

Элементарный анализ простейших соотношений теории относительности

Окунев В.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: okunevvs@bmstu.ru

1. Введение

Принято считать, что привычные нам законы физики не «работают» в черной дыре, что «по мере продвижения вглубь черной дыры пространство-время продолжает искривляться и в центре становится бесконечно искривленным. Эта точка известна как гравитационная сингулярность [1]. «Пространство и время в ней перестают иметь какое-либо значение, а все известные нам законы физики, для описания которых необходимы эти два понятия, больше не действуют» [2]. Современные теории не позволяют заглянуть внутрь черной дыры. Однако, преобразования некоторых простейших известных соотношений специальной и общей теории относительности позволяют сделать какие-то качественные и количественные оценки. Что нам известно? С одной стороны, черная дыра поглощает все излучение и вещество, падающее на нее. С другой стороны, С. Хокинг предположил, что черная дыра излучает элементарные частицы (преимущественно фотоны), теряя массу и испаряясь (излучение Хокинга) [3].

Некоторые известные простые соотношения специальной и общей теории относительности позволяют сделать простые важные предположения.

Допустим, система отсчета K^* движется относительно системы K в направлении оси x (совпадает с направлением оси x^*) со скоростью v . Из преобразований Лоренца следует, что промежуток времени прошедший в системах K и K^* связан соотношением

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

где $\Delta t^* = t_2^* - t_1^*$, c — скорость света в вакууме. Начало отсчета времени совпадает, т. е. $t_0 = t_0^*$. Иначе говоря, время в движущейся системе отсчета замедляется.

На отставание движущихся по замкнутой кривой часов от неподвижных (известный впоследствии как парадокс близнецов специальной теории относительности или кинематический парадокс близнецов) впервые указал А.Эйнштейн в 1905 году [4]. Парадокс напрямую следует из преобразований Лоренца при движении с около световой скоростью. Парадокс отставания часов впервые подтвержден экспериментально в октябре 1971 года (эксперимент Хафеле — Китинга) [5].

В общей теории относительности присутствует другой «парадокс близнецов» (гравитационный). Брат-близнец, находящийся вблизи большой гравитационной массы оказывается моложе. Будем считать, что система K связана с относительно большой гравитационной массой (гравитационным потенциалом), а K^* связана с гораздо меньшим гравитационным потенциалом. Например, близнец в системе K находится на поверхности Земли, а близнец в системе K^* находится на высокой башне. Время вблизи поверхности Земли замедляется и брат, постоянно находящийся в системе K после встречи близнецов окажется моложе. В 1980 году для подтверждения общей теории относительности проведены исследования «с использованием эталона частоты водородного мазера на космическом корабле, запущенном почти вертикально на высоту до 10 000 км» [6]. Результаты высокоточных экспериментов по кинематическому и гравитационному замедлению времени представлены в работах [7, 8].

Скорость тела, движущегося в поле силы тяжести Земли с ускорением свободного падения g , после прохождения расстояния x равна $v = \sqrt{2gx}$. Подставляя это соотношение в формулу (1), получим

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{1 - \frac{2gx}{c^2}}}. \quad (2)$$

Потенциальная энергия однородной силы тяжести на поверхности Земли $U = -mgx$, гравитационный потенциал $\varphi = -U/m = -gx$. Выражение (2) можно переписать в виде

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{1 - \frac{2\varphi}{c^2}}} = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{1 - \frac{2|\varphi|}{c^2}}}. \quad (3)$$

Гравитационное поле можно считать слабым, так как $|2\varphi| \ll c^2$. Вблизи поверхности Земли (радиус Земли $x = 6\,371$ км, среднее $g = 9,807$ м/с²) $\varphi = -62480,397$ м²/с², отношение $2|\varphi|/c^2 = 1,400 \cdot 10^{-12} \ll 1$.

2. Результаты

2.1. Кинематический эффект замедления времени

Следует сделать некоторые существенные уточнения. Казалось бы, в специальной теории относительности замедление времени — эффект чисто кинематический, но не совсем. Система отсчета K жестко «привязана» к Земле, т. е. близнец, оставшийся дома не перемещается относительно Земли, т. е. покоится относительно большой гравитационной массы. Причем, масса M космического объекта (Земли или другого тела) намного превышает массу m улетевшего космического корабля с космонавтом, т. е. $M \gg m$. Иначе парадокс близнецов не работает, поскольку, все физические процессы во всех инерциальных системах отсчета идут одинаково, и улетевшего близнеца можно считать покоящимся, а оставшегося на Земле — улетевшим со скоростью минус v . Таким образом, важно, что система K покоится, а K^* движется относительно большой гравитационной массы. Определяющее значение имеет наличие большой гравитационной массы в качестве начала отсчета. Тогда скорость v есть скорость относительно объекта с большой гравитационной массой.

Допустим, две ракеты с близнецами стартуют в далеком космосе вдали от объектов с заметной гравитационной массой (гравитационный потенциал $\varphi \rightarrow 0$). Нельзя определить, какая из ракет покоится, а какая движется, иначе говоря, что принять за систему отсчета K и что за K^* . Ход времени на обеих ракетах одинаков. Они обе покоятся относительно, например, ближайшей, но очень далекой черной дыры.

Значит парадокс близнецов в специальной теории относительности так или иначе всегда связан с покоящимся на Земле наблюдателем, т.е. с гравитационной массой Земли (обладающей малым, но не нулевым, по абсолютному значению гравитационным потенциалом: $|\varphi| \ll c^2$). Иначе говоря, система отсчета K связана с гравитационной массой.

Некоторые авторы находят некоторую противоречивость парадокса близнецов специальной теории относительности [9]. Объяснения самые разные: от движения по замкнутой кривой (как и предполагал А.Эйнштейн [4]), до необязательности возврата в исходную точку и возможности мгновенного разворота.

2.2. Гравитационный эффект замедления времени

Гравитационный потенциал определяется как $\varphi = -GM/x$, где G — гравитационная постоянная ($G = 6,6743 \cdot 10^{-11}$ м³ с⁻² кг⁻¹), M — масса большого космического объекта, x — расстояние от центра масс большого объекта до данной точки, в которой расположено тело массой m (причем $m \ll M$). Подставляя выражения для φ в формулу (3), получим

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{xc^2}}}. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) справедливы при малом $|\varphi|$. Обозначим $\frac{GM}{xc^2} = a$. Формула (4) справедлива при $a \ll 1$. В этом случае

$$(1 - a)^2 = (1 - 2a + a^2) \approx 1 - 2a \text{ или } \sqrt{1 - 2a} \approx \sqrt{(1 - a)^2} = |1 - a|. \quad (5)$$

Если $|\varphi| \sim c^2$, то выражение (4) с учетом (5) можно записать в виде

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\sqrt{(1 - \frac{GM}{xc^2})^2}} = \frac{\Delta t^*}{|1 - \frac{GM}{xc^2}|}. \quad (6)$$

Это более точная формула. Она справедлива для любого гравитационного потенциала.

Из преобразований Лоренца следует, что длина тела при переходе от системы K в K^* уменьшается. Пусть $\Delta x = x_2 - x_1$; $\Delta x^* = x_2^* - x_1^*$, оси x и x^* совпадают, $\Delta x \parallel x$, $\Delta x^* \parallel x^*$. Тогда

$$\Delta x^* = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta x}{\left|1 - \frac{GM}{xc^2}\right|}. \quad (7)$$

То же касается массы:

$$m = \frac{m^*}{\left|1 - \frac{GM}{xc^2}\right|}, \quad (8)$$

где m и m^* — масса одного и того же тела в системе K и K^* соответственно.

2.3. Анализ простейших черных дыр

Будем рассматривать простейшую черную дыру Шварцшильда. Предположим, что дыра сферически симметрична, не имеет «предпочтительного» направления и оси вращения, не имеет электрического заряда и магнитного поля. Будем считать, что черная дыра характеризуется определенной массой. Для таких черных дыр

$$\frac{GM}{xc^2} = 1. \quad (9)$$

Это означает, что время с точки зрения внешнего наблюдателя останавливается на горизонте событий ($\Delta t \rightarrow \infty$) и не зависит от Δt^* (при $\Delta t^* \neq 0$). Любой объект, приближающийся к горизонту событий со стороны наблюдателя, кажется замедляющимся и никогда полностью не пересекающим горизонт [10]. Что происходит за горизонтом событий при приближении к центру черной дыры? G и c — мировые константы. Согласно (6), если расстояние от центра x падает, то $\frac{GM}{xc^2} > 1$ и, благодаря наличию модуля в знаменателе выражения (6), интервал времени Δt начинает уменьшаться, причем $\Delta t < \Delta t^*$. При $x \rightarrow 0$ (центр черной дыры) $\Delta t \rightarrow 0$, т. е. время в системе отсчета K останавливается и не зависит от Δt^* при конечных Δt^* . Вернемся к гравитационному «парадоксу близнецов». Брат-близнец, путешествующий по гравитационным полям (система отсчета K^*) и находящийся на горизонте событий, будет самым молодым. Он стареет при удалении от горизонта событий в любую сторону. Внутри горизонта событий близнец в системе K^* будет всегда старше близнеца в системе отсчета K , вне — моложе. При приближении к горизонту событий с любой стороны ход времени замедляется до нуля.

Характерным размером черной дыры считают радиус Шварцшильда

$$x_s = 2 \frac{GM}{c^2}. \quad (10)$$

Он получен из формулы (4). Множитель «2» в формуле (10) характерен для малого по абсолютному значению гравитационного потенциала, когда справедливо разложение (5).

При малых a ($a \ll 1$) можно воспользоваться разложением

$$\frac{1}{\sqrt{(1-a)^2}} \approx 1 + a^2/2. \quad (11)$$

Тогда формула (6) примет вид

$$\Delta t = \Delta t^* \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{GM}{xc^2} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Формула (12) говорит об отсутствии горизонта событий при малых гравитационных потенциалах, т. е. при $|\varphi| \ll c^2$.

Из соотношения (6) следует, что характерным размером черной дыры или радиусом Шварцшильда следует считать выражение

$$x = \frac{GM}{c^2}. \quad (13)$$

Следует заметить, что в теории относительности скорость любых взаимодействий ограничена скоростью света в вакууме. При таких скоростях нельзя ввести ни потенциальную энергию, ни потенциал. Гравитационный потенциал φ имеет смысл, если $|\varphi| \ll c^2$. При

$$|\varphi|/c^2 = \frac{GM}{xc^2} \sim 1 \quad (14)$$

правомерность использование понятия гравитационного потенциала вызывает сомнение. Чтобы как-то исправить положение, можно предположить, что по мере приближения к черной дыре (к

радиусу Шварцшильда) извне, скорость света в вакууме увеличивается таким образом, чтобы соотношение (14) никогда не превышало 1, или

$$xc^2 = \text{const.} \quad (15)$$

Здесь x — расстояние от центра черной дыры. В этом случае сферы (радиуса x), на которой время с точки зрения наблюдателя в системе K останавливается ($\Delta t \rightarrow \infty$), может не существовать. Таким образом, нельзя детерминистически исключить возможность покинуть черную дыру.

На рис. 1 представлена зависимость $\Delta t / \Delta t^*$ от x при приближении к центру черной дыры из области $|\varphi| \rightarrow 0$ при $\gamma_0 = G/c^2 = \text{const}$. Здесь x_S — радиус Шварцшильда. С точки зрения внешнего наблюдателя временной «потенциальный» барьер «изолирует» черную дыру от внешнего мира. Допустим $\gamma_0 \rightarrow \gamma = G/c^2 = \gamma(x) \neq \text{const}$ при $x \rightarrow x_S$ (рис. 2). Рис. 1 и 2 эквивалентны и иллюстрируют искривление пространства-времени.

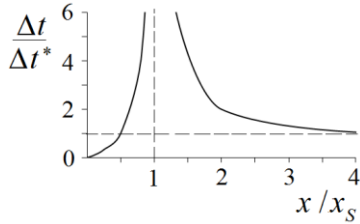


Рис. 1. Зависимость $\Delta t / \Delta t^*$ от x .

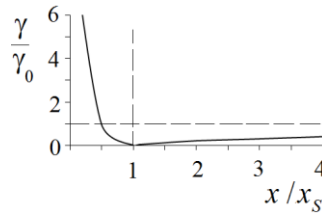


Рис. 2. Зависимость γ / γ_0 от x .

Зависимость дифференциальной плотности физического вакуума от расстояния x качественно совпадает с зависимостью, представленной на рис. 2. Их соотношений (1) и (4) следует, что условие $\frac{GM}{xsc^2} = 1$ эквивалентно скорости $v = c$ при массе покоя $m \neq 0$. Приложения специальной и общей теории относительности предельно идеализированы.

Из рис. 1 и 2 следует, что при наличии явной асимметрии, наблюдается и некоторая симметрия в изменении исследуемых параметров относительно радиуса Шварцшильда. По крайней мере, наиболее ярко симметрия наблюдается при $x \geq x_S / 2$.

2.4. Три «способа» замедления времени

Изменение геометрии пространства-времени возможно при движении на релятивистских скоростях и вблизи больших гравитационных масс. Изменение геометрии пространства приводит к изменению временных интервалов и наоборот. По этой причине соотношения (1) и (6) можно считать эквивалентными с точки зрения возможности замедления времени в системе K^* . Как отмечалось, в формуле (1) система отсчета K жестко «привязана» к Земле, т. е. внешний наблюдатель не перемещается относительно Земли, покоится относительно большой гравитационной массы с малым гравитационным потенциалом $|2\varphi| \ll c^2$. Условие $\frac{GM}{xc^2} = 1$ в формуле (6) эквивалентно условию $v^2/c^2 = 1$ при массе покоя $m \neq 0$ в формуле (1). При этом в обоих случаях, так или иначе, гравитация (гравитационный потенциал) оказывает влияние. В формуле (1) она позволяет выбрать «внешнего» наблюдателя (для которого $|\varphi| \ll c^2$, для системы отсчета K^* потенциал пренебрежимо мал $|\varphi| \rightarrow 0$). В формуле (6) она определяющая. Для «внешнего» наблюдателя $|\varphi| \ll c^2$ или $|\varphi| \rightarrow 0$, для системы отсчета K^* , приближающейся к черной дыре, $|\varphi| \rightarrow c^2$.

Таким образом, время замедляется (длина уменьшается, масса увеличивается) при релятивистских скоростях и (или) вблизи большой гравитационной массы. В обоих случаях искривляется пространство-время.

Есть и еще один фактор, замедляющий время. Этот фактор непосредственно связан с искривлением пространства, вернее, с растяжением пространства и уменьшением его кривизны при эволюции Вселенной. В процессе расширения Вселенной кривизна уменьшается. Значит, еще одним эквивалентным условием соотношениям (1) и (6) можно считать расширение Вселенной. Это, в свою очередь, эквивалентно условию (6) в предположении (исключительно для проведения расчетных оценок), что вся масса современной Вселенной ($\sim 10^{53}$ кг) была сосредоточена в

сингулярности (здесь и далее речь идет о космологической сингулярности). По мере удаления от сингулярности (по мере расширения Вселенной) время ускоряется. Таким образом, в далеком прошлом, время могло идти на много порядков медленнее. Это косвенно подтверждает следующий факт. По мере приближения к центру Земли возраст породы уменьшается, т. е. внутренние слои планеты моложе внешних. Ядро Земли на 2,5 года моложе своей поверхности [11]. Это возможно, если предположить, что вся гравитационная масса планеты сосредоточена в точке, т. е. в ее центре. По аналогии для проведения расчетных оценок, можно предположить, что масса Вселенной была сосредоточена в сингулярности. С точки зрения фотонов света, их скорость равна c , с точки зрения внешнего наблюдателя Вселенная может расширяться со скоростью, превышающей c .

Итак, к релятивистскому и гравитационному замедлению времени следует прибавить замедление времени при приближении по временной оси к началу Вселенной (к сингулярности) с максимально искривленным пространством. Во всех трех случаях (даже при релятивистском замедлении времени) системы отсчета не инерциальные.

3. Анализ

3.1. Планковская черная дыра

Рассмотрим планковскую эпоху. Оценим параметры планковской черной дыры. Этот объект принято считать тождественным максимону (элементарной частице с максимально возможной массой) [12]. Комптоновская длина волны планковской черной дыры $\lambda = \frac{h}{mc} = 1,2655 \cdot 10^{-35}$ м (здесь h — постоянная Планка). Гравитационный радиус без учета коэффициента 2 в формуле (9) или «горизонт событий» $x = 0,7416 \cdot 10^{-35}$ м. (С учетом коэффициента «2» $x = 1,4832 \cdot 10^{-35}$ м.) Как и ожидалось, $x \sim \lambda$. Для элементарных частиц длина волны больше гравитационного радиуса, для черных дыр — меньше [12]. Планковская черная дыра занимает промежуточное положение [12].

Предположим, что Вселенная является замкнутой системой, в которую не поступает извне ни масса, ни энергия. Масса максимона определяется планковской массой $m_{Pl} \sim 10^{-8}$ кг, масса современной Вселенной $\sim 10^{53}$ кг. По какой причине масса увеличилась на много порядков?

3.2. Об образовании массы во Вселенной. Гипотезы, основанные на аналогиях

Известно, что среди всех видов фундаментальных взаимодействий только гравитационное взаимодействие не насыщается. Планковская эпоха характеризуется единым взаимодействием. Насыщение трех видов фундаментальных взаимодействий из четырех известных, дает основание полагать, что единое взаимодействие насыщается. Космологическая сингулярность (максимон) — неизвестная праматерия. Как проявляется насыщение ядерных сил? Взаимным отталкиванием нуклонов на малых расстояниях (менее 0,25 фм). Наличие взаимного кулоновского отталкивания протонов в аномально сверхтяжелых ядрах (с зарядом около 400) делает оптимальной форму пузыря, когда в центральной части ядро находится полость [13]. Форму пузыря имеет ядро ^{34}Si [14].

В результате насыщения сил единого взаимодействия в следующий квант времени (время Планка) в центре сингулярности (максимона) появляется пустота с характерным размером, определяемым длиной Планка. Пустота окружена сферическим слоем праматерии толщиной, определяемой длиной Планка $l_{Pl} \sim 10^{-35}$ м.

Можно предположить, что эволюция Вселенной началась с процесса, подобного ядерной мультифрагментации (или делению атомного ядра на множество осколков) максимона из сильно возбужденного состояния. Расширение максимона эквивалентно переходу в возбужденное состояние. Максимон становится нестабильным. При характерных размерах частиц $\sim 10^{-15}$ см и менее можно ожидать выполнения известного соотношения квантовой физики: $mcr \sim h$. Здесь m — масса осколка деления, c — скорость света в вакууме, r — характерный размер осколка деления, h — постоянная Планка. Иначе говоря, каждый осколок деления по массе сравним с исходным делящимся объектом (планковской массой). В соответствии с соотношением (2) масса могла преумножаться по мере деления деформированного (расширенного) максимона.

Если максимон можно считать черной дырой, то в соответствии выводами к рис. 2, на гравитационном радиусе сингулярности-максимона $\gamma = G/c^2 = \gamma(x) \rightarrow 0$, т. е. можно предположить, что $c \rightarrow \infty$. Но сингулярность не является черной дырой, поскольку $|\varphi| \ll c^2$. На расстоянии радиуса Шварцшильда от центра сингулярности скорость света в вакууме увеличивается, но ограничена. Скорость деления максимона не может быть меньше характерного времени единого взаимодействия. Самым малым временем ($\tau_S \sim 10^{-23}$ с) характеризуется сильное взаимодействие и его проявление — ядерное взаимодействие. Характерное время сильного (и ядерного) взаимодействия определяют как $\tau_S \sim l_{Pl}/c$. При $c \sim 10^{38}$ м/с время взаимодействия $\tau_S \sim 10^{-43}$ с, что сравнимо с планковским временем. В результате деление максимона на осколки, равные по массе максимону, происходит быстро. Так могла нарастать масса молодой Вселенной.

Полное решение Шварцшильда содержит черную и белую дыры [15]. Можно предположить, то космологическая сингулярность в гораздо большей степени проявляет свойства белой дыры [15, 16], а не черной: внутрь сингулярности ничего не входит, она быстро распадается.

Общая теория относительности дает основания полагать, что при продвижении к центру черной дыры ($x \rightarrow 0$) пространство-время окажется наиболее искривленным. Это соответствует гравитационной сингулярности. Но так ли это? Если допустить возможность насыщения гравитационного взаимодействия, то можно ожидать самые невероятные последствия. Например, для черных дыр может оказаться оптимальной структура пузыря, когда вся масса сосредоточена в относительно тонком поверхностном слое дыры вблизи радиуса Шварцшильда. Получается своеобразный пузырь, в который легко войти и из которого нельзя (почти нельзя) выйти. Не напоминает ли это отдаленно нашу Вселенную — огромную черную дыру, из которой невозможно выбраться?

3.3. Связь с эффектом Шапиро

Гравитационное замедление времени и искривление пространства влекут за собой гравитационную задержку электромагнитного сигнала (эффект Шапиро [17]). В поле тяготения электромагнитные сигналы идут дольше [17, 18].

По существу, эффект Шапиро ведет к замедлению скорости света вблизи гравитационной или космологической сингулярности, что согласуется с данными рис. 2 при $x \rightarrow 0$. Можно предположить, что с точки зрения внешнего наблюдателя свет, направленный к большой гравитационной массе, ускоряется. Свет, идущий от гравитационной массы, замедляется.

Предположим, что скорость света в вакууме может изменяться под действием большой гравитационной массы (сингулярности на начальном этапе эволюции Вселенной, черных дыр). Сильная гравитация тормозит свет, замедляет время. А. Эйнштейн впервые вычислил гравитационное отклонение света (изменение направления распространения света в гравитационном поле). Луч света (фотоны с бесконечно малой массой), проходящий мимо Солнца, отклоняется на $1,7'$ [19]. Если свет отклоняется гравитационной массой, масса покоя фотона отлична от нуля, хотя и близка к нулю. По данным [20] она менее 10^{-22} эВ/ c^2 . С одной стороны, скорость света замедляется, с другой — существенно увеличивается временной интервал. В итоге скорость света в вакууме увеличивается. Это увеличение можно оценить из условия (9). На раннем этапе эволюции Вселенной фундаментальной константой (инвариантом) можно считать не c , а соотношение G/c^2 .

Из выражения (9) можно определить значение x , соответствующее радиусу ранней Вселенной, при котором время останавливается (а скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Получим $0,6742 \cdot 10^{-26}$ м, что на пять порядков превышает длину Планка. Возможно, при расширении Вселенной до такого значения скорость света в вакууме быстро уменьшалась.

Итак, можно предположить, что скорость света в вакууме изменяется вблизи космических объектов большой гравитационной массы по мере приближения отношения $\frac{GM}{xc^2}$ к 1. При $\frac{GM}{xc^2} \geq 1$ скорость света заметно увеличивается по сравнению с известным значением c . Если мысленно перенестись в далекое прошлое Вселенной, то по мере приближения к сингулярности время замедляется, гравитационный потенциал растет по абсолютному значению, скорость света

увеличивается. В этом случае вблизи черных дыр и внутри горизонта событий время не останавливается, а, замедляясь, продолжает течь в «прямом» направлении.

Заметим, что большинство фундаментальных констант играют ограничивающую роль в физике. Гравитационная постоянная такой роли не выполняет. Можно предположить, что она изменялась в процессе эволюции Вселенной. Возможно, она меньше принятого значения.

В общем, здесь много вариантов «обхода» остановки времени на горизонте событий. Нельзя исключить, что изменяется комплекс G/c^2 . Возможно, что константой вблизи черных дыр является $|\varphi|/c^2$.

Э.А. Милн (1933), а затем П. Дирак (1937) высказали гипотезу о возможном изменении гравитационной постоянной со временем [21]. Позднее об этом высказывались и другие ученые [22]. «Австралийские физики под руководством теоретика Пола Дэвиса из университета Маккваре в Сиднее предположили, что при прохождении миллиардов световых лет скорость света в вакууме снижается. Может оказаться, что 6-10 млрд. лет назад скорость света могла быть выше, чем сейчас» [23].

3.4. Замедление безмассовых частиц. Рождение массы из энергии

Допустим, что физический вакуум замедляет объекты микромира до скорости, не превышающей c [24]. Возможно и замедление до меньших скоростей. В этом случае объекты «обретают» массу покоя, т. е. физический вакуум выполняет функции поля Хиггса [24]. Замедление объектов микромира происходит вследствие их взаимодействия с виртуальными частицами, рождающимися в физическом вакууме [24]. Виртуальные частицы при определенных условиях превращаются в реальные. Взаимодействие может привести к появлению инертной массы у частиц микромира. При торможении в эфирном поле скорость частиц становится равной v , причем, $v \leq c$. При $v = c$ масса покоя частицы $m = 0$, при $v < c$ масса покоя $m \neq 0$. Таким образом, существует два класса частиц. Частицы одного из классов взаимодействуют со всеми виртуальными частицами, рождающимися в физическом вакууме. Частицы другого класса взаимодействуют не со всеми, а только с определенными виртуальными частицами (возможно, гораздо более тяжелыми — бозонами Хиггса). Другие частицы для них «прозрачны». Появляющаяся у частиц первого класса масса определяется формулой Эйнштейна для энергии покоя $E = mc^2$ или $\Delta E = \Delta m c^2$, где ΔE — изменение энергии, Δm — изменение массы. Потерянная энергия при торможении в эфирном поле превращается в массу изначально безмассовой частицы. Таким образом, скорость света в вакууме и разделяет частицы на два упомянутых класса. Полная энергия частицы в вакууме:
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2 \epsilon_0 \mu_0}}$$

Итак, существуют два класса частиц. К одному из них можно отнести фотоны (переносчики электромагнитного взаимодействия или электромагнитные волны), к другому — все остальные (не фотоны). Фотоны — безмассовые частицы. Все остальные объекты микромира характеризуются не нулевой массой покоя (и релятивистской массой). Фотоны органически связаны с мировой константой c . Их скорость $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ определяется только двумя фундаментальными константами: электрической и магнитной проницаемостью эфирного поля или физического вакуума (ϵ_0 и μ_0) и ничем более. Скорость других объектов микромира (не фотонов) может лишь зависеть от c или не превышать c .

Например, звуковые волны в физическом вакууме с нулевой средней плотностью ρ распространяться не могут, так как скорость волны $v \sim \rho^{1/2}$.

Фотоны — самые распространенные по численности частицы во Вселенной (на один нуклон приходится не менее 20 млрд фотонов [25]). Они наблюдаемы, существуют в свободном виде, стабильны, просты (неразложимы, не составные), т. е. фундаментальные частицы. Очевидно, если масса фотона отлична от нуля, он может распадаться на более легкие частицы. За время жизни Вселенной (13,8 млрд. лет) ни один фотон не распался [26]. По данным, полученным с помощью спутников WMAP (NASA) и Planck (ЕКА), можно считать, что время жизни реликтовых микроволновых фотонов как минимум на 4 порядка больше времени жизни Вселенной, т. е. не менее 10^{14} лет [26]. (В результате взаимодействия с веществом возможен распад фотона на два фотона с меньшей энергией.)

В 2017 году ученые ЦЕРН объявили о наблюдении с помощью детектора ATLAS (в составе ЛНС) столкновений между двумя одиночными фотонами [27]. Большая напряженность электромагнитного поля создавалась сталкивающимися ультрарелятивистскими ионами свинца (энергии центра масс на пару нуклонов составляет 5,02 ТэВ) [27]. Фотоны могут взаимодействовать друг с другом непрямым и прямым способом. В прямом взаимодействии обычно рождаются виртуальные электрон и позитрон [26]. В непрямом взаимодействии «фотоны обмениваются виртуальным набором всех уже открытых и, возможно, неизвестных нам носителей заряда» [27]. Рассеяние света на свету ($\gamma + \gamma \rightarrow \gamma + \gamma$) — крайне редкие квантовые процессы [27]. Инвариантная масса дифотона более 6 ТэВ [27].

Известно, что фотон (или γ -квант) тождественен антифотону. Таким образом, процесс образования электрон-позитронных пар есть аннигиляция фотона и антифотона. Известен процесс трехфотонной аннигиляции. Для рождения пары частицы-античастица необходима соответствующая энергия фотонов (превышающая массу покоя рождающихся частиц) и дополнительный объект X (необходимый в соответствии с законами сохранения), в качестве которого обычно рассматривается атомное ядро или атомный электрон. Формально схему процесса можно записать в виде:

$$\gamma + \bar{\gamma} + X \rightarrow X + e^+ + e^-,$$

где $\gamma \equiv \bar{\gamma}$. Это двухфотонная аннигиляция. Возможно трехфотонная аннигиляция:

$$\gamma + \gamma + \gamma + X \rightarrow X + e^+ + e^-,$$

но ее вероятность приблизительно в 100 раз меньше вероятности двухфотонной аннигиляции. Законы сохранения не позволяют исключить и большее число аннигилирующих фотонов (причем, возможны прямые и обратные процессы, например, $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \dots$).

Обычно процесс рождения пар происходит около атомного ядра (в области, размер которой определяется комптоновской длины волны: $2,4 \cdot 10^{-10}$ см), но возможен около атомного электрона.

Можно предположить, что в качестве «посредника» X выступает виртуальная частица, рожденная в физическом вакууме. Характерное время электромагнитного взаимодействия (переносчиком которого является фотон) $\sim 10^{-20}$ с. Фотоны (γ -кванты) большой энергии (несколько МэВ и более) могут участвовать в ядерном взаимодействии. Характерное время сильного (ядерного) взаимодействия $\tau_s \sim 10^{-23} \dots 10^{-22}$ с. Среднее время жизни τ виртуальных частиц массой m определяется из принципа неопределенности Гейзенберга: $\tau \leq \frac{h}{2\pi c^2 m}$. Время τ заметно меньше τ_s . Возможно ли за такое время жизни принципиально не наблюдаемых (виртуальных) частиц рождение пар реальных частиц?

Из курса общей физики известно, что виртуальные частицы могут превратиться в реальные частицы [28]. При ускорении электрона виртуальные фотоны превращаются в реальные [28]. При β -распадах виртуальные электроны и антинейтрино превращаются в реальные [28]. При общении энергии системе частиц, виртуальные частицы превращаются в реальные [28]. (При сообщении нуклонам достаточной энергии окружающие их виртуальные π -мезоны превращаются в реальные [28]). Реальные частицы при поглощении виртуальных частиц превращаются в другие реальные частицы (например, реальный нейтрон, поглотивший виртуальный пион, превращается в реальный протон [28]).

Таким образом, можно сделать вывод, что постоянно рождающиеся в физическом вакууме виртуальные частицы способны выполнять функции «посредника» при рождении пар реальных частиц за счет аннигиляции γ -квантов.

Итак, есть три способа образования массы во Вселенной. Первый связан с распадом космологической сингулярности в первые мгновения Большого взрыва, когда масса фрагментов была приблизительно равна массе «осколков» ($mcr \sim h$). Деформация сингулярности-максимона эквивалентна его переходу в возбужденное состояние. В таком состоянии максимон нестабилен. По существу, это рождение массы из массы. Возможно рождение массы из энергии. В этом случае физический вакуум выполняет функции поля Хиггса. Рождение частиц из энергии наблюдается до настоящего времени. Первый способ связан с образованием пар частиц при аннигиляции фотонов в физическом вакууме. Посредником служат виртуальные частицы, постоянно рождающиеся и исчезающие в физическом вакууме, или реальные частицы, в которые иногда превращаются

виртуальные. Второй способ связан с переходов виртуальных частиц, рожденных в физическом вакууме, в реальные частицы. Этому способствует интенсивное электромагнитное поле, переносчиком которого и являются фотоны.

Как известно, фотоны (γ -кванты) являются единственными объектами микромира, отсутствие массы у которых надежно подтверждается современными физическими теориями и практикой. Экспериментально на основе комптоновской волны фотона (не менее 10^{22} см [29]) получена верхняя оценка массы фотона ($3,5 \cdot 10^{-60}$ г [29]). Современные физические теории предполагают, что безмассовыми частицами являются глюоны, не наблюдающиеся в свободном виде [30]. На роль безмассовых частиц претендуют гравитоны, верхний предел массы ($3,5 \cdot 10^{-53}$ г [31].) которых определяется частотой $3 \cdot 10^{-5}$ Гц [32]. Экспериментально наблюдали приход гравитационных и световых волн от удаленного объекта. Полагают, что скорость распространения гравитационных волн равна скорости света (в пределах точности измерений), т. е. масса покоя гравитона равна нулю [32]. По оценкам, комптоновская длина волны гравитона не менее 10^{13} км, а верхнее значение энергии покоя гравитона $1,2 \cdot 10^{-22}$ эВ/ c^2 [32].

3.5. Скорость гравитационного взаимодействия

Принято считать, что максимальная скорость c_G гравитационного взаимодействия равна скорости c света в вакууме. Предположим, эти скорости различны. Действительно, какая связь между квантами электромагнитного и гравитационного взаимодействия? Фотоны и гравитоны независимы.

Абсолютное значение гравитационного потенциала имеет размерность скорости в квадрате, т.е. $v \sim |\varphi|^{1/2}$. Пусть скорость гравитационного взаимодействия $c_G = |\varphi|^{1/2} = \frac{GM}{x}$, где G — гравитационная постоянная, M — масса Вселенной, x — радиус Вселенной. Принимая $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м² кг⁻¹ с⁻², $M = 10^{53}$ кг, $x = 7,8 \cdot 10^{10}$ св. лет, получим $|\varphi| = 9 \cdot 10^{15}$ м²/с² или $c_G = 0,9 \cdot 10^8$ м/с.

Для космологической сингулярности (на момент времени Планка, когда $M \sim 10^{-8}$ кг, $x \sim 10^{-35}$ м) получим: $|\varphi| \approx 6,67 \cdot 10^{16}$ м²/с², или $c_G = |\varphi|^{1/2} \approx 2,58 \cdot 10^8$ м/с. Это может означать, что силы гравитационного взаимодействия в сингулярности (на момент выделения гравитационного взаимодействия из единого взаимодействия) перенасыщены, или скорость света (скорость распространения гравитационного взаимодействия) изменяется со временем эволюции Вселенной, или гравитационная постоянная уменьшилась с $9 \cdot 10^{-11}$ м² кг⁻¹ с⁻² до $6,67 \cdot 10^{-11}$ м² кг⁻¹ с⁻² за время жизни Вселенной.

3.6. Философская дилемма

Сделаем два важных замечания.

Первое замечание. При $|\varphi| \rightarrow c^2$ можно ожидать, что собственный размер черной дыры превышает размер Вселенной (теория Фридмана). Возможно, есть какое-либо дополнительное ограничение M/x , чтобы размер всегда был меньше размера Вселенной. Это возможно, если гравитационное взаимодействие при больших M/x насыщается. Либо сравнивать надо не c^2 , а с максимальной скоростью c_G распространения гравитационного взаимодействия в вакууме в квадрате ($c_G^2 < c^2$). Можно считать, что при $|\varphi| \rightarrow c_G^2$ гравитационные силы насыщаются.

Если максимальное значение $|\varphi|$ не превышает c_G^2 , т. е. $|\varphi| \leq c_G^2 < c^2$, то соотношение (6) для максимального $|\varphi| = c_G^2$ примет вид:

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{|1 - \frac{c_G^2}{c^2}|}.$$

Как было показано ранее, $c_G = 0,9 \cdot 10^8$ м/с. Значит, $c_G/c^2 = 0,09$. В этом случае

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{|1 - 0,09|} \approx 1,1 \Delta t^*.$$

Тоже касается преобразований массы и длины. Иначе говоря, собственные параметры черной дыры (размер, масса, ход времени) отличаются от параметров, фиксируемых внешним наблюдателем не более чем на 10 %. Иначе говоря, черная дыра в традиционном понимании — лишь математическая абстракция. Она далека от идеалов абсолютно черного тела. Временной потенциал на ее границе не бесконечен: ход времени замедляется лишь на 10 % по сравнению с внешним наблюдателем. Собственный размер черной дыры и размер, оцениваемый внешним

наблюдателем, не позволяет считать ее фридмоном, в котором (согласно теории Фридмана) могла бы уместиться огромная Вселенная. Главное, что черную дыру можно покинуть.

Второе замечание. Как известно, преобразования Лоренца выводились на примере перемещения фотона (светового луча) в световых часах. При гравитационном взаимодействии логично рассматривать перемещение гравитона или «гравитационного луча». Допустим, максимальная скорость его перемещения в вакууме не c , а c_G . Значит в преобразования Лоренца и следующих из них соотношениях общей теории относительности (теории гравитации) для преобразований времени, массы, и длины следует заменить c на c_G .

В этом случае в формулах для преобразований времени, массы и длины в теории гравитации фигурирует $|\varphi| / c^2$, а максимальные изменения (преобразования) этих параметров можно определить из соотношения, подобных (1), (6), (8) и (9), с заменой c на c_G . В этом случае фридмоны могут реально существовать и собственный размер (равно как и собственная масса, и собственное время) такого фридмона (черной дыры) ничем не ограничен. При насыщении гравитационных сил знаменатель этих соотношений ((1), (6), (8) и (9), с заменой c на c_G) тождественно равен нулю. Собственный размер черной даже очень маленькой (с точки зрения внешнего наблюдателя) черной дыры может существенно превышать размер Вселенной, внутри которой эта дыра находится. Известное соотношение квантовой механики $mcr \sim h$ (где m — масса, c — скорость света в вакууме или скорость взаимодействия, r — характерный размер, h — постоянная Планка) означает, что масса части может быть сравнима с массой целого или размер части сравним с размером целого. Парадоксы есть в физике микромира. Почему их не может быть в физике мегамира.

Какому из замечаний следует отдать предпочтение? Второе более обосновано, хотя и не укладывается в привычные для нас представления. Можно довериться рассмотрению этого вопроса философам.

4. Выводы

Элементарный анализ соотношений специальной и общей теории относительности позволяет сделать выводы, несколько отличающиеся от общепринятых. Это связано со следующими фактами.

1. Парадокс близнецов в специальной теории относительности всегда связан с покоящимся на Земле наблюдателем, т.е. с гравитационной массой Земли (обладающей малым, но не нулевым, по абсолютному значению гравитационным потенциалом: $|\varphi| \ll c^2$). Объяснения самые разные: от движения по замкнутой кривой (как и предполагал А.Эйнштейн [4]), до необязательности возврата в исходную точку и возможности мгновенного разворота.

2. Приложения специальной и общей теории относительности предельно идеализированы. Часть из них эквивалента движению объекта с ненулевой массой со скоростью света.

3. Некоторые соотношения теории гравитации соответствуют малым скоростям и малым по абсолютному значению гравитационным потенциалам.

4. Принято считать, что скорость гравитационного взаимодействия в вакууме равна скорости электромагнитного взаимодействия (скорости света). Для этого нет оснований.

5. Не исключено, что гравитационные силы насыщаются.

Следствия.

1. Распад космологической сингулярности мог привести ведет к преумножению массы Вселенной.

2. Временной «потенциальный» барьер, «изолирующий» черную дыру от внешнего мира, не бесконечен, т. е. черная дыра Шварцшильда не является абсолютно черным телом.

3. Можно допустить изменение мировых констант (отношения G/c^2) вблизи объекта большой массы.

4. Можно «заглянуть» внутрь черной дыры Шварцшильда.

5. Возможно замедление времени при приближении по временной оси к началу Вселенной (к сингулярности) с максимально искривленным пространством.

6. Вблизи сингулярностей и на раннем этапе эволюции Вселенной фундаментальной константой (инвариантом) можно считать не c , а соотношение G/c^2 .

Литература

- [1] Gambini R, Olmedo J and Pullin J 2014 Quantum black holes in Loop Quantum Gravity *Classical and Quantum Gravity* **31** (9) 095009 doi:10.1088/0264-9381/31/9/095009
- [2] Geftter A (25 May 2015) The strange fate of a person falling into a black hole *BBC Earth* <http://www.bbc.com/earth/story/20150525-a-black-hole-would-clone-you>
- [3] Hawking S W 1974 Black hole explosions? *Nature* **248** 30-31 DOI:<https://doi.org/10.1038/248030a0>
- [4] Einstein A 1905 Zur Elektrodynamik der bewegter Körper *Annalen der Physik* **322** (10) 891-921 DOI: 10.1002 / andp.19053221004
- [5] Hafele J C and Keating R E 1972 Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains *Science, New Series* **177** (4044) 166-168 doi:10.1126/science.177.4044.166
- [6] Vessot R F C, Levine M W, Mattison E M, Blomberg E L, Hoffman T E, Nystrom G U, ... Wills F D 1980 Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser *Phys. Rev. Lett.* **45** 2081
- [7] Middleton C (2020). Transportable atomic clocks achieve laboratory precision *Physics Today* **73** (6) 20–21 <https://doi.org/10.1063/PT.3.4496>
- [8] Chou C W, Hume D B, Rosenband T, and Wineland D J 2010 Optical Clocks and Relativity *Science* **329** (5999) 1630-1633 DOI: 10.1126/science.1192720
- [9] Gron O 2010 *The twin paradox and the principle of relativity* (Cornell University) 13 <https://arxiv.org/abs/1002.4154>
- [10] Chaisson E 1990 *Relatively Speaking: Relativity, Black Holes, and the Fate of the Universe* (New York: W. W. Norton & Company) 213
- [11] Uggerhøj U I, Mikkelsen R E, and Faye J 2016 The young centre of the Earth *European Journal of Physics* **37** (3) 035602 doi:10.1088/0143-0807/37/3/035602
- [12] Bernard J C and Steven B (2005 May) Giddings *Scientific American* 48-55
- [13] Оганесян Ю Ц (28 апреля 2008) Семинар, посвященный 75-летию академика РАН Ю.Ц. Оганесяна (Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова ОИЯИ, Дубна, Россия) ([http:// www.naukograd.dubna.ru/47/46/1093/](http://www.naukograd.dubna.ru/47/46/1093/))
- [14] Mutschler A, Lemasson A, Sorlin O, Bazin D, Borcea C, Borcea R, ..., Vandebrouck M 2017 A proton density bubble in the doubly magic ^{34}Si nucleus *Nature Physics* **13** 152 DOI 10.1038/nphys3916
- [15] Frolov V P and Novikov I D 1998 *Black Hole Physics: Basic Concepts and New Developments* (Springer) <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5139-9>
- [16] Retter A and Heller S 2012-2 The Revival of White Holes as Small Bangs *New Astronomy* **17** (2) 73-75. DOI:10.1016/j.newast.2011.07.003
- [17] Shapiro I I 1964 Fourth Test of General Relativity *Physical Review Letters* **13** 789-791 doi:10.1103/PhysRevLett.13.789.
- [18] Shapiro I I, Pettengill G H, Ash M E, Stone M L, Smith W B, Ingalls R P, and Brockelman R A 1968 Fourth Test of General Relativity: Preliminary Results *Physical Review Letters* **20** 1265-1269 doi:10.1103/PhysRevLett.20.1265.
- [19] Эйнштейн А 1965 Основы общей теории относительности. Собрание научных трудов в 4 томах (Москва: Наука) **1** 504
- [20] Pani P, Cardoso V, Gualtieri L, Berti E, and Ishibashi A 2012 Black-Hole Bombs and Photon-Mass Bounds *Physical Review Letters* **109** (13) 131102 doi:10.1103/PhysRevLett.109.131102
- [21] Dirac P A M 1937 The Cosmological Constants *Nature* **139** 323 <https://doi.org/10.1038/139323a0>
- [22] Kordi A S 2009 Variation of the gravitational constant with time in the framework of the large number and creation of matter hypothesizes *Journal of King Saud University (Science)* **21** (2) 151-154 DOI:10.1016/j.jksus.2009.07.006
- [23] Ваганов А (25.09.2002) Покушение на мировые константы *Независимая газета* https://www.ng.ru/nauka/2002-09-25/11_attempt.html
- [24] Kruglov A I and Okunev V S 2021 Expansion of the Concept of the Term "Physical Vacuum" (Philosophy of Physics) *Physical Interpretations of Relativity Theory: 22th Int. Scientific Conf., Abstracts* (Moscow: Bauman Moscow State Technical University)
- [25] Weinberg S (1993) *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (New York: The Perseus Books Group Publication Country) 224
- [26] Иванов И (05.08.2013). Время жизни фотона. *Элементы*. https://elementy.ru/problems/637/Vremya_zhizni_fotona
- [27] ATLAS Collaboration 2017 Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC *Nature Physics* **13** 852 DOI: 10.1038/nphys4208
- [28] Савельев И В 1987 *Курс общей физики. В трех томах* (Москва: Наука) **3** 442-447
- [29] Окунь Л Б 2005 *Лептоны и кварки* (Москва: Едиториал УРСС) 352
- [30] Olive K A 2014 Review of Particle Physics *Chinese Physics C* **38** (9) 090001. doi:10.1088/1674-1137/38/9/090001
- [31] Рубаков В А и Тиняков П Г 2008 Модификация гравитации на больших расстояниях и массивный гравитон *Успехи физических наук* **178** 813
- [32] Abbott B P et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) 2016 Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger *Physical Review Letters* **116** 061102 doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102