

Э. Т. Ахмедов

**О рождении
и смерти
черных дыр**

Эмиль Ахмедов

О рождении и смерти черных дыр

«МЦНМО»

2015

УДК 524
ББК 22.632

Ахмедов Э. Т.

О рождении и смерти черных дыр / Э. Т. Ахмедов — «МЦНМО», 2015

ISBN 978-5-04-017522-2

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

УДК 524
ББК 22.632

ISBN 978-5-04-017522-2

© Ахмедов Э. Т., 2015
© МЦНМО, 2015

Содержание

О чем эта книга и на кого она рассчитана	5
Как наглядно представить пространство-время и его искривление?	7
Конец ознакомительного фрагмента.	14

Э. Т. Ахмедов

О рождении и смерти черных дыр

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 достижения, 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/dsrtophysika6_Politech.phtml, где выложена видеOVERсия 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 Сусловой 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.

Э. Г. Ахмедов

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.

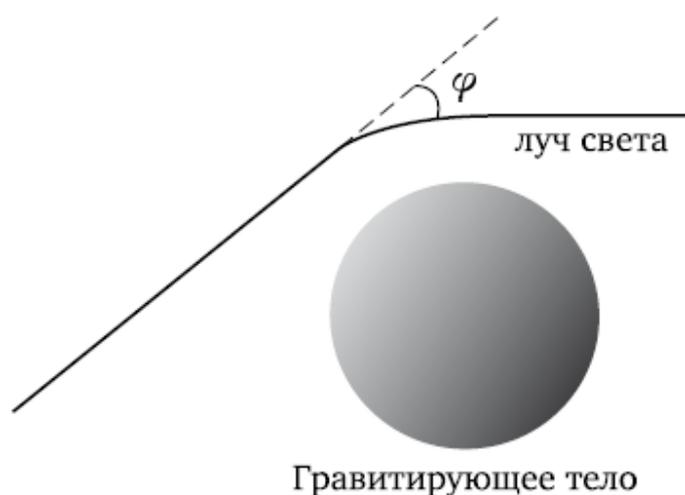


Рис. 1. Без гравитирующего тела траектория света была бы прямой. В его присутствии угол отклонения света φ определяется массой тела, а также расстоянием между его центром и лучом

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 $v_{II} \geq c \approx 300000$ километров в секунду.

Из выписанных формул видно, что радиус такой планеты должен быть меньше, чем

$$r_{ШВ} = \frac{2GM}{c^2}$$

– 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 – 700000 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 (точки 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

¹ Цуг – пакет электромагнитных волн.

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).

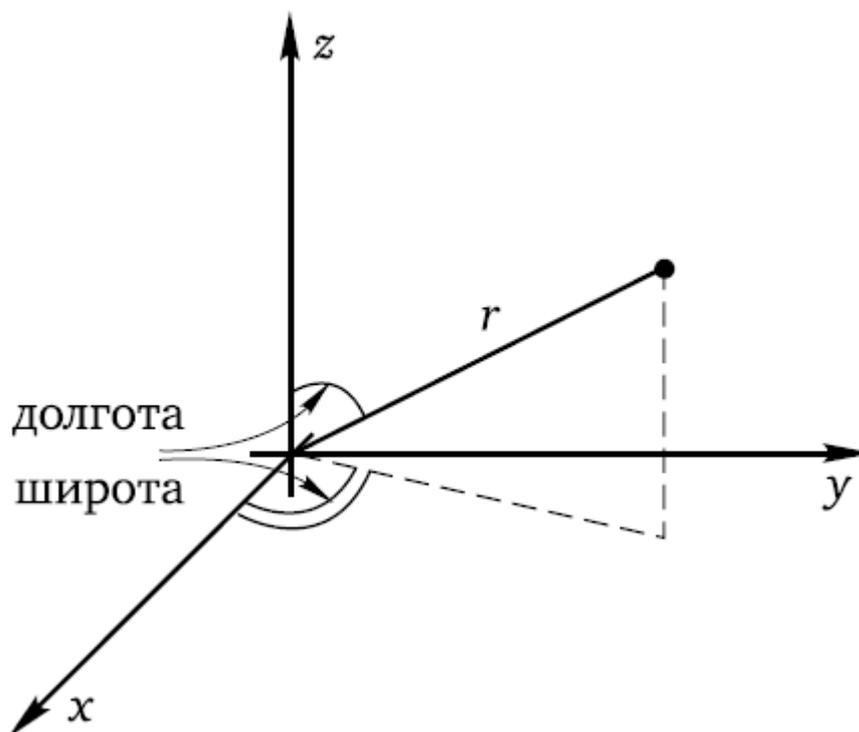


Рис. 2. Здесь изображен пространственный срез – «фотография» пространства, то есть «один из кадров фильма», показывающего, как ситуация развивается во времени. Обычно положение точки в таком пространстве определяют с использованием декартовых координат (x, y, z) . Однако есть и другой общепринятый способ 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 сферы².

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.

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

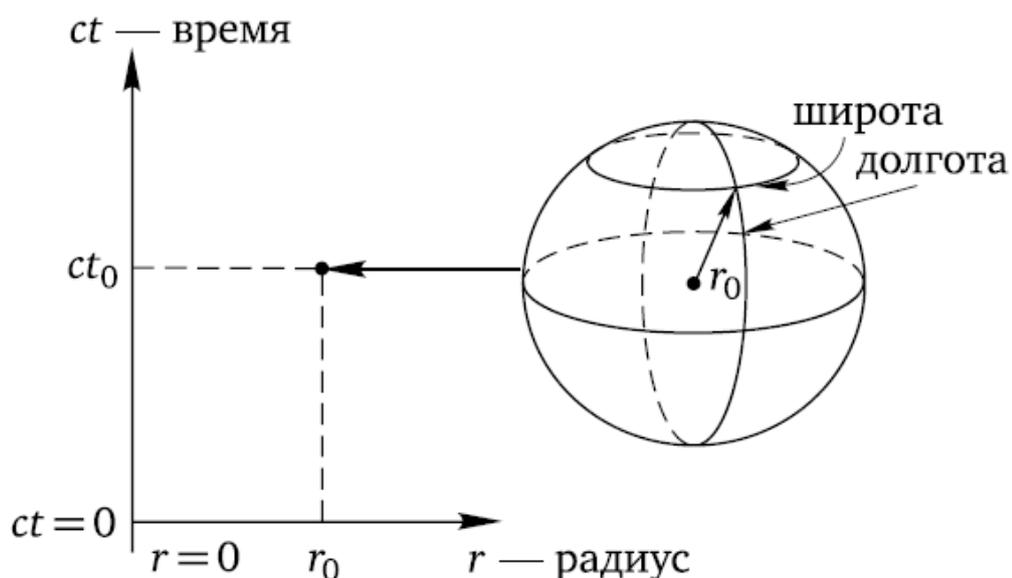


Рис. 3. Если изображать на плоскости только временную координату $c \cdot t$ события и его расстояние r до центра системы координат, то каждая точка такой плоскости может представлять любое положение на сфере радиуса r в пространстве, то есть с любым значением долготы и широты. Иными словами, каждая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

► 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. ◀

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 картинку 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 кото-

рой проходит дуг 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 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 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.

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

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.

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 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.

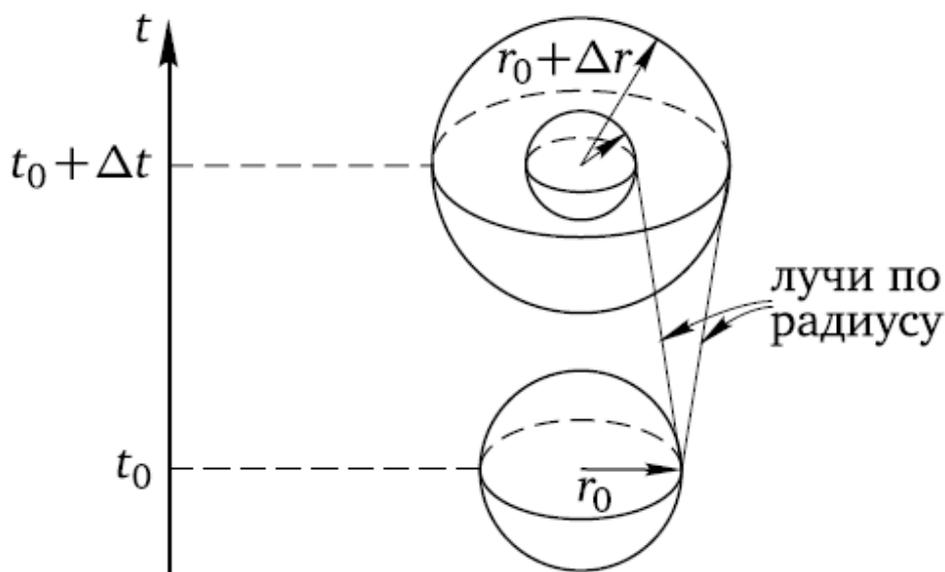


Рис. 4. По вертикали отложено время. В каждый заданный момент времени пространство расслоено на сферы, как луковица. В момент времени t_0 со сферы радиуса r_0 строго по радиусу испускаются два луча света. В следующий момент времени $t_0 + \Delta t$ фронты этих двух световых волн будут находиться на сферах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

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.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.