

# Эйнштейновский принцип эквивалентности (EEP<sup>1</sup>) [1]

В.А. Касимов, [quadrica-m@mail.ru](mailto:quadrica-m@mail.ru)



Принцип эквивалентности сыграл исторически важную роль в развитии теории гравитации. Ньютон считал его краеугольным камнем механики, что и отметил как Первый принцип в знаменитых *Математических началах натуральной философии*. В 1907 году Эйнштейн использовал

этот принцип как основной элемент в разработке общей теории относительности. Сейчас принцип эквивалентности рассматривается как основа не только для ньютоновской гравитации или релятивистской теории гравитации (РТГ), но и как общая идея при построении теорий в искривленном пространстве-времени. Существенную определённую в эту идею внёс Роберт Дикке в период между 1960 и 1965 гг. Он же использовал этот принцип и для обоснования теории гравитации. Всё это было обобщено и изложено в лекциях, прочитанных в Summer School of Theoretical Physics в Les Houches в 1963 году и получило название эйнштейновского принципа эквивалентности (EEP).

Современная формулировка **EEP** является более мощной и далеко идущей концепцией. Она утверждает:

1. Слабый принцип эквивалентности (WEP<sup>2</sup>);
2. Принцип локальной лоренц-инвариантности (LLI<sup>3</sup>);
3. Принцип локальной позиционной инвариантности (LPI<sup>4</sup>).

Что же утверждают эти принципы?

---

<sup>1</sup>) EEP - Einstein's Equivalence Principle

<sup>2</sup>) WEP - Weak Equivalence Principle

<sup>3</sup>) LLI - Local Lorentz Invariance

<sup>4</sup>) LPI - Local Position Invariance

2.

Самой первой формулировкой *EEP* можно считать ньютоново утверждение о пропорциональности инертной и гравитационной масс, что стало называться слабым принципом эквивалентности (*WEP*). Другой формулировкой этого принципа является утверждение о независимости траектории свободного полёта тела (не подверженного воздействиям таких сил, как электромагнитные или приливные гравитационные силы<sup>5)</sup> от его внутренней структуры и состава. В простейшем случае падения двух различных тел в гравитационном поле *WEP* утверждает, что падение тел будет происходить с одинаковыми ускорениями (этот факт часто называют универсальным законом свободного падения).

Принцип локальной лоренц-инвариантности (*LLI*) утверждает, что результаты любого локального негравитационного эксперимента<sup>6)</sup> не зависят от скорости свободно движущейся системы отсчёта, в которой этот эксперимент выполняется.

Принцип локальной позиционной инвариантности утверждает, что процесс и результаты любого локального негравитационного эксперимента не зависят от того, где и когда во вселенной этот эксперимент выполняется.

Триединый эйнштейновский принцип эквивалентности (*EEP*) является сутью теории гравитации в том смысле, что если этот принцип справедлив, то гравитация должна рассматриваться, как единственная причина искривления пространства-времени или, другими словами, проявление гравитации должно быть полностью эквивалентно эффекту существования физических тел в искривлённом пространстве-времени. Как следствие этого, можно сказать, что только те теории гравитации, которые смогут полностью воплотить в себе принцип *EEP*, будут удовлетворять постулатам *метрической теории гравитации*:

---

<sup>5)</sup> Возникают в движущихся телах конечных размеров при наличии градиента поля.

<sup>6)</sup> Например, измерение электрической силы взаимодействия между двумя заряженными телами является негравитационным экспериментом; измерение же гравитационной силы между двумя телами (типа опыта Кавендиша) таковым не является.

1. Пространственно-временные отношения описываются симметричной метрикой ( $g_{ik}$ );
2. Траектория свободного движения тела является геодезической в этой метрике;
3. В локальной свободно движущейся системе отсчёта негравитационные законы физики описываются на языке специальной теории относительности.

Как следствие *EEP* можно сказать, что в локальной свободно движущейся системе отсчёта результаты экспериментов не должны зависеть от её скорости движения (*принцип локальной лоренц-инвариантности*), значения различных атомных констант не должны меняться (*принцип локальной позиционной инвариантности*). Примером полного воплощения этих принципов являются уравнения Максвелла, которые полностью совместимы с СТО. Кроме того, в локальной свободно движущейся системе отсчёта тела двигаются не ускоренно, или другими словами, по прямым линиям; но эти “локально прямые линии” просто соответствуют геодезическим в искривлённом пространстве.

РТГ является метрической теорией гравитации. Однако существуют и другие, например, теория Бранса-Дике и её обобщения. Теории, в которых негравитационные константы непосредственно связываются с динамическими полями взаимодействующими с материей, не являются метрическими теориями. В этом смысле теория суперструн, базирующаяся на фундаменте пространственно-временной метрики и включающая дополнительные поля (дилатоны, модули), которые могут образовывать материализующиеся перекрёстные энергетические пары, может вести к нарушению *WEP*.

Важно отметить, однако, что существует некоторая неопределённость при трактовке отрицательных результатов *EEP*-экспериментов – рассматривать ли такие результаты, как нарушение принципа эквивалентности или как проявление дополнительной материи, подобно случаям электромагнетизма или слабых взаимодействий. Так или иначе, но понятие искривлённого пространства – это общее и фундаментальное понятие. Поэтому очень важно тщательно проверить различные аспекты эйнштейновского принципа эквивалентности. Далее мы рассмотрим эксперименты и

4.

результаты, опишем некоторые теоретические аспекты формализма, которые были разработаны для этого. Обзор по теоретическим и экспериментальным интерпретациям *EEP* см. в ( 2 ) .

## **Проверка слабого принципа эквивалентности (WEP)**

Прямая проверка *WEP* заключается в сравнении ускорений тел *различного* состава в лабораторной системе отсчёта под воздействием внешнего гравитационного поля. При нарушении принципа должны быть зафиксированы различные ускорения.

Самый простой способ определить возможные нарушения *WEP* в форме, пригодной для сравнения с экспериментом – это предположить, что для пробного тела инертная  $m_I$  и гравитационная  $m_P$  массы отличаются так, что в гравитационном поле ускорение свободного падения  $a$  будет определяться соотношением:  $a = (m_P/m_I)g$ .

Инерционная масса любого физического тела включает в себя различные типы масс-энергий: массу покоя, электромагнитной энергии, энергии слабого взаимодействия и другие. Если одна из форм энергии, дающая вклад в  $m_P$  будет отличаться от соответствующего вклада в  $m_I$ , то будет зафиксирован факт нарушения *WEP*. Можно записать

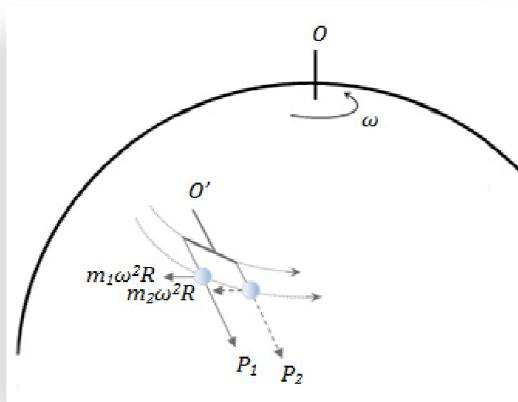
$$m_P = m_I + \sum_A \frac{\eta^A E^A}{c^2} \quad (2.6.1)$$

где  $E^A$  – внутренняя энергия тела, генерируемая взаимодействием  $A$ ,  $\eta^A$  – безразмерный параметр, показывающий нарушение принципа *WEP* этого взаимодействия при измерении – так называемое отношение Этвеша (Eötvös) для взаимодействия  $A$ ,  $c$  – скорость света. Усреднённое по всем взаимодействиям отношение Этвеша можно представить в виде:

$$\eta \equiv \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} = 2 \frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|} \cong \frac{a_1 - a_2}{g} = \sum_A \eta^A \left( \frac{E_1^A}{m_1 c^2} - \frac{E_2^A}{m_2 c^2} \right) \quad (2.6.2)$$

Здесь индекс  $I$  для инерционной массы опущен. Таким образом, экспериментальная величина  $\eta$  устанавливает предел возможного нарушения *WEP* факторами  $\eta^A$ .

К настоящему времени уже выполнено много высокоточных экспериментов этвешевского типа (Этвеш Л.) — от маятниковых экспериментов Ньютона, Бесселя и Поттера до классических с крутильными весами (Этвеш Р, Дикке, Брагинский).



**Рис 1. Принципиальная схема эксперимента Этвеша**<sup>3)</sup>

*В эксперименте наблюдалось действие силы тяжести на крутильные весы, к коромыслу которых были прикреплены два грузика, подвергавшиеся одновременному действию двух сил: силы притяжения Земли и центробежной силы, создаваемой вращением Земли. Если бы две массы различного состава по-разному реагировали на эти две силы, то они вызвали бы некоторый поворот коромысла. Наблюдая равновесие весов в различных азимутах, Этвеш убедился, что никакого существенного поворота коромысла не происходит.*

В современных экспериментах с крутильными весами два тела различного состава связываются коромыслом, которое подвешивается вертикально. Схематично такое устройство

<sup>7)</sup> Рис. 1, 2, 3, 4, табл. 1 и описания к ним воспроизведены из (2) с согласия автора — как демонстрации научных результатов. На рисунках представлены экспериментальные данные по проверке *EEP*, полученные в разное время, разными авторами. Результаты экспериментов приведены к единому формату. Значения представляют верхний предел возможного нарушения (ВПВН) соответствующего принципа. Выше этих значений нарушений не обнаружено, что составляет положительное и твёрдо установленное содержание полученных экспериментальных данных.

6.

изображено на рис.1 На первое тело действует пара сил: вес  $P_1$  и центробежная сила  $m_1\omega^2R$ . Аналогичная пара сил действует и на второе тело:  $P_2$  и  $m_2\omega^2R$ . Здесь:  $O$  – ось вращения Земли,  $R$  – расстояние тела до оси вращения Земли,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли. Если гравитационные ускорения тел отличаются, то  $P_1$  и  $P_2$  также будут различными. Вследствие этого, при их векторном сложении с центробежными силами возникнет крутящий момент, передающийся оси  $O'$ . Изменение угла поворота системы вокруг оси  $O'$  фиксируется с помощью оптических приборов.

Эксперименты подобного типа впервые были проведены Л. Этвешем: первая серия экспериментов – в 1889 г., вторая – в 1908 г. Эти эксперименты с большой точностью показали, что ускорение силы тяжести постоянно.

В экспериментах Дикке и Брагинского в качестве источника гравитационного потенциала использовалось гравитационное поле Солнца. Вследствие вращения Земли вокруг своей оси возмущение на крутильные весы подвергалось модуляции с периодом равным 24 часа.

Начиная со второй половины 1980-х годов, были проведены многочисленные эксперименты по поиску “пятой силы”<sup>8)</sup>. Но и здесь были получены нулевые результаты, касающиеся проверки *WEP*.

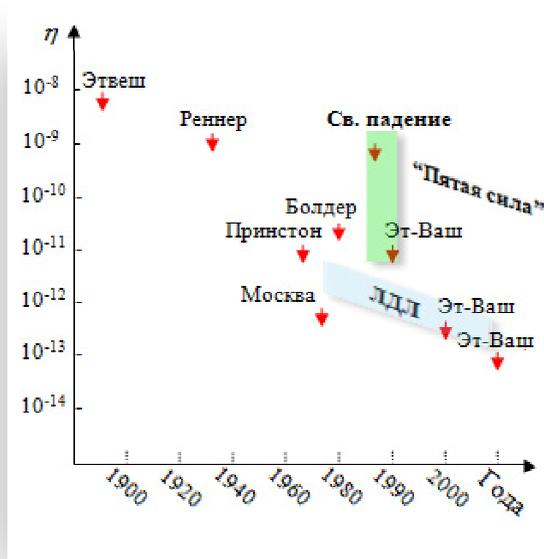
В эксперименте свободного падения (галилеевского типа), поведённом в Университете Колорадо, сравнение ускорений двух тел из урана и меди производилось с помощью техники лазерной интерферометрии.

Группа Эт-Ваш (Eöt-Wash) Университета в Вашингтоне использовала сложные торсионные подвески для сравнения ускорений различных материалов в подвижной лаборатории с максимально возможным учётом влияния гравитационных полей Земли, Солнца, Галактики и достигла уровня точности  $3 \times 10^{-13}$ .

---

<sup>8)</sup> Силы, вклад энергии которой не влияет на гравитацию, то есть сила, которая влияет на геометрию, минуя гравитацию.

Результаты измерений верхних пределов отношения Этвеша в разных экспериментах представлены на рис. 2.



**Рис 2. Экспериментальная проверка слабого принципа эквивалентности**

*Представлены эксперименты по проверке слабого принципа эквивалентности, показывающие границы значений  $\eta$  для тел из разных материалов. Много экспериментов со свободным падением и эксперименты группы Эт-Ваш впервые выполнялись для поиска "Пятой силы" (отмечено зелёным цветом). Голубое поле представляет эксперименты по лазерной дальнометрии Луны (ЛДЛ).*

Независимость ускорения различных тел, падающих в гравитационном поле Земли от их состава может быть проверена на много порядков точнее в космических лабораториях. По сравнению с наземными лабораториями эксперименты в космосе могут быть освобождены от многих помех в гораздо большей степени, чем это достижимо в земных условиях: сейсмических, термальных и многих других источников негравитационных шумов. Существует множество проектов для экспериментов, которые предлагается провести для

8.

проверки *WEP* в космосе. Эти проекты представляют возможности увеличить точность показателя  $\eta$  от  $10^{-14}$  до  $10^{-18}$ . Представим самые показательные проекты, не вдаваясь в технические детали <sup>9)</sup>.

*МикроМасштаб (MicroScope)* представляет собой космический эксперимент при комнатной температуре, использующий электростатические дифференциальные акселерометры. Проект находится на стадии развития при поддержке Французского космического агентства (CNES) с запуском, запланированным на 2010 год. Конечная цель состоит в измерении разности ускорений с точностью до  $10^{-15}$ .

*Проверка принципа эквивалентности (POEM – Principle of Equivalence Measurement)* представляет собой тест *WEP* в земных условиях и находится в стадии разработки. С помощью этого теста можно зафиксировать границу ВПВН для *WEP* на уровне  $5 \cdot 10^{-14}$  в коротком (несколько дней) варианте и на порядок выше при более продолжительном эксперименте. Эксперимент основан на оптических измерениях расстояний с помощью лазерной метрологии по частоте. Вслед за этим проектом был предложен эксперимент *SR-POEM*, основанный на предыдущем проекте – проверка *WEP* во время суборбитального полёта на ракетном зонде (*SR – Sounding Rocket*). Ожидается, что это улучшит точность измерений до  $10^{-16}$ ; в настоящее время исследуются возможности выхода и на более высокий уровень точности. Кроме того, сейчас разрабатывается проект космического эксперимента *Космическая проверка универсальности свободного падения (STUFF – Space Test of Universality of Free Fall)*; данный проект также опирается на оптическую метрологию. Предполагается, что *STUFF* позволит достигнуть точности на уровне  $10^{-17}$ .

*Проверка принципа эквивалентности с помощью квантового интерферометра (QuITE – Quantum Interferometer Test of the Equivalence Principle)* предполагает метод проверки *WEP*, основанный на холодных атомах. *QuITE* предполагает измерить абсолютное разностное ускорение с точностью  $10^{-16}$  вдоль одной оси, используя для этого два близко расположенных атомных интерферометра, работающих на атомах двух разных типов. *QuITE* позволит улучшить

---

<sup>9)</sup> По состоянию на 2010 год

текущие пределы точности, установленные в наземных экспериментах, на семь–девять порядков. Кроме того, проект I.C.E., создаваемый во Франции при поддержке CNES, направлен на разработку высокоточного акселерометра, основанного на когерентных атомных источниках, расположенных в космосе. Точная проверка *WEP* является одной из главных целей проекта I.C.E.

*Галилео Галилей (GG – Galileo Galilei)* – итальянский космический эксперимент, цель которого состоит в проверке *WEP* при комнатных температурах с точностью  $10^{-17}$ .

*Спутниковая проверка принципа эквивалентности (STEP – Satellite Test of Equivalence Principle)* – эксперимент по проверке *WEP*, который предполагается провести на свободно падающей платформе в космосе, которая представляет бесшумный КА (с минимальным лобовым сопротивлением), вращающийся вокруг Земли. STEP позволит проверить независимость гравитационного ускорения от композиции пробных масс, контролируемых при низких температурах, путём поиска нарушений *WEP* с точностью до  $10^{-18}$ . *Этот амбициозный эксперимент позволит проверить существование каких-либо новых неметрических дальнедействующих физических взаимодействий.*

### **Проверка принципа локальной лоренц-инвариантности (LLI)**

Хотя специальная теория относительности “ничего и не получила” от таких решающих экспериментов как смещение перигелия Меркурия, отклонение света, сыгравших существенную роль в признании и самой общей теории относительности и её автора Эйнштейна – постоянное накопление экспериментальных данных, успешное объединение СТО и квантовой механики привели к принятию ее в конце 1920-х годов в качестве физического стандарта. Стандарт же экспериментального базиса СТО на сегодняшний день составляет:

- классический эксперимент Майкельсона-Морли и их последователей;
- эксперименты Айвса–Стилвелла, Росси–Холла и других по дилатации интервалов времени;

10.

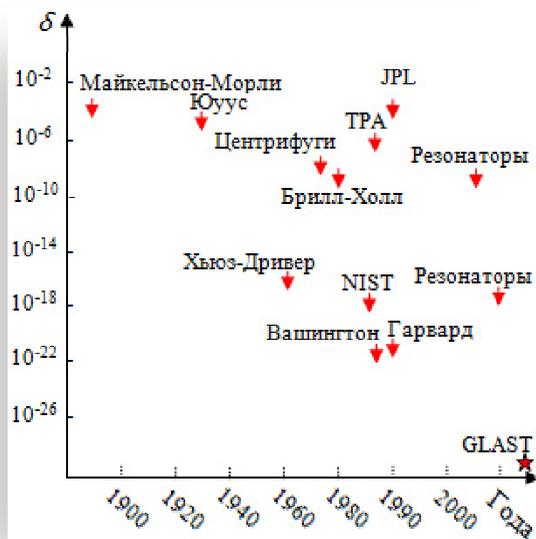
- проверки независимости скорости распространения света от состояния источника света по наблюдениям за рентгеновским излучением от двойных звёзд и за пионами с высокой энергией;
- тесты на изотропию скорости распространения света.

Помимо этих прямых экспериментов в квантовой механике появилось уравнение Дирака с предсказанием античастиц и спина, после чего последовала чрезвычайно успешная релятивистская теория квантовой электродинамики.

В 2005 году, в год 100-летнего юбилея специальной теории относительности, закономерно возник вопрос: *А где пределы применимости СТО?* Ведь специальная теория относительности так глубоко интегрировалась в ткань современной физики, что её справедливость могли оспорить лишь чудачки, да сумасшедшие. Ирония судьбы в том, что именно в течение последних лет в международном масштабе стали предприниматься энергичные усилия теоретического и экспериментального характера для поиска возможных нарушений специальной теории относительности. Мотивацией этих усилий было не стремление отказаться от эйнштейновского наследия, но составляло поиски “новой физики” в рамках тех теорий, в которых возможно перестают работать макропредставления пространственно-временных отношений и где поэтому возможны нарушения лоренц-инвариантности, в частности, в некоторых моделях квантовой гравитации.

При квантовании гравитации возникает характерный масштаб равный  $L_{Pl} = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1.6 \times 10^{-33}$  см., который называется *планковской длиной*. Поскольку длина не обладает свойством инвариантности при преобразованиях Лоренца, можно ожидать и нарушения принципа лоренц-инвариантности в будущих теориях квантовой гравитации. В сценариях мира с *бранами*, хотя физика локально и остаётся лоренц-инвариантной, но в пространстве с большей размерностью при рассмотрении взаимодействий, связанных с переходами из этого пространства в четырёхмерную брану, можно ждать эффектов нарушения принципа лоренцевской инвариантности. В таких моделях как теория струн, дополнительные скалярные, векторные и тензорные поля в больших масштабах, которые

объединяются в рамках стандартной модели, также могут проявиться возможные нарушения симметрии Лоренца. Эти и другие идеи и побудили предпринять новым усилия к серьёзным проверкам лоренц-инвариантности с большей точностью и в связи с появлением новых теорий.



**Рис 3. Экспериментальная проверка локальной лоренц-инвариантности**

Представленные тесты принципа локальной лоренц-инвариантности показывают границы параметра  $\delta$ , который показывает степень нарушения принципа в электромагнетизме. Тесты Майкельсона-Морли, Брилли-Холла и резонаторы демонстрируют эксперименты по проверке изотропии распространения света в режиме “туда и обратно”. Центрифуга, ТРА (двухфотонное поглощение), JPL представляют эксперименты по проверке изотропии распространения света в режиме однонаправленного распространения света. Наиболее точные эксперименты проверяют изотропию атомных энергетических уровней. Предполагается, что скорость Земли равна 370 км/сек. относительно покоящейся системы отсчёта во Вселенной.

LLI – основополагающий принцип теории относительности, постулирующий, что результат локального эксперимента не зависит ни от скорости и ни от ориентации экспериментального

12.

оборудования. Для того, чтобы обнаружить нарушение этого принципа, необходимо построить альтернативную теорию в целях интерпретации экспериментов. Простой и удобный способ интерпретации некоторых современных экспериментов предоставляет  $c^2$ -формализм. Суть его в следующем.

В  $c^2$ -формализме предполагается, что есть выделенная, универсальная покоящаяся система отсчёта, в которой скорость света  $c_0$  изотропна (по определению,  $c_0 = 1$  в системе единиц измерения РСИ). Эту выделенную систему отсчёта обычно связывают с реликтовым фоновым излучением. Сквозь среду этой универсальной системы мы движемся со скоростью около 370 км/сек.

Предположим, что в электромагнитных взаимодействиях может незначительно нарушаться лоренц-инвариантность, что заключается в изменении скорости распространения электромагнитного излучения  $c$  относительно предельной скорости пробных частиц среды, другими словами,  $c \neq 1$ . Такое лоренц-неинвариантное электромагнитное взаимодействие должно стать причиной сдвигов энергетических уровней атомов и ядер в зависимости от ориентации квантовых осей и квантовых чисел состояния относительно вектора универсальной скорости. Наличие таких энергетических сдвигов при сравнении энергий двух частиц может свидетельствовать о нарушении лоренц-инвариантности. Одним из способов обнаружения сдвигов энергетических уровней состояний, которые в обычных условиях вырождены, является наблюдение зеемановского расщепления основного состояния на  $2J + 1$  подуровней ядерного спина в магнитном поле; другой способ – сравнение уровней сложных ядер с уровнями тонкой структуры водородного лазера. Магнитуда временной анизотропии будет пропорциональна величине  $\delta \equiv |c^{-2} - 1|$ .

Ранние эксперименты по анизотропии часов были выполнены в период 1959-60, независимо Хьюзом в Йельском Университете и Драйвером в Университете Глазго, однако мотивация для этих экспериментов была несколько иной. Эксперименты Хьюза – Драйвера дали чрезвычайно точные результаты, ограничивающие значение параметра  $\delta \equiv c^{-2} - 1$ , представленные на рис. 3. Значительно улучшенные результаты были получены в 80-е годы прошлого

*Эйнштейновский принцип эквивалентности*

столетия с помощью охлаждённых лазерных ловушек атомов и ионов. Этот метод позволил снизить ширину резонансных линий столкновений и улучшить оценки  $\delta$ . На рис. 3 эти эксперименты обозначены как NIST, Вашингтон и Гарвард, соответственно.

На рис.3 представлены также результаты экспериментов типа Майкельсона-Морли. В этих экспериментах наблюдалось распространение света по двум плечам движущегося интерферометра, и сравнивались соответствующие скорости распространения. В электродинамике  $c^2$ -формализма может быть показано, что компенсирующее сокращение Лоренца-Фицджеральда параллельного плеча определяется скоростью  $c_0 = 1$ . Поэтому эксперимент Майкельсона-Морли и его последующие варианты позволяют измерить коэффициент  $c^{-2} - 1$ . Одним из таких вариантов является эксперимент Брилл-Холла, в котором использовался лазерный интерферометр Фабри-Перота. В последней серии экспериментов сравнивались частоты электромагнитных резонаторных колебаний в различных ориентациях друг с другом с атомными часами при различных ориентациях лаборатории. Эти эксперименты дали границы для  $c^{-2} - 1$  на уровне лучше, чем в  $10^9$ . Naugan и Lämmerzahl рассмотрели границы для экспериментов типа Майкельсона-Морли для модифицированной электродинамики, включающей “вектор-значение” эффективной фотонной массы.

Ранее  $c^2$ -формализм сосредоточивался исключительно на классической электродинамике. Однако недавно Костельским и его коллегами этот формализм был распространён на стандартную модель физики элементарных частиц. Расширенная стандартная модель (*SME* – Standard Model Extension) содержит в себе большое количество потенциально лоренц-нарушаемых параметров. Это обстоятельство открывает множество новых возможностей для экспериментальных проверок. Уже проведены различные эксперименты с анизотропией часов, связывающие параметры модели *SME*. Например, эксперименты с резонаторами давали ограничения на коэффициенты тензоров  $\tilde{k}_{e-}$  и  $\tilde{k}_{0+}$  на уровне  $10^{-14}$  и  $10^{-10}$ , соответственно. Прямое сопоставление атомных часов различных ядер связывалось по параметрам *SME* в секторах нейтронов и протонов в зависимости от

14.

характера вовлечённых переходов. Были достигнуты границы в районе от  $10^{-27}$  до  $10^{-32}$  ГэВ.

Для проверок возможных нарушений лоренцевской инвариантности используются также и астрофизические наблюдения. Со времён открытия космологических причин вспышек гамма-излучения появился постоянно растущий интерес к использованию этих кратковременных явлений для исследования масштабов энергий квантовой гравитации в диапазоне от  $10^{16}$  до  $10^{19}$  ГэВ – вплоть до планковского масштаба. Этот энергетический диапазон может проявлять себя в измеряемых модификациях дисперсионного соотношения для электромагнитного излучения (в частности, для высокоэнергичных фотонов, испускаемых с космологических расстояний).

Дисперсионное соотношение для фотонов представляется выражением

$$E^2 = p^2 c^2 + E_{Pl} f^{(1)} |p| c + f^{(2)} p^2 c^2 + \frac{f^{(3)}}{E_{Pl}} |p|^3 c^3 + \dots, \quad (1)$$

где  $E_{Pl} = (\hbar c^5/G)^{1/2}$  - планковская энергия. Тогда скорость света  $v_\gamma = \partial E/\partial p$  даётся с точностью до линейных членов  $f^{(n)}$  выражением

$$\frac{v_\gamma}{c} \approx 1 + \sum_{n \geq 1} \frac{(n-1) f_\gamma^{(n)} E^{n-2}}{2 E_{Pl}^{n-2}} \quad (2)$$

Например, лоренцевское нарушение дисперсионного соотношения может быть проявлением эффектов квантовой гравитации.

Оценки времён прихода высокоэнергичных фотонов от источников взрыва на больших расстояниях дали возможность оценить вклады в дисперсию для  $n > 2$ . Так, наблюдения за 1- и 2-ТэВ  $\gamma$ -лучами блазара Markarian 421 дали такую оценку:  $|f^{(3)}| < 128$ . Другая оценка была получена при наблюдении двойного лучепреломления в фотонном распространении. Во многих моделях лоренцевского нарушения, различно поляризованные фотоны могут распространяться с разными скоростями, меняя линейную поляризацию на круговую. Если частота фотона зависит от вращения и имеет место дисперсионное соотношение подобное уравнению (1),

тогда изучая “поляризационную диффузию” света от поляризованного источника в заданной полосе пропускания можно получить эффективную оценку. Она была получена и составила  $|f^{(3)}| < 10^{-4}$ . Другими тестируемыми эффектами нарушения лоренцевской инвариантности могут быть пороговые эффекты взаимодействия частиц, гравитационный эффект Черенкова и нейтринные осцилляции.

Ожидается, что большой космический гамма-телескоп GLAST (the Gamma-ray Large Area Space Telescope) сможет улучшить проверки *LLI* на несколько порядков, что позволит достичь точности на уровне  $\delta \leq 10^{-26}$ . Проект GLAST способен измерить потоки космических  $\gamma$ -лучей в диапазоне от 20 МэВ до более чем 300 ГэВ, позволяя также наблюдать гамма-вспышки от 8 КэВ до 30 МэВ. Успешный запуск этого телескопа (в июле 2008 года) позволит по-новому взглянуть на широкий спектр физических явлений, включая чёрные дыры и активные галактические ядра: оптический и УФ внегалактический фон, гамма-вспышки; происхождение космических лучей и остатков сверхновых; по новому взглянуть на такие гипотетические явления, как аннигиляция суперсимметричной тёмной материи и нарушения лоренц-инвариантности.

Mattingly даст полный и обновленный обзор теоретических основ и экспериментальных результатов для испытаний *LLI*.

## **Проверка принципа локальной позиционной инвариантности (*LPI*)**

Принцип локальной позиционной инвариантности (*LPI*) – третья составляющая принципа *EEP*. Этот принцип может быть проверен в экспериментах, связанных с гравитационным красным смещением, Идея такого эксперимента впервые была предложена Эйнштейном. Несмотря на тот факт, что Эйнштейн рассматривал подобный эксперимент критичным для подтверждения теории релятивистской гравитации, теперь уже ясно, что результаты подобных экспериментов не дают возможности отличить эйнштейновскую теорию гравитации от других метрических теорий. В типичном эксперименте по измерению красного смещения измеряется

16.

частотный или волновой сдвиг  $Z \equiv \Delta\nu/\lambda\nu = -\Delta\lambda/\lambda$  в показаниях двух идентичных частотных часов, размещённых на разных высотах в статическом гравитационном поле.

Если частота данного типа атомных часов не меняется при измерениях в локальной, свободно падающей системе отсчёта (лоренцевская система отсчёта), и не зависит от положения или скорости системы, тогда сравнение частот двух часов в покое в различных положениях сводится к сравнению скоростей двух локальных лоренцевских систем отсчёта, одной – покоящейся относительно одних часов в момент испускания сигнала, другой –

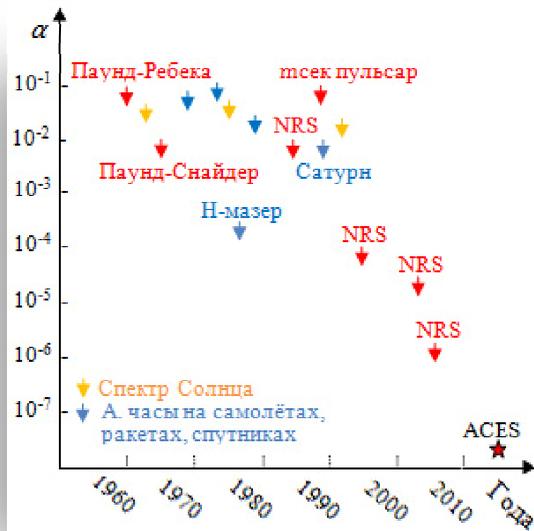


Рис 4. Экспериментальная проверка локальной позиционной инвариантности

Представлены результаты проверок принципа локальной позиционной инвариантности с помощью экспериментов по гравитационному красному смещению, показывающие границы значения параметра  $\alpha$ , описывающего отклонения красного смещения от  $\Delta\nu/\nu = \Delta U/c^2$ . В экспериментах NRS оценки  $\alpha$  указаны с учётом различия между часами разных типов.

покоящейся относительно других часов в момент принятия сигнала. Частотный сдвиг является следствием доплеровского эффекта

первого порядка между системами отсчёта. Природа часов не играет никакой роли. Результат сдвига даётся выражением:

$$Z = \frac{\Delta U}{c^2} \quad (3)$$

где  $\Delta U$  – разность ньютоновых гравитационных потенциалов между точками приёма и испускания сигнала. При нарушении  $LPI$  эту разность можно записать в виде:

$$Z = (1 + \alpha) \frac{\Delta U}{c^2}, \quad (4)$$

где параметр  $\alpha$  оценивается по результатам эксперимента и показывает границу возможного нарушения  $LPI$  при проведении дальнейших уточняющих экспериментов. Параметр  $\alpha$  может зависеть и от природы часов, используемых для измерения частотного сдвига.

Первый успешный высокоточный результат измерения красного смещения был получен в серии экспериментов Пауда-Ребеки-Снайдера в 1960 – 1965 годах. Эксперимент основывался на использовании эффекта Мёссбауэра резонансного поглощения  $\gamma$ -излучения изотопа железа  $^{57}\text{Fe}$  при вертикальном удалении источника излучения от его приёмника на расстоянии 22.5 м, что равнялось высоте башни Физической Лаборатории Джефферсона в Гарвардском Университете. В ходе экспериментов ещё раз было подтверждено влияние гравитации на частоту света при проверке сдвига частоты  $\Delta\nu$  в гравитационном поле, величина которой даётся соотношением, вытекающим из  $WEP$ :

$$\Delta\nu/\nu = gh/c^2 = (2.57 \pm 0.26) \cdot 10^{-15}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота падения. Эксперименты Пауда-Ребеки-Снайдера привели к следующей оценке границы  $\alpha$  возможного нарушения  $LLI$ :  $\alpha \cong 10^{-2}$ .

С 1960 года параллельно с экспериментами Пауда-Ребеки-Снайдера проводились и другие эксперименты: измерялся сдвиг спектральных линий в гравитационном поле Солнца; измерялась разница хода атомных часов, размещаемых на самолётах, ракетах,

18.

спутниках На рис. 4 представлены результаты наиболее важных экспериментов, которые были выполнены с 1960 года.

Почти 50 лет безрезультатных и противоречивых попыток оценки гравитационного красного смещения спектральных линий Солнца завершились, наконец, его надежным измерением. Технические трудности измерения красного смещения линий солнечного спектра в собственном гравитационном поле в первые годы существования теории релятивистской гравитации породили некоторые сомнения в справедливости теории. Однако подобные измерения не являются простыми, поскольку солнечные спектральные линии искажаются, так называемым, краевым эффектом. В наблюдаемом солнечном излучении присутствуют компоненты от конвекционных и турбулентных движений в фото- и хромосферах со своими доплеровскими сдвигами. Сложность проведения измерений заключалась в эффективном разделении этих компонент, поскольку наблюдения “смешивались” с поперечными движениями солнечного лимба. Выход был найден в использовании “сильных” симметричных линий спектра, что позволило достичь определённости в измерениях. Успешные измерения были проведены в 1962 и 1972 годах. В 1991 году LoPresto с коллегами измерили сдвиги солнечных спектральных линий и установили согласие с принципом  $LPI$  с точностью около 2%, наблюдая за триплетом линий в спектрах кислорода, как поглощения, так и испускания.

Первое точное измерение красного смещения было выполнено в суборбитальном эксперименте Вессо-Левина в июне 1976 года. В этом эксперименте сравнивались частоты двух водородных мазеров, один из которых был расположен в ракете на высоте около 10 000 км, другой – на Земле. В эксперименте использовалась частотная стабилизация мазеров при отслеживании частотного сдвига в зависимости от высоты. Разработанная система обработки данных позволила исключить эффекты Доплера первого порядка, обусловленные движением ракеты, сохраняя при этом полезную информацию о локализации и скорости (для оценки разности потенциалов  $\Delta U$  и релятивистского “замедления времени”). Результаты эксперимента установили предел  $|\alpha| < 2 \cdot 10^{-4}$ .

С помощью эксперимента по нулевому красному смещению (NRS), выполненного в 1978 году, были проверены темпы хода двух часов различного типа в зависимости от расположения. Показания двух часов на основе водородных мазеров с использованием устройства сверхпроводящих резонаторов стабилизированных частот (SCSO- superconducting-cavity stabilized oscillator) были сопоставлены спустя 10 дней после начала эксперимента. В течение времени проведения эксперимента гравитационный потенциал Солнца  $U/c^2$  менялся по синусоиде с 24-часовым периодом на величину  $3 \times 10^{-13}$  из-за вращения Земли вокруг своей оси и линейно на  $3 \times 10^{-12}$  день вследствие 90-градусного положения Земли от перигелия в апреле. Анализ данных показал неразличимость показаний в пределах достигнутой точности и дал оценку для параметра  $\alpha$ :  $|\alpha^H - \alpha^{SCSO}| < 2 \cdot 10^{-2}$ . Эта граница была улучшена с использованием более стабильной частоты атомных часов. Из сравнения показаний цезиевых атомных часов и водородного мазера годовая разница составила  $|\alpha^H - \alpha^{CS}| < 2.1 \cdot 10^{-5}$ .

С точностью до 10 процентов по часам, связанным с Землёй относительно стабильных миллисекунд пульсара P00 1937+21, было измерено гравитационное красное смещение, обусловленное движением Земли в гравитационном поле Солнца вокруг центра масс Земля-Луна (амплитуда 4000 км). Два измерения красного смещения с использованием стабильных часов были проведены с однопроцентной точностью: один на космическом аппарате “Вояджер” в гравитационном поле Сатурна, другой на станции “Галилео” в поле Солнца. Результаты представлены на рис.4

Точность экспериментов по гравитационному красному смещению может быть улучшена до уровня  $10^{-10}$  с использованием лазерных охлаждённых атомных часов на борту космического аппарата, путешествующего на расстоянии в пределах четырёх солнечных радиусов.

Современные технологии в области навигации, используя атомные часы на орбите Земли, осуществляя регулярно точную передачу синхронизирующих сигналов, должны принимать в расчет, как эффекты гравитационного красного смещения, так и “замедления координатного времени” Например, глобальная система позицио-

20.

нирования (GPS) обеспечивает точность позиционирования до 15 метров (и даже большую в военных целях) и 50-наносекундные интервалы времен при локализации объектов в любом месте на Земле. Тем не менее, разница величин между спутниковыми и земными часами как результат релятивистских эффектов составляет 39 миллисекунд (+46 мсек. вследствие гравитационного красного смещения и -7 мсек. вследствие “координатного замедления времени”). При отсутствии точного учёта этих эффектов GPS не смогла бы функционировать с заявленной точностью. Этот факт является примером практического применения релятивистской теории гравитации в реальной практике. Роль РТГ в технологиях GPS сегодня не вызывает сомнений.

**Принцип локальной позиционной инвариантности имеет и временной аспект:** если *LPI* справедлив, то фундаментальные постоянные не гравитационной физики должны оставаться постоянными во времени. В табл. 1 представлены установленные в экспериментах текущие границы точности для безразмерных констант. Ссылки и обсуждения по этому вопросу для начала можно увидеть в<sup>[1]</sup> или <sup>[2]</sup>.

Проводимые эксперименты можно сгруппировать по тем типам:

1. Эксперименты, в которых сравниваются показания либо разных атомных часов, либо атомных часов со сверхстабильными осцилляторами;
2. Измерения спектров поглощения и испускания удалённых атомов, например, линий поглощения квазаров с большим красным смещением;
3. Измерения с использованием реликтовых радиоактивных остатков (метеориты, естественные реакторы на Земле).

В тестах на сравнение показаний часов, в которых взаимно сравниваются высокостабильные атомные часы различной физической природы, продолжают обычно в течение периодов от месяца до года (варианты экспериментов NRS). Если частоты часов по-разному зависят от постоянной тонкой структуры  $\alpha_{EM}$ , от электрон-протонного отношения масс  $m_e/m_p$  или гиромагнитного отношения  $g_p$ , например, для протона, то различие частот приведёт к

“дрейфу” границ на значения этой константы. Зависимость частоты от констант может быть довольно сложной, в зависимости от участвующих в эксперименте атомов.

Для достижения экстремальной точности при сравнении частот в самых последних экспериментах использовалась техника атомных фонтанов, лазерного охлаждения и ловушек. Измерялись и сравнивались частоты переходов сверхтонкой структуры рубидия-87, квадрупольных переходов ионов ртути-199, переходы 1S–2S атомов водорода, оптических переходов в иттербии-177, против переходов сверхтонкой структуры цезия-133 наземных часов. Эти эксперименты показали на сегодня для постоянной тонкой структуры:  $\dot{\alpha}_{EM}/\alpha_{EM} < 3 \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1}$ .

Получаемые границы для той или иной константы, как результаты проведённых экспериментов, могут отличаться по двум признакам: первая группа значений границ возникает в экспериментах первого типа, которые связаны с проведением экспериментов в лабораториях и станциях на предмет их сегодняшних значений; вторая группа результатов для границ возникает в экспериментах при проведении измерений, связанных с реликтовыми процессами, произошедшими в далёком прошлом, как результат астрономических измерений спектральных линий красного смещения от далёких источников или как результат измерений ядерных процессов, произошедших на ранних этапах геологической истории Земли.

**Границы точности на изменения основных космологических констант негравитационных физики** Табл. 1

Константа $k$	Ограничение на $\dot{k}/k$ (год <sup>-1</sup> )	Красное смещение	Метод
Постоянная тонкой структуры ( $\alpha_{EM} = e^2/\hbar c$ )	$< 30 \times 10^{-16}$	0	Сравнение часов
	$< 0.5 \times 10^{-16}$	0.15	Естественный реактор в Окло
	$< 3.4 \times 10^{-16}$	0.45	Распад <sup>187</sup> Re в метеоритах
	$(6.4 \pm 1.4) \times 10^{-16}$	0.2 – 3.7	Спектр удалённых квазаров
	$< 1.2 \times 10^{-16}$	0.4 – 2.3	Спектр удалённых квазаров
Постоянная слабого	$< 1 \times 10^{-11}$	0.15	Естественный

взаимодействия ( $\alpha_W = G_f m_p^2 / \hbar^3$ )	$< 5 \times 10^{-12}$	$10^9$	реактор в Окло Ядерный синтез БВ
Отношение масс $m_e/m_p$	$< 3 \times 10^{-15}$	2.6 – 3.0	Спектр удалённых квazarов

Ранние эксперименты по сравнению спектральных линий различных атомных переходов в удалённых галактиках и квазарах дали оценки границ точности  $\alpha_{EM}$ ,  $g_p$ , ( $m_e/m_p$ ), которые составили величину порядка 10 процентов от хаббловского масштаба. Однако значительный прогресс в астрономической и лабораторной спектроскопии, возможность моделирования сложных астрономических сред, где продуцировались линии поглощения и испускания, возможности достичь больших величин красного смещения позволили существенно повысить точность границ. Как факт, в 1999 году Уэбб с соавторами объявил, что измерения линий поглощения Mg, Al, Si, Cr, Fe, Ni и Zn квазаров в области красного смещения  $0.5 < Z < 3.5$  показали малое значение  $\alpha_{EM}$  в ранних эпохах, а именно  $\Delta \alpha_{EM} / \alpha_{EM} = (-0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5}$ , соответствующее  $\dot{\alpha}_{EM} / \alpha_{EM} = (6.4 \pm 1.4) \times 10^{-16} \text{год}^{-1}$  (в предположении линейного дрейфа во времени). Измерения по другим группам пока не подтвердили этот эффект; последний анализ спектра поглощения Mg в квазарах при  $0.4 < Z < 2.3$  дал  $\dot{\alpha}_{EM} / \alpha_{EM} = (-0.6 \pm 0.6) \times 10^{-16} \text{год}^{-1}$ .

Ещё один важный ряд границ точности констант получен из анализа процессов происходивших в естественном ядерном реакторе в Окло (Габон, Африка) около 1.8 миллиарда лет назад. Измерения проб руды показали аномально низкое отношение содержащихся в них двух изотопов Самария –  $^{149}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ . Ни тот, ни другой из изотопов не являются продуктами распада, но  $^{149}\text{Sm}$  мог быть истощён благодаря исходящему потоку нейтронов. Оценки нейтронного потока (суммарной величины) на этапе “работы” естественного реактора с учётом распространённых аномалий, дали значение сечения рассеяния нейтронов для  $^{149}\text{Sm}$ , соответствующее периоду времени около 1.8 миллиардов лет назад, которое согласуется с современными данными. Однако сечение захвата очень чувствительно к энергиям низких уровней ( $E \sim 0.1 \text{ эВ}$ ), так что изменение в энергии этого уровня только на 20МэВ через миллиард лет должно было бы изменить сечение захвата от сегодняшнего значения более, чем на

наблюдаемую величину. Впервые это проанализировал в 1976 году Shlyakter. Последние повторные анализы “Окло”-данных дали границы точности на изменения  $\dot{\alpha}_{EM}$  около  $5 \times 10^{-17}$  год<sup>-1</sup>. Аналогично, последний анализ скорости распада <sup>187</sup>Re в древних остатках метеоритов (возрастом 4.5 миллиардов лет) дали значение  $\dot{\alpha}_{EM}/\alpha_{EM} < 3.4 \times 10^{-16}$  год<sup>-1</sup>.

В 2010 году были опубликованы две работы по результатам экспериментов по точному измерению гравитационного красного смещения интерференцией волн материи и измерению вариации постоянной тонкой структуры.

Одно из главных предсказаний метрических теорий тяготения, таких как, общая теория относительности – предсказание замедления хода часов в гравитационном поле с потенциалом  $U$ . Величина этого замедления должна определяться множителем  $1+U/c^2$ , где  $c$  – скорость света. Замедление же хода часов должно проявиться при сравнении показаний часов, находящихся в гравитационном поле, с часами, находящимися вне зоны действия гравитационного потенциала. Учёт влияния этого эффекта, известного как гравитационное красное смещение, крайне важен при разработках и эксплуатации систем глобального позиционирования, при обслуживании систем эталонного времени, для предстоящих экспериментов со сверхточными часами при их распределённом пространственном базировании в таких экспериментах, как исследование изменений численных значений фундаментальных констант. Гравитационное красное смещение измерялось и ранее с использованием часов на башне, самолете и ракете, достигнув точности  $-7 * 10^{-5}$ . В работе показано, что лабораторные эксперименты, основанные на квантовой интерференции атомов, допускают более точное измерение и достигают точности  $-7 * 10^{-9}$ . Результаты экспериментов согласуются с той точкой зрения, которая утверждает, что гравитация является следствием кривизны пространства-времени, что является основой принципа общей относительности. Это обстоятельство является весьма важным в связи с продолжением исследований в области квантовой теории гравитации. Совершенствование инструментария измерений, основанных на использовании эффекта красного смещения особенно

24.

важно, поскольку этот тест уже проводился, но точность результатов была ниже той, которая требуется для подтверждения теорий искривлённого пространства-времени. В связи с этим необходимо отметить – авторы увеличили точность измерения на четыре порядка.

Дж. Вебб, В. Фламбаум и их коллеги из австралийского университета Нового Южного Уэльса в статье представили результаты измерения постоянной тонкой структуры в ходе анализа излучения квазаров, находящихся в миллиардах световых лет от Земли. Группа Вебба еще в 1998 году начала эксперимент по поиску свидетельств изменчивости постоянной тонкой структуры. Ученые изучали спектры квазаров, излучение от которых путешествует миллиарды лет, в частности, проходя сквозь газовые облака. Изучая спектр поглощения в них, можно выяснить их химический состав, а также вычислить значение постоянной тонкой структуры. Команда Вебба исследовала сотни квазаров на северном небе и пришла к выводу, что миллиарды лет назад постоянная тонкой структуры была примерно на одну стотысячную меньше, чем сегодня. Однако тогда не все физики признали этот результат. Теперь Вебб и его коллеги проанализировали излучение от 153 квазаров на южном небе с помощью телескопа VLT в Европейской южной обсерватории (Чили). Результат оказался противоположным: постоянная тонкой структуры на южном небе 10 миллиардов лет назад была на одну стотысячную больше, чем сегодня. Эта асимметрия между двумя полушариями названа исследователями "австралийским диполем". Последние исследования (март 2020) группы Вебба представлены в работе [3].

*Современная формулировка эйнштейновского принципа эквивалентности в триединой ипостаси является более мощной и далеко идущей концепцией. Сейчас принцип эквивалентности рассматривается как основа не только релятивистской теории гравитации, но и как общая идея при построении теорий в искривленном пространстве-времени. Будем надеяться, что сегодняшние проблемы, например, с энергией (ковариантность "тензора" энергии-импульса), с пространственно-временными отношениями в мегамире ("австралийский диполь") и другие будут решены в рамках ОТО и РТГ.*

Однако, изменения негравитационных констант (например, постоянной тонкой структуры) может свидетельствовать о том, что геометрия пространственно-временных отношений ( $g_{ik}$ ) может определяться не только распределением материи и гравитацией. То есть метрика может изменяться не только материей, но и какими-то другими факторами. В исходных уравнения Эйнштейна-Гильберта эти факторы “выключены”.

## Литература

1. В. А. Касимов. *Теория относительности*. СИБПРИНТ. Новосибирск. 2014  
<https://www.dropbox.com/s/odqtz8sagsfnnlj/TO-01-02-2018.pdf?dl=0>  
<https://cloud.mail.ru/public/9UOm/VgUxtqSY3>  
<https://www.academia.edu/35877014/>  
<http://vixra.org/pdf/1807.0060v1.pdf>
2. Clifford M. Will.  
*The confrontation between General Relativity and Experiment*  
arXiv:1403.7377v1 [gr-qc] 28 Mar 2014.
3. M. R. Wilczynska1, J. K. Webb, M. Bainbridge...  
*Four direct measurements of the fine-structure constant 13 billion years ago*  
arXiv:2003.07627v1 [astro-ph.CO] 17 Mar 2020