Принцип зквивалентности ошибочен ?

L.Rimsha, V.Rimsha

E-mail: laimontas.rim@gmail.com

viktor@pasvalys.lt

Мы рассматриваем частный случай принципа эквивалентности (ПЭ) , а именно - мы рассматриваем утверждение о том, что однородное статическое гравитационное поле в инерциальной системе отсчета своим влиянием на ход неподвижных часов (ход времени) во всем (т.е. полностью) тождественно влиянию ускоренного движения на ход неподвижных часов в жесткой равноускоренной системе отсчета .

1. Введение .

В случае однородного статического гравитационного поля наблюдается два эффекта – гравитационное смещение частоты сигналов и замедление хода часов в гравитационном поле. Важно то обятоятельство , что в этом случае оба эти эффекты обусловленны одной и той же причиной – гравитационное поле влияет на ход времени (на ход часов) . Для доказательства того, что это полностью таким же образом происходит и в ускоренной системе отсчета используются два различных способа - при помощи СТО и при помощи рассмотрения смещения частоты сигнала. Далее мы , при помощи довольно общих соображений, попытаемся показать , что оба эти сейчас всеми используемы способа могут быть ошибочными.

2. Об доказательстве ПЭ при помощи СТО .

Успешное рассмотрение в рамках СТО прецессии Томаса , когда движение неинерциальной системы отсчета (движение с ускорением) можно представить как последовательность переходов с течением времени из одной сопутствующей инерциальной системы в другую сопутствующую инерциальную систему отсчета , наводит на мысль, что при помощи СТО (и трансформаций Лоренца) можно рассматривать и неинерциальные системы отсчета . В таком случае рассматривается неинерциальная ускоренная система отсчета с ускорением движущаяся относительно инерциальной системы отсчета и используются трансформации между этими системами отсчета . Далее , как и в случае других любых трансформаций координат точек (в СТО это уже события) , например, как и в случае перехода от декартовых координат к сферическим координатам, из трансформаций для конечных величин уже ищутся трансформации для дифференциалов и эта полученная связь для дифференциалов подставляется в интервал пространства -времени псевдодекартового вида инерциальной системы отсчета , относительно которой с ускорением движется неинерциальная система отсчета . Получаем таким образом, что в дифференциалах неинерциальной системы отсчета вид интервала пространства-времени уже имеет не псевдодекартовый вид , метрический тензор зависит от ускорения неинерциальной системы отсчета и положения точек этой системы отсчета . Рассмотрим это чуть подробнее . Далее используются латинские индексы от 1 до 3, а греческие индексы от 0 до 3 , скорость света в этом разделе принимем за единицу. Метрика пространства Минковского в лабораторной инерциальной системе отсчета S_0 имеет вид

$$ds^2 = dT^2 - dX^2 - dY^2 - dZ^2 \qquad (1)$$

Здесь T физическое время инерциальной системы отсчета , измеряемое неподвижными синхронизированными часами, X, Y, Z декартовы координаты события . Предположим, что преобразование от неинерциальной системы отсчета S к инерциальной лабораторной системе отсчета имеет вид

$$T = T(t, x, y, z) \quad X^i = X^i(t, x, y, z) \qquad (2)$$

Подстановка этих пребразований в (1) даст , например , такой интервал в неинерциальной системе отсчета (в случае в ОТО этот вид интервала соответствует статической метрике диагонального вида)

$$ds^2 = g_{\alpha\alpha} dx^\alpha dx^\alpha \qquad (3)$$

Чтобы делать какие то физические заключения, необходимо определить этот интервал (3) при помощи физического времени $d\tau$ и физической длины dl неинерциальной системы отсчета . Здесь

$$d\tau = \sqrt{g_{00}}\, dt \qquad (4)$$

$$dl^2 = -g_{ii} dx^i dx^i \qquad (5)$$

Выражение интервала в физических величинах неинерциальной системы отсчета тоже принимает псевдоевклидовый вид

$$ds^2 = d\tau^2 - dl^2 \qquad (6)$$

Итак , в обоих формулах (1) и (6) в интервалах физические наблюдаемые измеряемые времена и длины . То что верно для одной инерциальной системы(нашей лабораторной), должно быть правильно и для всех других инерциальных систем отсчета , например, и для мгновенно сопутствующей нашу неинерциальную систему отсчета (относительная скорость между этими системами отсчета равна 0) . Так как для обоих интервалов (1) и (6) вид псевдоевклидовый, то соответствующим образом величины должны трансформироваться при помощи трансформаций Лоренца. В случае мгновенно сопутствующей системы отсчета поэтому получаем

$$dT = d\tau \tag{7}$$

Темп хода всех , во всех точках , неподвижных часов инерциальной системы одинаков и поэтому из (7) получаем, что наблюдаемый измеряемый темп хода всех часов и в неинерциальной системы отсчета одинаков, что очевидно противоречит ПЭ .

Если же трансформация (2) это какой частный случай трансформации Лоренца, то использовать СТО подобным образом может быть вовсе ошибочно , так как если трансформация (2) - это трансформация события (точки пространства-времени) , то это не согласуется с ковариантным формализмом СТО , в котором при помощи трансформаций Лоренца должны преобразовываться тензорные величины (скаляры, 4-векторы и другие тензоры). Как известно, сам вектор определяется длиной и направлением , т.е. эта величина зависит от двух неравноправных точек - начала и конца вектора и сами преобразования вектора , для того чтобы получить снова вектор , должны быть обязательно линейным. Операции с векторами в таком случае возможны тоже только две - перенос вектора и вращение вектора . И поэтому использование формул СТО для трансформаций событий точек , для того чтобы получить трансформации для дифференциалов и затем эти дифференциаллы подставлять в интервал может быть довольно сомнительным . Сам интервал пространства-времени при таком ковариантном подходе - это скалярное произведение 4-векторов . Напишем трансформацию Лоренца в стандартной форме

$$T = \frac{t - Vx}{\sqrt{1 - V^2}} \qquad X = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2}} \tag{8}$$

Так как координаты вектора - это разность координат конца и начала вектора, то в ковариантном формализме в (8) это координаты 4-векторов , а не точек- событий.

Это должно быть верно для всех 4-векторов , т.е. и для бесконечно малых 4-векторов тоже

$$dT = \frac{dt - Vdx}{\sqrt{1 - V^2}} \qquad dX = \frac{dx - Vdt}{\sqrt{1 - V^2}} \tag{9}$$

Более того, все контрвариантные 4-векторы трансформируются именно так как бесконечно малые 4-векторы (дифференциалы координат)

$$A^{\alpha} = \frac{\partial X^{\alpha}}{\partial x^{\beta}} a^{\beta} \qquad (10)$$

Т.е. и 4-векторы x^{β} и X^{α} преобразуются точно таким же образом как дифференциалы

$$dX^{\alpha} = \frac{\partial X^{\alpha}}{\partial x^{\beta}} dx^{\beta} \qquad (11)$$

И поэтому в СТО при помощи трансформаций Лоренца вряд ли можно доказать ПЭ . Сама метрика в таком случае во всех используемы системах отсчета должна быть только псевдоевклидова .

3. Об доказательстве ПЭ при помощи смещения частоты сигналов .

Мы рассматриваем далее короткие сигналы (сам сигнал - это некоторое количество колебаний) , когда за само время излучения сигнала скорость источника и за время приема сигнала скорость приемника не практически меняются . Далее мы используем и некоторую инерциальную систему, относительно которой и рассматриваем смещение частоты сигналов, координатное время в таком случае - это собственное время часов неподвижных в этой инерциальной системе . Если еще рассматриваем и гравитационное поле, то тогда эти часы и удаленны от гравитационного поля , т.е. на темп хода этих часов не влияет гравитационное поле . Обозначаем далее

ω - частота принимаего сигнала приемником,

ω_0 - частота посылаемого сигнала источником,

$d\tau$ - длительность приема сигнала в собственном времени приемника,

$d\tau_0$ - длительность излучения сигнала в собственном времени источника,

dt - длительность приема сигнала в координатном времени,

dt_0 - длительность излучения сигнала в координатном времени ,

$\vec{v}, \vec{v}_0$ - скорости приемника и источника сигнала в соответствующие моменты времени,

u, u_0 - соответствующие потенциалы гравитационного поля ,

$\vec{n}$ - единичный вектор по направлению расспространения сигнала .

Далее мы используем следующее приближение - все скорости тел малы по сравнению со скоростью света и однородное гравитационное поле является слабым . Сам гравитационный потенциал у нас положительная величина . Рассмотрим три разных случая с одним и тем же лифтом в том случае , когда сигнал от пола лифта к потолку лифта расспространяется точно по прямой линии . В однородном гравитационном поле для лифта в нашем случае гравитационный потенциал у потолка лифта можно выразить с помощью гравитационного потенциала на полу лифта

$$u = u_0 - gh \qquad (12)$$

Здесь

h - высота лифта

g - ускорение свободного падения в однородном гравитационном поле .

Формула для расчета смещения частоты сигналов в гравитационном поле , как известно, может иметь вид

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{d\tau_0}{d\tau} = \frac{d\tau_0}{dt_0}\frac{dt_0}{dt}\frac{dt}{d\tau} \qquad (13)$$

Важное замечание - величина относительного смещения частоты сигнала не должна зависеть от того в какой системе делается расчет - в системе источника сигналов, в системе отсчета приемника сигналов или же в какой то другой системе отсчета .

В нашем приближении c^{-2} производные в (13) равны

$$\frac{d\tau_0}{dt_0} \approx 1 - \frac{v_0^2}{2c^2} - \frac{u_0}{c^2} \qquad (14)$$

$$\frac{d\tau}{dt} \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2} - \frac{u}{c^2} \qquad (15)$$

$$\frac{dt_0}{dt} \approx 1 - \frac{\vec{n}(\vec{v} - \vec{v}_0)}{c} - \frac{(\vec{n}\vec{v})(\vec{n}\vec{v}_0)}{c^2} + \frac{(\vec{n}\vec{v}_0)^2}{c^2} \qquad (16)$$

Производные (14) и (15) и производная (16) отличаются как и математической природой , так и физической природой . Производные (14) и (15) локальные и обусловленны разным темпом хода часов (времени) , а производная (16) двухточечная и имеет чисто классическую природу - в ней учитывается только то обстоятельство, что следует учитывать вклады скорости сигнала и скорости источника сигнала и приемника сигнала относительно какой то системы отсчета (при рассмотрении смещения частоты сигналов) . Вклад (16) зависит от скорости сигнала (например, зависит от среды расспространения сигнала) и присутствует не только в оптике, но и в акустике, в отличии от вкладов (14) и (15) .

И наконец получаем следующую известную формулу для смещения частоты сигнала в приближении c^{-2} в гравитационном поле

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{d\tau_0}{d\tau} \approx 1 + \frac{(v^2 - v_0^2)}{2c^2} + \frac{(u - u_0)}{c^2} - \frac{\vec{n}(\vec{v} - \vec{v}_0)}{c} - \frac{(\vec{n}\vec{v})(\vec{n}\vec{v}_0)}{c^2} + \frac{(\vec{n}\vec{v}_0)^2}{c^2} \qquad (17)$$

3.1 Неподвижный лифт в однородном гравитационном поле .

В таком случае $\vec{v} = \vec{v}_0 = 0$ и из (17) получаем

$$\frac{\omega}{\omega_0} \approx 1 + \frac{(u - u_0)}{c^2} = 1 - \frac{gh}{c^2} \qquad (18)$$

Поучается гравитационное красное смещение частоты $\omega_0 \succ \omega$. Причина - разный темп хода часов (времени) в разных точках пространства с разным значением гравитационного потенциала .

3.2 Ускоренный в пустом пространстве лифт.

Ускорение лифта относительно какой то инерциальной системы отсчета обозначаем тоже как $\vec{g}$, само направление ускорения от пола лифта к потолку . В этом случае уже отличаются скорость источника на полу лифта в момент излучения сигнала и скорость приемника у потолка лифта в момент приема сигнала . Хотя очевидно, что в каждый момент времени источник сигнала и приемник сигнала неподвижны друг относительно друга, но для расчета смещения частоты следует учитывать то обстоятельство , что скорости источника и приемника различны в разные моменты времени (ведь лифт движется с ускорением) . Время прохождения сигнала от пола до потолка

$$t \approx \frac{h}{c} \qquad (19)$$

За это время скорость лифта изменяется на величину

$$\vec{v}-\vec{v}_0 \approx \frac{\vec{g}h}{c} \qquad (20)$$

Если мы ограничиваемся рассмотрением смещения частоты сигнала приближением c^{-2}, то учитывая (20) из формулы (17), так как направление ускорения совпадает с направлением распространения сигнала ,

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{d\tau_0}{d\tau} \approx \frac{d\tau_0}{dt_0}\frac{dt}{d\tau}(1-\frac{gh}{c^2}) \qquad (21)$$

Если же , как в предыдущем случае с неподвижным лифтом в однородном гравитационном поле, такой же разный темп хода времени (хода часов) источника и премника и в нашей неинерциальной системе отсчета , то очевидно, что тогда

$$\frac{d\tau_0}{dt_0}\frac{dt}{d\tau} \approx 1-\frac{gh}{c^2} \qquad (22)$$

Из (21) и (22) следует такова величина относительного смещения частоты сигнала

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{d\tau_0}{d\tau} \approx 1-\frac{2gh}{c^2} \qquad (23)$$

Получаем , что если правилен ПЭ в том , что если темп хода часов (времени) в ускоренной системе отсчета такой же как и в соответствующем гравитационном поле (формула (22)) , то тогда ПЭ неправилен в том, что в этом же случае будет такое же смещение частоты сигнала (формула (23)) , как и в формуле (18) .

3.3 Свободно падающий в однородном гравитационном поле лифт .

Наблюдения показывают, что формула (17) применима и в случае когда источник и приемник сигналов свободно падают в гравитационном поле . Если свободно падает лифт в однородном гравитационном поле , то в нашем приближении и в нашем случае из этой формулы следует такое смещение частоты (эта формула относиться к инерциальной системе отсчета, относительно которой с ускорением свободно падает лифт)

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{d\tau_0}{d\tau} \approx 1+\frac{(u-u_0)}{c^2}+\frac{gh}{c^2} \approx 0 \qquad (24)$$

Видно, что поменялся по сравнению с предыдущим случаем знак одного из членов формулы, так как единичный вектор по направлению расспространения сигнала уже противопожного направления чем разность скоростей источника и приемника (и направление ускорения свободного падения) . Согласно ПЭ такой свободно падающий лифт в однородном гравитационном поле можно рассматривать как инерциальную систему отсчета и поэтому в такой системе отсчета не должно быть в смещении частоты сигнала вклада однородного внешнего поля , как и вклада классичесого эффекта Доплера (для пеподвижных , как бы в инерциальной системе отсчета , источника и приемника) . Результат общий (24) получается такой ,как и нужно для соблюдения ПЭ, но в (24) присутствует компенсация вкладов двух разных по своей природе эффектов, а не отсутствие обоих этих вкладов . Никто же пока не опровегает то обстоятельство , что свободное падение в гравитационном поле происходит с ускорением (между прочим, это следует из трех тех самых законов Ньютона) , но только в ОТО почему то принимается , что такое падение с ускорением является инерциальным движением . Если свободное падение это движение с ускорением , то в нашем случае в эффект смещения частоты должен внести свой вклад и классический эффект Доплера (из-за ускорения лифта) и что важно этот вклад должен присутствовать и в случае рассмотрения в системе отсчета лифта (источника или приемника) . Отметим, что в нашем приближении вклады классического эффекта Доплера и гравитационного смещения частоты можно рассматривать аддитивно - т.е. независимо одного от другого . Главный тут следующий момент - если вклад классического эффекта Доплера в этом приближении присутствует в системе отсчета лифта (в системе отсчета источника и приемника сигналов), то тогда же в этой системе отсчета этого лифта должен присутствовать вклад и внешнего однородного гравитационного поля , чтоб компенсировать вклад классического эффекта Доплера - т.е. в свободно падающем с ускорением в однородном внешнем гравитационном поле лифте должно присутствовать это самое внешнее однородное гравитационное поле как физическая реальность, что нереально с точки зрения ПЭ . Более подробно и в случае реальных систем отсчета нами рассмотрена эта задача в [1] .

[1] L.Rimsha, V.Rimsha   http://vixra.org/abs/1508.0123