют те свойства, которые им приписываются. Это потребует определенной мыслительной работы. Поэтому для облегчения чтения наиболее тяжелые для понимания места книжки выделены черными треугольниками ► ◄. Большая часть этого текста предназначена для читателей, знакомых с основами специальной теории относительности в объеме книги «Физика пространства–времени» Э. Тейлора и Дж. Уилера. (Мир, 1969 г.).

В данной книжке практически не будут упоминаться имена тех ученых, за которыми научное сообщество признает те или иные до-

стижения, и не будут присутствовать ссылки на первоисточники, в частности потому, что не предполагается, что ее читатель способен сразу же перейти к изучению оригинальных научных работ. Конечно, это не очень справедливо по отношению к тем людям, которые проделали тяжелую работу на пути к пониманию столь таинственного и абстрактного предмета, но мы вообще постараемся обойтись без исторических экскурсов, так как это выходит за рамки книжки и сильно бы ее утяжелило. Благо на данную тему написано немало хорошей научно-популярной литературы.

В научно-популярной литературе является общепринятым изложение только хорошо понятых и устоявшихся фактов. В этом смысле я позволил себе определенную вольность и рассказал о нескольких пока еще плохо изученных явлениях. Например, в книге обсуждается то, как формируется черная дыра, а также излучение Хокинга. Об этом обязательно нужно было рассказать по многим причинам. В частности, у меня есть надежда, что, даже если в книжке и будут сделаны некоторые неверные или не совсем корректные утверждения, это не создаст у основательного читателя ложных представлений о физике черных дыр. Напротив, надеюсь, что рассказ о таких явлениях даст читателю и некоторое представление о том, как устроен процесс научного познания.

Те, кто предпочитают смотреть лекцию, а не читать книгу, могут обратиться к интернет-ресурсу: http://infox.ru/science/enlightenment/2011/04/16/Asrtophysika6_Politech.phtml, где выложена видеозапись популярной лекции в Политехническом музее в Москве на тему книжки. Правда, в книге содержится больше материала, и он изложен последовательнее.

Я хотел бы выразить благодарность Сергею Ивановичу Блинникову за ликбез по физике звезд и за полезные замечания по тексту; Сергею Михайловичу Апенко, Евгению Александровичу Выродову и Валерию Анатольевичу Рубакову за замечания по педагогическому изложению материала и за полезные комментарии; Филиппу Бурде и особенно Эвелине Арушановой за оформление рисунков; Валерии Ахмедовой, Елене Суловой и Константину Кузнецову за корректуру текста, а также Дмитрию Васильеву за помощь в публикации книги. Также я хотел бы поблагодарить Международный институт физики в Натале, Бразилия, и Институт Альберта Эйнштейна в Гольме, Германия, и лично Альваро Ферразу, Дмитрия Мельникова, Германа Николаи и Штефана Тайсена за гостеприимство в процессе работы над этой книгой.

Как наглядно представить пространство–время и его искривление?

(Вместо введения)

Все материальные объекты обладают энергией. В том числе электромагнитные волны, то есть и свет. В современном представлении объекты, несущие энергию, искривляют пространство–время, что является одним из основных положений общей теории относительности Эйнштейна. В свою очередь, в искривленном пространстве–времени, в отличие от плоского, физические тела, на которые не действуют никакие другие силы, движутся неравномерно и непрямолинейно. Поэтому, например, луч света, проходящий мимо такого гравитирующего тела, как планета или звезда, претерпевает искривление, как изображено на рис. 1.

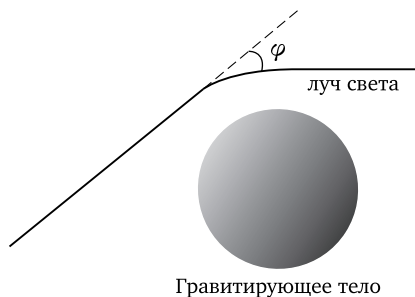


Рис. 1. Без гравитирующего тела траектория света была бы прямой. В его присутствии угол отклонения света φ определяется массой тела, а также расстоянием между его центром и лучом

Если мы предположим, что фотон (квант или частица света) ведет себя в гравитационном поле так же, как и частица с массой, равной его энергии E , деленной на квадрат скорости света c , $m = E/c^2$, и воспользуемся формулами из теории гравитации Ньютона, то получим не совсем верный результат для угла отклонения света в поле гравитирующего тела. Но так как мы будем обсуждать различные физические явления лишь качественно, а не количественно, то нам важен лишь сам факт существования отклонения лучей света в гравитационном поле, а не его величина.

Ученик старших классов должен знать, что вторая космическая скорость v_{II} — это скорость, которой необходимо обладать предмету, чтобы улететь с поверхности небесного тела, скажем планеты, на

бесконечность. Она определяется из того, что кинетическая энергия предмета должна равняться разности его потенциальных энергий на бесконечности и на поверхности тела:

$$\frac{mv_{II}^2}{2} = G \frac{mM}{r}.$$

Здесь m и M — это массы рассматриваемых предмета и планеты соответственно; G — константа Ньютона; r — радиус рассматриваемого небесного тела.

Некоторые ученые уже на рубеже XVIII и XIX веков задумались над тем, как должны относиться радиус и масса планеты, чтобы даже свет не смог покинуть ее. То есть чтобы вторая космическая скорость для этого гравитирующего тела была больше скорости света $v_{II} \geq c \approx 300\,000$ километров в секунду.

Из выписанных формул видно, что радиус такой планеты должен быть меньше, чем $r_{\text{шв}} = \frac{2GM}{c^2}$ — радиус Шварцшильда для данной массы. Он назван в честь ученого, который первым нашел решение уравнений общей теории относительности, описывающее геометрию пространства–времени снаружи гравитирующего тела, имеющего форму шара.

Интересно, что из неверных соображений, с использованием лишь формул из ньютоновской физики, мы получили верный ответ для радиуса черной дыры соответствующей массы. Эти соображения неверны по той причине, что в сильных гравитационных полях и при скоростях, близких к скорости света, уже нельзя пользоваться такими выражениями для кинетической и потенциальной энергий, как использовались выше.

И все же полученная формула для размера черной дыры при заданной массе верна и будет нам полезна. Нетрудно посчитать, например, что для звезды с массой Солнца $2 \cdot 10^{30}$ килограмм радиус Шварцшильда приблизительно равен трем километрам. Сравните эту величину с настоящим размером Солнца — 700 000 километров. В то же время для планеты с массой Земли радиус Шварцшильда равен нескольким миллиметрам.

Если какая-то сила сожмет небесное тело до соответствующего его массе радиуса Шварцшильда, то оно настолько искривит пространство–время, что даже свет не сможет его покинуть. Это и означает, что тело станет черной дырой. При каких условиях такие сжатия возможны и как они происходят, мы обсудим в следующих главах, а сейчас определим метод, которым мы будем изучать геометрию пространства–времени.

Как известно, пространство–время, в котором мы живем, имеет четыре измерения. То есть для определения какого-то события (точ-

ки в пространстве–времени), скажем прохождения светового цуга¹ на некотором расстоянии от гравитирующего тела в некоторый момент времени, необходимо задать три пространственных координаты, определяющих данное положение цуга в пространстве, и одну временную координату, определяющую данный момент времени.

Изобразить все четыре измерения на листе бумаги не представляется возможным. Поэтому если мы хотим наглядности, необходимо сделать некоторые упрощения. Каждую точку пространства в фиксированный момент времени можно определить по расстоянию от нее до начала координат, а также по двум углам, которые являются аналогами долготы и широты на глобусе и определяют направление радиус–вектора из начала координат в обсуждаемую точку. Это и есть три координаты, которые необходимы для определения пространственного положения события в пространстве–времени (рис. 2).

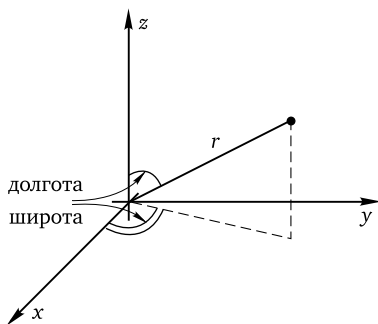


Рис. 2. Здесь изображен пространственный срез — «фотография» пространства, то есть «один из кадров фильма», показывающего, как ситуация развивается во времени. Обычно положение точки в таком пространстве определяют с использованием декартовых координат (x , y , z). Однако есть и другой общепринятый способ определения ее положения в пространстве — через расстояние от начала координат и долготу с широтой

Ниже мы всегда будем рассматривать движения тел и света строго по радиусу, то есть без изменения долготы и широты. Также мы будем рассматривать идеальные сферические звезды, планеты или пылевые облака. В этом и состоит наше упрощение, так как в реальности пылевые облака, падающие на звезды, или даже гравитационные поля вращающихся черных дыр не обладают симметрией сфер².

¹ Цуг — пакет электромагнитных волн.

² Более того, сферически симметричная ситуация крайне неустойчива по отношению к малейшему возмущению. Из-за приливных сил, которые подробнее обсуждаются ниже, любое возмущение, нарушающее сферическую симметрию, будет только расти, приводя к ее полному разрушению. Однако можно показать, что невращаю-

Для наших целей главное, что, изображая пространство–время при таком упрощении, мы можем забыть про долготу и широту каждого события и рисовать только временную координату $c \cdot t$ и длину радиус–вектора события r (рис. 3). То есть в таком случае обсуждаемое изображение пространства–времени будет иметь два, а не четыре измерения.

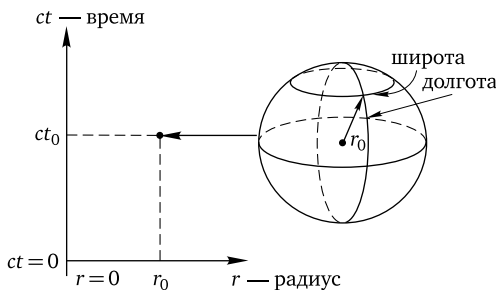


Рис. 3. Если изображать на плоскости только временную координату $c \cdot t$ события и его расстояние r до центра системы координат, то каждая точка такой плоскости может представлять любое положение на сфере радиуса r в пространстве, то есть с любым значением долготы и широты. Иными словами, каждая точка нарисованной здесь плоскости суть двумерная сфера. Следует подчеркнуть, что на самом деле здесь изображена полуплоскость, так как r может принимать только неотрицательные значения

Далее наши рассуждения будут достаточно строгими, хотя мы и будем использовать только наглядные геометрические образы без сложных аналитических математических обоснований, выходящих за рамки школьного курса. Рисуя картинки в этой книге, мы будем руководствоваться здравым смыслом и минимальным количеством данных, следующих из совокупности опытных фактов.

Итак, гравитация искривляет пространство–время. Это можно наглядно увидеть, изучая поведение лучей света в ее присутствии. Свет при этом удобен тем, что он самый быстрый в природе. Поясним, что мы будем считать лучом света. На рис. 1 изображен луч в том смысле, как он понимается в школьном курсе физики, а именно как путь, который проходит световой цуг в пространстве — траектория света. Нам же будет интересна кривая, вдоль которой проходит цуг в пространстве–времени, которую иначе называют мировой линией света. Именно это мы и будем считать лучом света, если не оговорено иное. Например, мировой линией покоящейся частицы является

ящаяся черная дыра сферически симметрична и устойчива по отношению к таким возмущениям, что сильно упрощает нашу задачу.

прямая, параллельная оси времени на рис. 3, тогда как ее траектория является точкой — проекцией такой прямой на ось r .

Далее, сделаем еще одно важное упрощение: пренебрежем тем, как пространство–время искривляется самими лучами света, несмотря на то, что они обладают энергией. То есть пространство–время может быть искривлено только некоторым массивным телом, а свет является лишь показателем этого искривления. Такое упрощение, как правило, делают и ученые, занимающиеся исследованием черных дыр. Исследователи еще только учатся учитывать влияние самих лучей и находить реальные световые мировые линии при наличии гравитирующих тел. Технически это оказалось очень сложной проблемой. Поясним, в чем состоит сложность этого предмета.

Рассмотрим задачу Ньютона — два массивных тела вращаются вокруг общего центра масс и взаимодействуют друг с другом за счет гравитационной силы³. Эта задача была точно решена еще Ньютоном.

Однако в современном представлении два тела взаимодействуют друг с другом при помощи гравитационного поля. (В частности, по этой причине гравитационное взаимодействие не является действием на расстоянии, тела действуют друг на друга полем.) Система из двух тел возмущает гравитационное поле и приводит к излучению гравитационных волн. Эта ситуация на наглядном примере будет рассмотрена в главе про теорию поля.

Учет гравитационного поля делает рассматриваемую задачу очень сложной. Она даже сложнее задачи трех тел в ньютоновой гравитации, то есть наличие поля усложняет ситуацию больше, чем наличие третьего тела. Задача может стать точно решаемой, только если не учитывать излучение гравитационных волн. В Солнечной системе такое излучение очень слабое, и им позволительно пренебречь. Поэтому предсказания гравитации Ньютона хорошо описывают поведение планет в Солнечной системе.

Однако, например, в так называемой двойной звездной системе, где массы обоих тел очень велики, радиусы их орбит достаточно малы, а центростремительные ускорения огромны, излучением гравитационных волн пренебречь нельзя. В таком случае задачу можно решить только приближенно.

Ее решение показывает, что звезды, излучая волны, теряют кинетическую и потенциальную энергию и постепенно падают друг на друга. Это явление действительно наблюдается в двойных звездных системах и находится в количественном согласии с предсказаниями

³ Точнее, нас интересует несколько иная ситуация, в которой вместо двух ньютоновых тел рассматривают гравитирующее тело и луч света. Как станет ясно далее, в некоторых случаях пренебрежение искривлением пространства–времени самим светом не является вполне корректным, несмотря на его относительно слабое влияние.

общей теории относительности. В частности, оно согласуется с предположением наличия гравитационных волн.

При этом ученые продолжают работать над созданием точного прибора, который позволил бы наблюдать непосредственно сами гравитационные волны, а не только их косвенные проявления через уменьшение энергии в двойных звездных системах.

► Для тех, кто знаком со специальной теорией относительности, упомянем о еще одном допущенном упрощении. Дело в том, что мы изображаем пустое пространство–время (ct, r) на обыкновенной евклидовой плоскости (x, y) . На такой плоскости расстояние Δl между двумя точками (ct_1, r_1) и (ct_2, r_2) , разделенными пространственным $\Delta x = \Delta r = r_1 - r_2$ и временным $\Delta y = c\Delta t = c(t_1 - t_2)$ смещениями, вычисляется с помощью теоремы Пифагора:

$$\Delta l^2 = \Delta y^2 + \Delta x^2 = c^2 \Delta t^2 + \Delta r^2.$$

При этом, как следует из совокупности экспериментальных данных, такое расстояние в пространстве–времени следует вычислять по формуле $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$. Отличие в знаке существенным образом сказывается на аналитических вычислениях и свойствах геометрии пространства–времени. Учитывая это, последующее геометрическое моделирование вполне адекватно описывает физику черных дыр. ◀

Теперь, чтобы понять, как работает предлагаемый в этой главе метод, рассмотрим, как движется свет в пустом пространстве без гравитирующих тел. Ясно, что в такой ситуации он движется по прямой. Пусть в начальный момент времени t_0 из некоторой точки сферы радиуса r_0 испускаются два луча света строго по радиусу. При этом один из лучей направлен наружу сферы, а другой — внутрь. Во времени этот процесс будет протекать так, как показано на рис. 4. Немного менее наглядным, но более удобным для наших целей будет изображение этого же процесса в обсуждавшемся выше пространстве–времени на рис. В1 цветной вкладки.

Теперь можно изобразить сетку из лучей света в пустом пространстве–времени на рис. В2. Ее можно представлять себе как состоящую из лучей, которые испускаются в разные моменты времени через одинаковые его промежутки с разных радиусов, отличающихся один от другого на числа, кратные одной и той же величине. В искривленном пространстве общего вида нарисовать подобную сетку гораздо сложнее, но ее отличие от рис. В2 собственно и показывает, насколько искривлено пространство–время.

Если читателю ясны приведенные выше геометрические построения, то он в принципе готов к изучению сферически симметричных черных дыр. Но, возможно, прежде чем двигаться дальше, нам

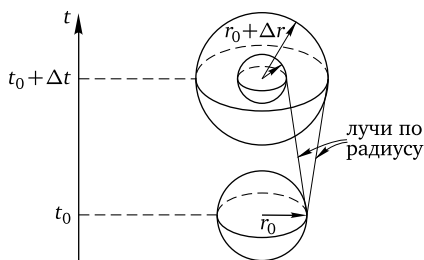


Рис. 4. По вертикали отложено время. В каждый заданный момент времени пространство расслоено на сферы, как луковица. В момент времени t_0 со сферы радиуса r_0 строго по радиусу испускаются два луча света. В следующий момент времени $t_0 + \Delta t$ фронты этих двух световых волн будут находиться на сферах радиусов $r_0 + \Delta r$ и $r_0 - \Delta r$ соответственно. При этом $\Delta r / \Delta t = c$ — скорость света

будет полезно разобраться в некоторых положениях общей теории относительности. Для этого полезно наглядно представить искривление пространства–времени. Рассмотрим, например, леску, которую перемещают в пространстве, удерживая ее за концы. Она в процессе своей эволюции во времени описывает двумерную поверхность, геометрия которой нас и интересует. Ее можно вообразить себе как поверхность пустыни. Барханы при этом наглядно представляют собой искривление рассматриваемого двумерного пространства–времени. Нам неважно, какое из направлений на поверхности пустыни является временным, а какое — пространственным. Во всяком случае, в кривом пространстве–времени это не всегда бывает очевидным.

Рассмотрим бусинку, насаженную на рассматриваемую леску. Ей придали некоторый начальный импульс. Она свободно скользит по леске, если забыть о трении. Кривая, которую опишет бусинка в процессе своего движения, является аналогом мировой линии материального объекта в пространстве–времени. Также она напоминает след, который оставляет шарик, катящийся по барханам, если забыть про его трение о песок. След шарика прямой, если поверхность пустыни абсолютно плоская. Когда есть барханы, шарик описывает некоторые более сложные кривые.

Можно рассмотреть множество бусинок при разных начальных условиях (исходных положениях и скоростях) и нарисовать сетку из их всевозможных мировых линий. Различные начальные скорости определяют разные направления кривых в нашем пространстве–времени, так как одно из направлений в описываемой леской поверхности определяет развитие ситуации во времени. Далее представим себе, что есть некоторый тип бусинок, который может двигаться только

с одной максимально возможной скоростью. Тогда в его начальных данных существует свобода в выборе только исходного положения на леске, а направления кривых фиксированы, с точностью до неоднозначности — вправо или влево. Именно поэтому сетка из мировых линий рассматриваемого типа бусинок универсальна. Более того, если мы не видим самого песка и барханов, но можем некоторым образом восстановить такую сетку, то это дает нам представление об искривлении нашего пространства–времени.

► Теперь нарисуем в пустыне некоторую координатную сетку. Если пустыня абсолютно плоская, то можно сказать, что есть естественный способ ее изображения. Действительно, сначала можно покрыть всю поверхность пустыни параллельными прямыми на расстоянии, скажем, метр друг от друга, а затем нарисовать еще такие же прямые, перпендикулярные первым. Есть, конечно, свобода в выборе расстояний между параллельными прямыми и в их направлении. В частности, поворот сетки является аналогом преобразования Лоренца в плоском пространстве–времени, физический смысл которого — переход из одной инерциальной системы отсчета в другую.

В пустыне с барханами столь естественного способа уже нет. Можно в качестве координатной выбрать сетку из мировых линий самых быстрых бусинок, но есть и другие варианты. Один из них — нарисовать нечто вроде параллелей и меридианов, аналогично тому, как они изображаются на поверхности Земли. Этот способ похож на рисование прямых в случае плоской пустыни. Другой вариант — из вершины каждого бархана рисуются лучи во все стороны, а перпендикулярно им изображаются уровни высот. В этом случае необходимо как-то идентифицировать координатные сетки в областях между барханами, но этот вопрос сейчас не очень важен для нас. К слову сказать, так рисуются геодезические карты.

Возвращаясь к нашей ситуации, подчеркнем, что разные координатные сетки отвечают разному выбору того, что мы называем r и ct . Оказывается, переходы от некоторых r и ct к другим имеют физический смысл замен систем отсчета. И эти системы отсчета не обязаны быть инерциальными. Обратим теперь внимание на то, что при замене координатных сеток не меняются никакие физически осмысленные величины. Например, не меняются расстояния между любыми двумя точками в пустыне. Также неизменны сетки из мировых линий свободных частиц. Инвариантна и кривизна нашего пространства–времени — положения, высоты и округлости барханов.

Из этого нетрудно понять изучаемый постулат общей теории относительности. Он утверждает, что физические законы (уравнения движения материальных тел, например) не зависят от выбора коор-

динатной сетки. Этот принцип называется общей ковариантностью. Его полезно помнить при изучении физики черных дыр. Также нам следует понимать, что ct и r задают лишь какую-то координатную сетку. Они, безусловно, могут совпадать со временем и радиусом в каких-то областях пространства–времени при специальном выборе координатной сетки, но не обязаны делать этого всюду. ◀

Что такое черная дыра?

Теперь мы готовы к рассмотрению того, как будут вести себя лучи света в присутствии сферически симметричного гравитирующего тела. Очевидно, что лучи, распространяющиеся очень далеко от тела, практически не испытывают его влияния и выглядят так же, как и в пустом пространстве. Однако по мере приближения к телу поведение лучей света все сильнее и сильнее отличается от такового в пустоте. Степень отличия определяется радиусом и массой тела, а также положением луча относительно поверхности тела. Нашей задачей сейчас является понимание рис. В5, на котором нарисована сетка из лучей света в присутствии черной дыры. Сравнение этого рисунка и рис. В2 показывает, как искривлено пространство–время в присутствии рассматриваемого небесного тела.

Рассмотрим несколько источников, находящихся на разных расстояниях от центра тела и испускающих в момент времени t_0 лучи света, как изображено на рис. В3. Каждый из таких источников испускает два луча строго по радиусу — один в направлении его увеличения, а другой — в направлении уменьшения. Чем ближе источник к телу, тем тяжелее его лучам, направленным от центра гравитации, преодолевать притяжение. Поэтому за те же промежутки времени Δt они проходят тем меньшее расстояние Δr , чем ближе их источник к звезде. В то же время луч света, направленный к телу, движется тем быстрее, чем ближе его источник к гравитационному центру.

► Из сделанных выше предположений следует, что для лучей, направленных к центру тела, $\frac{\Delta r}{\Delta t} > c$, а для направленных от центра — $\frac{\Delta r}{\Delta t} < c$. Те, кто знаком со специальной теорией относительности, могут возразить, что скорость света не может зависеть от чего-либо и должна оставаться постоянной и равной c . Дело здесь в том, что если понимать под скоростью отношение приращения координаты Δr к приращению Δt , то эта величина строго равняется $\frac{\Delta r}{\Delta t} = c$ вдоль луча только в *пустом* пространстве и не зависит от выбора только среди *инерциальных* систем отсчета. Дело в том, что в случае инерциальной системы отсчета мы можем канонически выбрать ось t так, чтобы она совпадала с направлением времени, а r — с направлением пространства. Однако при переходе в неинерциальные системы отсчета скорость света начинает зависеть от координат, оставаясь при этом самой большой скоростью. Так же и в кривом пространстве, хотя свет тоже является самым быстрым, его скорость, понимаемая в вышеуказанном смысле, уже не является незыблемой констан-

той и может зависеть от значений t и r . Здесь следует подчеркнуть, что как в плоском пустом пространстве–времени, так и в кривом пространстве–времени вдоль светового луча интервал Δs^2 равен 0. Лишь в плоском пустом пространстве–времени интервал выражается через координаты как $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$. В кривом же пространстве–времени подобное выражение уже будет выглядеть более сложно. При этом вдоль мировой линии частицы с массой $\Delta s^2 > 0$. ◀

Теперь представим себе, что при фиксированном радиусе наращивается масса тела, изображенного на рис. В3. Неважно, каким образом это достигается. Просто абстрагируемся и попробуем представить, как будет меняться рис. В3 при таком изменении условий. По мере увеличения массы, чем ближе источник к поверхности гравитирующего тела, тем медленнее преодолевают расстояния излученные им исходящие лучи, и при некоторой массе настанет ситуация, изображенная на рис. В4: начиная с некоторого радиуса, называемого радиусом горизонта $r_{\text{горизонта}}$, луч света, направленный от центра гравитирующего тела, либо остановится ($\Delta r / \Delta t = 0$, если он излучен прямо с $r = r_{\text{горизонта}}$), либо же будет двигаться в сторону уменьшения r , если точка излучения находится при $r < r_{\text{горизонта}}$. То есть в последнем случае оба луча, излученных источником, — и тот, что к центру, и тот, что от центра, будут двигаться в сторону уменьшения r .

► Понятно, что это звучит довольно-таки странно, так как читатель, возможно, представляет себе описанную картинку буквально на листе бумаги, где расстояния вычисляются с использованием теоремы Пифагора $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 + \Delta r^2$. Здесь следует вспомнить, что в пространстве–времени расстояния вычисляются по другой формуле, как уже подчеркивалось выше. Помимо этого в присутствии гравитирующих тел Δs^2 выражается через t и r более сложным образом, чем в пустом пространстве–времени. Однако, исходя из ситуации на рис. В3, нетрудно представить ее развитие на рис. В4. При принятых допущениях этот рисунок корректно описывает реальную ситуацию. ◀

Тело со свойствами, изображенными на рис. В4, и является черной дырой, так как лучи света, излученные внутри горизонта черной дыры $r_{\text{горизонта}}$, никогда не достигнут той области, где $r > r_{\text{горизонта}}$. Иными словами, наблюдатель, все время находящийся снаружи черной дыры (при $r > r_{\text{горизонта}}$), никогда не увидит ничего того, что происходит внутри нее (при $r < r_{\text{горизонта}}$).

Здесь следует подчеркнуть, что в научной литературе существует несколько неэквивалентных определений того, что такое горизонт черной дыры. Наиболее распространенным является понятие гори-

зонта событий. Другое очень распространенное понятие — это так называемый очевидный (apparent) горизонт. Все эти понятия страдают от тех или иных недостатков, обсуждение которых выходит за рамки данной книжки. Для нас важно лишь то, что в случае сферически симметричной статической дыры большая часть этих определений задает одну и ту же поверхность. Более того, для сферически симметричной черной дыры радиус ее горизонта $r_{\text{горизонта}}$ совпадает с вышеупомянутым радиусом Шварцшильда $r_{\text{ШВ}}$.

Обратим теперь внимание на тот факт, что на рис. В4 не изображено само гравитирующее тело. Подчеркнем, что $r_{\text{горизонта}}$ не является поверхностью рассматриваемого массивного тела.

Как уже упоминалось при обсуждении рис. В1 предыдущей главы, любая частица, проходящая через некоторую точку пространства-времени, движется внутри угла, ограниченного двумя лучами света, исходящими из этой же точки в противоположных направлениях. Поэтому, как видно из рис. В4, падение любого материального объекта (как света, так и произвольной частицы), находящегося при $r < r_{\text{горизонта}}$, на центр ($r = 0$) неизбежно.

► Иными словами, внутри горизонта ничто не может оставаться в покое и находиться при фиксированном r , а избежать падения на центр — все равно что избежать следующего понедельника. Действительно, из наших картинок и пояснений к ним должно быть ясно, что под горизонтом время течет просто в сторону $r = 0$, а не вдоль оси $c \cdot t$. При этом снаружи горизонта время течет параллельно оси ct . ◀

Таким образом, если гравитирующее тело удалось поместить внутри соответствующего его массе радиуса Шварцшильда, то оно неизбежно целиком сожмется в точку $r = 0$, что приведет к образованию сингулярности — такой точки, где плотность вещества стремится к бесконечности. Так как природа не терпит бесконечностей, то одной из основных проблем современной теоретической физики и является понимание того, что на самом деле происходит при таком сильном сжатии вещества. Научное сообщество, к сожалению, пока еще далеко от понимания природы этого явления, и можно лишь добавить, что при рассмотрении столь сильного сжатия знания, накопленные при исследовании относительно низких плотностей, оказываются неприменимы.

Все, что здесь сказано, верно для простейших черных дыр. В случае вращающихся черных дыр, которые не обладают симметрией сферы, или же в случае дыр, несущих электрический заряд, ситуация внутри горизонта будет несколько сложнее.

Для незаряженной сферически симметричной черной дыры можно нарисовать сетку из лучей света, аналогично сетке рис. В2. Она

изображена на рис. В5. Общая идея построения такой сетки должна быть ясна. Следует просто повторить картинку, изображенную на рис. В4, для промежутков времени от $t_0 + n \cdot \Delta t$ до $t_0 + (n + 1) \cdot \Delta t$, отвечающих нескольким последовательным целым значениям n , а затем склеить получившиеся картинки.

При таком построении следует помнить, что при удалении от горизонта рассматриваемые кривые приближаются к прямым, которые наклонены под углом 45° по отношению к оси времени. Это происходит потому, что вдали от тела гравитация слаба и рассматриваемая нами картина не должна сильно отличаться от рис. В2. При этом не следует забывать, что как красные лучи света, излученные в направлении гравитирующего тела, не могут пересекаться между собой, так и, аналогично, фиолетовые лучи, испущенные наружу, также не имеют пересечений.

Нетрудно изобразить сетку из лучей света и для других гравитирующих тел, таких как планета или звезда, при условии что они обладают симметрией шара. При радиусах $r > r_{\text{тела}}$ она просто совпадает с сеткой для черной дыры с такой же массой, но для $r < r_{\text{тела}}$ она отличается от сетки для черной дыры и напоминает картину снаружи гравитирующего тела. В частности, отсутствует область, из которой не могут вылетать электромагнитные волны, так как внутри любого радиуса $r \leq r_{\text{тела}}$ находится недостаточная для этого масса.

Какие свойства у черных дыр?

Обсудим теперь некоторые из основных свойств черной дыры. Представим себе наблюдателя, который находится при фиксированном радиусе над горизонтом черной дыры $r > r_{\text{шв}}$. Пусть наблюдатель видит падающий в черную дыру и летящий строго по радиусу камень. Можно представить, что камень просто рассеивает свет со стороны, но для наших целей удобнее, если на этом камне находится источник, который по установленным на нем часам через *равные* промежутки времени $\Delta \tau$ излучает свет в направлении наблюдателя. Как можно понять из рис. В5 и рис. В6, по часам наблюдателя лучи будут приходить к нему через *разные* промежутки времени.

Здесь следует сделать несколько замечаний. Во-первых, рис. В6 изображен в предположении, что наблюдатель, падающий камень и свет очень легки по сравнению с черной дырой. Поэтому можно пренебречь их воздействием на пространство–время, считая, что оно искривлено только черной дырой. Во-вторых, вспомним, что ничто не может двигаться быстрее света, поэтому у падающего в черную дыру тела и наблюдателя, да и любых двух объектов в пространстве–времени нет более быстрого способа сообщения, чем обмен электромагнитными волнами. Поэтому синхронизацию часов на камне и у наблюдателя лучше всего производить посредством обмена световыми сигналами.

При приближении камня к центру гравитации чем позже испущена пара последовательных лучей света, тем больше промежутков между их приходом к наблюдателю: $\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t_3 < \dots$ и Δt_n неограниченно растет с ростом n , как следует из рис. В6. Действительно, луч света, испущенный с камня в момент его пересечения горизонта, идет параллельно оси $c \cdot t$, в силу того, как был определен горизонт в предыдущей главе. Поэтому по часам наблюдателя этот луч не может прийти к нему за конечное время.

В результате, например, если на камне происходит какой-то процесс, скажем, по нему ползет жук, то для наблюдателя по мере приближения камня к горизонту черной дыры жук замедляется до полной остановки. Более того, по этой же причине наблюдатель снаружи черной дыры, обладая абсолютно точными и чувствительными приборами, никогда не увидит, как брошенное им вниз тело пересечет горизонт. С его точки зрения тело замедляет свое движение по мере бесконечного приближения к черной дыре. Помимо этого, как мы увидим в следующих главах, свет от падающего тела будет постепенно гаснуть.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда строго по радиусу вслед за обсуждавшимся выше камнем в черную дыру падает наблюдатель (рис. В7). Нетрудно видеть, что, в отличие от предыдущего случая, лучи света, излученные с поверхности камня, будут приходить к новому наблюдателю по его часам практически через равные промежутки времени, если он летит на достаточно близком от камня расстоянии.

Камень никогда не пропадает из виду падающего за ним наблюдателя. Но лучи света, испущенные с поверхности камня после пересечения им горизонта, приходят к наблюдателю только после того, как он сам пересечет эту поверхность. До пересечения горизонта наблюдатель получает только те лучи, которые испущены с камня до его собственного пересечения горизонта.

Таким образом, из-за существования в природе максимально возможной скорости разные наблюдатели могут воспринимать свойства одного и того же объекта (черной дыры в нашем случае) совершенно по-разному.

Попробуем теперь представить, что чувствует человек, пересекающий горизонт черной дыры в свободном падении. Гравитацию он может чувствовать только через приливные силы — через разность гравитационного притяжения к черной дыре разноудаленных от нее частей своего тела. На Земле эта разность на размерах человеческого тела мала и совсем нами не ощущается. Помимо этого, так как мы не находимся в свободном падении, то чувствуем гравитационную силу через реакцию опоры.

Если черная дыра имеет достаточно большую массу и, соответственно, большой радиус Шварцшильда, то разность сил притяжения к центру различных частей тела человека, который приближается к горизонту, может быть сколь угодно мала при сколь угодно большой массе дыры. Поэтому человек, пересекая горизонт, вообще не почувствует никакого отличия этого своего положения от любого иного около горизонта по ту или иную его сторону. Только после пересечения горизонта, по мере приближения к сингулярности — месту сосредоточения всей массы черной дыры, человек начнет чувствовать приливные силы, которые с неизбежностью в итоге разорвут его (рис. 5).

Если же черная дыра имеет небольшую массу и поэтому маленький радиус Шварцшильда, то ее горизонт находится достаточно близко к сингулярности. Поэтому приливные силы на горизонте могут быть очень большими. Несмотря на это их величина все равно не будет сильно отличаться на близлежащих радиусах по обе стороны горизонта. То есть и в этом случае при пересечении горизонта в свободном падении не произойдет ничего необычного, что отличало бы его физически от любого другого радиуса. Таким образом, в свобод-

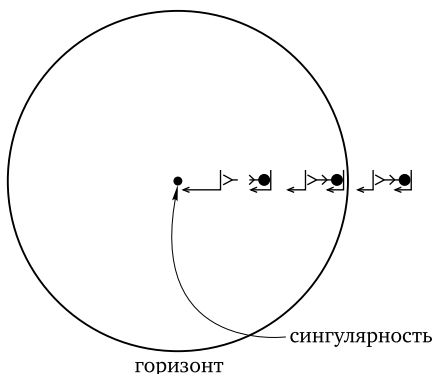


Рис. 5. Приливные силы на горизонте массивной черной дыры оказываются маленькими. Однако они неограниченно растут по мере приближения к сингулярности. Стрелками различного размера изображены силы гравитационного притяжения различной величины

ном падении физически мы можем осязать лишь близость к сингулярности — она существенно отличается от любого другого места в черной дыре.

При этом для того, чтобы висеть при фиксированном радиусе $r > r_{\text{шв}}$ над горизонтом черной дыры, необходимо прилагать тем больше усилий, чем ближе к горизонту $r_{\text{шв}}$ желаешь находиться. Можно показать, что непосредственно на горизонте придется прилагать бесконечную силу (рис. 6).

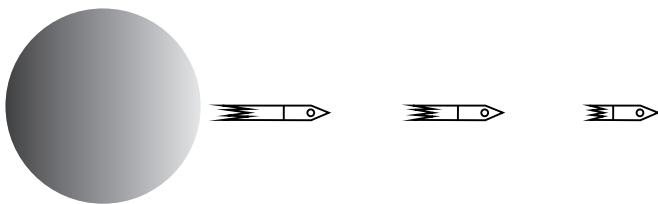


Рис. 6. Количество огня, извергаемое из ракетных сопел, определяет мощность работы ее двигателей, достаточную для того, чтобы она висела на фиксированном радиусе. Космонавт, находящийся в ракете, будет иметь тем больший вес (силу давления на пол ракеты), чем ближе ракета к горизонту черной дыры

Среди неспециалистов бытует мнение, что черные дыры являются своего рода пылесосами, которые с неизбежностью всасывают все вещество, находящееся вокруг них. Как следует из обсуждения в конце предыдущей главы, по свойствам гравитации черная дыра

за пределами горизонта ничем не отличается от любого массивного тела. Например, если сжать Солнце до его радиуса Шварцшильда, не меняя его массы и положения, то орбиты планет Солнечной системы не изменятся.

Более того, обсуждаемая черная дыра будет поглощать окружающую материю в меньшем объеме, чем это делает Солнце, так как из-за значительно меньших размеров попасть в нее будет труднее. Единственное, что принципиально отличает черную дыру от звезды, — это полное отсутствие возможности улететь оттуда даже мельчайшим частицам, коль скоро они туда попали. Однако важным отличием компактных небесных объектов, как черных дыр, так и нейтронных звезд, является то, что очень близко к ним нет стабильных круговых орбит. Это можно показать, только решая уравнения движения частиц в гравитации. В результате все, что попало в эту область перед небесным объектом, упадет на звезду, если не обладает достаточно большой скоростью, чтобы покинуть ее.

Таковы основные свойства черных дыр. Другие их свойства мы обсудим в следующих главах.

Как образуются черные дыры?

Перейдем теперь к обсуждению механизмов образования черных дыр. Некоторые элементы этой темы несколько выходят за пределы программы данной книги. Наверняка специалисты по физике звезд могли бы дать более наглядное и простое их объяснение, но подробное рассмотрение сделало бы эту главу слишком объемной. Другие явления, изложенные в ней, пока еще плохо изучены, и велик риск сказать нечто не совсем корректное или, по крайней мере, не общепринятое в научном сообществе. И все же автор считает своим долгом осветить эту тему, насколько это возможно с учетом вышесказанного.

Только гравитационная сила способна сжать небесное тело до таких маленьких размеров, как его шварцшильдовский радиус, так как только гравитационное взаимодействие ведет исключительно к притяжению, и фактически неограниченно возрастает при увеличении массы. Электромагнитное взаимодействие между элементарными частицами на много порядков сильнее гравитационного. Однако любой электрический заряд, как правило, оказывается компенсированным зарядом противоположного знака. Гравитационный заряд — массу ничто не может заэкранировать.

Такая планета, как Земля, не сжимается под собственной тяжестью до соответствующих размеров Шварцшильда потому, что ее массы недостаточно для преодоления электромагнитного расталкивания ядер, атомов и молекул, из которых она состоит. А такая звезда, как Солнце, являясь намного более массивным объектом, не сжимается из-за сильного газодинамического давления за счет высокой температуры в его недрах.

Заметим, что для очень массивных звезд, с массой больше ста Солнц, сжатие не происходит в основном из-за сильного светового давления. Для звезд массивнее двухсот Солнц ни газодинамического и ни светового давления оказывается не достаточно, чтобы предотвратить катастрофическое сжатие (коллапс) такой звезды в черную дыру. Однако ниже речь пойдет об эволюции более легких звезд.

Свет и высокая температура звезд являются продуктами термоядерных реакций. Такая реакция идет потому, что в недрах звезд достаточно водорода и вещество сильно сжато под давлением всей массы звезды. Сильное сжатие позволяет преодолеть электромагнитное отталкивание одинаковых зарядов ядер водорода, ведь термоядерная реакция — это слияние ядер водорода в ядро гелия, сопровождающееся большим выделением энергии.

Рано или поздно количество термоядерного топлива (водорода) сильно сократится, световое давление ослабнет, температура упадет. Если масса звезды достаточно мала, как, например, у Солнца, то она пройдет через фазу красного гиганта и превратится в белый карлик.

Если же ее масса велика, то звезда начнет сжиматься под собственной тяжестью. Произойдет коллапс, который мы можем увидеть как взрыв сверхновой. Это очень сложный процесс, состоящий из многих фаз, и пока не все его детали ясны ученым, но многое уже понятно. Известно, например, что дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы в момент перед коллапсом. Результатом такого сжатия может быть либо нейтронная звезда, либо черная дыра, или же комбинация из нескольких подобных объектов и белых карликов.

Нейтронные звезды и белые карлики не коллапсируют до состояния черной дыры, так как их массы недостаточно, чтобы преодолеть давление нейтронного или электронного газа соответственно. Эти давления обусловлены квантовыми эффектами, вступающими в силу после очень сильного сжатия. Обсуждение последних не имеет непосредственного отношения к физике черных дыр и выходит за рамки данной книги.

Однако если, например, нейтронная звезда находится в двойной звездной системе, то она может притягивать материю со звезды-компаньона. В таком случае ее масса будет расти и, если она превысит некоторое критическое значение, опять произойдет коллапс, уже с образованием черной дыры. Критическая масса определяется из условия, что газ нейтронов создает недостаточное давление, чтобы удержать ее от дальнейшего сжатия.

Итак, черные дыры являются результатом коллапса самых тяжелых звезд. В современном представлении масса сердцевины звезды после выгорания термоядерного топлива должна составлять не менее двух с половиной солнечных⁴. Никакое известное нам состояние вещества не способно создать такое давление, которое удержало бы столь большую массу от сжатия до состояния черной дыры, если выгорело все термоядерное топливо. Факты, экспериментально подтверждающие упомянутое ограничение на массу звезды для образования черной дыры, мы обсудим чуть позже, когда будет рассказано, как астрономы обнаруживают черные дыры.

На рис. В8 представлена идеализированная картина коллапса в случае идеальной сферической симметрии. Она не показывает многих деталей этого сложного процесса, но достаточна для наших целей. На рисунке в момент времени t_0 выгорело все термоядерное топливо, и тело звезды начало сжиматься под собственной тяжестью.

⁴ Это приблизительная оценка. Точное значение предела пока не известно.

В момент времени t_1 в центре звезды образуется горизонт, так как там сосредоточена уже достаточно большая масса в достаточно маленьком объеме, чтобы электромагнитные волны не могли в принципе выйти оттуда наружу. Далее горизонт дыры растет, пока не будет поглощено все вещество звезды полностью.

У внимательного читателя должен возникнуть вопрос: как образуется и растет горизонт черной дыры, если в предыдущей главе объяснялось, что с точки зрения нас — наблюдателей со стороны — ничто не может пересечь ее горизонт за конечное время? Неужели с точки зрения сторонних наблюдателей черные дыры никогда не образуются, а коллапс — это процесс, в котором все вещество звезды находится в таком бесконечно замедляющемся падении, как изображено на рис. 7? Что же тогда наблюдают астрономы, утверждая, что это черные дыры? Может, мы здесь обсуждаем просто гипотетические объекты — решения уравнений Эйнштейна, найденные Шварцшильдом, которые на самом деле в природе не существуют?

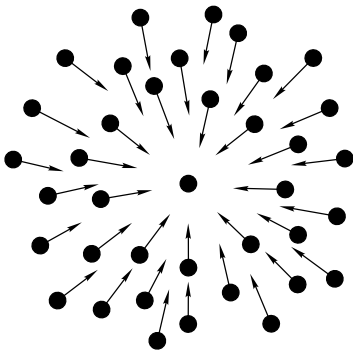


Рис. 7. Неверное представление о коллапсе с точки зрения стороннего наблюдателя как о замедляющемся вечном падении вместо формирования горизонта черной дыры

Как будет рассказано в следующих главах, все говорит о том, что астрономы наблюдают именно такие объекты, у которых нет поверхности. То есть такие звездные тела, у которых вещество спрятано под горизонтом.

В этой главе мы убедимся, что черные дыры на самом деле образуются, а все выше озвученные вопросы возникают из-за недопонимания сделанных выше упрощений. Внимательный читатель мог заметить, что мы забыли, что падающее в черную дыру тело тоже искривляет пространство-время, как и сама дыра. Более того, горизонт был определен из предположения, что лучи света не искривляют

пространства–времени. Насколько оправданы такие упрощения при обсуждении процессов рождения черных дыр?

Рассмотрим еще раз более внимательно падение тела в черную дыру. Мы обсудим радиальное сжатие идеальной сферической оболочки, окружающей черную дыру, и при этом учтем, что оболочка тоже искривляет пространство–время. Однако для начала мы продолжим рисовать лучи света, пренебрегая их собственным вкладом в искривление пространства–времени.

При учете гравитации падающего тела удобно рассматривать вместо камня сферическую оболочку по следующим причинам. Во-первых, как и в гравитации Ньютона, в общей теории относительно-сти такая оболочка не создает поля внутри себя. Во-вторых, как будет объяснено в следующей главе, падение идеальной сферической оболочки не сопровождается излучением гравитационных волн, что сильно упрощает картину процесса формирования черной дыры.

На рис. В9–В11 рассматриваемый процесс изображен последовательно. В момент времени t_0 с некоторого расстояния оболочка начинает свое падение в черную дыру. На рис. В9 красным цветом изображено искажение (по сравнению с пустым пространством–временем) света только за счет гравитации черной дыры.

В следующий момент времени, изображенный на рис. В10, оболочка окажется ближе к черной дыре. На этом рисунке красным цветом показано такое же искажение лучей света, как и на рис. В9, то есть только за счет гравитации черной дыры. Фиолетовым же цветом теперь представлено то, как искривятся лучи света за счет гравитации как черной дыры, так и оболочки. Те ростки лучей, чьи источники находятся внутри оболочки, не исказятся ее гравитацией. В свою очередь, ростки, источники которых находятся вне оболочки, претерпевают искажение.

При приближении оболочки к горизонту те лучи света, что с трудом преодолевали гравитацию черной дыры вблизи ее горизонта, теперь уже не смогут уйти на бесконечность, так как им придется преодолевать суммарную гравитацию черной дыры и оболочки. Как показано на рис. В11, это приведет к образованию нового горизонта, охватывающего вещество черной дыры вместе с оболочкой.

Возникает вопрос: будет ли конечной продолжительность этого процесса для висящего над дырой наблюдателя? Представим себе, что на оболочке имеется источник света, который испускает лучи строго по радиусу в направлении наблюдателя. В момент формирования нового горизонта, охватывающего оболочку и черную дыру, испущенный с нее луч света пойдет вдоль оси $c \cdot t$, как видно из рис. В11. Поэтому сторонний наблюдатель никогда его не получит. То есть, с точки зрения такого наблюдателя, процесс приближения оболочки

к положению нового образующегося горизонта будет происходить также вечно. Получается, что наблюдатель должен видеть то же, что было описано в предыдущей главе.

Однако вспомним, что лучи света тоже несут энергию и искривляют пространство–время. Формирование черной дыры физически корректно рассматривать с учетом их реального воздействия на пространство–время. В таком случае с падающего тела испускаются пакеты (цуги) электромагнитных волн, и эти цуги тоже гравитируют. Тогда сторонний наблюдатель увидит, как за конечное время по его часам свет, исходящий с падающей оболочки, совсем погаснет. Он не будет виден даже самым чувствительным приборам. Таким образом, наблюдатель увидит не то, как свет от падающего тела вечно постепенно гаснет, а примет последний пакет электромагнитных волн, который сможет преодолеть гравитацию. Следующий за последним цуг просто не сможет покинуть черную дыру и будет участвовать в ее формировании.

► Поясним последнее наблюдение на примере рис. В5. Рассмотрим только фиолетовые лучи — те, что испущены в сторону от гравитирующего тела. Видно, что эти лучи разделены горизонтом на две группы — одна (та, что над горизонтом) уходит от $r=0$. Другая же (та, что под горизонтом) сходится к $r=0$. При этом горизонт — граница, разделяющая эти две группы, — тоже является одним из лучей, испущенных в сторону от гравитирующего центра. Подчеркнем, что если луч идет вдоль горизонта, то он никогда с него не сойдет. Теперь то, что сказано в предыдущем абзаце, можно сформулировать так. Если нарисовать ростки мировых линий для световых цугов с учетом их воздействия на пространство–время, то обсуждаемый рис. В9 для фиолетовых лучей сильно изменится. (В частности, картина будет меняться во времени и невозможно будет нарисовать полный аналог рис. В9.) Однако для ростков, а не для полных мировых линий, характерное разделение на две группы — сходящихся к $r=0$ и убегающих от $r=0$ — сохранится. При этом, и это самое главное для нашего обсуждения, граница между этими двумя группами уже не будет одной из мировых линий. Это и объясняет утверждения предыдущего абзаца. ◀

Основным недостатком такого определения горизонта является то, что теперь изменение в его положении будет зависеть от энергии, которую несет объект, падающий в черную дыру. Однако здесь для нас важно подчеркнуть, что образование черных дыр происходит за конечное время с точки зрения внешнего наблюдателя. В любом случае, поскольку данный вопрос пока еще не изучен до конца, есть риск того, что некоторые утверждения сформулированы здесь не совсем

корректно. Однако есть надежда, что направление, в котором следует искать разрешение рассматриваемого парадокса, выбрано верно. Следует добавить, что в среде специалистов по физике черных дыр преобладает мнение, что процесс формирования горизонта черной дыры является квантовым (то есть происходит на *микроскопическом* уровне) и мы еще не достигли такого уровня знаний в квантовой гравитации, чтобы детально изучить его. Возможно, это и верно для самой ранней стадии формирования черной дыры, если ее исходный размер микроскопический. Но в случае прироста горизонта *макроскопической* черной дыры за счет падающих в нее тел автор не может согласиться с точкой зрения, что процесс формирования черной дыры является квантовым, поэтому автор предпринял попытку объяснить рассматриваемое явление, не выходя за рамки классической теории.

В связи с нашим обсуждением поучительно будет на примере вспомнить о взаимосвязи различных идей и представлений в науке. Этот рассказ, возможно, позволит читателю ощутить, насколько потенциально глубок обсуждаемый вопрос.

Известно, что Галилей пришел к тому, что сейчас называется законом Ньютона об инерциальных системах отсчета, отвечая на критику системы Коперника. Критика заключалась в том, что Земля не может вращаться вокруг Солнца по причине того, что иначе мы бы не удержались на ее поверхности.

В ответ Галилей утверждал, что Земля вращается вокруг Солнца по инерции. А инерциальное движение мы не можем отличить от покоя, так же как не ощущаем инерциальное движение, например, корабля. При этом он не верил в гравитационные силы между планетами и звездами, так как не верил в действие на расстоянии, а про существование полей он и вовсе не мог знать. Да и не принял бы столь абстрактного на тот момент объяснения.

Галилей считал, что инерциальное движение может происходить только по идеальной кривой, то есть Земля может двигаться только по окружности или же по окружности, центр которой, в свою очередь, вращается по окружности вокруг Солнца. То есть может существовать наложение разных инерциальных движений. Последний тип движения можно усложнить, добавив еще больше окружностей в композиции. Такое вращение называется движением по эпициклам. Оно было придумано еще для согласования птолемеевой системы с наблюдаемыми положениями планет.

Поэтому Галилей отрицал кеплеровское движение планет по эллипсам. Они с Кеплером обменивались письмами, которые были на-

писаны в довольно-таки раздражительном тоне⁵. И это несмотря на их полную поддержку одной и той же планетарной системы.

Итак, Галилей считал, что Земля движется вокруг Солнца по инерции. С точки зрения механики Ньютона это явная ошибка, так как на Землю действует гравитационная сила. Однако с точки зрения общей теории относительности Галилей должен быть прав: в силу этой теории, в гравитационном поле тела движутся по инерции по крайней мере тогда, когда их собственной гравитацией можно пренебречь. Такое движение происходит по так называемой геодезической кривой. В плоском пространстве это просто прямая мировая линия, а в случае планеты Солнечной системы это такая геодезическая мировая линия, которая отвечает эллиптической траектории, а не обязательно круговой. К сожалению, Галилей этого не мог знать.

Однако из общей теории относительности известно, что движение происходит по геодезической, только если можно пренебречь искривлением пространства самим движущимся телом (планетой) и считать, что оно искривляется исключительно гравитирующим центром (Солнцем). Возникает естественный вопрос: так прав ли был Галилей по поводу инерциальности движения Земли вокруг Солнца? И хотя это уже и не столь важный вопрос, так как теперь мы знаем причину, по которой люди не слетают с Земли, возможно, он имеет отношение к геометрическому описанию гравитации.

⁵ Кстати, в момент своего создания система Коперника описывала наблюдаемые явления гораздо хуже системы Птолемея. Так как Коперник тоже верил только в движение по идеальным окружностям, у него получалось, что центры орбит некоторых планет находились за пределами Солнца. (Последнее являлось одной из причин поддержки публикации Коперником своих работ. Ведь он верил в свою систему исходя из эстетических соображений, а наличие странных смещений центров орбит за пределы Солнца в эти соображения не вписывались.)

Поучительно то, что в принципе система Птолемея могла описывать наблюдаемые данные с любой наперед заданной точностью — нужно было только добавить необходимое число эпициклов. Однако, несмотря на все логические противоречия в исходных представлениях ее создателей, только система Коперника могла привести к концептуальному перевороту в наших взглядах на природу — к закону всемирного тяготения, который описывает как движение планет, так и падение яблока на голову Ньютона, а в дальнейшем и к понятию поля.

Как можно «увидеть» черную дыру?

Прежде чем рассказать о том, как астрономы наблюдают черные дыры, обсудим еще одно важное их свойство, которое косвенным образом позволяет идентифицировать объекты на ночном небе как черные дыры. Для этого взглянем по-другому на распространение света в кривом пространстве. Вспомним, что свет — это волна, а представление его в виде лучей является приближением, когда длина волны света много меньше размеров объектов, на фоне которых он распространяется.

Электромагнитная волна — это периодически меняющееся во времени с некоторой частотой электромагнитное поле. Ненулевое электромагнитное поле, которое не меняется во времени, называется статическим. Оно может создаваться только некоторым постоянным распределением электрических зарядов. Например, поле Кулона, создаваемое покоящимся точечным электрическим зарядом, является примером статического электромагнитного поля. При этом ускоренно движущиеся заряды излучают электромагнитные волны, но у электромагнитного излучения есть некоторое отличительное, важное для нашего обсуждения, свойство. Рассмотрим, например, равномерно заряженную сферическую оболочку. За пределами своей поверхности она создает поле, идентичное полю Кулона точечного заряда, сосредоточенного в ее центре.

Представим себе теперь, что такая оболочка совершает колебательные движения по радиусу, сохраняя идеальную сферическую симметрию. За ее пределами всегда будет одно и то же кулоновское поле — его вид не зависит от радиуса сферы. То есть несмотря на то, что в данном случае заряд совершает ускоренное движение, электромагнитное излучение не образуется. Аналогично от такой оболочки не будет образовываться и гравитационное излучение при рассмотрении соответствующего поля.

Следует отметить, что такие же колебания оболочки в воздухе приведут к возникновению звуковых волн. Это показывает, что обсуждаемое свойство электромагнитных и гравитационных полей является совершенно нетривиальным. Говоря научным языком, для того же электромагнитного излучения необходимо наличие не просто заряда, а более тонких характеристик поля, в частности так называемого дипольного момента, ускоренно меняющегося во времени. Последний в случае идеальной сферической симметрии — относительно центра сферы — всегда равен нулю. Если бы эта же сферическая оболочка летела с ускорением мимо нас, то дипольный момент менялся бы во времени и оболочка излучала бы точно так же, как

точечный заряд,двигающийся по той же траектории, что и ее центр. Аналогичное, но немного более сложное свойство имеется и у гравитационного излучения.

Ученик старших классов должен знать, что энергия E электромагнитной волны пропорциональна ее частоте ω : $E = \hbar\omega$, где коэффициент пропорциональности \hbar — это так называемая постоянная Планка. Чем выше частота света, тем меньше длина его волны $\lambda = 2\pi c/\omega$. Электромагнитные волны низкой частоты являются радиоволнами. Далее, увеличивая частоту, мы перейдем к инфракрасному излучению, а затем к видимому свету. Красный свет имеет самую низкую частоту из видимого спектра, а фиолетовый — самую высокую. При дальнейшем увеличении частоты мы переходим к ультрафиолетовому излучению, затем к рентгеновскому и, наконец, к гамма-излучению. Наоборот, при стремлении частоты к нулю, а длины волны, соответственно, к бесконечности в пределе получается не меняющееся во времени (статическое) поле.

Рассмотрим теперь источник электромагнитного излучения, который испустил волну где-то недалеко от горизонта черной дыры, как изображено на рис. В12. По мере удаления от черной дыры, свет совершает работу против гравитационных сил и теряет энергию. Поэтому если исходно он находился в диапазоне, скажем, синего цвета, то, пройдя какое-то расстояние вверх по радиусу, он может покраснеть или даже перейти в диапазон радиоволн.

Если теперь мы зафиксируем точку наблюдения где-то над черной дырой, но при этом будем медленно менять положение источника света около горизонта, не меняя частоты его излучения, то увидим следующую картину. Вне зависимости от того, насколько высока частота испускаемого излучения, по мере приближения его источника к горизонту черной дыры частота наблюдаемого электромагнитного излучения будет уменьшаться вплоть до нуля, когда источник достигнет горизонта. Соответственно, свет от источника постепенно погаснет.

Рассматриваемое явление имеет ту же самую природу, что и замедление всех процессов на падающем в черную дыру камне с точки зрения висящего наблюдателя. Поэтому оно распространяется также и на другие типы излучений, например гравитационное, и лежит в основе важного свойства черных дыр, которое мы сейчас обсудим.

Очевидно, что во время образования черной дыры возникает множество разного рода излучений. И не только электромагнитных. Можно показать, что при формировании черной дыры излучается все, что может излучиться, а получившееся небесное тело создает только стационарные, постоянные во времени поля. Причем так, словно со-

ответствующие заряд и масса равномерно распределены по поверхности горизонта.

Поясним данное наблюдение с помощью рис. 8. Представим себе, что под горизонтом имеются электрические заряды. Пусть эти заряды ускоренно движутся. Очевидно, что они порождают электромагнитное излучение. Однако оно не выходит за пределы горизонта, то есть неподвижная заряженная черная дыра создает стационарное электрическое поле. То же самое верно и для других полей, ею создаваемых, в том числе и для гравитационного поля.

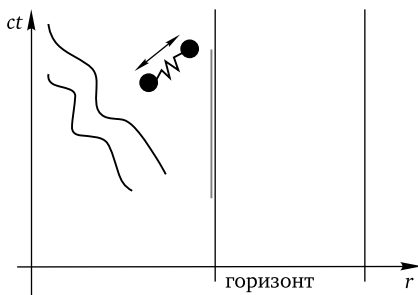


Рис. 8. Светлым изображены мировые линии произвольно двигающихся зарядов. Гантелька на пружинке — это два заряда, совершающие колебательные движения. Все эти объекты рождают электромагнитное излучение. Однако снаружи черной дыры оно отсутствует

Помимо этого любые более тонкие, чем заряд, характеристики электромагнитного поля, ответственные за излучение электромагнитных волн, у черной дыры равны нулю, даже если она вращается.

Это свойство отличает черную дыру от любой планеты или звезды и называется теоремой «Нет волос» (No hair theorem). Она утверждает, что у черной дыры нет никаких других характеристик (волос), кроме тех, что создают стационарные электромагнитные и гравитационные поля. А именно, любая черная дыра однозначно определяется массой, угловым моментом и электрическим зарядом. Из чего бы ни были созданы две черные дыры и что бы ни происходило внутри их горизонтов, они неотличимы, если у них одинаковая масса, угловой момент и электрический заряд.

► Все эти наблюдения верны для макроскопических черных дыр, для которых применима классическая теория гравитации — общая теория относительности. Совершенно отличная картина складывается для микроскопических дыр, где существенную роль играют эффекты квантовой гравитации, которая сейчас находится только в стадии разработки и потому для наглядного описания не подходит. ◀

Перейдем теперь к обсуждению того, как черные дыры наблюдаются на звездном небе. Если черная дыра поглотила все вещество, которое ее окружало, то ее можно увидеть только через искажение лучей света от дальних звезд. То есть если бы недалеко от нас оказалась черная дыра в таком чистом виде, то мы увидели бы примерно то, что изображено на обложке. Но даже встретив подобное явление, нельзя быть уверенным, что это черная дыра, а не просто массивное, несветящееся тело. Требуется определенная работа, чтобы отличить одно от другого.

Однако в реальности черные дыры окружены облаками, содержащими элементарные частицы, пыль, газы, метеориты, планеты и даже звезды. Поэтому астрономы наблюдают нечто вроде картинки, изображенной на рис. 9. Но как они делают вывод, что это именно черная дыра, а не какая-нибудь звезда?

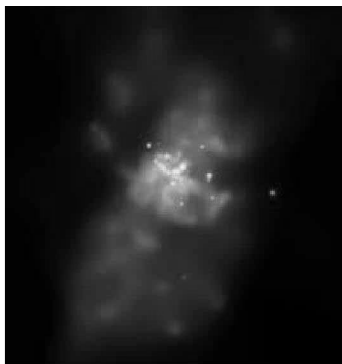


Рис. 9. Реальность гораздо прозаичней, и нам приходится наблюдать черные дыры в окружении различных небесных тел, газов и облаков пыли

Для начала выбирают определенного размера область на звездном небе, как правило, в двойной звездной системе или в активном ядре галактики. По спектрам излучения, исходящего из нее, определяется масса и поведение вещества в ней. Далее фиксируют, что от рассматриваемого объекта исходит излучение, как от падающих в гравитационном поле частиц, а не только от термоядерных реакций, идущих в недрах звезд. Излучение, являющееся, в частности, результатом взаимного трения падающей на небесное тело материи, содержит значительно более энергичное гамма-излучение, чем результат термоядерной реакции.

Если наблюдаемая область достаточно мала, не является пульсаром и в ней сосредоточена большая масса, то делается вывод, что это черная дыра. Во-первых, теоретически предсказано, что после вы-

горания термоядерного топлива не существует никакого состояния вещества, которое могло бы создавать давление, способное предотвратить коллапс столь большой массы в столь маленькой области.

Во-вторых, как только что было подчеркнуто, рассматриваемые объекты не должны быть пульсарами. Пульсар — это нейтронная звезда, которая, в отличие от черной дыры, имеет поверхность и ведет себя как большой магнит, что является одной из тех самых более тонких характеристик электромагнитного поля, чем заряд. Нейтронные звезды, являясь результатом очень сильного сжатия исходных вращающихся звезд, совершают еще более быстрые вращения, ибо угловой момент должен сохраняться. Это приводит к тому, что такие звезды создают магнитные поля, меняющиеся во времени. Последние играют основную роль при образовании характерного пульсирующего излучения.

Все найденные на данный момент пульсары имеют массу меньше двух с половиной масс Солнца. Источники характерного энергичного гамма-излучения, масса которых превышает этот предел, не являются пульсарами. Как видно, этот предел массы совпадает с теоретическими предсказаниями, сделанными исходя из известных нам состояний вещества.

Все это, хотя и не является прямым наблюдением, представляет собой достаточно убедительную аргументацию в пользу того, что астрономы видят именно черные дыры, а не что-либо другое. Хотя что можно считать прямым наблюдением, а что нет — является большим вопросом. Ведь вы, читатель, видите не саму книгу, а лишь рассеянный ею свет. И только совокупность тактильных и визуальных ощущений убеждает вас в реальности ее существования. Точно так же и ученые делают вывод о реальности существования того или иного объекта на основании всей совокупности наблюдаемых ими данных.

Что такое квантовое поле?

До сих пор мы обсуждали то, как устроены черные дыры, их формирование и наблюдение на звездном небе. Все соответствующие свойства черных дыр можно понять, не выходя за рамки классической теории поля и классической гравитации Эйнштейна. Но у черных дыр есть по крайней мере еще одно очень важное свойство — они могут терять энергию, рождая частицы. Это явление, теоретически предсказанное Хокингом, объясняется квантовыми эффектами на фоне гравитационного поля черной дыры. Оно пока еще плохо понято и не подтверждено экспериментально, но в силу его важности и красоты обсудить его полезно.

Чтобы объяснить, в чем состоит явление, предсказанное Хокингом, необходимо овладеть некоторыми основными элементами квантовой теории поля. Для этого рассмотрим двумерную решетку из одинаковых шариков, соединенных одинаковыми пружинками (рис. 10). Она является моделью двумерной кристаллической решетки, где шарики играют роль атомов, а пружинки заменяют электромагнитные силы между ними. Для простоты мы рассмотрим именно двумерную решетку. Нет никаких принципиальных сложностей с переходом к трехмерной решетке, кроме как чрезмерной загроможденности картинок лишними элементами.

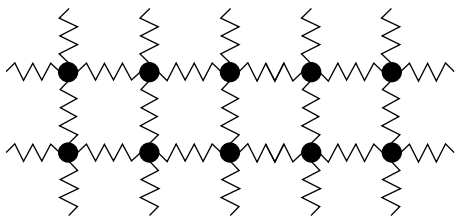


Рис. 10. Модель двумерной кристаллической решетки

Представим себе, что плотность шариков и пружинок растет, а их размер уменьшается, как это изображено на рис. 11. В непрерывном пределе мы получим эластичное тело, которое мы обычно наблюдаем, не замечая его тонкой атомарной структуры.

Примером дискретного поля, заданного в данный момент времени, является полный набор значений отклонений всех шариков решетки от их положений равновесия. В положении равновесия и при отсутствии внешних воздействий рассматриваемая решетка является идеально квадратной, а значение поля в таком случае везде равно

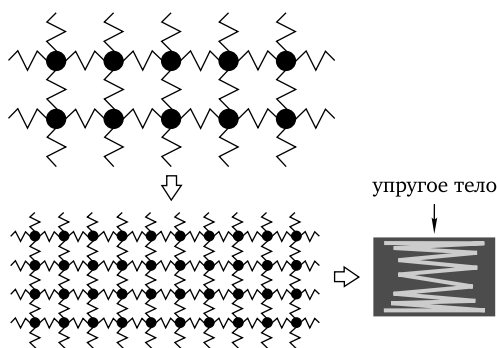


Рис. 11. Механическая модель простейшей теории поля в двух измерениях

нулю. Это состояние решетки является вакуумом для обсуждаемого поля.

В непрерывном пределе мы имеем дело с настоящим, а не дискретным полем, которое задано в каждой точке тела и описывает упругую деформацию соответствующего маленького его сегмента. Динамика такого поля (его изменение во времени) описывает деформации больших масштабов по сравнению с расстоянием между шариками в положении равновесия.

Если мы приложим внешнюю постоянную силу и потянем за один из шариков, как это изображено на рис. 12, то через некоторое время установится новое равновесие. В нем значения смещений шариков относительно исходного равновесия не будут равны нулю. Иными словами, поле будет отличаться от своего вакуумного значения. По мере удаления от места приложения силы отличие поля от его вакуумного значения будет уменьшаться вплоть до нуля.

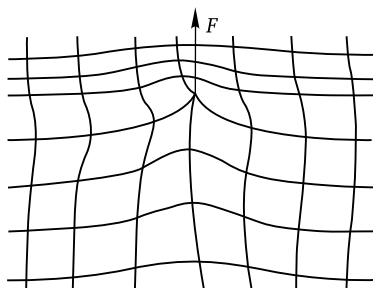


Рис. 12. Искажение решетки под воздействием внешней силы. Простейший пример статического поля

Рассматриваемая здесь ситуация представляет собой пример статического (неменяющегося во времени) поля — аналог того, как по-

коящийся электрический заряд возмущает электромагнитное поле, или же того, как масса возмущает гравитационное поле.

► На самом деле аналогия даже более сильная, чем может показаться. Совпадают некоторые существенные элементы формул. Например, вид потенциала Кулона или Ньютона связаны с формой искривления *трехмерной* решетки, определяемой рассматриваемым полем. Интересно, что если приложить возмущение в двух точках решетки, то между этими точками возникнет сила — некоторый аналог силы Кулона или Ньютона, но для нас все это сейчас не столь важно. ◀

Теперь отпустим шарик, к которому было приложено внешнее воздействие. В результате по решетке побегут волны — шарики начнут колебаться (рис. 13). Они являются простым аналогом электромагнитных и гравитационных волн. Если по решетке провести палкой, то мы получим нечто вроде того, как ускоренно движущаяся заряженная частица рождает электромагнитное или гравитационное излучение. Аналогия очень близкая с точностью до нюансов, связанных с электромагнитным и гравитационным излучениями, которые обсуждались в начале предыдущей главы.

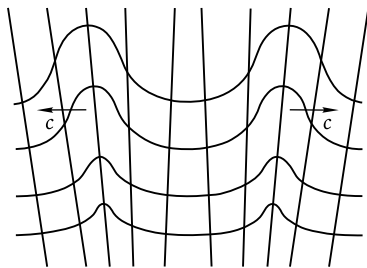


Рис. 13. Упругие волны в кристалле. Здесь c — скорость этих волн — аналог скорости электромагнитных волн

Нами описана механическая модель для теории упругих и звуковых волн в кристалле — классической теории поля. Нас же интересуют квантовые поля. Опуская некоторые существенные подробности, связанные с вероятностной интерпретацией квантовой механики, можно сказать, что переход от классических частиц к квантовым — это то же самое, что и переход от геометрической оптики к волновой. Траектории точечных частиц — классический предел волн — это аналог геометрических лучей света.

То есть при учете квантовых эффектов для микроскопических частиц последние размываются в волны. Как это отражается на кри-

сталлической решетке, изображенной на рис. 10, мы поймем чуть позже. Сейчас же обсудим последствия рассматриваемого перехода — квантование — для одной частицы.

Рассмотрим частицу в яме, как изображено слева на рис. 14. В основном состоянии она покоится на дне ямы. В квантовой же теории мы имеем дело с волнами, в случае ямы — со стоячими волнами. В основном состоянии в яме уместается одна длина волны, как изображено справа на рис. 14. То есть даже в основном состоянии квантовая частица (волна) совершает так называемые нулевые колебания и имеет отличную от нуля энергию.

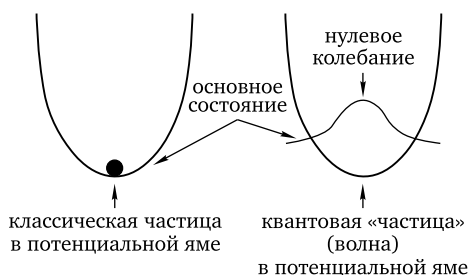


Рис. 14. Основное состояние классической и квантовой частицы

Возбужденные же состояния квантовой частицы описываются стоячими волнами с бóльшим, чем одна, числом длин волн, уместающихся в яме. Это изображено справа на рис. 15. Энергия квантовой частицы пропорциональна числу длин волн, то есть может принимать только дискретные значения. Отсюда и возникает квантование энергии в квантовой механике при движении в ограниченной области.

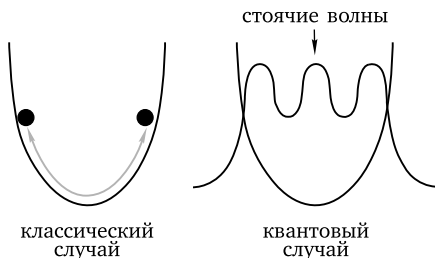


Рис. 15. Возбужденное состояние классической и квантовой частицы

Что же происходит с кристаллом, когда частицы, из которых он состоит, становятся квантовыми? Для упрощения картинок мы рассмотрим одномерный кристалл. Пружинки задают потенциал, в ко-

тором живут частицы, составляющие кристалл. Каждая из частиц становится теперь волной, как изображено на рис. 16.

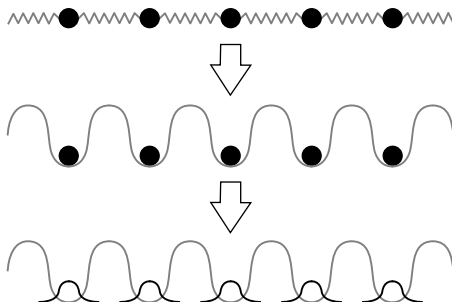


Рис. 16. Светлым показан потенциал, который создают пружинки. Кругами нарисованы классические частицы, внизу — квантовые частицы

В основном состоянии кристалла его частицы совершают нулевые колебания. Последние представляют собой наложение волн всех длин, которыми заполнен кристалл. В современном представлении так должно быть устроено основное состояние (вакуум) любого квантового поля (рис. В13). Например, в квантовой электродинамике — теории, описывающей физику фотонов (электромагнитных волн) и электронов с позитронами, — вакуум — это своего рода смесь из колебаний электромагнитного и электронно-позитронного поля.

Появление упругой волны в кристалле является уже возбуждением относительно нулевых колебаний вакуума. То есть рождение упругих волн в кристалле отвечает переходу его атомов из основных в возбужденные состояния.

Наличие нулевых колебаний в кристаллах подтверждается экспериментом. Гипотеза нулевых колебаний в квантовой теории фундаментальных полей и гравитации порождает неясности и приводит к разного рода нерешенным проблемам. Однако их наличие в разных ситуациях подтверждается экспериментами, некоторые из которых мы опишем ниже. Они играют существенную роль в физике квантовых полей.

Этих представлений нам достаточно, чтобы понять, откуда берется излучение Хокинга.

Излучение Хокинга, или как распадаются черные дыры?

Эффект Хокинга — это излучение частиц черной дырой, которое приводит к ее распаду. В его основе лежит простой физический эффект. Рассмотрим маятник, изображенный на рис. 17, длину плеча

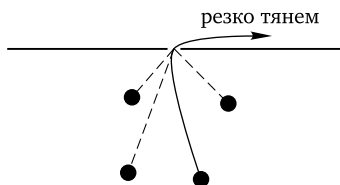


Рис. 17. Амплификация колебаний маятника при укорачивании его плеча

которого можно менять. Если длина уменьшается, то амплитуда и энергия колебаний растет. Это явление называется усилением или амплификацией. То же самое произойдет, если резко изменить форму потенциала, в котором колеблется шарик, как изображено на рис. 18.

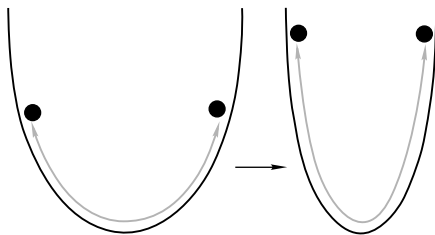


Рис. 18. Та же амплификация при резком изменении формы потенциала

Конечно, детали такого процесса сильно зависят от того, как быстро меняется форма потенциала по сравнению с периодом колебаний. Амплификация может происходить по-разному, в зависимости от того, медленно или быстро меняются параметры потенциала. Например, при адиабатическом (очень медленном) изменении потенциала классическая частица может вообще не возбудиться.

При этом если маятник исходно покоился, то очевидно, при изменении размера плеча он и не возбудится (рис. 19). Однако вспомним, что в квантовом случае колебания происходят даже в основном состоянии, поэтому, как изображено на рис. 20, амплификация происходит всегда. То есть если исходно мы имели дело с нулевыми

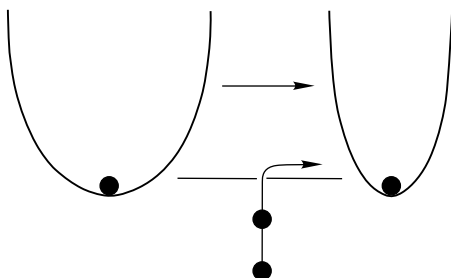


Рис. 19. Маятник, находящийся исходно в покое, не возбудится при изменении размера плеча

колебаниями, то после изменения формы потенциала частица перейдет в состояние, которое будет описываться наложением разных стоячих волн. Коэффициенты разных компонент в этой композиции волн будут определять вероятность того, что частица осядет в соответствующем состоянии измененного потенциала. Последнее наблюдение следует из совокупности экспериментальных данных и лежит в основе вероятностной интерпретации квантовой механики.

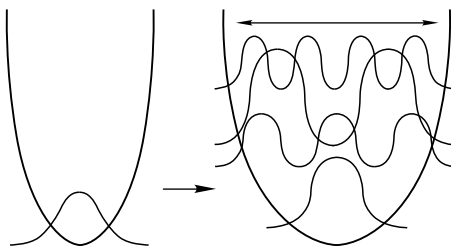


Рис. 20. В квантовом случае частица совершает колебания даже в основном состоянии, поэтому амплификация происходит всегда

Все это верно для случая одной частицы. Посмотрим теперь, как обсуждаемое явление проявляется в случае квантового поля. Речь пойдет о так называемом эффекте Казимира, который был изначально предсказан теоретически и только затем подтвержден экспериментом.

Оказывается, если поместить две нейтральные проводящие пластины в вакууме параллельно друг другу, то между ними возникнет сила (рис. 21). Методами квантовой теории поля можно показать, что величина этой силы, деленная на единицу площади, определяется по формуле

$$P = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4},$$

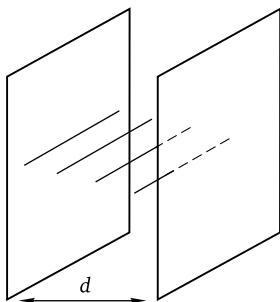


Рис. 21. На две пластины в вакууме действует сила Казимира, приводящая к притяжению между ними

где d — это расстояние между пластинами. Сила Казимира становится заметной только на расстояниях порядка нескольких микрон ($d \lesssim 10^{-6}$ м). Она порождается стоячими нулевыми колебаниями электромагнитного поля между пластинами. Возникает эта сила по той причине, что нулевым колебаниям энергетически выгодно занимать меньший объем. Поэтому сила Казимира является притягивающей. Можно также показать, что другие поля тоже дают вклады в силу Казимира, но они по тем или иным причинам подавлены по сравнению с электромагнитным.

Чтобы избежать недопонимания, следует подчеркнуть еще раз, что все это происходит в вакууме. Между пластинами нет никаких частиц. Частицы — это возбуждения полей относительно нулевых колебаний — основного состояния, вакуума. В обсуждавшейся в предыдущей главе ситуации частицы составляли кристаллическую решетку, возбуждениями которой были упругие волны. В основном состоянии этих волн нет, но есть нулевые колебания решетки. Нас тогда интересовала теория поля, описывающая возбуждения кристаллической решетки относительно основного состояния, но мы не интересовались теорией, описывающей сами эти частицы кристалла.

Представим себе теперь, что мы резко изменили расстояние между пластинами в ту или иную сторону, как изображено на рис. 22. Это приведет к амплификации стоячих нулевых колебаний между пластинами — они перейдут в возбуждения. В результате из вакуума появятся частицы. Близкий аналог описанного здесь явления совсем недавно был обнаружен экспериментально, но все еще требует независимого подтверждения.

В этом нет никакой мистики или нарушения каких-либо законов природы вроде закона сохранения энергии. Мы не черпаем энергию или материю из ничего. Дело в том, что та сила, которая совершает работу по перемещению пластин, совершает еще и дополнительную

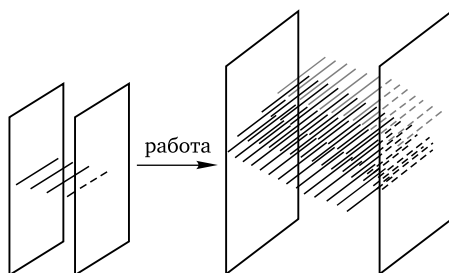


Рис. 22. Динамический эффект Казимира

работу по рождению частиц. То есть если силы Казимира не было бы в природе, то в рассматриваемом эксперименте нам пришлось бы совершить меньшую работу — необходимую только для ускорения и затем торможения пластин.

Читатель может спросить: при чем здесь черные дыры? Оказывается, если рассмотреть процесс коллапса в присутствии квантовых полей, то образование горизонта черной дыры существенным образом сказывается на поведении нулевых колебаний. Дело в том, что горизонт черной дыры является границей, на которой квантовые поля, как и свет, ведут себя особым образом. То есть аналогично пластинам в эффекте Казимира горизонт определенным образом ограничивает нулевые колебания: вспомним, что без пластин нулевые колебания являются бегущими волнами, тогда как в их присутствии силу Казимира создают стоячие волны между ними.

В результате то, что было нулевым колебанием до образования горизонта, после этого становится возбуждением над вакуумом — частицами. Таким образом, в результате формирования черной дыры мы получаем поток частиц, идущий от горизонта. Это не частицы, которые вылетают из-под него. Такого не может быть, так как ничто не может двигаться быстрее света. Рассматриваемое излучение образуется вблизи внешней стороны горизонта.

Так как последнее явление пока еще не подтверждено экспериментально, остаются не совсем понятными некоторые моменты, связанные с тем, как на микроскопическом уровне происходит процесс рождения частиц. Безусловно, есть масса интересных предложений по деталям формирования излучения, но все они страдают от различных недостатков и логических противоречий, поэтому мы их здесь обсуждать не будем.

Очевидно, излучая частицы, черная дыра будет расходовать собственную энергию, то есть терять массу. В идеале она в конце концов полностью испарится. Самым интересным в излучении Хокинга

является то, что анализ спектра излучаемых частиц показывает, что макроскопическая черная дыра ведет себя так, как будто она имеет температуру. Величина этой температуры для дыры без заряда определяется по формуле

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B},$$

где M — масса черной дыры, а k_B — постоянная Больцмана.

Для черной дыры, имеющей массу Солнца, эта температура порядка 10^{-7} градусов Кельвина, что намного меньше температуры 2,7 градусов Кельвина космологического микроволнового излучения, которое заполняет всю Вселенную. Если бы не это микроволновое излучение, черная дыра массы Солнца испарилась бы полностью за 10^{67} лет. Для сравнения: время, прошедшее с Большого Взрыва до сегодняшнего дня, составляет порядка 10^{10} лет. То есть, как видно, эффект Хокинга очень слабый.

Чтобы черная дыра теряла массу, ее температура должна быть выше температуры микроволнового излучения, иначе, даже если вблизи рассматриваемой дыры ничего больше нет, она скорее будет поглощать фотоны этого излучения, чем испаряться. Но при этом черная дыра массы $2 \cdot 10^5$ килограмм распадется за одну секунду. По мере испарения ее масса, а поэтому и радиус, будут уменьшаться. Соответственно, температура будет расти.

Чтобы пояснить происхождение и смысл формулы для температуры хокинговского излучения, поучительно рассказать о следующей истории, которую автор слышал из уст нескольких ее свидетелей — сотрудников Института теоретической и экспериментальной физики в Москве. Автор сам не был ее свидетелем, поэтому может не совсем точно передать то, что происходило.

История произошла на рубеже 60–70-х годов прошлого века, еще до открытия Хокинга. Тогда ученые только начинали понимать физику черных дыр. Так вот, вернувшись с какой-то очередной конференции, Яков Борисович Зельдович, великий советский физик, рассказывал Владимиру Наумовичу Грибову, тоже великому советскому физику, что в природе существуют такие объекты, из которых ничто не может вылететь в принципе. Грибов в ответ утверждал, что в квантовой физике ситуация должна быть другой. На аргументы Зельдовича о невозможности превысить скорость света Грибов отвечал, что он ничего не понимает в черных дырах, но уверен, что квантовая механика сильнее всех этих ограничений. В качестве одного из аргументов Грибов спросил Зельдовича о том, как же черная дыра может удерживать волны (квантовые частицы), длина которых равна или больше ее размера — радиуса Шварцшильда.

Если посмотреть внимательно на приведенную выше формулу для температуры Хокинга и вспомнить ее смысл как величины, пропорциональной средней энергии частиц в излучении, то должны отчасти стать понятными слова Грибова. Дело в том, что волна с энергией, равной температуре Хокинга, будет иметь длину порядка размера горизонта соответствующей черной дыры.

Конечно, не следует буквально воспринимать слова Грибова, но многих восхищает поразительная интуиция и глубокое понимание квантовой теории Владимиром Наумовичем. Ведь он не проделал никаких вычислений на данную тему, а при этом понял физическую суть и предсказал характерную величину эффекта. Автор надеется, что этот рассказ поможет и читателю осознать происхождение температуры Хокинга.

Заключение

Итак, мы обсудили основные характерные черты черных дыр и их свойства. Наше обсуждение не содержало практически никаких вычислений, и автору остается надеяться, что эта книга не создаст у читателя ложного впечатления, что занятие наукой сводится к разглагольствованию на основе правдоподобных рассуждений без проверки всех интуитивных умозаключений при помощи строгих математических вычислений и грамотно поставленных воспроизводимых экспериментов. Например, если добросовестный читатель захочет поставить эксперимент, описанный на рис. 17, то он должен иметь в виду, что если это будет сделано неграмотно, то малейшее возбуждение маятника при вытягивании веревки приведет к его амплификации. Эксперимент нужно ставить так, чтобы гарантировать, что в процессе сокращения плеча на маятник не действовали никакие другие силы, помимо той, которая сокращает его плечо.

Да простит читатель автору некоторый, возможно, чрезмерный моралистический пафос, но следует помнить, что глубокая физическая интуиция является результатом кропотливого труда — многочисленных вычислительных и экспериментальных проверок своих общих умозаключений. Хотя, безусловно, в своем исследовании очень правильно ставить под сомнение общепризнанные истины и никогда не останавливаться и не удовлетворяться полученными ответами, но также уместно относиться с уважением к результатам работы многих поколений ученых, особенно если они корректно описывают какой-то круг явлений.

Выдвигая собственные наглядные идеи по описанию того или иного экспериментального факта, читатель должен помнить, что его гипотезы не просто должны более «правдоподобно» описывать этот факт, они также обязаны описать и все явления, сопряженные с данным экспериментальным наблюдением. А это уже довольно трудная задача, решение которой невозможно получить, руководствуясь лишь правдоподобными рассуждениями без детальной проверки.

Магазин «Математическая книга»

Книги издательства МЦНМО можно приобрести в магазине «Математическая книга» в Москве по адресу: Б. Власьевский пер., д. 11; тел. (499) 241-72-85; biblio.mccme.ru
Книга — почтой: <http://biblio.mccme.ru/shop/order>
Книги в электронном виде: <http://www.litres.ru/mcnmo/>

Мы сотрудничаем с интернет-магазинами

- Книготорговая компания «Абрис»; тел. (495) 229-67-59, (812) 327-04-50; www.umlit.ru, www.textbook.ru, абрис.рф
- Интернет-магазин «Книга.ру»; тел. (495) 744-09-09; www.kniga.ru

Наши партнеры в Москве и Подмоскowie

- Московский Дом Книги и его филиалы (работает интернет-магазин); тел. (495) 789-35-91; www.mdk-arbat.ru
- Магазин «Молодая Гвардия» (работает интернет-магазин): ул. Б. Полянка, д. 28; тел. (499) 238-50-01, (495) 780-33-70; www.bookmg.ru
- Магазин «Библио-Глобус» (работает интернет-магазин): ул. Мясницкая, д. 6/3, стр. 1; тел. (495) 781-19-00; www.biblio-globus.ru
- Спорткомплекс «Олимпийский», 5-й этаж, точка 62; тел. (903) 970-34-46
- Сеть киосков «Аргумент» в МГУ; тел. (495) 939-21-76, (495) 939-22-06; www.arg.ru
- Сеть магазинов «Мир школьника» (работает интернет-магазин); тел. (495) 715-31-36, (495) 715-59-63, (499) 182-67-07, (499) 179-57-17; www.uchebnik.com
- Сеть магазинов «Шаг к пятерке»; тел. (495) 728-33-09, (495) 346-00-10; www.shkolkniga.ru
- Издательская группа URSS, Нахимовский проспект, д. 56, Выставочный зал «Науку — Всем», тел. (499) 724-25-45, www.urss.ru
- Книжный магазин издательского дома «Интеллект» в г. Долгопрудный: МФТИ (новый корпус); тел. (495) 408-73-55

Наши партнеры в Санкт-Петербурге

- Санкт-Петербургский Дом книги: Невский пр-т, д. 62; тел. (812) 314-58-88
- Магазин «Мир науки и медицины»: Литейный пр-т, д. 64; тел. (812) 273-50-12
- Магазин «Новая техническая книга»: Измайловский пр-т, д. 29; тел. (812) 251-41-10
- Информационно-книготорговый центр «Академическая литература»: Васильевский остров, Менделеевская линия, д. 5
- Киоск в здании физического факультета СПбГУ в Петергофе; тел. (812) 328-96-91, (812) 329-24-70, (812) 329-24-71
- Издательство «Петроглиф»: Фарфоровская, 18, к. 1; тел. (812) 560-05-98, (812) 943-80-76; k_i@bk.ru, k_i@petroglyph.ru
- Сеть магазинов «Учебная литература»; тел. (812) 746-82-42, тел. (812) 764-94-88, тел. (812) 235-73-88 (доб. 223)

Наши партнеры в Челябинске

- Магазин «Библио-Глобус», ул. Молдавская, д. 16, www.biblio-globus.ru

Наши партнеры в Украине

- Александр Елисаветский. Рассылка книг налоговым платежом по Украине: тел. 067-136-37-35; df-al-el@bk.ru