Наблюдаются ли нарушения принципа эквивалентности ?

Л. Римша
laimontas.rimsa@yahoo.com

В. Римша
viktor@pasvalys.lt

Показано что, при помощи свободно падающих атомных часов в однородном гравитационном поле, можно не только проверить принцип эквивалентности сил гравитации и сил инерции, но и однозначно установить какова геометрия пространства-времени в гравитационном поле – Римана или Минковского.

1. Введение.

В ОТО, согласно принципу эквивалентности (ПЭ), утверждается , что в свободно падающей системе отсчета нет однородного гравитационного поля, и например, наблюдатель, находящийся в свободно падающем лифте , после некоторого промежутка времени свободного падения, при сравнении показаний часов на полу и у потолка лифта, разности хода времени не обнаружит (эксперимент Хафеле-Китинга). Согласно ПЭ - силы гравитации это силы инерции и такой переход в свободно падающию систему отсчета это переход в инерциальную систему отсчета, в которой все синхронизированные и неподвижные относительно друг друга часы идут одинаково. Далее в этой работе покажем ,что сейчас имеются возможности проверить при помощи наблюдений это предсказание ПЭ, и, что интересно, возможно имеются наблюдательные факты опровергающие ПЭ. Во всех выше приведенных рассуждениях предполагается, что приливными эффектами можно пренебречь.

2. Влияют ли силы инерции на темп хода часов ?

Принцип эквивалентности - это по сути постулат, который другими доводами вряд ли можно достаточно строго доказать или опровергнуть. Если принять этот принцип, то неизбежно приходим к геометрическому подходу в гравитации. В этой работе рассмотрим подробнее влияние гравитационного поля на темп хода часов (времени). В отличии от СТО, где причиной различия темпа хода часов является относительная скорость, в гравитационном поле разница темпа хода часов зависит от относительного положения и при том наблюдается не только смещение частоты при распространении излучения (эксперимент Паунда-Ребки), но и интегральный эффект – замедление темпа хода часов (эксперимент Хафеле-Китинга) . Согласно ОТО, причина в обоих случаях та же самая – темп хода собственного времени в разных точках гравитационного поля разный . Если соблюдается ПЭ, точно такие же должны быть и эффекты и в равноускоренной системе отсчета. Покажем что достаточно строгих доказательств этого пока нет. Приведем одну цитату Тирринга [15] „ Как известно, оно (прим. – красное смещение) следует непоредственно из принципа эквивалентности. Рассматривая вращающиеся или равномерно ускоренные системы , мы получаем поперечный или продольный , соответственно , эффект Доплера“. Но, как известно , нерелятивисткий продольный эффект Доплера первого порядка зависит не от разности темпа хода времени в точках излучения и поглощения , а от относительной скоростью излучателя и приемника в моменты излучения и поглощения . При том продолжительность процессов излучения и поглощения различаются из-за разности скоростей излучателя и приемника в эти моменты, а не из-за разности темпа хода времени . Так как в равноускоренной системе обязательно должен наблюдаться продольный эффект Доплера первого порядка, то для соблюдения ПЭ, необходимо отказаться от стандартой интерпретации этого эффекта. В противном случае , если предположить что в равноускоренной системе наблюдается стандартный продольный эффект Доплера и к тому же еще и темп хода собственного времени в точках излучения и поглощения разный , то смещение частоты излучения в равноускоренной системе отсчета было бы два раза больше по сравнению со смещением частоты в однородном гравитационном поле . Только от относительного движения зависит и поперечный эффект Доплера и поэтому доказательством полной тождественности однородного гравитационого поля и равноускоренной системы отсчета вряд ли можно принять доказательства, использующие относительное движение часов, как например в [1] . Утверждения, что равноускоренная система отсчета в случае метрики Риндлера, тождествена однородному гравитационному полю тоже являются предметом дискуссий [2]. Даже утверждения что эта метрика описывает равноускоренную систему отсчета подвергаются сомнению [3].

При помощи только преобразований Лоренца для дифференциалов

$$d\vec{r} = \gamma(d\vec{r}\,' + \vec{V}dt')$$
$$dt = \gamma(dt' + \frac{\vec{V}}{c^2}d\vec{r}\,') \qquad (1)$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\vec{V}^2/c^2}}$$

доказать ПЭ тоже невозможно. Например, ход всех часов равноускоренной системы отсчета относительно выбранной инерциальной системы отсчета должнен быть одинаков, так как скорости и ускорения всех этих часов относительно инерциальной системы одинаковы. А вот , если правилен ПЭ, относительно друг друга темп хода этих же часов должен быть разный. Но если пользоваться определением собственного времени часов в СТО

$$d\tau = \frac{ds}{c} \qquad (2)$$

то такого не может быть. Собственное (или действительное, истинное, физическое) время – это как раз то время которое и отсчитывают часы. И если в инерциальной системе отсчета для двух часов $ds_1 = ds_2$ то и любой системе отсчета это условие сохранится, так как ds является скалярной величиной и при любых трансформациях координат не меняется.

Многочисленные наблюдательные факты потверждают правильность формулы в гравитационном поле

$$d\tau \approx (1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+\frac{\Phi}{c^2})dt \qquad (3)$$

здесь τ - собственное время показываемое часами, v - скорость часов относительно источника гравитационного поля, Φ - ньютонов потенциал гравитационного поля, t - координатное время (собственное время бесконечно удаленного и неподвижного относительно источника гравитационного поля наблюдателя). Важно то что (3) применима как в случае неподвижных , так и при свободном падении часов (часы на спутниках в гравитационном поле Земли) , так как этого достаточно для того чтобы, на хрестоматийнном примере с лифтом , показать что ПЭ может нарушаться .

Часы 1 на полу лифта и часы 2 у потолка лифта неподвижны относительно друг друга (лифт это жестко связанная система). В случае когда лифт неподвижен в однородном поле $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = 0$ и когда $dt_1 = dt_2$ получаем

$$\frac{d\tau_1}{d\tau_2} = (1-\frac{gl}{c^2}) \qquad (4)$$

здесь g - ускорение свободного падения, l - высота лифта. Видно что, в отличии от инерциальной системы отсчета, темп хода неподвижных относительно друг друга часов различен. Но если применить (3) к свободно падающему лифту , то опять же получим (4), так как в этом случае $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}$. ПЭ предполагает, что часы в лифте идут по разному относительно часов, бесконечно удаленных и неподвижных относительно источника гравитационного поля, а вот относительно свободно падающей системы отсчета (системы отсчета лифта) эти же часы в одно и то же время идут одинакого. В этом случае можно повторить те же возражения что и в случае равноускоренной системы отсчета, так как, если пользоваться определением (2), то даже в случае нелинейных трансформаций, при помощи которых можно символы Кристоффеля локально обнулить, ход собственного времени не меняется. Например, пусть T - координатное время в системе отсчета лифта и если ускорение свободного падения лифта в однородном поле выразить при помощи потенциала

$$\vec{g} = -\vec{\nabla}\Phi$$

то нелинейная трансформация которая может локально обнулить символы Кристоффеля (в системе отсчета лифта метрический тензор примет вид метрического тензора Минковского) может быть

$$dT \approx (1+\frac{1}{c^2}\Phi(\vec{R})+\frac{1}{c^2}\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})\vec{r}-\frac{1}{2}\frac{\vec{v}^2}{c^2})dt \qquad (5)$$

здесь $\vec{R}$ - радиус-вектор центра масс лифта

$\vec{r}$ - радиус-вектор часов относительно центра масс лифта

Применив трансформацию (5) к (3) получим

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 = c^2 dT^2$$

В этом случае координатное время в системе отсчета лифта совпадает с собственным временем, темп хода зтого координатного времени (точнее дифференциал) зависит от локального значения потенциала однородного поля.

И поэтому, хотя как и в СТО, в системе отсчета лифта $g_{00} = 1$, часы на полу и у потолка по прежнему идут по разному (так как сам интервал инвариантная величина то это не удивительно)

$$\frac{d\tau_1}{d\tau_2} = \frac{dT_1}{dT_2} \approx (1 - \frac{gl}{c^2})$$

С точки зрения ПЭ этого быть не должно – однородного гравитационного поля в системе свободно падающего лифта нет (следует из вида метрического тензора) , а вот неподвижные относительно друг друга часы идут по разному. Следовательно, сам геометрический подход в ОТО противоречив – разности потенциалов однородного поля в свободно падающей системе не должно быть, но так как в этом случае собственное время определяется как (2), то при помощи часов можно наблюдать (измерять) эту разность.

Заметим, многие авторы утверждают, что в свободно падающей системе отсчета достаточно рассмотреть прием и передачу сигналов (или например провести эксперимент Паунда – Ребки) и, если не будет сдвига частот, то тогда такая система инерциальна и часы в такой системе идут одинакого. Но такие рассуждения нельзя признать достаточно убедительными – гравитационное смещение частоты может компенсироваться продольным эффектом Доплера (за время распространения сигнала скорости излучателя и приемника меняются), так что только эксперимент в котором, после определенного промежутка времени, сравниваются показания самих часов (эксперимент Хафеле – Китинга) может дать однозначный ответ на вопрос – тождественны ли свободно падающие часы в однородном гравитационном поле часам инерциальной системы.

3. Об свободно падающих атомных часах в однородном гравитационном поле Солнца.

Влияет или не влияет однородное поле Солнца на ход атомных часов находящихся на поверхности Земли или на ее спутниках – однозначный и корректный ответ на этот вопрос был бы однозначным ответом и на вопрос о том справедлив ли принцип эквивалентности сил гравитации и сил инерции. Далее покажем, что пока такого ответа нет. В этом разделе рассмотрим два встречаемые в литературе теоретические подхода , а последующих двух разделах укажем на некоторые неоднозначные результаты наблюдений.

Обшепринято мнение, что такого влияния нет как в гелиоцентрической (система центра масс Солнца) так и в геоцентрической системах (система центра инерции Земли – в случае условия однородности поля Солнца это и система центра тяжести Земли). При таком подходе как будто и нет проблемы указанной в предыдущем разделе, когда относительно одной системы отсчета часы идут по разному, а вот относительно другой системы эти же часы идут одинакого. Покажем, что если пользоваться только определением собственного времени (3), то такого рода утверждения ошибочны – в гелиоцентрической системе отсчета влияние однородного поля Солнца на темп хода часов должно проявляться. Вопрос только в том - есть ли это влияние и относительно геоцентрической системы отсчета (соблюдается ПЭ или нет).

В первом подходе утверждается что, хотя часы на поверхности Земли или поблизости ее, находятся при разных значениях потенциала Солнца, но их скорости в орбитальном движении Земли тоже разные из за орбитального вращательного движения. Суммарный эффект потенциала Солнца и поперечного эффекта Доплера в (3) таков что темп хода часов не меняется, поэтому влияния однородного поля Солнца не должно наблюдаться ни гелиоцетрической ни в геоцентрической системах отсчета. Но такой способ рассуждений ошибочен – в орбитальном вращательном движении участвует только начало отсчета такой системы, сама же система может вращаться относительно центра инерции (в случае однородного поля это и центр тяжести) только по инерции. Однородное поле Солнца во время орбитального движения не может вращать систему отсчета относительно этого центра, так как влияние однородного внешнего поля на твердое тело или систему материальных точек можно свести к одной внешней силе действующей в одной точке – в центре инерции (в центре тяжести). Геоцентрическая система отсчета, во время орбитального движения, движется криволинейно и при том это движение поступательно – пространственные оси такой системы сохраняют ориентацию – орбитальные скорости всех точек системы одинаковы и равны скорости начала отсчета системы, а вот потенциал однородного гравитационного поля Солнца в этих точках может быть разным. К тому же , если бы разные точки геоцентрической системы отсчета имели бы разные орбитальные скорости относительно Солнца, то в таком случае наблюдалось бы годовое вращение орбит спутников, так так в этом случае геоцентрическая система обязательно должна вращаться во время орбитального движения, период такого вращения был бы год [6]. Этого не наблюдается – можно ввести невращающиеся относительно удаленных звезд геоцентрическую и гелиоцентрическую системы отсчета [18]. Далее везде будем пользоваться только такими системами отсчета .

Во втором подходе тоже утверждается, что ПЭ заложен в формуле (3), так как некая сила инерции полностью компенсирует силу однородного поля Солнца [12].

Рассмотрим этот подход подробнее. Если собственное время для часов на поверхности Земли в гелиоцентрической системе отсчета переписать как

$$d\tau \approx \left(1 + \frac{\Phi(\vec{R})}{c^2} + \frac{\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})\vec{r}}{c^2} + \frac{\Phi_g(\vec{r})}{c^2} - \frac{1}{2}\frac{\vec{V}^2}{c^2} - \frac{\vec{V}\vec{w}}{c^2} - \frac{1}{2}\frac{\vec{w}^2}{c^2}\right)dt \qquad (6)$$

здесь $\Phi_g(\vec{r})$ - геопотенциал на поверхности Земли

$\vec{R}, \vec{V}$ - векторы положения и скорости центра Земли относительно центра масс Солнца

$\vec{r}, \vec{w}$ - векторы положения и скорости часов относительно центра Земли

$\Phi(\vec{R} + \vec{r})$ - потенциал Солнца на поверхности Земли

t - гелиоцентрическое координатное время

то специалистами по релятивисткой астрометрии утверждается что с помощью тождества

$$\frac{\vec{w}\vec{V}}{c^2} = \frac{d}{dt}(\frac{\vec{r}\vec{V}}{c^2}) - \frac{\vec{r}}{c^2}\frac{d}{dt}\vec{V} \qquad (7)$$

можно показать, что последний член (7) компенсирует член $\frac{1}{c^2}\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})\vec{r}$ в (6) .

Или используется то же тождество в другом порядке

$$\frac{\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})}{c^2}\vec{r} - \frac{\vec{V}\vec{w}}{c^2} = -\frac{1}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r} - \frac{1}{c^2}\vec{V}\frac{d\vec{r}}{dt} = -\frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}(\vec{V}\vec{r}) \qquad (8)$$

При этом предполагается что система отсчета остается гелиоцентричеслой (и координатное время остается гелиоцентрическим временем) т. е. все выше указанные величины являются измеряемыми величинами в гелиоцентрической системе отсчета. Но преобразование с помощью тождества (7) не меняет вклад однородного поля в дифференциал для собственного времени . Из (6) путем интегрирования получаем для конечных промежутков времени

$$\tau - \tau_0 = t - t_0 - \int_{t_0}^{t}(\frac{1}{2}\frac{\vec{V}^2}{c^2} + \frac{1}{2}\frac{\vec{w}^2}{c^2} - \frac{\Phi(\vec{R})}{c^2} - \frac{\Phi_g(\vec{r})}{c^2})dt - \frac{1}{c^2}[\vec{V}(t)\vec{r}(t) - \vec{V}(t_0)\vec{r}(t_0)]$$

так как

$$\frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t_1}\frac{d(\vec{V}\vec{r})}{dt}dt = \frac{1}{c^2}[\vec{V}(t\ )\vec{r}(t\ ) - \vec{V}(t_0)\vec{r}(t_0)] \qquad (9)$$

и только при предположении, что в момент координатного времени t_0 часы могут быть синхронизированны – показывают одинаковое собственное время (усредненное международное атомное время TAI), следует что остается только квазипериодический член в момент t . Этот член в момент времени t интерпретируется как соответствующий исключительно **преобразованию СТО** и тем самым утверждается, что в барицентрической (или в гелиоцентрической) системе отсчета однородное поле Солнца не влияет на темп хода часов , находящихся на поверхности Земли. Цитата из раздела 5.5 [5] (наример в [10] то же самое) – “**Эта поправка объясняется в рамках специальной теории относительности: одновременные события в неподвижной барицентрической системе отсчета не являются одновременными в движущейся геоцентрической системе “.**

Хотя по своему виду эта интегральная поправка и тождественна члену СТО, но подобные утверждения не корректны - в этом члене есть вклад и однородного гравитационного поля и ,следовательно, наличие поправки такого вида свидетельствует об том что в гелиоцентрической системе отсчета есть вклад однородного поля Солнца . Цитированное же утверждение может быть корректным только при соблюдении условия $\frac{d\vec{V}}{dt} = 0$, так как только при соблюдении этого условия член СТО $\frac{\vec{V}\vec{w}}{c^2}$ можно преобразовать в полный дифференциал по времени $\frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}(\vec{V}\vec{r})$.

Это просто можно показать в частном случае, если рассматривать темп хода конкретных часов, а не шкалу времени TAI. Например, если

$\vec{r}_N$ - радиус вектор часов на Северном полюсе в геоцентрической системе отсчета,

$\vec{r}_S$ - радиус вектор часов на Южном полюсе в геоцентрической системе отсчета,

то эти часы находятся на оси вращения Земли и поэтому остаются неподвижны относительно геоцентра во время суточного вращения и орбитального движения Земли

$$\vec{w}_N = \vec{w}_S = 0$$

к тому же если учесть что

$$\Phi_g(\vec{r}_N) \approx \Phi_g(\vec{r}_S)$$

то разность темпа хода часов в гелиоцентрической системе отсчета должна зависить от величины однородного гравитационного поля Солнца на Земле.

$$\frac{d\tau_N}{d\tau_S} \approx 1 + \frac{1}{c^2}[\Phi(\vec{R}+\vec{r}_N) - \Phi(\vec{R}+\vec{r}_S)] \approx 1 + \frac{1}{c^2}\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})[\vec{r}_N - \vec{r}_S] = 1 - \frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}(\vec{V}[\vec{r}_N - \vec{r}_S])$$

Так как ось вращения Земли повернута на угол по отношению плоскости орбиты, то в гелиоцентричесской системе отсчета должны наблюдаться годовые вариации разности темпа часов на противоположных полюсах, при том скорости обоих полюсов относительно гелиоцентрической (барицентрической) системы отсчета одинаковы. Видно, что полную производную по времени в этом частном случае определяет только вклад однородного гравитационного поля – вовсе нет вклада СТО в разность показаний часов.

Рассмотрим этот же вопрос с точки зрения геоцентрической системы отсчета. Общепринято доказывать что при переходе в геоцентрическую систему отсчета весь вклад от полной производной по времени (8) - а точнее весь вклад интегрального члена (9) в момент координатного времени t

$$\frac{1}{c^2}\vec{V}\vec{r}$$

изчезает (аналогичном образом как в СТО при использовании трансформации Лоренца) и при том метрический тензор принимает такой вид, что не зависит от потенциала однородного поля Солнца (зависит только от потенциала приливных сил Солнца) и поэтому нет никаких проблем с ПЭ и в геоцентрической системе отсчета. Такой подход не корректен, так как полной аналогии с СТО в этом случае нет. Покажем это.

Пусть

$$\Phi = -U$$

Тогда рекомендации IAU указывают [18] что закон трансформации должен быть

$$T = t - \frac{1}{c^2}[\int_{t_0}^{t} \frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{\vec{V}\,\vec{r}}{c^2} \qquad (10)$$

T – геоцентрическое координатное время

t - барицентрическое (гелиоцентрическое) координатное время

Если же переписать (10) трансформацию как трансформацию для дифференциалов, то полученная трансформация отличается от преобразования Лоренца в **СТО**

$$dT = dt - \frac{1}{c^2}[\frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{1}{c^2}[\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r} + \vec{V}\ \frac{d\vec{r}}{dt}]dt \qquad (11)$$

И хотя с помощью нелинейной трансформации (11) в геоцентрической системе отсчета из компоненты g_{00} метрического тензора можно исключить потенциал однородного поля Солнца, но , как и в ранее рассмотреном случае с лифтом, сам дифференциал таким образом определенного геоцентрического координатного времени (геоцентрическая система не вращается – точки этой системы не подвижны относительно друг друга) зависит от этого потенциала (зависит от ускорения геоцентра относительно Солнца и положения часов относительно геоцентра) и поэтому исключить потенциал однородного поля из самого интервала ds не возможно и тем самым не возможно исключить влияние однородного поля Солнца на темп хода часов на поверхности Земли и при рассмотрении в геоцентрической системе отсчета .

Например, для точки $\vec{r} = 0$, из (11) следует что дифференциал геоцентрического координатного времяни dT_g

$$dT_g = dt - \frac{1}{c^2}[\frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{1}{c^2}\vec{V}\frac{d\vec{r}}{dt}dt \qquad (12)$$

а в точке $\vec{r}$ геоцентрической системы , согласно (11) , дифференциал геоцентрического координатного времяни dT . Отсюда следует

$$\frac{dT}{dT_g} \approx (1 - \frac{1}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r})$$

Так как в геоцентрической системе отсчета общий вклад вращения Земли и геопотенциала на поверхности Земли на уровне моря для всех часов с хорошей точностью одинаков, то разность темпа хода часов на поверхности Земли может возникнуть из за разности потенциалов однородного поля Солнца. Очевидно, что этот вывод применим и в случае часов на спутниках .

4. Возможный сезонный дрейф часов.

В разделе 3.1 лекций М.В.Сажина [4] написано(цитируем),, Ось вращения Земли наклонена по отношению к плоскости земной орбиты на угол $23^0,5$. По этому часы , скажем 1 и 2 с собственным временем τ_1 и τ_2 которые находятся на разных широтах соотвественно φ_1 и φ_2, находятся также при разных значениях гравитационного потенциала Солнца.Естественно, что при движении Земли по орбите возникает годовая гармоника в изменении скорости хода часов

$$\frac{d\tau_1}{dt} - \frac{d\tau_2}{dt} = 14{,}8\frac{ns}{day}(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1)\cos(\frac{t - 22June}{365}) \qquad (12)$$

Здесь в качестве начала отсчёта выбран день летнего солнцестояния. На коротких промежутках времени, значительно меньших длительности года, такое изменение скорости течения времени воспринимается как линейный дрейф часов, зависящий от широты . Величина этого дрейфа ≈ 15 наносекунд в день. Такой эффект действительно наблюдается и природа его никах не объяснима, если ,, забыть‘‘ про эффекты общей теории относительности‘‘ (конец цитаты).

Так как Земля свободно падает в поле Солнца, покажем что Сажин ошибается - если этот эффект наблюдается то надо ,,забыть’’ как раз про ПЭ (и тем самым ОТО) , так как такой эффект по величине и характеру даёт только однородное поле Солнца на Земле , приливные эффекты поля Солнца должны быть на несколько порядков меньше. Достаточно посмотреть в 10 разделе [11] оценку порядка приливных эффектов в системе GPS. На поверхности Земли величина приливных эффектов еще меньше. Так как нам не удалось установить первоисточник об этом дрейфе часов, то кратко попытаемся воспроизвести вывод формулы (12).

Вклад однородного поля Солнца при подсчёте разности потенциалов между часами на поверхности Земли и часами в центре Земли определяется величиной

$$\frac{\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})}{c^2}\vec{r}$$

$\Phi(\vec{R})$ - потенциал Солнца в центре Земли

$\vec{r}$ - радиус-вектор положения часов по отношению к геоцентру.

Введём две системы отсчёта с общей точкой в начале координат (эта точка совпадает с геоцентром). Для системы x, y, z во время орбитального движения Земли ось x направлена к Солнцу , плоскость x, y совпадает с плоскостью орбиты Земли (эклиптическая система). Ось $z^/$ системы $x^/, y^/, z^/$ повернута по отношению к оси z системы x, y, z на угол θ и к тому же система $x^/, y^/, z^/$ вращается вокруг оси $z^/$ (экваториальная система). Теперь можно переписать

$$\frac{\vec{\nabla}\Phi(\vec{R})}{c^2}\vec{r} = -\frac{gr_x}{c^2} \qquad (13)$$

Здесь g - напряженность гравитационного поля Солнца в центре Земли, r_x - компонента по направлению к Солнцу радиус-вектора часов в системе x, y, z.
Если использовать углы Эйлера :

θ - угол нутации
ω - угол вращения
ψ - угол прецессии

то связь между проекциями радиус вектора положения часов в системах x, y, z и x', y', z' можно установить при помощи матрицы поворотов. В разделе 3.5 лекций [5] дана обратная матрица, нам же нужная получится путем транспонирования (матрица ортонормирована) . Следовательно получим

$$r_x = r_{z'} \sin\theta \sin\psi + r_{y'}(-\sin\omega\cos\psi - \cos\omega\cos\theta\sin\psi) + r_{x'}(\cos\omega\cos\psi - \sin\omega\cos\theta\sin\psi)$$

Угол $\psi = 0$ соответствует весеннему равноденствию, если же за начало отсчета принять точку летнего солнцестояния, то следует учесть дополнительный сдвиг угла ψ на 90 градусов.Примем, что за один оборот системы x', y', z' угол нутации и угол прецессии практически не меняются . Если рассматриваем суточный эффект, то важен первый член, так как остальные периодические по углу вращения ω не дадут интегрального эффекта. К тому же

$$r_{z'} = r_0 \sin\varphi \qquad (14)$$

r_0 - радиус Земли
φ - широта на которой находятся часы.

И того суточный вклад поля Солнца на часы на поверхности Земли будет

$$\frac{gr_0}{c^2}\sin\theta T \approx 14{,}8ns \qquad (15)$$

T - продолжительность суток в секундах.

Годовая гармоника описывает изменение угла ψ при орбитальном движении. Очевидно, что с учётом (13) ,(14) и (15) легко можно получить формулу (12) указанную в лекциях Сажина.

5. Некоторые другие возможные способы проверки принципа эквивалентности при помощи атомных часов.

Можно предположить, что должно также проявится влияние однородного поля Солнца на часы спутников системы GPS , так как в однородном поле Солнца Земля и спутники GPS падают с одинаковым ускорением по отношению к Солнцу, и , следовательно, на относительное движение спутников орбитальное движение Земли не влияет. Интересно , что имеются данные [7], [8], [9] которые можно интерпретировать подобным образом, но, по понятным причинам, ищутся другие возможные объяснения .

Укажем еще два других возможных способа проверить ПЭ. Если разность темпа хода часов на поверхности Земли зависит от разности потенциалов однородного поля Солнца между этими часами, то при регистрации сигналов станциями сети VLBI это можно зафиксировать. Эта разность темпа хода часов будет вопрениматься как допольнительная задержка и при том должны наблюдаться годовые и суточные гармоники. Точность наблюдений при помощи станций VLBI для частоты интерференции достигнута $10^{-15}\frac{s}{s}$ и лучше [5] , так что эта проверка вполне реальна. Имеются данные наблюдений которые возможно указывают на влияние однородного гравитационного поля Солна при наблюдениях VLBI [7] .

Другая возможность проверки ПЭ состит в том, что , если нарушается этот принцип, то из за влияния однородного поля Солнца должна наблюдаться определенная зависимость времени прихода сигнала пульсаров (time of arrivals – TOA) от широты на которой находится наблюдатель (годовая гармоника). Разность TOA в ns для двух наблюдателей от того же самого пульсара можно получить проинтегрировав (8)

$$\tau_2 - \tau_1 = 14{,}8(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2)\cdot\frac{365}{2\pi}\sin(\frac{2\pi(t-t_0)}{365})$$

t_0 - день летнего солнцестояния .

Если обеспечить устоичивость хода часов в течении года с точностью 100-200 ns (вполне реально) то можно проверить есть ли такой эффект. Надо отметить что τ_1, τ_2 - это собственные времена часов.

6. Пространство Римана или пространство Минковского ?

Согласно ПЭ, выбором свободно падающей системы можно осуществить переход в в локально инерциальную систему отсчета. В такой системе уравнение геодезической принимает вид уравнения движения тел в инерциальной системе отсчета – символы Кристоффеля в этой системе равны 0 . Так как в ОТО плотность псевдотензора энергии – импульса гравитационного поля пропорциональна символам Кристоффеля то и эта плотность локально станет нулевой. Если гравитационное поле однородно (или в некоторой области конечных размеров можно пренебрегнуть приливными эффектами) то все это можно проделать и в системах отсчета определенных конечных размеров . Это прямое следствие геометрической природы ОТО . Если же в свободно падающей системе отсчета наблюдается влияние однородного поля на темп хода часов, то это ставит под сомнение сам геометрический подход в гравитации – так как если первые производные метрического тензора равны 0, то в этом случае невозможно указать причину такого влияния . По этой причине чуть подробнее рассмотрим возможный альтернативный подход. Хорошо известно, что возможна полевая теория гравитации (ПТГ) в пространстве Минковского [13] [14] [15] [16] [17] . При том большинство физиков придерживаются точки зрения, что если строить нелинейную теорию гравитации с помощью тензорного поля (спин 2 и 0) в пространстве Минковского, то получим ту же ОТО. Нужно отметить и наличие противоположного мнения [13] [14]. Покажем далее, что полевая теория гравитации в пространстве Минковского приводит к отрицанию ПЭ, и, таким образом, при помощи атомных часов, можно однозначно установить природу пространства-времени в гравитационном поле.

В полевой теории гравитации, в отличии от ОТО, в свободно падающей системе отсчета, в уравнении движения тел сила гравитации не изчезает, а компенсируется силой инерции. Плотность тензора энергии-импульса гравитационного поля, как и других физических полей, в этом случае не становится нулевой – не равны 0 первые производные потенциалов гравитационного поля. И следовательно, при переходе в свободно падающую систему отсчета, в ПТГ не изчезает однородное гравитационное поле. Сам же переход в свободно падающую систему можно осуществить при помощи линейных преобразований Лоренца (1), так как ПТГ это лоренц-ковариантная теория в пространстве Минковского, и при том к компонентам тензорного поля могут появится только поправки следующего порядка малости по $\frac{1}{c}$. Согласно ПТГ, на сдвиг уровней атомов (гравитационное красное смещение) влияет только гравитационный потенциал, а не напряженность (сила) гравитационного поля. И тем самым силы инерции тоже не влияют на гравитационное красное смещение. Цитата из работы В.Тирринга [15] „Таким образом мы пренебрегаем гравитационным эффектом Штарка, который, действительно, очень мал. Кроме того , в этом случае нет различия между свободно падающим протоном и протоном покоящимся“ .

Это утверждение можно принять как полностью доказанное наблюдениями за темпом хода часов на спутниках , свободно падающими в гравитационном поле Земли. Присутствет ли или нет однородное поле в свободно падающей системе можно установить сравнивая темп хода двух атомных часов в двух различных точках этой системы. Разность темпа хода этих часов должна зависить от разности потенциалов гравитационного поля, так как темп хода свободно падающих часов зависит от гравитационного потенциала в точке нахождения часов . В ПТГ если два идентичных атома в разных точках падают в однородном гравитационном поле и, если в этих точках потенциал однородного поля принимает различные значения, то сдвиги уровней атомов, энергии связи (и тем самым из-за деффекта масс и сами массы покоя атомов) будут разными.

Если ПТГ не является приближением ОТО, то в действительности компоненты тензора поля не входят в интервал ds, и тем самым с точки зрения ПТГ геометризации гравитации это только эффективный феноменологический подход . Поэтому в ПТГ должен быть справедлив специальный принцип относительности . Тогда свойства пространства - времени Минковского в гравитационном поле не могут зависить от поля и локальные измерения в гравитационном поле должны приводить к разным результатам по сравнению с ОТО . Так для инерциального наблюдателя в любой точке гравитационного поля и для инерциального наблюдателя вне поля разница показаний промежутков времен и пространственных расстояний может зависет только от относительной скорости . Поэтому существенное различие ПТГ от ОТО -

здесь влияние на темп хода часов (а не на темп хода самого времени) гравитационным полем определяется тем, что в таком поле с точки зрения ПТГ есть сдвиг энергетических уровней системы. Зависимость измерительных приборов от какого либо фактора не означает автоматически зависимость свойств и измеряемого обьекта (в нашем случае свойств пространства – времени) от того же фактора.

Поэтому, с точки зрения ПТГ, определяя эталон измерения времени с помощью реальных физических систем, мы должны в самом определении указывать местонахождение этой системы в гравитационном поле . Если перенести физическую систему в другое место в поле то нужно вносить поправки . Например ... определяя с помощью атома цезия секунду в определенной точке поля как некоторое число колебаний мы должны иметь ввиду , что в другом месте в поле секунде будет соответствовать уже другое число колебаний атома цезия . Такой подход в ПТГ из-за универсальности гравитационного взаймодействия является всеобщим для всех эталонов измерения . Различие в понимании измерений с ОТО уже в слабом гравитационном поле существенное .

Рассмотрим этот вопрос (разницу интерпретаций атомных часов в ОТО и ПТГ) подробнее.

Пусть имеем случай двух одинаковых неподвижных относительно друг друга атомных часов в гравитационном поле . Эксперименты дают для любых чисел колебаний

$$N_2 = N_1(1 + \Delta\Phi/c^2)$$

Φ - ньютоновский потенциал

Разность чисел колебаний

$$\Delta N = N_1 \Delta\Phi/c^2$$

В ОТО частота атомных часов не должна зависить от поля - разность чисел колебаний определяется зависимостью времени от поля

$$\Delta N = f_0 \Delta t$$

$$f_2 = f_1 = f_0$$

Поэтому разница показаний промежутков времени в интерпретации ОТО

$$\Delta t = t_1 \Delta\Phi/c^2$$

$$t_1 = \frac{N_1}{f_0}$$

Совсем другое объяснение чем в ОТО может быть для результатов экспериментов с атомными часами в рамках ПТГ . Здесь разность чисел колебаний надо объяснять зависимостью частоты атомных часов от гравитационного поля

$$\Delta N = \Delta f t$$

$$t_2 = t_1 = t$$

С точки зрения ПТГ теперь эксперименты с атомными часами доказывают зависимость частоты (энергетических уровней) атомных часов от поля

$$\Delta f = f_1 \Delta\Phi/c^2$$

Если двое атомных часов двигаются в гравитационном поле относительно друг друга то измеренная разница промежутков времен в ПТГ зависит только от их относительной скорости

$$\tau - t = -\frac{1}{2c^2}\int dt V^2$$

Тогда разность чисел колебаний определяется как зависимостью частот от гравитационного потенциала так и зависимостью промежутков времени от относительной скорости (эффект СТО). Разность чисел колебаний в движущихся атомных часах N_2 (собственное время τ) и чисел колебаний в неподвижных атомных часах N_1 (время t) в таком приближении можно определить как

$$\frac{N_2 - N_1}{N_1} = \frac{\tau}{t} - 1 + \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{c^2}$$

Только первый член в правой стороне определяется зависимостью самого хода времени от относительной скорости (СТО) наблюдателей. Второй член определяется зависимостью хода самих часов от гравитационного поля (ПТГ).

Значит, ПТГ может обьяснить возможно уже сейчас наблюдаемые нарушения принципа эквивалентности (сезонный дрейф атомных часов , влияние поля Солнца на часы спутников GPS и др.), но при этом нужно учитывать другую интерпретацию зависимости числа колебаний атомных часов от гравитационного потенциала.

7. Заключение.

Принцип эквивалентности сил гравитации и сил инерции предполагает, что в свободно падающей системе отсчета, вид уравнений движения всех тел принимает вид уравнений движения в инерциальной системе. Необходимым условием этого является равенство гравитационной и инертной масс. Все же этого недостаточно для того чтоб принцип эквивалентности признать правильным. Необходимо проверить и как себя ведут часы в свободно падающей системе в случае однородного поля – так как в инерциальной системе или нет. В настоящее время точность наблюдений позволяет это сделать. Эта проверка тем более важна, что имеются данные наблюдений, возможно опровергающих принцип эквивалентности.

Литература

1. K. Nordtvedt gr-qc/0212053
2. M. Alberici gr-qc/0503092
3. Ch.G. Huang, H.Y. Guo gr-qc/0604088
4. М.В.Сажин ,, Теория относительности для астрономов ‘’ http://www.astronet.ru/db/msg/1170927
5. В.Е. Жаров ,, Сферическая астрономия ‘’
http://www.astronet.ru/db/msg/1190817
6. Ronald R. Hatch Foundations of Physics vol. 34 , no 11 , p 1725-1739 (2004) http://www.springerlink.com/content/h503n551u713wg72/
7. Scott R. Chubb Astrophysics and Space Science vol. 213 , no1 , p 63-73 (1994) http://adsabs.harvard.edu/abs/1994Ap&SS.213...63C
8. Tom van Flandern and Thomas B.Bahder http://metaresearch.org/cosmology/gravity/vanflandern.ppt
9. Thomas B.Bahder gr-qc/9811009
10. Theodore D. Moyer Celestial Mechanics **23** (1981) 33-56
11. N. Ashby http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/
12. N. Ashby www.aapt-doorway.org/TGRU/articles/Ashbyarticle.pdf
13. Yu.V. Baryshev gr-qc/9912003
14. A.A. Logunov gr-qc/0210005
15. В. Тирринг Гравитация ,том 2 , выпуск 2 , 40-58 (1996)
16. R. Feynman, F. Morigo, W. Wagner ,, Feynman lectures on gravitation “
17. N. Straumann astro-ph/0006423
18. S.M. Kopeikin astro-ph/0610022v2