



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА ЧАСТОТУ СИГНАЛА РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА

Е.Е. Занимонский, декан Международного славянского университета, г. Харьков

В.Д. Нагорный, консультант корпорации "Метроматикс", г. Нью-Йорк, США

А.В. Омельченко, кандидат технических наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

Е.М. Занимонский, PhD, научный сотрудник Радиоастрономического института НАН Украины, г. Харьков



Е.Е. Занимонский



В.Д. Нагорный



А.В. Омельченко



Е.М. Занимонский

Предложена и реализована методика определения зависимости частоты сигнала рубидиевого стандарта от ускорения силы тяжести. Показано, что эта зависимость для отдельного прибора имеет систематический характер, но существенно отличается для двух исследованных экземпляров.

The method for determining the dependence of signal frequency of rubidium standard to gravity acceleration is proposed and realized. It is shown that this dependence for a single device is of a systematic character but is significantly different for two examined samples.

Введение. Постановка задачи

Прецизионные измерения времени, исследования стабильности частоты атомных стандартов сопровождаются расчетами релятивистских поправок. Учет эффектов специальной теории относительности необходим при сравнении частот стандартов, находящихся в движении, а эффектов общей теории относительности – если стандарты находятся в разных точках гравитационного поля или участвуют в ускоренном движении [1–3]. Вместе с тем, в дискуссиях о теории относительности (см., например, [4, 5]) высказывается мнение о том, что непосредственное силовое воздействие гравитационного поля на частотообразующие элементы стандартов также может влиять на частоту атомного стандарта.

Сила тяжести является проявлением одного из фундаментальных природных взаимодействий и поэтому влияет на все физические тела и системы,

находящиеся в ее поле. Ускорение силы тяжести g изменяется в условиях Земли в достаточно широких пределах от 9,65 до 9,85 м/с² и учитывается при расчете поправок или компонент неопределенности во многих высокоточных измерительных приборах.

Однако в число таких приборов не входят атомные стандарты частоты, показания которых на сегодняшний день считаются свободными от влияния ускорения силы тяжести. Даже при изменении условий измерения с земных на орбитальные, соответствующее уменьшение гравитационного ускорения до нуля не рассматривается как фактор, влияющий на показания прибора [6]. Этот факт тем более примечателен, что исторически измерители и стандарты частоты всегда находились в сильной зависимости от гравитационного ускорения.

Для стандартов частоты или часов на основе механических колебаний влияние напряженности гравитационного поля на частотообразующий элемент вполне очевидно. Частота колебаний маятников в часах Гойгенса, Шора, Федченко напрямую зависит от ускорения свободного падения (УСП). Эта зависимость использовалась при создании гравиметров.

После маятниковых часов на метрологической арене в середине 20 века появились пьезокварцевые, частота резонатора которых зависит от УСП уже во втором порядке малости, при изменении положения кварцевого резонатора относительно гравитационного поля Земли происходит небольшое изменение его частоты [7, 8].

В первом и втором порядках от УСП не зависит частота атомных стандартов. Принципиально

имеет место небольшой сдвиг частоты стандарта при изменении положения светового пучка относительно микроволнового резонатора из-за неоднородности распределения фазы поля в резонаторе. Другой тонкий эффект является результатом изменения скорости активных атомов в ячейке. По оценкам авторов работы [9] эти сдвиги частоты в постоянном гравитационном поле пренебрежимо малы. Еще одним источником сдвига частоты атомного стандарта является влияние ускорения на перестраиваемый кварцевый генератор стандарта. Вклад этого эффекта существенно уменьшается благодаря автоподстройке по атомному реперу, но могут быть некоторые остаточные изменения частоты из-за статической погрешности системы автоподстройки.

Вполне очевидно, что частота излучения атомов сдвигается относительно частоты внешнего резонатора стандарта из-за их свободного падения в ячейке конечных размеров. А вот стандарты с атомными фонтанами, по определению, должны быть чувствительны к ориентации пучка относительно местной вертикали, да и в невесомости, на спутнике, например, они работать не будут вообще.

Хорошее проектирование элементов стандарта, соответствующий выбор ориентации кристалла кварца и резонатора атомного дискриминатора относительно вертикали в штатном положении прибора позволяют минимизировать вариации частоты стандарта, например, в результате его транспортировки с изменением высоты над уровнем моря.

Возрастающие требования к эталонам времени и частоты предъявляют, в частности, гравитационные эксперименты по усовершенствованным старым схемам [10, 11] и по оригинальным [4, 12]. Определить, зависит ли частота атомного стандарта от УСП и оценить количественно параметры этой зависимости можно в ходе специальных испытаний, например, подобных описанным в [9].

Описание метода измерений

Способ проверки влияния УСП на частоту стандарта основывается на использовании векторного характера УСП, в отличие от скалярного характера потенциала, влияние которого на частоту рассматривается обычно [1–5]. По аналогии с кварцевыми резонаторами предположим, что если у стандарта частоты имеется чувствительность к напряженности гравитационного поля, то она может быть представлена в виде скалярного произведения вектора напряженности \vec{g} на вектор чувствительности $\vec{\Gamma}$. Модуль этого вектора как раз и определяет искомую составляющую бюджета погрешностей.

По аналогии с исследованиями кварцевых генераторов предлагается также и для атомных стандартов выполнить испытание, называемое

в англоязычной литературе *2g tip-over test* [9]. Изменяя ориентировку стандарта частоты без перемещения в гравитационном поле, просто поворачивая его на бок и переворачивая “вверх ногами”, можно существенным образом изменить величину упомянутого скалярного произведения.

Когда генератор поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси, скалярное произведение вектора УСП на единичный вертикальный вектор, связанный с прибором при его исходном, штатном, положении изменяется от $-g$ до $+g$, то есть на $2g$. Простой $2g$ -тест с опрокидыванием состоит из измерения изменений частоты, когда генератор поворачивается вокруг трех ортогональных осей. Величина чувствительности к ускорению при этом определяется как векторная сумма трех изменений частоты под влиянием ускорения силы тяжести.

Производители атомных стандартов не рекомендуют размещать их возле источников магнитных полей и поворачивать в рабочем режиме из-за возможного влияния на частоту внешнего геомагнитного поля. Поэтому в ходе выполнения настоящей работы пришлось исследовать и чувствительность частоты к изменениям магнитного поля, которая также представляется как скалярное произведение вектора напряженности магнитного поля \vec{H} на вектор чувствительности $\vec{\Psi}$.

Представим относительное изменение $\Delta f/f$ частоты под действием УСП и геомагнитного поля в виде

$$\frac{\Delta f}{f} = \vec{\Gamma} \cdot \vec{g} + \vec{\Psi} \cdot \vec{H},$$

где f – номинальное значение частоты.

Изменение частоты будет наибольшим в случае, если векторы ускорения и напряженности магнитного поля параллельны соответствующим векторам чувствительности и нулевым, если эти векторы попарно ортогональны.

Есть некоторые серьезные проблемы с использованием $2g$ -теста с опрокидыванием. Прежде всего, этот тест применим только к приборам с термостатированием высокого качества, потому что в противном случае изменения частоты из-за изменения распределения температуры внутри прибора при переворотах будут маскировать вызванные ускорением изменения частоты. Результаты также будут неправильными, если повороты стандарта выполнять с периодом, сопоставимым с постоянной времени системы автоподстройки частоты внутреннего кварцевого генератора по сигналу атомного дискриминатора.

Результаты измерений

Авторы настоящей работы провели *2g tip-over* испытания двух рубидиевых стандартов частоты типа Ч1-69 (№ 505001 и 502150). Измерения про-

водились в лабораторном помещении с использованием цифровых частотомера и осциллографа при различной ориентации исследуемого прибора как по вертикали, так и в направлении горизонтальной составляющей геомагнитного поля с шагом в четверть оборота, в общей сложности – при 24 различных положениях.

Собственно для определения разности частот использовалась пересчетная часть электронно-счетного частотомера. Длительность счета в каждой сессии задавалась как 2000 секундных импульсов опорного генератора. Подсчитывалось количество импульсов сигнала с частотой 5 МГц от исследуемого стандарта после умножения в 20 раз.

Вначале были выполнены исследования прибора № 505001. В качестве опорного генератора использовался прибор № 502150. Во второй группе измерений был исследован прибор № 502150, а в качестве опорного сигнала использовались секундные метки времени на выходе приемника GPS.

Некоторые положения стандарта показаны на рис. 1: *a* – в нормальном (штатном) положении; *b* – “вверх ногами”; *в*, *г*, *д* – на боковых сторонах корпуса; *е* – на лицевой стороне; *ж* – на задней стороне. На рисунках показано положение координатных осей (орты $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$), связанных с прибором. На рис. 1*a, б* показаны также составляющие векторов чувствительности $\vec{\Gamma}$ ($\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$) и $\vec{\Psi}$ (Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z). Неподвижная система координат представлена ортами \vec{e}_v и \vec{e}_h , вдоль которых направлены векторы УСП, вертикальной \vec{H}_v и горизонтальной \vec{H}_h составляющих геомагнитного поля, показанных на рис. 1*a, б*. В исходном положении прибора ось *z* направлена вертикально вверх, а ось *y* – вдоль горизонтальной составляющей геомагнитного поля.

Для уменьшения влияния вариаций температуры в помещении и дрейфов частот стандартов использовался рандомизированный план эксперимента. Очередное пространственное положение исследуемого генератора выбиралось случайным образом.

Результаты измерений для каждой ориентации прибора объединялись в группы после первичной статистической обработки (в качестве примера см. таблицу для прибора № 502150).

В колонках с третьей по восьмую представлены скалярные произведения ортов $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ на орт местной вертикали \vec{e}_v и на орт \vec{e}_h горизонтальной составляющей геомагнитного поля.

Если расписать скалярные произведения векторов в проекциях, то получится система уравнений для компонент векторов чувствительности $\vec{\Gamma}$ и $\vec{\Psi}$. Такие уравнения для некоторых вариантов ориентации исследуемого прибора, показанных на рис. 1, приведены ниже:

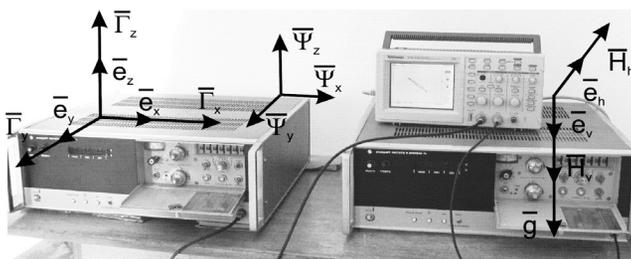
$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_a = -\Gamma_z g - \Psi_y H_h - \Psi_z H_v;$$

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_b = \Gamma_z g - \Psi_y H_y + \Psi_z H_v;$$

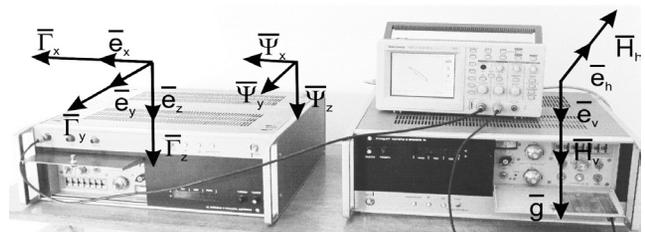
$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_в = \Gamma_x g + \Psi_x H_v - \Psi_y H_h;$$

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_г = -\Gamma_x g - \Psi_x H_v - \Psi_y H_h;$$

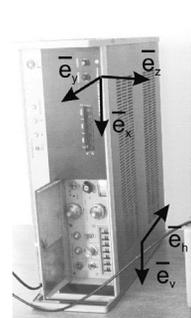
$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_д = -\Gamma_x g - \Psi_x H_v + \Psi_y H_h;$$



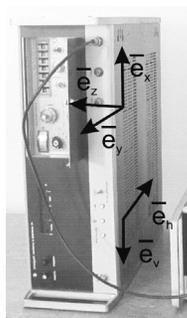
a



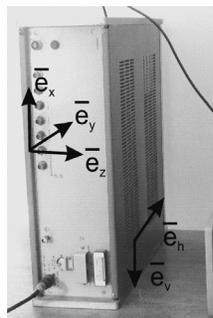
б



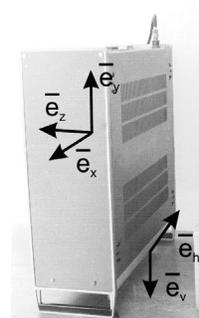
в



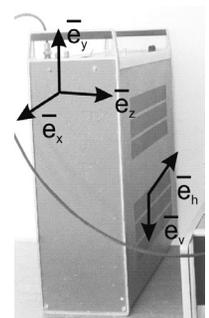
г



д



е



ж

Рис. 1. Расположение рубидиевых стандартов во время 2*g* tip-over теста

$\frac{\Delta f}{f_0} \cdot 5 \cdot 10^{-12}$	СКО $\frac{\Delta f}{f_0} \times 5 \cdot 10^{-12}$	$\vec{e}_x \cdot \vec{e}_v$	$\vec{e}_y \cdot \vec{e}_v$	$\vec{e}_z \cdot \vec{e}_v$	$\vec{e}_x \cdot \vec{e}_h$	$\vec{e}_y \cdot \vec{e}_h$	$\vec{e}_z \cdot \vec{e}_h$	Конфигурация на рис. 1
293,2	2,6	0	0	-1	0	-1	0	<i>a</i>
283,3	8,0	0	0	-1	1	0	0	
289,1	4,1	0	0	-1	0	1	0	
296	3,4	0	0	-1	-1	0	0	
287,4	1,2	0	-1	0	0	0	-1	
283,5	6,1	0	-1	0	1	0	0	
293,8	1,1	0	-1	0	1	0	0	
285	2,0	0	-1	0	0	0	1	<i>ж</i>
299	2,1	0	1	0	0	0	-1	
296,4	3,4	0	1	0	-1	0	0	<i>e</i>
305,1	3,6	0	1	0	0	0	1	
299,6	2,2	0	1	0	1	0	0	
291,9	3,9	0	0	1	0	-1	0	<i>б</i>
293,6	3,0	0	0	1	1	0	0	
296,9	2,8	0	0	1	0	1	0	
297,4	3,9	0	0	1	-1	0	0	
295,4	2,0	1	0	0	0	0	-1	
292	2,9	1	0	0	0	1	0	<i>д</i>
294,8	3,8	1	0	0	0	0	1	
292,2	1,9	1	0	0	0	-1	0	<i>в</i>
297,3	2,3	-1	0	0	0	0	1	
300,8	1,8	-1	0	0	0	1	0	
297,8	4,6	-1	0	0	0	0	-1	
293,9	6,7	-1	0	0	0	-1	0	<i>з</i>

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_e = -\Gamma_y g - \Psi_x H_v - \Psi_y H_h;$$

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_ж = -\Gamma_y g - \Psi_x H_h - \Psi_y H_v.$$

На рис. 2 показаны зависимости относительного отклонения частоты от ориентации в пространстве для первого стандарта (рис. 2а, в) и второго (рис. 2б, з). Из всех возможных ориентаций выбраны такие, при которых сила тяжести действует, во-первых, в штатном положении прибора, представленном на рис. 1а, б (рис. 2а, б) и, во-вторых, вдоль оси оптического пучка в рубидиевой ячейке поглощения, находящейся в СВЧ-резонаторе, что представлено на рисунках 1е, ж (рис. 2в, з). Достаточно очевидно, что два прибора существенно отличаются по зависимости выходной частоты от положения в гравитационном поле. Наибольшая чувствительность обнаружена к силе тяжести, направленной вдоль оси оптического пучка ($3 \cdot 10^{-11}/g$) у одного из приборов.

Изменение частоты в штатном положении составляет относительную величину до $10^{-11}/g$ для одного из приборов и практически отсутствует для

другого. Наибольшая чувствительность к геомагнитному полю зарегистрирована у обоих приборов вдоль оси *x* на уровне $(1...2) \cdot 10^{-11}/H$.

Обсуждение

Метрологическое исследование зависимости частоты атомного стандарта от УСП можно было бы осуществить непосредственно, размещая стандарты на различной высоте [10, 11]. Однако в этих опытах на фоне зависимости разности частот от разности потенциалов гравитационного поля невозможно выделить эффекты напряженности.

В гравитационных экспериментах со стандартами частоты фактически сравниваются частоты излучения или поглощения отдельных атомов, находящихся в разных точках поля силы тяжести. Поэтому вполне можно оценить влияние УСП на разность частот, рассматривая для начала это влияние на отдельные атомы. Активные атомы в стандартах по отношению к гравитационному полю, вообще говоря, находятся в свободном падении, будь то в рубидиевой поглощающей ячейке, в цезиевом пучке или в колбе водородного генератора.

Для рубидиевого стандарта существует два фундаментальных ограничения точности. Первое из них связано с движением активных атомов

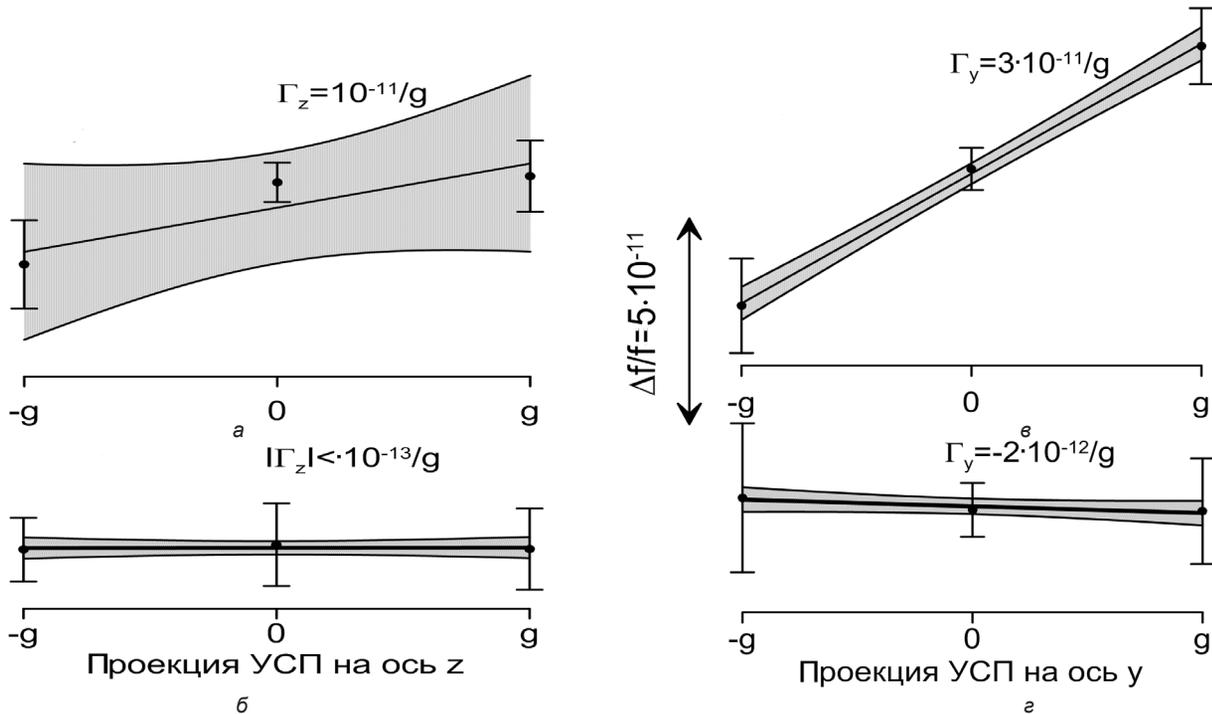


Рис. 2. Зависимости относительного отклонения частоты от ориентации в пространстве: а, в – для стандарта № 505001; б, г – для стандарта № 502150

в газовой ячейке относительно резонатора. К доплеровскому смещению частоты атомного перехода из-за случайного теплового движения атома следует добавить систематическое смещение из-за свободного падения атома в гравитационном поле Земли. Второе ограничение связано со средним временем T взаимодействия атомов, находящихся в определенном квантовом состоянии, с полем СВЧ-резонатора. Это время определяет среднюю ширину полосы частот $1/T$ линии атомного резонанса, по которому происходит автоподстройка.

Через внешнее ускорение перечисленные два ограничения оказываются связанными. Чем больше время T , тем больше средняя скорость V падения атомов, которая определяется как $V = 0,5gT$. Например, при характерном для промышленных рубидиевых стандартов времени $T = 0,01$ с средняя скорость падения атомов составит $0,05$ м/с, что приведет к систематическому доплеровскому сдвигу частоты $1,5 \cdot 10^{-12}$ в относительном выражении. Эта оценка по порядку величины соответствует результатам, полученным в настоящей работе. Причины расхождения могут быть выяснены после совершенствования существующей физической модели взаимодействия активных атомов, оптического и СВЧ-излучения в резонаторе стандарта.

В развитие полученных результатов в настоящее время проводятся дополнительные измерения в рамках многофакторного эксперимента для увеличения статистической обоснованности результатов. Параллельно организовывается рабочее место для исследований нескольких экземпляров рубидиевых стандартов. Изыскиваются возможности для исследований цезиевого стандарта.

Выводы

Изменение ориентации рубидиевого стандарта в гравитационном поле приводит к относительному изменению частоты до $3 \cdot 10^{-11}$ для одного из исследованных приборов и находится на уровне погрешности эксперимента для другого.

Минимальное влияние на частоту оказывает сила тяжести в штатном положении приборов.

Влияние геомагнитного поля приводит к изменению частоты не более чем на $2 \cdot 10^{-11}$ в относительном выражении для обоих стандартов.

Литература

1. Weiss M. GPS receivers and relativity / M. Weiss, N. Ashby // Proceedings of 29th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI): Meeting. – Long Beach, CA, 1997. – P. 69–83.
2. Hafele J.C. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains / J.C. Hafele, R.E. Keating // Science. – 1972. – 177. – P. 166–168; Hafele J.C. Around the world atomic clocks: observed relativistic time gains / J.C. Hafele, R.E. Keating // Science. – 1972. – 177. – P. 168–170.
3. Руденко В.Н. Релятивистские эксперименты в гравитационном поле / В.Н. Руденко // Успехи физических наук. – 1978. – Ноябрь, Т. 126, № 3. – С. 361–401.
4. Турышев В.Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований / В.Г. Турышев // Там же. – 2009. – Январь, Т. 179, № 1. – С. 3–34.
5. Алешкевич В.А. О преподавании специальной теории относительности на основе современных

- экспериментальных данных / В.А. Алешкевич // Там же. — 2009. — Декабрь, Т. 182, № 12. — С. 1301–1318.
6. Space-class rubidium atomic frequency standard with improved performance for GNSS systems / T. McClelland, I. Pascaru, I. Shtaermann [et al.] // Proceedings of 43rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications: Meeting. — Long Beach, CA, 2011. — P. 325–340.
 7. On-orbit performance of Milstar Rubidium and Quartz Frequency Standards / N.D. Bhaskar, A.D. Matt, N. Russo [et al.] // IEEE International Frequency Symposium. — Orlando, Florida. — 28–30 May 1997. — P. 329–337.
 8. Гуськов А.М. Особенности численного анализа динамики кварцевого генератора / А.М. Гуськов, Е.А. Коровайцева // Инженерный журнал: наука и инновации: ежемесячное мультидисциплинарное научно-практическое сетевое издание. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2012. — Вып. № 6 (6). — С. 108–114.
 9. The Effects of Acceleration on Precision Frequency Sources: Research and Development Technical Report SLCET-TR-91-3 / J.R. Vig, C. Audoin, L.S. Cutler [et al.] // U.S. ARMY LABORATORY COMMAND Electronics Technology and Devices Laboratory Fort Monmouth, NJ 07703-5601. — July 1992. — P. 63.
 10. *Pound R.V.* Apparent weight of photons / R.V. Pound, G.A. Rebka // Phys. Rev. Lett. — 1960. — 4. — P. 337–341.
 11. Detection of the gravitational Redshift of the cesium frequency Standard at CRL / M. Hosokawa, N. Kotake, K. Imamura, N. Kurihara // Proceedings of 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI): Systems and Applications Meeting. — Reston, VA, 2000. — P. 463–470.
 12. Занимонский Е.Е. Схема локального релятивистского эксперимента с периодическим движением системы в гравитационном поле / Е.Е. Занимонский, А.В. Омельченко // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2008. — № 1. — С. 53–57.