

Если расставить отражающие стенки в различных местах и определить время, которое необходимо, чтобы мяч упал на стенку, а затем возвратился обратно, можно избежать использования световых сигналов, которые уходят на слишком уже большие расстояния. Но какой бы метод мы ни применили, результат останется неизменным: неподвижный внешний наблюдатель всегда обнаружит, что частице нужно бесконечно большое время, чтобы достичь сферы Шварцшильда.

14. Внутри шварцшильдовской сферы

Хотя, согласно данным внешнего наблюдателя, частица никогда не достигнет сферы Шварцшильда и никакой световой сигнал не может в конечное время пересечь эту сферу, свободно падающему наблюдателю нужен конечный интервал его собственного времени, чтобы проникнуть в область внутри шварцшильдовской сферы. В связи с этим отнюдь не безынтересно выяснить, какие приключения ожидают отважного наблюдателя, рискнувшего самому прыгнуть в бездну, а не довольствоваться показаниями приборов. Итак, посмотрим, что скажет на этот счет теория.

Не забудем, что этот фантастический проект не представляет никакого интереса с точки зрения теории, если только гравитирующая масса не сжата до такой степени, что ее шварцшильдовская сфера лежит уже в пустом пространстве. У обычных небесных тел не обнаружится никаких «экзотических» явлений, связанных с существованием сферы Шварцшильда. Чтобы проиллюстрировать это обстоятельство, на рис. 53 приведена зависимость величины красного смещения для двух случаев: когда вся масса сконцентрирована в центре в одной точке (*a*) и когда она распределена по конечному объему, выходящему за шварцшильдовскую сферу (*b*). Дело вовсе не в том, что размазанное по пространству вещество будет чисто механически мешать проведению наблюдений в районе, где проходит сфера Шварцшильда, не позволяя приборам проникать через звездную материю. Даже если бы удалось прорыть тоннель через все протяженное небесное тело, никаких удивительных явлений в районе, где (номинально) проходит сфера Шварцшильда обнаружить не удалось бы, потому что вовсе не все вещество, образующее тело, участвует в

этом случае в создании кривизны внутренних областей тела. На рис. 54 изображено возрастание кривизны пространства-времени при приближении к центру вещества, размазанного по сфере; сравните этот рисунок с рис. 44,

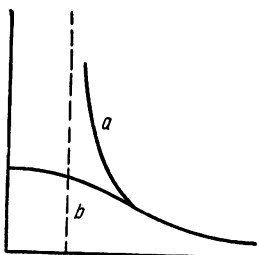


Рис. 53. Зависимость красного смещения от расстояния.

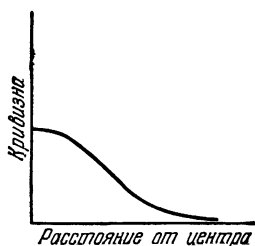


Рис. 54. Кривизна пространства-времени для протяженного тела.

где предполагалось, что вся масса вещества сосредоточена в центре.

На рис. 55 изображены условия, которые возникают в том случае, если все вещество сосредоточено в центре; конечно, такая схема в любом случае дает весьма идеализированную картину. На рисунке указано только одно пространственное направление (радиальное направление, проходящее через центр) и одно временное. На этом рисунке выбран переменный масштаб, так что в каждой точке луч света, идущий наружу или внутрь, представляется прямой линией, направленной под углом 45° к вертикали. Любое направление, лежащее между этими биссектрисами и вертикальным направлением, времениподобно; любое направление, более пологое, чем эти биссектрисы, пространственноподобно. Точки, лежащие на равных расстояниях от центра, находятся не на вертикальных линиях, а на кривых, которые выглядят, как гиперболы. Точки, дающие «одно и то же время» лежат на кривых, проходящих через одну и ту же точку; эта особая точка представляет собой радиус шварцшильдовской сферы для всех конечных времен. Две линии, выходящие из этой точки и направленные под углом в 45° вправо, представляют собой радиус сферы Шварцшильда в бесконечно удаленном будущем и бесконечно удаленном прошлом. Эти две линии ограничивают сегмент пространства-времени, который можно считать

за внешнюю область относительно шварцшильдовской сферы; лишь эта область, внешняя относительно сферы Шварцшильда, доступна наблюдению извне путем двусторонней посылки сигналов.

Пунктиром намечена кривая, которая могла бы быть мировой линией частицы; в любой точке наклон этой кривой имеет времениподобное направление. В силу чисто графических ограничений рис. 55 эта траектория представляет чисто радиальное движение — прямо к центру

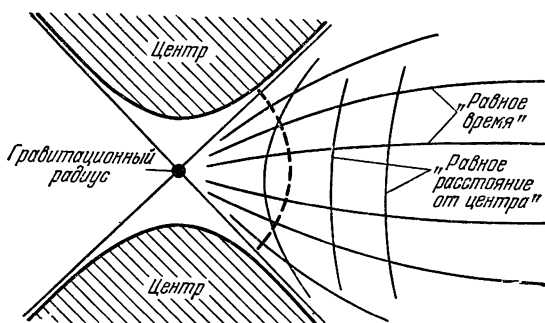


Рис. 55. Геометрия вблизи шварцшильдовской сферы.

или от него. Часть траектории проходит через двусторонне недоступную область вне шварцшильдовской сферы. Любая из кривых, лежащая в доступной области и соответствующая постоянному значению r , вполне пригодна для того, чтобы поместить на ней стационарного наблюдателя. Любой такой наблюдатель может послать световой сигнал в произвольную часть траектории материальной частицы и позже получить отраженный сигнал обратно; таким образом, он может поддерживать двустороннюю связь с материальной частицей. Но двусторонняя связь нарушается в двух точках, в которых материальная частица пересекает сферу Шварцшильда: один раз, когда она входит под сферу, другой — когда она выходит наружу. Наблюдатель может наблюдать тот момент, когда частица выйдет из сферы Шварцшильда, хотя он сам не может приветствовать это событие сигналом. Наоборот, сигнал, посланный наблюдателем, придет к частице в тот момент, когда она скрывается за шварцшильдовской сферой;

однако нет никакого способа, чтобы сигнал, указывающий «погружение» частицы, достиг наблюдателя.

Внутри сферы Шварцшильда имеются две отличающиеся друг от друга области, которые можно назвать «внутренней областью прошлого» и «внутренней областью будущего». Стационарный наблюдатель может видеть события, происходящие в первой области (внутренняя область прошлого), и может посылать сигналы во вторую область (внутренняя область будущего), но не наоборот. Никакой сигнал из внутренней области будущего не может попасть в область вне сферы Шварцшильда. Третья область внутри сферы Шварцшильда абсолютно недоступна световым сигналам ни по какому направлению.

Из-за очень сильного искажения, обусловленного переменными масштабами на рис. 55, границы заштрихованных областей, обозначенных словами «центр», представляют особую точку — центр. Бессмысленно рассматривать эту точку «в течение» времени, так как время не имеет привычного смысла под сферой Шварцшильда. Что касается внешнего стационарного наблюдателя, то ему понадобится бесконечное время, чтобы дотянуться до сферы Шварцшильда; он не в состоянии придать осмысленную отметку времени тому, что происходит под сферой Шварцшильда. Он просто изолирован от того, что находится под сферой Шварцшильда, тем, что называется *горизонтом событий*: он не может установить двустороннюю связь с любым наблюдателем, находящимся внутри, ни световыми сигналами, ни каким-либо другим способом. Внешнего наблюдателя либо нельзя будет увидеть, либо он сам не будет видеть, в зависимости от того, где находится его коллега — во внутренней области будущего или прошедшего (в следующем пункте мы продолжим обсуждение вопроса о горизонте событий).

Но что будет с наблюдателем, который падает на сферу Шварцшильда, а затем уходит под нее? Как уже говорилось, он дойдет до сферы за конечное время; часы на его руке отметят конечное число секунд, прошедших с начала его путешествия. Как только он попадет во внутреннюю область будущего, он сможет видеть внешнюю область, хотя он будет лишен возможности послать туда какие-либо сигналы. Когда он будет пересекать сферу Шварцшильда, никаких особых явлений он не обнаружит. Все вокруг покажется ему вполне обычным.

Как только наблюдатель станет приближаться к центру, кривизна пространства-времени начнет увеличиваться; она станет бесконечной, когда он подойдет вплотную к центру, и центральная область будет казаться ему «аномальной» во многих отношениях. То, что он не может послать сигнал наружу, оказавшись внутри сферы Шварцшильда, будет ему совсем неочевидно. Сигналы, которые он посылает, будут с его точки зрения распространяться нормально. Они не смогут попасть во внешнюю область только потому, что эта внешняя область, как ему кажется, удаляется от него со скоростью света. Именно поэтому его световые сигналы не могут достичь границы. Но так как эта граница ничем особенным не выделена, он не может обнаружить движение этой границы от него. Если он обратит внимание на своего коллегу — стационарного наблюдателя, который не пожелал сопровождать его при падении внутрь, он отметит, что часы его коллеги идут все медленнее и медленнее, однако они не остановятся совсем. Обратно, если стационарный наблюдатель взглянет на часы своего падающего друга, то он обнаружит, что его часы идут все медленнее и медленнее и никогда не покажут тот момент, когда падающий наблюдатель пересечет сферу Шварцшильда.

15. Горизонты событий

О горизонтах событий в дорелятивистской физике ничего не знали, но в релятивистской физике — это вещь обычная. Мы встречаемся с горизонтами событий даже тогда, когда никаких полей тяготения нет и в поmine. Речь идет о двух наблюдателях, участвующих в специально подобранных ускоренных движениях. На рис. 56, где указаны координаты x и t , проведены мировые линии двух наблюдателей, которые удаляются друг от друга с ускорением. Ни один из них не будет в состоянии увидеть другого, если каждый из них движется с постоянным ускорением и так, что направления ускорения этих наблюдателей противоположны. Для этого нужно только, чтобы светоподобная прямая не пересекала обе траектории. Если в некоторый момент времени расстояние между двумя наблюдателями было равно D и каждый из них имел постоянное ускорение, то