Об возможности проверить принцип Маха.

Л. Римша
laimontas.rimsa@yahoo.com

В. Римша
viktor@pasvalys.lt

Показано что, при помощи свободно падающих атомных часов в однородном гравитационном поле Солнца, можно проверить не только принцип эквивалентности сил гравитации и сил инерции , но и принцип Маха.

1. Введение.

Во время создания ОТО и еще довольно продолжительный после этого период , Эйнштейн и большинство физиков придерживались точки зрения что ОТО содержит в себе три принципа – общий принцип относительности, принцип эквивалентности и принцип Маха. Интерпретация общего принципа относительности со временем менялась и до сих пор нет общепринятого толкования этого принципа (тут достаточно вспомнить убедительную критику этого принципа В.А.Фоком) . Принцип Маха пока не получил достаточного как теоретического обоснования так и экспериментального потверждения и , в настоящее время , принято считать что в ОТО этот принцип не является обязательным. Только принцип эквивалентности большинством физиков и сейчас воспринимается в такой формулировке в какой был дан Эйнштейном. В этой работе, на простом примере Солнечной системы в ньютоновом приближении, мы попытаемся показать что принцип эквивалентности и принцип Маха - это по сути взаимодополняющие и взаимозависимые положения в формализме ОТО и что, если отказаться от принципа Маха , то это ведет и к отказу от принципа эквивалентности. Тем самым , при проверке принципа эквивалентности (ПЭ) , проверяется и принцип Маха.

В.А.Фок в [19] отмечал **Во всякой теории поля, формулируемой при помощи дифференциальных уравнений в частных производных, предельные условия (или условия, их заменяющие) столь же важны как и самые уравнения; без них поле не может быть определено.** Принцип Маха предпологает существование гравитационных полей, простирающихся по всему пространству, с другой стороны, метрики в случае равноускоренной системы отсчета или в случае вращающейся системы отсчета тоже ведут себя подобным образом . Все это приводит к тому , что, вопрос об правильности принципа Маха и ПЭ, можно свести к вопросу об возможности существования изолированных систем конечных размеров (островных), с асимптотической квазиевклидовой метрикой. Если такие системы реальные , то и принцип Маха и ПЭ неверны, и тогда не пространство-время Римана, а пространство-время Минковского является фундаментальным в гравитации и , при этом, принципом относительности для такой теории должен быть специальный принцип относительности. В этой работе укажем и каким образом все это можно сравнительно простым способом проверить экспериментально.

2. Принцип зквивалентности и Солнечная система.

Рассмотрим системы отсчета, используемые в астрометрии при изучении Солнечной системы. Общепринято в этом случае пользоваться геоцентрической и барицентрической системами отсчета [1] в гармонической калибровке с использованием декартовых координат, и ,при том, рассматривать Солнечную систему как изолированную систему (предполагается что метрика в далеке от нее является асимптотически плоская) . В тоже время, при переходе из барицентрической системы отсчета в геоцентрическу систему , координатные времена этих систем отсчета трансформируются при помощи нелинейной трансформации. Но такой подход не является корректным –это достаточно строго доказал В.А.Фок. Как известно, он показал что трансформации , не нарушающие условия гармоничности систем отсчета и предельные условия, в этом случае должны быть линейными . Вывод, сделанный им, состоит в том что [2] (с. 474) **В случае изолированной системы масс существует координатная система , которая определяется однозначно, с точностью до преобразования Лоренца. Это есть гармоническая координатная система, характеризуемая линейными дифференциальными уравнениями первого порядка и предельными условиями для величин** $g^{\mu\nu}$.

В свою очередь, при помощи линейных преобразований координат и времени , невозможно даже локально обнулить первые производные метрического тензора и ,таким образом, невозможно получить локально-инерциальную систему отсчета. Следовательно, ПЭ не согласуется с такими предельными условиями гравитационных полей островных систем (с условием асимптотически плоской метрики) .

К таким же выводам приводит и рассмотрение изолированной системы при помощи формализма обобщенной динамики Гамильтона . Цитата Л.Д.Фаддеева [3] **Таким образом, с точки зрения динамики теория тяготения в асимптотически плоском пространстве-времени не отличается от других релятивистких теорий поля : роль динамической группы в ней играет группа Пуанкаре. В зтом смысле термин “ общая относительность ” относится не к динамике, а к определению калибровочной группы. Эта точка зрения была сформулированна в (.....) в только что введенных терминах. Она близка многим параллельным формулировкам других авторов, в особенности В.А.Фока.**

Очевидно, что ПЭ должен согласоваться именно с динамическими принципами , так как ПЭ имеет отношение к уравнениям движения (к уравнению геодезической). Пусть Γ^0 - это связность соответствующая силам инерции (кориолисовым, центробежным и др. силам), тогда можно привести цитату А.Траутмана [4] **Уравнения движения приводятся тогда к обычной форме**

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -grad\varphi \qquad \textbf{(1)}$$

Однако группа преобразований, сохраняющих (1) , много шире , чем группа Галилея. Если вектор $\vec{a}(t)$ **зависит от времени, то замена**

$\vec{r} \to \vec{r}' = \vec{r} + \vec{a}$ **(2а)**

$\varphi \to \varphi' = \varphi - \ddot{\vec{a}}\vec{r}$ **(2б)**

не изменяет (1). Ясно , что формула (2б) отображает нетензорные трансформации Γ и неединственногсть расщепления Γ на Γ^0 и гравитационные поля, создаваемые ограниченными источниками. Тогда можно нормировать потенциал φ , исходя из требования обращения его в нуль на больших расстояниях; это исключает возможность преобразования типа (2б) и восстанавливает привилигированную роль группы Галилея. Однако этого нельзя сделать в том случае, когда гравитационное поле простирается во всем пространстве, как в космологии. В этом случае мы стоим перед выбором : либо вообще отказаться от концепции инерциальных систем отсчета, либо назвать инерциальными все системы , в которых свободное падение характеризуется (1) .

Несомненно, на Солнечную систему влияет поле Галактики и поля других масс Вселенной, но вопрос в том является ли это влияние таким по величине и таким по своему характеру, чтобы уже в ньютоновом приближении это влияние согласовалось с ПЭ.

3. Относительность промежутков (интервалов) времени в системах отсчета в Солнечной системе .

В ОТО происходит переопределение свободных , равноправных (инерциальных) движений – за инерциальные движения принимаются все движения, которые происходят по геодезическими траекториями пространсва-времени Римана.

Примем что латинские индесы принимают значения $i, j = 0,1,2,3$, а греческие индексы принимают значения $\mu, \nu = 1,2,3$ и эти индексы относятся к пространственным координатам. Сам интервал пространства-времени примет вид $ds^2 = g_{ij}dx^i dx^j = g_{00}dx^0 dx^0 + g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$. Здесь $dx^0 = ct$, где t - координатное время. К тому же, везде далее будем пользоваться следующим приближением :

- гравитационное поле статическое и слабое (учитываются только члены порядка $\frac{\Phi}{c^2}$) ;
- пространственные части интервалов имеют евклидовый вид;
- используется приближение малых скоростей атомных часов (в интервале учитываются только члены порядка $\frac{v^2}{c^2}$) ;
- локально наблюдаемые скорости часов равны координатным скоростям;
- тензоры деформации и вращения координатных систем равны нулю.

Такое приближение для собственного времени совпадает с ньютоновым приближением для уравнения движения (для уравнения геодезической), так как интервал пространства- времени (интервал собственного времени) в этом приближении пропорционален ньютоновому действию. В этом приближении и системы отсчета можно представить как жесткие твердые тела классической механики. Интервал во всех системах отсчета в этом случае принимает вид

$$ds^2 = g_{00}dx^0dx^0 - dx^\mu dx^\mu \qquad (3)$$

Многочисленнные наблюдательные факты потверждают правильность формулы в гравитационном поле

$$d\tau \approx (1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{\Phi}{c^2})dt \qquad (4)$$

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 (4) применима как в случае неподвижных , так и при свободном падении часов (атомные часы на спутниках в гравитационном поле Земли) . Хотя трансформация (4) отличается от трансформации дифференциалов (трансформации Лоренца) для инерциальных наблюдателей СТО, в ОТО оба наблюдателя рассматриваются как свободные (инерциальные), так как оба они двигаются по геодезическим траекториям. Относительность ускорения в ОТО допускает нелинейные преобразования при переходе из одной системы отсчета в другую систему отсчета.

Можно ввести невращающиеся относительно удаленных звезд геоцентрическую и гелиоцентрическую системы отсчета [1]. Далее используются обозначения -

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

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

$\Phi(\vec{R}+\vec{r})$ - ньютоновый потенциал поля Солнца

t - барицентрическое координатное время

T - геоцентрическое координатное время

$\Phi = -U$

Тогда рекомендации IAU указывают [5], что закон трансформации координатных времен в нашем приближении должен быть

$$T = t - \frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t}[\frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{\vec{V}\,\vec{r}}{c^2} \qquad (5)$$

В члене $\frac{\vec{V}\,\vec{r}}{c^2}$ скорость зависит от момента координатного времени t.

Этот член в (5) получается следующим образом -

$$\frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t}\frac{d(\vec{V}\vec{r})}{dt}dt = \frac{1}{c^2}[\vec{V}(t\ )\vec{r}(t\ ) - \vec{V}(t_0)\vec{r}(t_0)] \qquad (6)$$

и 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. Член (6) интерпретируется как соответствующий преобразованию СТО и ,тем самым следует , что в геоцентрической системе отсчета однородное поле Солнца не влияет на темп хода часов. Цитата из раздела 5.5 [7] **Эта поправка объясняется в рамках специальной теории относительности: одновременные события в неподвижной барицентрической системе отсчета не являются одновременными в движущейся геоцентрической системе .**

Но такая интерпретация недостаточно корректна. Замена градиента потенциала ускорением, при получении (6), возможна только при свободном падении и , при такой замене переменных, вряд ли корректно подменять одни физические эффекты другими физическими эффектами - эффект относительности промежутков времени ОТО (из-за относительности ускорения) сводить к эффекту относительность одновременности СТО. Если во всех формулах градиент потенциала не поменять на ускорение, то тогда видно что это различные физические эффекты.

Если востановить градиент в (6) то получим и нелинейный член

$$\frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t}\frac{d(\vec{V}\vec{r})}{dt}dt = \frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t}(\vec{\nabla}U(\vec{R})\vec{r})dt + \frac{1}{c^2}\int_{t_0}^{t}(\vec{V}\vec{w})dt \qquad (7)$$

Если переписать (5) трансформацию как трансформацию для дифференциалов, то, тоже видно, что полученная трансформация является нелинейной и отличается от преобразования Лоренца в для дифференциалов в СТО

$$dT = dt - \frac{1}{c^2}[\frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{1}{c^2}[\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r}]dt + \frac{1}{c^2}\vec{V}\ d\vec{r} \qquad (8)$$

$\vec{V}\ \frac{d\vec{r}}{dt}dt$ - этот только член эффекта относительности промежутков времени СТО (из-за относительности скорости) .

Но такой , выше изложенный общепринятый подход, использующий нелинейные трансформации , предполагает и влияние на часы в Солнечной системе удаленных тел; по сути такой подход требует в какой то форме учесть и принцип Маха.

Если же Солнечную систему можно рассматривать как изолированную систему , то трансформация , при переходе из барицентрической системы отсчета в геоцентрическую систему отсчета , должна быть линейной трансформацией (не должна в себе содержать градиентный член в случае дифференциалов). В этом случае трансформация дифференциалов координатных времен может быть

$$dT = dt - \frac{1}{c^2}[\frac{V^2}{2} + U(\vec{R})]dt - \frac{1}{c^2}\vec{V}\frac{d\vec{r}}{dt}dt \qquad (10)$$

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 и может наблюдаться в геоцентрической системе отсчета. Очевидно, что этот вывод применим и в случае часов на спутниках .

В следующем разделе покажем что , использование нелинейного преобразования (5) , с неизбежностью приводит к тому что Солнечную систему нельзя рассматривать как изолированную систему.

4. Равноправны ли барицентрическая и геоцентрическая системы отсчета ?

Рассмотрим Солнечную систему с точки зрения барицетрической и геоцентрической систем отсчета. Сперва заметим, что и геоцентрическую систему отсчета можно рассматривать не только вблизи начала отсчета координат (так называемая локально- инерциальная система отсчета), но и во всем простанстве Солнечной системы – как и систему отсчета барицентра Солнечной системы . Обе эти системы определяются одинакого – их координатные оси неподвижны относительно бесконечно удаленных звезд (они не вращаются) и ,очевидно, что и все наблюдения Солнечной системы производятся именно из геоцентрической системы отсчета . Если и возможно ограничение размеров геоцентрической системы в ньютоновом приближении, то условием такого ограничения может быть условие $\frac{1}{c^2}(\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r}) \prec\prec 1$. Если обозначить размер орбиты Земли $R = 1AU$, и выразить центробежное ускорение Земли с помощью скорости и радиуса орбиты Земли , то получим такое условие

$$r \prec\prec \frac{c^2}{V^2}R \approx 10^8 AU \qquad (11)$$

На таких расстояниях новые релятивисткие эффекты не должны появляться, условие же для скоростей остается прежним (как и в барицентрической системе) $\frac{v^2}{c^2} \prec\prec 1$. В нашем приближении важны только следующие компоненты метрического тензора (потенциалы)

g_{00} - в барицетрической системе отсчета

G_{00} - в геоцентричесской системе отсчета

Если расматривать Солнечную систему только в ньютоновом приближении, то в этом случае за уравнение поля достаточно принять уравнение Пуассона для ньютоновского потенциала (и уравнение Лапласа для свободного поля). Тогда в барицентрической системе, в точке барицентра Солнечной системы (практически совпадает с точкой нахождения Солнца)

$\Delta g_{00} \approx \frac{8\pi\gamma}{c^2} M$ - в точке нахождения центра масс M Солнечной системы ,

$\Delta g_{00} \approx 0$ - а в других точках Солнечной системы .

Уравнения движения тел в этой системе отсчета (ускорение)

$$\vec{u} \approx -\frac{c^2}{2} \vec{\nabla} g_{00}$$

При переходе в геоцентрическую систему отсчета при помощи нелинейной трансформации

$$dT \approx (1 + \frac{1}{c^2}\Phi(\vec{R}) - \frac{1}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r} - \frac{1}{2}\frac{\vec{V}^2}{c^2})dt - \frac{1}{c^2}\vec{V}\, d\vec{r} \qquad (12)$$

(эта трансформация используется в релятивиской астрометрии и не нарушает условие (11) на огромном расстоянии от Солнечной системы) получаем в геоцентрической системе (учитываем что $\frac{\partial x^\mu}{\partial T} \approx V^\mu$)

$$G_{00} \approx g_{00}\frac{\partial t}{\partial T}\frac{\partial t}{\partial T} - \frac{\partial x^\mu}{c\partial T}\frac{\partial x^\mu}{c\partial T} \approx g_{00}(1 - \frac{\Phi(\vec{R})}{c^2} + \frac{1}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r} + \frac{1}{2}\frac{\vec{V}^2}{c^2})^2 - \frac{\vec{V}^2}{c^2}$$

$$G_{00} \approx g_{00}(1 - 2\frac{\Phi(\vec{R})}{c^2} + \frac{2}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}\vec{r}) \qquad (13)$$

Уравнение для поля в геоцентрической системе получаем такое же как в барицентрической системе отсчета (учитывая что везде члены вида $\vec{\nabla} g_{00}\frac{2}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}$ имеют порядок величин $\frac{1}{c^4}$)

$\Delta G_{00} \approx \frac{8\pi\gamma}{c^2} M$ - в точке барицентра Солнечной системы ,

$\Delta G_{00} \approx 0$ - а в других точках Солнечной системы.

А вот уравнение движения (ускорение) тел в геоцентрической системе уже будет другим

$$\vec{a} \approx -\frac{c^2}{2}\vec{\nabla} G_{00} \approx -\frac{c^2}{2}(\vec{\nabla} g_{00} + \frac{2}{c^2}\frac{d\vec{V}}{dt}) \approx \vec{u} - \frac{d\vec{V}}{dt} \qquad (14)$$

Можно (14) переписать следующим образом

$$\vec{a} \approx \vec{u} - \frac{d\vec{V}}{dt} \approx -\frac{c^2}{2}\{\vec{\nabla} g_{00}(\vec{R}+\vec{r})\} + \frac{c^2}{2}\{\vec{\nabla} g_{00}(\vec{R})\}$$

Получаем закон сложения ускорений в классической механике при переходе в неинерциальную систему отсчета. Локально (в начале отсчета геоцентрической системы) получается равное 0 ускорение , тела в далеке от геоцентра в Солнечной системе двигаются с ускорением по сложным траекториям . В теории Ньютона, при переходе в неинерциальную систему, закону сложения ускорений полевая интепретация не нужна. В ОТО , в отличии от теории Ньютона, такая полевая интерпретации этого движения Солнечной системы относительно геоцентра необходима (если правилен ПЭ). Волновое уравнение для потенциалов в обоих системах то же самое , источники поля в самой Солнечной системе не изменились Полевая интерпретация уравнения движения в геоцентрической системе отсчета возможна только такая – появляется в геоцентрической системе допольнительное однородное поле.

Если, после нелинейной трансформации времени, появляющиеся в геоцентрической системе поля являются реальными физическими полями, то они должны иметь и реальные источники - это приводит в свою очередь к необходимости принципа Маха. Заметим , что В.А.Фок такие поля считал фиктивными, так как в противном случае неизбежно признание равноправия систем Коперника и Птоломея [2](с. 475) **Мы неоднократно подчеркивали принципиальное значение существования привилигированной координатной системы, определяемой с точностью до преобразования Лоренца. Оно проявляется и в следующем. Только признав его, можно говорить о правильности гелиоцентрической системы Коперника, в том смысле, в каком это было возможно в механике Ньютона. Непризнание же привилигированных координатных систем ведет к той точке зрения, согласно которой гелиоцентрическая система Коперника и геоцентрическая система Птоломея будто бы равноправны.**

Но можно привести и другие мнения.

М.Борн [8] (с. 335) **Итак, с точки зрения Эйнштейна, Птоломей и Коперник в одинаковой мере правы. Чье мнение предпочесть – вопрос удобства. Для механики планетной системы, безусловно, удобнее представление Коперника. Но бессмысленно называть гравитационные поля возникающие при выборе другой системы отсчета “фиктивными” в противовес “реальным” полям, создаваемым окружающими массами, - так же бессмысленно как и ставить вопрос о “действительной” длине линейки в специальной теории относительности. Само по себе гравитационное поле ни “реально” ни “фиктивно” . Вне выбора координат оно не имеет смысла так же, как и длина линейки. И никакого различия не существует между полями, которые прямо создаются окружающими массами, и полями, присутствующими независимо от этих масс ; в первом случае эффект обусловлен , в частности, окружающими массами, во втором - удаленными массами в космосе.**

К.Меллер [9] (с. 180) **Мысль о том, что ускорение удаленных масс может создать гравитационное поле, не наблюдаемое в инерциальной системе, не более искуственна, чем, например, тот факт, что электростатическая система имеет нулевое магнитное поле в инерциальной системе покоя зарядов, в то время как в любой другой инерциальной системе, относительно которой заряд движется с постоянной скоростью, магнитное поле не равно нулю. Причина появления магнитного поля в “движущейся” инерциальной системе следует искать в перемещении электрических зарядов относительно такой системы, и наличие магнитного поля не является указанием на то, что фундаментальные уравнения электромагнетизма имеют разную форму в различных инерциальных системах. Единственное существенное различие между двумя рассматриваемыми случаями состоит в том, что причину появления магнитного поля можно искать при изучении движения в земных системах (например, изучая движение зарядов) , а в то время как источников гравитационных полей в ускоренных системах отсчета следует искать , изучая движение космических удаленных масс.**

Поля удаленных масс реальны или фиктивны ровно настолько, насколько реально или фиктивно инерциальной является геоцентрическая система (в начале своего отсчета – в геоцентре). Возможна ли такая нелинейная трансформация координатных времен, чтобы в начале геоцентрической системы отсчета получалась локально инерциальная система отсчета и ,при этом, при условии $\vec{r} \to \infty$, асимптотика была следующая $G_{00} \to 1$ (в этом случае ньютонов потенциал $\Phi \to 0$) ? Ответ на этот вопрос должен быть отрицательный. В этом случае метрический тензор имел бы вид $G_{00} \approx 1 + \frac{2}{c^2}\Phi + \frac{2}{c^2}\varphi$, здесь φ - нелинейная часть трансформации. Очевидно, что эта функция должна удовлетворять уравнению Лапласа $\Delta\varphi = 0$ в пределах Солнечной системы. Но , как известно [2] (с.272) , единственным решением уравнения Лапласа $\Delta\varphi = 0$, удовлятворяющим условия конечности и непрерывности повсюду самой функции φ и ее производных, и при том что на пространственной бесконечности функция φ и ее производные стремятся к нулю, является решение $\varphi = 0$. Рассмотренный пример – это частный случай (в ньютоновом приближении) доказательства В.А.Фока [2] (с. 468) .

С точки зрения Коперника (точнее Ньютона), причиной появления в геоцентрической системе допольнительного ускорения в движении тел Солнечной системы является то, что сама геоцентрическая система неинерциальна (на Землю влияют сила-поле), реального влияния (влияния силы , однородного поля) на другие тела Солнечной системы нет.

Обосновать же равноправие системы Птоломея в рамках полевого подхода можно только при помощи принципа Маха – необходимо вводить поля (и источники этих полей) с довольно странными свойствами (изменение во времени и т. д.) . Это обстоятельство ставит под некоторое сомнение и принцип эквивалентности .

5. Пространство-время Минковского и теория гравитации.

При попытках построения теории гравитации при помощи тензорного поля, возникают математические выражения типа $g_{ij} = \eta_{ij} + h_{ij}$, здесь η_{ij} - метрический тензор пространства Минковского в координатах Декарта , h_{ij} - тензорное поле . Естественно, возникает вопрос об возможной физической интерпретации этого факта. Если правильный ПЭ, то такое разделение метрического тензора на две состаляющие физического смысла не имеет, и это только математический прием. Если же ПЭ ошибочен, то математическим приемом является именно такое обьединение, а не разделение (как , например, принцип геометризации А.А.Логунова [11]).

Следует отметить, что все наблюдаемые факты могут быть обьяснены при помощи стандартного формализма (Лагранжа-Гамильтона), с использованием тензорного поля h_{ij} и метрического тензора пространства Минковского η_{ij} (Тирринг, Фейнман, Логунов, Швингер, Грищук, Барышев и многие другие) . По этому поводу Я.Б.Зельдович и Л.П.Грищук [10] писали **Как уже сказано, общая теория относительности , являесь обобщением специальной теории относительности, безусловно допускает эквивалентную (полевую) формулировку, использующую понятие тензорного, гравитационного поля , заданного на фоне плоского мира Минковского . В таком подходе метрика Минковского играет чисто вспомагательную роль. Искуственный , формальный, характер метрики Минковского виден уже из того , что распространение света при наличии тяготения происходит не по нулевым геодезическим плоского мира Минковского, а по геодезическим искривленного мира .**

Последний довод серьезный , но не такой уж и однозначного убедительный, если вспомнить процесс распространения света в средах в рамках формализма СТО. Нам кажется, что более важным доводом в этом вопросе (формальна метрика Минковского или нет) было бы установить какие должны быть трансформации между системами отсчета, при переходе в свободно падающую геоцентрическую систему отсчета. Если пользоваться линейными преобразованиями Лоренца для гравитационного поля, то разности потенциалов двух разных точек будут преобразовываться линейным образом и ,поэтому , и в свободно падающей системе отсчета будет наблюдаться разность потенциалов однородного поля.

К тому же, если пространство-время Минковского играет фундаментальную роль в гравитации, то влияние гравитационного поля на показания часов и маштабов следует обьяснять как влияние физического поля на эти физические обьекты, погруженные в пространство-время Минковского , а не как прямое влияние поля на саму геометрию пространства-времени. 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. Покажем, что такое рассмотрение влияния гравитационного поля на часы приводит к заключению что ПЭ может нарушаться и это можно проверить выше указанным способом.

Показания атомных часов зависят от энергетических уровней атомов, в свою очередь и влияние гравитационного поля на эти атомные часы можно представить как влияние на энергетические уровни атомов [12] , [13] (с. 127). Сдвиг энергетических уровней зависит от значения потенциала гравитационного поле в точке нахождения часов , при этом, неоднородностью потенциала на расстоянии размеров атома можно пренебречь. Как известно, влияние же сил инерции на энергетические уровни атомов проявляется не как смещение всех уровней атомов пропорциональное самой энергии уровня (как в гравитационном смещении) , а как проявление эффекта Штарка . Цитата из [14] **Поэтому выяснение влияния ускорения на ход атомных часов сводится к использованию известных результатов, касающихся штарк-эффекта в атомах.** И цитата из (об энергетических уровнях атома водорода в гравитационном поле) [12] **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 .**

Следовательно, в случае энергетического рассмотрения гравитационного красного смещения, силами инерции можно пренебречь и влияние гравитационного поля на свободно падающие атомные атомные часы должно быть такое же как и влияние на неподвижные те же самые атомные часы.

Присутствует 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 . Если два идентичных атома в разных точках свободно 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 (как и в случае неподвижных атомов в таком же гравитационном поле) . Так как отсчет собственного времени атомных часов зависит от энергетических уровней атомов, то и показания собственного времени свободно падаюших этих часов должны зависить от гравитационного потенциала в точке нахождения .

Поэтому, при таком подходе, 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 , 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 , из-за универсальности гравитационного взаймодействия, является всеобщим для всех эталонов измерения .

Рассмотрим этот вопрос (разницу интерпретаций атомных часов в ОТО и в полевом подходе с метрикой Минковского) 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

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

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

В рамках нами рассматриваемого подхода, совсем другое объяснение чем в ОТО, может быть данно для результатов экспериментов с атомными часами . В этом случае разность чисел колебаний следует объяснять зависимостью частоты атомных часов от гравитационного поля

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

$$t_2 = t_1 = t$$

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 времени 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 .

6. Некоторые возможные способы проверки принципа эквивалентности при помощи атомных часов.

Цитата из раздела 3.1 лекций М.В.Сажина [6] **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**

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

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 никак не объяснима, если „ забыть" про эффекты общей теории относительности .

Тут имеются ввиду результаты наблюдений моментов времени прихода сигналов от пульсаров и координатное время в этом случае – это барицентрическое координатное время Солнечной системы. При общепринятой интерпретации (это эффект относительности одновременности СТО- мы же показали что это может быть только эффект ОТО) относительно геоцентрической системы отсчета эти атомные часы отсчитывают собственное время одинакого - общий вклад вращения Земли и геопотенциала на поверхности Земли на уровне моря для всех часов с хорошей точностью одинаков. При прямом сравнивании показаний часов в геоцентрической системе отсчета , с помощью сигналов или при переносе этих часов , можно проверить ПЭ. Если подобным образом сравнивая показания часов получится такой же дрейф, то ПЭ нарушается.

Можно предположить, что может также проявится влияние однородного поля Солнца на часы спутников системы GPS . Система GPS изначально настроенна только в геоцентрической системе отсчета и поэтому наличие влияния однородного гравитационного поля Солнца на часы этой системы однозначно опровергало бы ПЭ [18] , а отсутствие этого влияния , наоборот, подтверждало бы правильность этого принципа . Интересно , что имеются данные [15] [16] [17] которые можно интерпретировать как влияние однородного поля Солнца на атомные часы этой системы, но, по понятным причинам, ищутся другие возможные объяснения .

Литература

1. S.M.Kopeikin astro-ph/0610022v2
2. В.А.Фок Теория пространства, времени и тяготения 1961
3. Л.Д.Фаддеев УФН том 136, вып. 3, 1982
4. А.Траутман УФН том 89, вып. 1, 1966
5. M. Soffel,S.A. Klioner et all astro-ph/0303376v1
6. М.В.Сажин Теория относительности для астрономов http://www.astronet.ru/db/msg/1170927
7. В.Е. Жаров Сферическая астрономия http://www.astronet.ru/db/msg/1190817
8. М. Борн Эйнштейновская теория относительности 1972
9. К. Меллер Теория относительности 1975
10. Я.Б.Зельдович , Л.П.Грищук УФН том 155, вып. 3, 1988
11. A.A. Logunov gr-qc/0210005
12. В.Тирринг Гравитация ,том 2 , выпуск 2 , 40-58 (1996)
13. Р.Фейнман,Ф. Мориниго,У.Вагнер Фейнмановские лекции по гравитации
14. В.Л.Гинзбург,Ю.Н.Ерошенко УФН том 165 № 2 205-211 (1995)
15. Scott R. Chubb Astrophysics and Space Science vol. 213 , no1 , p 63-73 (1994) http://adsabs.harvard.edu/abs/1994Ap&SS.213...63C
16. Tom van Flandern and Thomas B.Bahder http://metaresearch.org/cosmology/gravity/vanflandern.ppt
17. Thomas B.Bahder gr-qc/9811009
18. N.Ashby http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/
19. В.А.Фок УФН T.LIX , вып. 1, 1956