

Что глобальная навигационная система **GPS** говорит нам об относительности

(Перевод статьи Tom Van Flandern "What the Global Positioning System Tells Us about Relativity" отсюда <http://www.metaresearch.org/cosmology/gps-relativity.asp>)

Том Ван Фландерн, Университет Штата Мэриленд и Мета Исследования

Из книги "Открытые вопросы в релятивистской физике" (стр. 81-90), отредактированной Franco Selleri, изданный Apeiron, Монреаль (1998)

1. Что такое глобальная навигационная система **GPS**?

Глобальная навигационная система [Global Positioning System (GPS)] состоит из сети 24 спутников, находящихся примерно на 12-часовых орбитах, на борту каждого из которых имеются атомные часы. Орбитальный радиус спутников - приблизительно равен четырем Земным радиусам (26 600 км). Орбиты почти круговые, с типичным эксцентриситетом, меньшим чем 1 %. Наклон орбиты к экватору Земли - обычно 55 градусов. Спутники имеют орбитальные скорости около 3,9 км/с в системе координат с началом в центре Земли и не вращающейся относительно отдаленных звезд. Расчетные орбиты спутников лежат в шести равноотстоящих плоскостях. В каждой плоскости находится по четыре спутника, а угловое расстояние между спутниками в каждой плоскости равно примерно 90 градусам. Орбитальные периоды спутников приблизительно равны 11 часам и 58 минутам так, что проекция траектории спутника на поверхность Земли повторяется день за днем, потому что Земля делает один оборот относительно звезд каждые 23 часа и 56 минут. (Четыре дополнительных минуты требуются, чтобы точка на Земле возвратилась в положение непосредственно под Солнцем, потому что Солнце перемещается приблизительно на один градус в день относительно звезд.)

Бортовые атомные часы имеют точность приблизительно в 1 наносекунду (нс) по времени, и приблизительно 1 нс/день по скорости хода. Так как скорость света приблизительно равна одному футу (1 фут = 30,48 см) в наносекунду, то система способна с удивительной точностью определять расположение объектов на Земле или в околоземной окружающей среде. Например, если спутниковые часы полностью синхронизированы с наземными атомными часами, и мы знаем время, когда сигнал послан со спутника, тогда временная задержка, необходимая для того, чтобы этот сигнал достиг наземного приемника, немедленно показывает расстояние (с потенциальной точностью приблизительно в один фут) между наземным приемником и спутником. Используя четыре спутника для проведения триангуляции и определения временных поправок, неизвестное положение приемника может быть определено со сравнительно высокой точностью.

2. Какие релятивистские эффекты могут быть замечены с помощью атомных часов спутниковой системы **GPS**?

Общая теория относительности (ОТО) предсказывает, что часы в более сильном поле тяготения идут с меньшим темпом. Специальная теория относительности (СТО) предсказывает, что движущиеся часы кажутся идущими медленнее, чем неподвижные часы. Примечательно, что эти два эффекта компенсируют друг друга для часов, расположенных на уровне моря где-нибудь на Земле. Так, если в качестве опорных использовать гипотетические часы на северном или южном полюсе Земли, то часы на земном экваторе идут медленнее из-за

относительной скорости вследствие вращения Земли, но быстрее из-за большего расстояния от центра масс Земли вследствие сплюснутости Земли. Из-за того, что скорость вращения Земли определяет ее форму, эти два эффекта не являются независимыми, и именно поэтому они не полностью компенсируют друг друга. Однако в общем случае компенсации не происходит. Часы на любой высоте над уровнем моря идут быстрее, чем часы, находящиеся на уровне моря; а часы на движущейся ракете идут медленнее, чем неподвижные часы.

ОТО предсказывает для спутников системы GPS, что атомные часы на орбитальных высотах спутников GPS идут быстрее примерно на 45900 нс/день, потому что они находятся в более слабом поле тяготения, чем атомные часы на земной поверхности. Специальная теория относительности (СТО) предсказывает, что атомные часы, перемещающиеся с орбитальной скоростью спутников системы GPS идут медленнее примерно на 7200 нс/день, чем неподвижные наземные часы. Чтобы не иметь часы с такими большими различиями скорости хода, спутниковые часы перед запуском регулируют на такую скорость хода, чтобы компенсировать эти предсказанные эффекты. На практике это достигается просто путем изменения международного определения числа периодов при атомных переходах, которые составляют односекундный интервал. Поэтому, мы сначала перед запуском наблюдаем темп хода часов с введенным смещением темпа хода. Затем мы наблюдаем темп хода часов после их запуска на орбиту и сравниваем их темпы с предсказаниями теории относительности, как суммарный эффект ОТО и СТО. Если предсказания правильны, то мы должны видеть, что часы снова идут с почти тем же самым темпом, что и часы на земле, несмотря на использование измененного определения для длительности одной секунды.

Мы обращаем внимание, что это сравнение темпа хода часов после запуска не зависит от рассматриваемой системы отсчета или рассматриваемого наблюдателя. Поскольку проекция траектории на поверхность земли повторяется день за днем, расстояние от спутника до поверхности земли остается по существу неизменным. Но любая разность в темпе хода между спутниковыми часами и часами на земле продолжает увеличивать разность между их показаниями с каждым проходящим днем. Поэтому никаких недоразумений не может возникнуть вследствие размещения спутниковых часов на некотором расстоянии от наземных часов, когда мы сравниваем их показания времени. Нужно только подождать достаточно долго и разница в показаниях времени из-за несоответствия темпа хода часов в конечном счете превысит любую воображимую ошибку или неоднозначность при таких сравнениях.

3. Подтверждает ли GPS изменения темпа хода часов, предсказываемых ОТО и СТО?

Информация от самых высокоточных приемников GPS собирается непрерывно на двух частотах с полупорасекундным интервалом от всех спутников GPS на пяти следящих станциях военно-воздушных сил США, распределенных вокруг Земли. Глубокое обсуждение этих данных и их анализ не возможны в этой статье. [1] Эти данные показывают, что темп хода бортовых атомных часов действительно находится в согласии с темпом хода наземных часов в предсказанной степени, которая слегка отличается от номинала, потому что фактически достигнутая орбита не всегда точно совпадает с запланированной. Точность этого сравнения ограничена главным образом тем, что атомные часы изменяют свою частоту в небольших, случайных размерах (порядка 1 нс/день) в непредсказуемые моменты времени по причинам, которые полностью не поняты. Вследствие этого долговременная точность этих часов хуже, чем их кратковременная точность.

Поэтому, мы можем утверждать с уверенностью, что предсказания теории относительности подтверждены с высокой точностью на протяжении временных периодов, равных многим дням. В наземном решении проблемы с данными, обычно один раз в день определяются новые поправки для временных промежутков и для темпа хода каждых часов. Эти поправки отличаются на несколько наносекунд для промежутков времени и на несколько наносекунд в день для темпа хода часов от подобных поправок для других дней на той же самой

неделе. Для больших промежутков времени непредсказуемые ошибки в часах растут пропорционально квадрату времени, так что сравнения с предсказаниями становятся все более и более неопределенными, если не используются эти эмпирические поправки. Но в пределах каждого дня, поправки часов остаются устойчивыми в пределах приблизительно 1 наносекунды для промежутка времени и 1 наносекунды в день для темпа хода часов.

Начальные ошибки темпа часов сразу после запуска дали бы наилучший показатель абсолютной точности предсказаний теории относительности, потому что они в наименьшей степени подвергались бы влиянию накопленных случайных ошибок в темпе часов за какое-то время. К сожалению, это еще не изучалось. Но если ошибки были бы значительно большими, чем дисперсия скорости среди 24-х спутников GPS, которая не превышает 200 нс/день при нормальных обстоятельствах, она была бы замечена даже без изучения. Так что мы можем заявить, что эффект изменения скорости хода часов, предсказанный ОТО, подтвержден не хуже чем в пределах $\pm 200 / 45\,900$ или приблизительно 0,7 %, а предсказанный СТО эффект подтвержден в пределах $\pm 200 / 7\,200$ или приблизительно 3 %. Это очень заниженная оценка. При реальном изучении, большая часть из этой максимальной дисперсии в 200 нс/день почти наверняка отнесена на счет различий между запланированными и достигнутыми орбитами, и предсказания теории относительности будут подтверждены с намного лучшей точностью.

Обнаружены также 12-часовые вариации (орбитальный период) в скорости хода часов из-за небольших отклонений орбитальной высоты и скорости спутников, вызванные маленьким эксцентриситетом их орбит. Они наблюдаются с ожидаемой величиной для собственной орбиты каждого спутника GPS. Например, при эксцентриситете орбиты, равном 0,01, амплитуда этого 12-часового изменения равна 23 нс. Изменения, вызванные изменением высоты и изменением скорости, хотя и не отделимы друг от друга, но оба они отчетливо представлены, потому что наблюдаемая амплитуда равняется сумме из двух предсказанных амплитуд.

4. Постоянна ли скорость света?

Другие изучения с использованием информации GPS установили гораздо более строгие пределы чем, мы наложим здесь. Но наша цель здесь состоит не в том, чтобы установить наиболее строгий предел на возможные изменения скорости света, а скорее определять, какое может быть максимально возможное изменение, которое может остаться совместимым с данными. Система GPS работает, посылая сигналы атомных часов с орбитальных высот на землю. Это занимает около 0,08 секунды с нашей человеческой точки зрения, но это очень длинный промежуток времени (хотя и эквивалентный) в 80 000 000 нс с точки зрения атомных часов. Из-за этой точности, система показала, что скорость радио сигналов (или "скорость света") является той же самой от всех спутников до всех наземных станций всегда и во всех направлениях в пределах ± 12 метров в секунду (м/с). То же самое численное значение для скорости света работает одинаково хорошо для любого сезона года.

Техническое примечание: Измерение односторонней скорости света требует двух часов, по одним часам на каждом конце пути. Если расстояние между часами известно, то, разделив расстояние на временной интервал между передачей и приемом сигнала, мы получим одностороннюю скорость сигнала. Но измерение временного интервала требует проведения предварительной синхронизации часов. Если используется эйнштейновский метод синхронизации часов, то измеренная скорость должна быть скоростью света по эйнштейновскому определению синхронизации (которое предполагает, что скорость света одна и та же во всех инерциальных системах отсчета). Если используется некоторый другой неэквивалентный метод синхронизации, то измеренная скорость сигнала не будет скоростью света. Ясно, что измеренная скорость сигнала и метод синхронизации глубоко связаны.

Наш результат здесь просто указывает, что измеренная скорость не изменяется как функция от времени дня или направления движения спутника на орбите, когда синхронизирующие поправки времени сохраняются неизменными в течение одного дня. Что касается сезонных вариаций, то все спутниковые часы корректируются так, чтобы держаться поближе к первичным часам американской военно-морской обсерватории, чтобы предотвратить чрезмерное накопление ошибок от случайных изменений скорости хода в течение длительных временных периодов. Так что мы не можем делать прямые сравнения между различными сезонами, но просто обращаем внимание, что одно и то же значение скорости света работает одинаково хорошо в любом сезоне.

5. Что такое "часы GPS"?

Атомные цезиевые часы работают, подсчитывая количество периодов частоты переходов атомов цезия, равной примерно 10 миллиардов раз в секунду с очень устойчивой частотой, обеспечиваемой природой. Точное число таких периодов было первоначально прокалибровано астрономами, и теперь принято в соответствии с международным соглашением как определение одной атомной секунды.

Атомные часы GPS на орбите идут с темпом, значительно отличающимся от темпа часов на Земле, если им позволено это, и это усложняет использование системы. Так что счетчик периодов частоты переходов цезия (или соответствующее явление в случае использования рубидиевых атомных часов) регулируется на Земле перед запуском так, чтобы после вывода на орбиту часы отмечали целые секунды с той же самой средней скоростью, что и часы на Земле. Поэтому кажется, что часы GPS перед запуском на Земле идут медленнее по сравнению с наземными часами, но после запуска на орбиту с соответствующей высотой они идут с той же самой скоростью, что и часы на Земле.

Мы будем называть часы, скорость хода которых была предварительно установлена таким образом, как "часы GPS". Это поможет нам при обсуждении эффектов СТО типа парадокса близнецов. Часы GPS предварительно отрегулированы для учета релятивистских изменений скорости так, чтобы они продолжали идти с тем же самым темпом, что и наземные часы даже при движении с высокими относительными скоростями. Таким образом, часы GPS, которые имеются у близнеца-путешественника, могут использоваться, для определения местного времени в системе отсчета Земли в любой точке полета - это большое преимущество для разрешения парадоксов.

6. Является ли ускорение существенным для решения "парадокса близнецов"?

Если перемещающийся близнец имеет на борту своего космического корабля обычные часы и часы GPS, то он может наблюдать эффекты, предсказанные СТО, не нуждаясь в каком-либо ускорении в обычном парадоксе близнецов. Это потому, что циклотронные эксперименты показали, что, даже ускорение в $10^{19} g$ ($g =$ ускорение свободного падения на поверхности земли) на скорость хода часов не влияет. По существу только скорость влияет на скорость хода часов, но не ускорение.

Предположим, что путешествующий близнец рождается в момент времени, когда его космический корабль проходит мимо Земли и двое его бортовых часов синхронизируются с часами на Земле. Обычные бортовые часы идут более медленно, чем бортовые часы GPS, потому что их темп хода отличается в γ раз, что предсказывает СТО для замедления хода всех часов, движущихся с относительной скоростью v [$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$]. Но всюду куда перемещающийся близнец попадает, пока его скорость относительно земной системы отсчета не изменяется, показания его GPS часов будут одинаковыми с показаниями любых часов, синхронизированных с земными часами и покоящихся в системе отсчета Земли, мимо которых он пролетает

на своем пути. А его обычные часы будут иметь показания для времени с момента прохождения Земли, меньшие в гамма раз. Его биологические процессы (включая старение), которые происходят в темпе, соответствующем темпу хода обычных часов, также замедлены в гамма раз.

Поскольку эта разность темпа хода имеется в каждый момент полета, начиная с самого первого момента, не удивительно, если путешествующий близнец выполнит весь полет туда и обратно без изменения скорости и возвращается на Землю. После завершения полета он проверит то, что он наблюдал на каждом этапе полета: темп хода его обычных часов был медленнее и его биологический возраст был моложе в гамма раз, чем таковые для его коллег из системы отсчета Земли в каждой точке его полета, включая и момент его завершения. То же самое было бы справедливо, если бы он не вернулся на Землю, а просто продолжил лететь вперед. Он был бы более молодым, чем его ровесники на любой планете, с которой он встречается, которые утверждают, что были рождены в тот же самый момент времени, в который был рожден наш путешественник (то есть, когда он пролетал мимо Земли) в соответствии с их точкой зрения из системы отсчета Земли.

Ясно, что ускорение или его отсутствие не имеет никакого отношения к наблюдаемым результатам. Если ускорение имеется, то оно просто позволяет произвести более удобное сравнение показаний часов после возвращения в исходную точку. Но так как путешественник никогда не может вернуться в ту же самую точку в пространстве-времени просто вернувшись в ту же самую точку в пространстве, результаты сравнения после полета туда и обратно ничем не отличаются от тех, которые сделаны где-нибудь вдоль маршрута полета. Путешественник всегда считает, что его собственное старение происходит медленнее, чем в любой другой системе отсчета с относительным движением.

Тогда, почему путешественник не имеет права утверждать, что он оставался в покое, а перемещалась Земля? Путешественник безусловно перемещается относительно системы отсчета Земли и поэтому его часы безусловно идут медленнее и он стареет медленнее по оценке любого человека из системы отсчета Земли. Однако если путешественник делает ту же самую оценку, результат будет зависеть от того, какие часы он считает лучшим хранителем времени - то ли его обычные часы, то ли его часы GPS. Если он берет показания часов GPS как представляющих земное время, его выводы будут всегда согласны с выводами наблюдателей из земной системы отсчета. Если он вместо этого использует результаты обмена световыми сигналами, чтобы делать выводы о течении времени в отдаленных местах, он придет к заключению, что близнец-домосед стареет меньше чем он сам из-за их относительного движения. Но в случае воздействия любого ускорения на его космический корабль, путешественник придет к заключению о скачке [discontinuity] в возрасте близнеца-домоседа, который может быть или вперед или назад во времени, в зависимости от того, в каком направлении путешественник ускоряется. В конце любого полета туда и обратно после любого числа таких ускорений, близнец-путешественник и близнец-домосед всегда придут к соглашению относительно того, чей возраст должен оказаться большим [twins will always agree about who should have aged more].

7. Подтверждает ли поведение часов GPS эйнштейновскую СТО?

Чтобы отвечать на это, мы должны делать различие между эйнштейновской СТО и лоренцевской теорией относительностью (ЛТО). И Лоренц в 1904, и Эйнштейн в 1905 выбрали за основу принцип относительности, обсуждавшийся Пуанкаре в 1899, который явно зародился несколькими годами ранее в 19-м столетии. Лоренц также популяризировал известные преобразования, которые носят его имя, позже использованные Эйнштейном. Однако теория относительности Лоренца предполагала существование эфира (привилегированной системы отсчета) и универсального времени. Эйнштейн отказался от потребности в них. Но важно понять, что ни один из 11 независимых экспериментов не подтвердил справедливость СТО экспериментально больше чем ЛТО - по крайней мере не в пользу Эйнштейна.

Таблица 1. Независимые эксперименты по специальной теории относительности

| Эксперимент | Описание | Год |
|------------------|---|------|
| Бредли | Открытие абберации света | 1728 |
| Френель | Свет увлекается локальной среды | 1817 |
| Эйри | Абберация не зависит от локальной среды | 1871 |
| Майкельсон-Морли | Скорость света, не зависит от орбитального движения Земли | 1881 |
| Де Ситтер | Скорость света не зависит от скорости источника | 1913 |
| Саньяк | Скорость света зависит от угловой скорости вращения | 1913 |
| Кеннеди-Торндайк | Движение влияет на измеренное время | 1932 |
| Айвс-Стилвелл | Ионы излучают на частотах, зависящих от их движения | 1941 |
| Фриш-Смит | Радиоактивный распад мезонов замедляется при их движении | 1963 |
| Хафеле-Китинг | Ход атомных часов зависит от вращения Земли | 1972 |
| Система GPS | Часы во всех системах отсчета непрерывно синхронизируются | 1997 |

Некоторые из экспериментов по различным аспектам СТО (см. Таблицу 1) дали результаты, совместимые и с СТО, и с ЛТО. Но опыт Саньяка в 1913, опыт Майкельсона вслед за подтверждением Майкельсоном-Гэйлом эффекта Саньяка для вращающейся Земли в 1925 (не независимый эксперимент, поэтому он и не внесен в список Таблицы 1), и опыт Айвса в 1941, все они объявляли в то время, когда они опубликовали их результаты, что их эксперименты противоречили эйнштейновской СТО, потому что они подразумевали привилегированную систему отсчета. Судя задним числом, это может быть объяснено тем, что большинство экспериментов содержит некоторый аспект, который делает их интерпретацию более простой в привилегированной системе отсчета, совместимой с ЛТО. В современных обсуждениях ЛТО, привилегированная система отсчета не универсальна, а скорее совпадает с локальным полем тяготения. Все же, нельзя сказать, что ни один из этих экспериментов невозможно объяснить с позиций СТО.

Например, Френель показал, что свет частично увлекается локальной средой, что предполагает некоторую зависимость от системы отсчета. Эйри нашел, что абберация не изменялась для заполненного водой телескопа, и поэтому она не возникала в трубе телескопа. Этот факт предполагает, что она должна возникать где-то в другом месте. В эксперименте Майкельсона-Морли ожидалось, что скорость Земли окажет влияние на скорость света, потому что она оказывала влияние на абберацию. Но этого не произошло. Если бы эти экспериментаторы поняли, что эфир не был единой сущностью, но изменялся локальным полем тяготения, то они не были бы удивлены. Их пониманию могло бы помочь осознание того, что Луна, находящаяся в поле тяготения Земли, не испытывает абберацию так, как это делают отдаленные звезды, а только в намного меньшей степени, только благодаря ее маленькой скорости в поле тяготения Земли.

Другой ключ к разгадке пришел в 1913 к Де Ситтеру, сотрудничавшему с Фиппсом [3], оба из которых напомнили нам, что компоненты двойных звезд с высокими относительными скоростями тем не менее имеют одинаковую звездную аберрацию. Это означало, что относительная скорость между источником света и наблюдателем не влияет на звездную аберрацию. Наоборот, относительная скорость между местным и удаленным полями гравитации определяла аберрацию. В том же самом году Саньяк показал ненулевые результаты для эксперимента Майкельсона-Морли, выполненного на вращающейся платформе. В самой простой интерпретации, это демонстрировало, что скорости относительно местного поля гравитации прибавляются или вычитаются из скорости света в эксперименте, так как интерференционные полосы перемещаются. Эксперимент Майкельсона-Гейла в 1925 году подтвердил, что результат Саньяка справедлив и для случая, когда вращающейся платформой является вся земная поверхность.

Когда Айвс и Стилуэлл показали в 1941, что частоты, испускаемые ионами, зависели от их движения, Айвс думал, что он разрешил раз и навсегда вопрос и что только относительная скорость имела значение. В конце концов, ионы испускали на специфической частоте независимо от того, из какой системы отсчета они наблюдались. Его не разубедили и аргументы показать, что СТО могла бы объяснять это явление также, потому что казалось ясным, что природа все еще нуждается в привилегированной системе отсчета, движение относительно которой определяет ионные частоты. Иначе, как ионы знали бы на какой частоте излучать? Ответы на дилемму Айвса существуют, но они не достаточно просты.

Ричард Китинг был удивлен в 1972, что двое атомных часов, перемещающиеся в противоположных направлениях вокруг Земли, после сравнения с третьими часами, которые оставались на месте, показали замедление, зависящее скорее от их абсолютной скорости через пространство – от векторной суммы скорости вращения Земли и скорости самолета, – чем от относительных скоростей часов. Но он быстро понял, что астрономы всегда используют систему отсчета Земли для локальных явлений, и систему отсчета с началом в центре Солнца для явлений на других планетных системах, и получил результаты, которые согласовывались с предсказаниями теории относительности. Будучи не знакомым с ЛТО, он не подвергал сомнению интерпретацию на каком-либо более глубоком уровне.

Таблица 2. Независимые эксперименты по специальной теории относительности

| Эксперимент | Тип | Замечание о взаимодействии |
|------------------|--|---|
| Бредли | Аберрация | Луна исключение |
| Френель | Увлечение Френеля | Существование эфира |
| Эйри | Существование эфира | Вода в телескопе игнорируется |
| Майкельсон-Морли | Никакого универсального эфира | “Увлекаемый” эфир? |
| Де Ситтер | Скорость света не зависит от источника | Аберрация от двойных звезд |
| Саньяк | Скорость света зависит от вращения | Локальное поле гравитации, не вращающееся |

| | | |
|------------------|-----------------------------|--|
| Кеннеди-Торндайк | Часы замедляются | Движение относительно локального поля гравитации |
| Айвс-Стилуелл | Ионы замедляются | То же |
| Фриш-Смит | Мезоны живут дольше | То же |
| Хафеле-Китинг | Часы зависят от вращения | Привилегированная система отсчета показана |
| Система GPS | Универсальная синхронизация | Привилегированная система = локальная гравитация |

В таблице 2 суммируется то, что различные эксперименты должны сказать относительно привилегированной системы отсчета. Эти эксперименты подтверждают первоначально сформулированный в терминах существования эфира принцип относительности с высокой точностью. Однако вопрос о необходимости в привилегированной системе отсчета в природе, по правде говоря, еще не улажен. Конечно, эксперты еще не договорились о его разрешении. Но те, кто сравнивал ЛТО и СТО с экспериментами, больше всего, кажется, убеждены, что ЛТО более легко объясняет поведение природы.

8. Как "парадокс близнецов" разрешается в ЛТО и СТО?

В ЛТО, ответ прост: сначала земная система отсчета, а затем и доминирующее локальное поле гравитации вообще, составляет привилегированную систему отсчета. Так что быстро движущийся путешественник всегда возвращается более молодым, и не имеется никакой истинной равноправности точек зрения для него и для других систем отсчета.

В СТО ответ не такой простой; но все же объяснение существует. Равноправность систем отсчета, требуемая СТО, когда Эйнштейн принял, что все инерциальные системы отсчета эквивалентны, вводит второй фактор влияния на "время" в природе, который не отражается только в одной лишь скорости хода часов. Мы могли бы назвать этот фактор "скачком времени" [time slippage] и мы можем обсудить его сейчас. Скачок времени представляет собой разность во времени для любого отдаленного события с точки зрения наблюдателей (даже мгновенно совпадающих) в различных инерциальных системах отсчета.

Например, мы можем утверждать, что, если здесь и сейчас мы имеем дату 9/1998, то "сейчас" на Альфа Центавра та же дата - 9/1998. Но наблюдатель, находящийся здесь и сейчас, но движущийся с достаточно высокой относительной скоростью (скажем, равной 99% от скорости света; $\gamma = 7$) может считать, что "сейчас" на Альфа Центавра другая дата - 9/1994 (подразумевая, что он только один месяц назад по земному времени вылетел оттуда, и тогда там была дата 8/1994). Или он мог бы считать, что "сейчас" на Альфа Центавра другая дата - 9/2002 (подразумевая, что он прилетит туда через один месяц земного времени, и обнаружит, что там будет дата 10/2002). Эти различия в мнениях, относительно того, какое сейчас время в удаленных точках, есть иллюстрации эффектов "скачков" времени, которые возникают, кажется, только в эйнштейновской СТО, чтобы сохранить независимость их предсказаний от систем отсчета.

Итак, если путешественник пролетает мимо Земли в момент времени 8/1994 на скорости $0,99c$, эффект "скачка" времени начинает расти. Семью месяцами позже по его обычным часам путешественник достигает Альфа Центавра. Его собственные часы GPS показывают четыре года прошедшего времени, и действительно

жители Альфа Центавра, которые думают, что они синхронизированы во времени с Землей, соглашаются, что дата прибытия близнеца 9/1998. Но близнец-путешественник убежден эйнштейновской СТО, что только один месяц земного времени прошел с того момента, как он пролетел мимо Земли и отметил время как 8/1994. Близнец-путешественник после достижения Альфа Центавра утверждает, что "сейчас" на Земле 9/1994. Жители Альфа Центавра утверждает, что "сейчас" на Земле 9/1998. Разность и есть "скачок" времени, предсказываемый СТО.

Если близнец-путешественник облетает вокруг Альфа Центавра на скорости $0,99c$, то когда он направляется к Земле, его мнение изменяется и он считает, что "сейчас" на Земле дата 9/2002. А когда он снова направляется от Земли, для него на Земле снова та же дата - 9/1994. Земное время "сейчас" согласно СТО изменяется непрерывно из-за этих эффектов скачков времени, необходимых, чтобы сохранить взаимность систем отсчета. Жители Земли - даже те, которые умерли в 1998 – не замечают их повторные проходы в будущее и прошлое перемещающегося близнеца, с их сопутствующими смертями и оживаниями.

Итак, когда близнец-путешественник наконец возвращается на Землю, он действительно обнаружит, что дата его возвращения на Землю - 10/2002, в точности согласно показаниям его GPS часов. Он считает, что это произошло потому, что прошло два месяца времени по земным медленно идущим часам в течение его собственного 14-месячного (по его обычным часам) полета, плюс 8 лет "скачок времени", когда путешественник изменял системы отсчета. Не имеется никакой логической или математической несогласованности в таком разрешении, вот почему СТО остается сегодня жизнеспособной теорией.

Мы, конечно, можем подвергнуть сомнению, сохраняет ли эта математическая теория справедливость принципа причинной связи или нет. Для тех из нас, кто отвечает "да", ЛТО не нужна, и груба, потому что она зависит от привилегированной системы отсчета. Для тех из нас, кто отвечает "нет", ЛТО является лучшим описанием природы, требующим принести в жертву симметрию ("ковариантность"), чтобы сохранить причинную связь.

9. Какие физические следствия возникают из-за различий между ЛТО и СТО?

В СТО скорость вызывает изменения в самих времени и пространстве, а не только в часах и линейках. Масса покоя остается неизменной, но сопротивление увеличению ускорения растет до бесконечности по мере того как скорость приближается к скорости света. Не имеется никакого абсолютного времени или пространства во вселенной. Время в удаленных точках зависит от того, в какой из систем отсчета находится наблюдатель. Все системы отсчета эквивалентны.

В ЛТО скорость относительно привилегированной системы отсчета (локального поля тяготения) заставляет часы замедляться, а линейки укорачиваться. Силы электромагнитного характера становятся все менее и менее эффективными с увеличением скорости движения относительно привилегированной системы отсчета, и приближаются к нулю, когда скорость приближается к скорости света. Имеются естественные, физические причины, почему это должно быть так [2]. Система отсчета локального поля тяготения действует как привилегированная система отсчета. Универсальное время и одновременность удаленных событий существуют.

Единственное наиболее важное различие – это то, что, в СТО ничто не может распространяться быстрее, чем скорость света в прямом направлении времени. В ЛТО силы электромагнитного характера и часы прекратили бы работать при скоростях, равных скорости света или выше. Но никакой проблемы в принципе не существует для достижения любой скорости в прямом направлении времени, используя силы типа сил тяготения, которые сохраняют свою эффективность и при высоких скоростях.

Литература

- [1] Alley, C.O. and Van Flandern, T. (1998). "Absolute GPS to Better Than One Meter", препринт, еще не представленный для публикации.
- [2] Van Flandern, T. (1993). Dark Matter, Missing Planets and New Comets, North Atlantic Books, Berkeley, CA.
- [3] Phipps, T. (1989). "Relativity and Aberration", Amer. J. Phys. 57, 549-551.