

Путешествие во времени, загадки часов и экспериментальные тесты.

И. Цуфолини (Италия)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1306.1826v1 [gr-qc] 7 Jun 2013

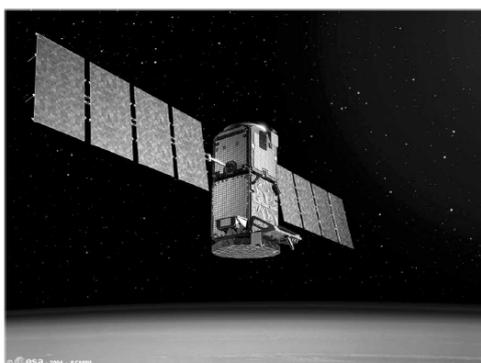
Time travel, Clock Puzzles and Their Experimental Tests.

Ignazio Ciufolini

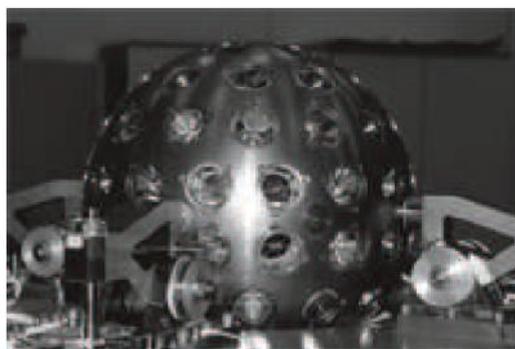
Dip. Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, Lecce, and Centro Fermi, Rome, Italy ignazio.ciufolini@unisalento.it

В статье обсуждаются путешествия во времени и 'загадки' часов, математически предсказываемые теорией общей относительности Эйнштейна, и их экспериментальные проверки. Путешествия во времени должны быть разделены на путешествия в будущее и в прошлое.

Путешествия в будущее, математически предсказываемые теорией относительности, действительно должны быть возможны. Это действительно является следствием так называемого 'парадокса близнецов' специальной теории относительности и эффекта расширения времени в гравитационном поле, предсказываемого общей теорией относительности. 'Парадокс близнецов' и расширение времени подтверждены многочисленными и очень точными экспериментальными тестами, включая прямое измерение расширения времени, выполненное прибором NASA Gravity Probe A с точностью порядка 0.02 %. Далее, каждый раз, когда мы используем спутниковый навигатор, мы выполняем такую проверку поведения часов, предсказываемого специальной и общей теорией относительности. Без учета этих релятивистских эффектов на позиционирование навигационных спутников ошибка в определении нашего положения может достигать километров.



GLOVE В, испытательный европейский спутник GALILEO с наиболее точными часами (в 2008 году), когда-либо побывавшими в космосе.

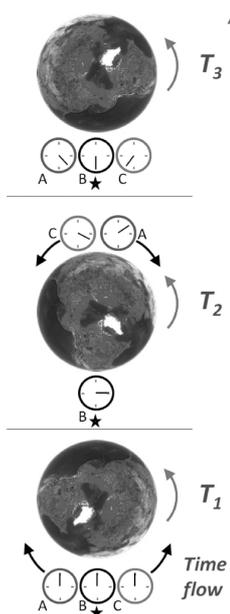


Спутник LARES (фотография любезно предоставлена Италианским космическим агенством).

А возможно ли путешествие в прошлое? Полевые уравнения Эйнштейна общей теории относительности предсказывают математическое существование замкнутых времениподобных линий (closed timelike lines – CTC), таких, как в метрике Керра и в первых космологических моделях Гёделя, а также математическое существование “кротовых нор”, таких, как мост Эйнштейна-Розена [1], связывающих удаленные области вселенной. “Кротовая нора” может использоваться в качестве “машины времени”, но для этого необходимо использовать некую “экзотическую материю” с отрицательной средней плотностью энергии [12].

Замкнутые времениподобные мировые линии являются “машинами времени”. Наблюдатель, способный следовать вдоль такой линии, мог бы вернуться к тому же самому исходному пространственно-временному событию, т.е. мог бы путешествовать назад во времени. Но неизвестно, может ли это быть осуществимо в “реальной” вселенной. Возможность путешествовать назад во времени приводит к так называемому парадоксу дедушки (или бабушки) (наблюдатель может предотвратить свое рождение, убив дедушку). Чтобы устранить парадоксы подобного рода, Торн, Новиков [8,9,10, 11,12] и др. показали, что всегда существуют математические решения, свободные от нарушения причинности. В этой связи Хокинг [13] сформулировал “Гипотезу о хронологической защите (Chronology Protection Conjecture)”.

Существует еще один тип “загадки часов”, которая возникает около вращающегося тела или потока массы-энергии, это – релятивистский феномен, именуемый “увлечением системы отсчета (frame-dragging)” или “увлечением инерциальных систем отсчета (dragging of inertial frames)”. Этот эффект имеет интригующее влияние на течение времени вокруг вращающегося тела: синхронизация часов вдоль замкнутого пути около вращающегося тела невозможна [33,41] в любой жесткой системе отсчета, не вращающейся относительно “неподвижных звезд”. Дело в том, что свет, распространяющийся вокруг вращающегося тела в направлении его вращения, требует меньше времени для возвращения в исходную точку (фиксированную относительно “неподвижных звезд”), чем свет, распространяющийся в противоположном направлении [33,41,42,43,44,45,46,47].



Невозможность непротиворечивого определения одновременности вдоль замкнутого контура вокруг вращающегося тела приводит к следующей загадке. Если двое близнецов А и С, каждый со своими часами, двигаются вокруг вращающегося тела очень медленно, а третий близнец В ждет их в исходной точке (фиксированной относительно “далеких фиксированных звезд”), а T1, T2 и T3 – последовательные моменты времени, то при их новой встрече близнец А, путешествовавший в направлении, противоположном вращению центрального тела, должен оказаться моложе близнеца В, ожидавшего его в начальной точке. С другой стороны, близнец С, двигавшийся в том же направлении, что и вращение тела, окажется старше их обоих [33,41,42,43,44] (Изображение Земли – NASA и Google Earth).

Феномен увлечения системы отсчета, обусловленный потоком и вращением масс, был назван гравимагнетизмом [17,2] потому что он является формальной

аналогией электродинамики в общей теории относительности (в приближении слабого поля и медленного движения). В то время, как электрический заряд генерирует электрическое поле, а ток электрических зарядов – магнитное поле, в ньютоновой теории гравитации масса тела генерирует гравитационное поле, но поток массы, возникающий, например, при вращении тела, не генерирует какого-либо дополнительного гравитационного поля. С другой стороны, теория гравитации Эйнштейна предсказывает, что поток массы должен генерировать гравимагнитное поле, оказывающее силовое воздействие на окружающие тела, и менять структуру пространства-времени, порождая дополнительную кривизну.

Данный эффект влияет не только на часы и электромагнитные волны, но и на гироскопы [19,20] (например, гироскопы в космическом эксперименте GP-B) и орбитальные частицы [21] (в частности, см. данные со спутников LAGEOS и LARES), например, на частицы, вращающиеся по орбите и падающие на вращающееся тело. В самом деле, объяснение постоянной ориентации впечатляющих выбросов (джетов) из активных ядер галактик и квазаров, испускаемых в одном и том же направлении в течение миллионов лет, основывается на эффекте увлечения аккреционного диска, обусловленного сверхмассивной вращающейся черной дырой [50,17], действующей как гироскоп.

В 1959 и 1960 годах был предложен эксперимент по проверке эффекта общерелятивистского увлечения системы с помощью гироскопа [19,20]. 20 апреля 2004 года, спустя более чем 40 лет подготовки, космический аппарат Gravity Probe B был в конце концов запущен на полярную орбиту с высотой порядка 642 км. Миссия Gravity Probe B [29] (см. <http://einstein.stanford.edu/>), совмещенная со спутником Земли, несла четыре гироскопа и один телескоп, нацеленный на звезду IM Pegasi (HR8703), и была разработана для измерения прецессии, предсказываемой общей теорией относительности (frame-dragging and geodetic precession). Последняя предсказывает, что средняя величина этой прецессии для четырех гироскопов Gravity Probe B вследствие вращения Земли должна составить около 39 угловых миллисекунд в год, то есть 0.000011 градусов в год относительно оси, нормальной к плоскости орбитальной орбиты спутника.

14 апреля 2007, спустя примерно 18 месяцев анализа данных, были представлены первые результаты работы Gravity Probe B: на эксперимент Gravity Probe B испытывал неожиданно большие прецессии осей гироскопов, вызванные неожиданными классическими моментами, приложенными к гироскопам. Команда Gravity Probe B объяснила [51] (см. также [52]) значительные прецессии гироскопов наличием электростатических участков на поверхности роторов и кожухов и оценила (без моделирования) систематические ошибки на уровне 100 угловых миллисекунд в год, что соответствует погрешности в более чем 250% от эффекта увлечения системы отсчета, вызванного вращением Земли. Однако в 2011 команда Gravity Probe B объявила, что в результате моделирования систематических ошибок они сумели снизить погрешность измерения увлеченности системы отсчета до 19 % [29].

Подобно небольшому гироскопу, орбитальная плоскость планеты, луны или спутника является огромным гироскопом, который демонстрирует релятивистские эффекты. Однако эти эффекты являются чрезвычайно малыми для объектов в солнечной системе, так что для измерения соответствующих эффектов на орбите спутника нам необходимо измерить положение спутников с чрезвычайно высокой точностью. Наиболее точным техническим методом для измерения расстояний до Луны и искусственных спутников является лазерный, он и использовался на таких спутниках, как LAGEOS (LAsEr GEODynamics Satellite) [53]. Короткие импульсы лазеров поступают с Земли и отражаются назад к испускающим лазерным станциям через отражатели на Луне или искусственных спутниках. Измеряя

полное время прохождения света, мы можем сегодня определить мгновенное расстояние до отражателя с точностью до нескольких миллиметров [54] с погрешностью миллисекунды в год [55,56,57].

LAGEOS был запущен NASA в 1976 году, а LAGEOS 2 – Итальянским космическим агентством и NASA в 1992, высоты орбиты составляют примерно 5900 км и 5800 км соответственно. Орбиты спутников LAGEOS могут быть предсказаны за 15-дневный период с погрешностью до нескольких сантиметров. Каких-либо отклонений от предсказаний общей теории относительности не наблюдалось.

13 февраля 2012 года был успешно запущен спутник LARES (LAsER RELativity Satellite) Итальянского космического агентства. LARES вместе со спутниками LAGEOS и LAGEOS 2, а также миссией GRACE [66,67] должен обеспечить точную величину эффекта увлечения системы отсчета для Земли с погрешностью порядка 1% и других тестовых задач фундаментальной физики [30,28,69].

Данная публикация была подготовлена по контракту с Итальянским космическим агентством № I/034/12/0.

Ссылки

1. C.W. Misner, K.S. Thorne, and J.A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973).
2. I. Ciufolini, and J.A. Wheeler, *Gravitation and Inertia* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1995).
3. K.S. Thorne, Closed Timelike Curves, in *General Relativity and Gravitation, 1992, Proceedings of the 13th International Conference on General Relativity and Gravitation*, edited by R.J. Gleiser, C.N. Kozameh, and O.M. Moreschi, (Institute of Physics Publishing, Bristol, England, 1993), pp. 295-315.
4. S. Chandrasekhar and J. P. Wright, The Geodesics in Gödel's Universe", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 47, 341-347 (1961).
5. R. P. Kerr, Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics, *Phys. Rev. Lett.* 11, 237-238 (1963).
6. M. S. Morris, K. S. Thorne and U. Yurtsever, Wormholes, Time Machines and the Weak Energy Condition, *Phys. Rev. Lett.*, 61, 1446-49 (1988).
7. U. P. Frolov and I. D. Novikov, Physical Effects in Wormholes and Time Machines', *Phys. Rev. D* 42, 1057-1065 (1990).
8. J. Friedman, M. S. Morris, I. D. Novikov, F. Echeverria, G. Klinkhammer, K. S. Thorne and U. Yurtsever, Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves, *Phys. Rev. D* 42, 1915-1930 (1990);
9. I. D. Novikov, Time Machine and Self-consistent Evolution in Problems with Self-interaction, *Phys. Rev. D*, 45, 1989-1994 (1992);
10. F. Echeverria, G. Klinkhammer and K.S. Thorne, Billiard Balls in Wormhole Spacetimes with Closed Timelike Curves: I. Classical Theory, *Physical Review D*, 44, 1077-1099 (1991).
11. K.S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (W.W. Norton and Company, New York, 1994).
12. S.W. Hawking, K.S. Thorne, I. Novikov, T. Ferris and A. Lightman, in *The Future of Spacetime*, R.H. Price, ed. (W.W. Norton, New York, 2002).
13. S.W. Hawking, The Chronology Protection Conjecture, in *Proceedings of the VI Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, Kyoto, Japan, June 1991 (World Scientific, Singapore).

14. S.-W. Kim and K.S. Thorne, Do vacuum fluctuations prevent the creation of closed timelike curves? *Physical Review D*, 43, 3929-3949 (1991).
15. A. Ori, A Class of Time-Machine Solutions with a Compact Vacuum Core, *Phys. Rev. Lett.*, 95, 021101 (2005).
16. M. Visser, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (AIP Series in Computational and Applied Mathematical Physics, 1996).
17. K.S., Thorne, R.H. Price, and D.A. Macdonald, *The Membrane Paradigm* (Yale Univ. Press, NewHaven, 1986).
18. I Ciufolini, Gravitomagnetism and status of the LAGEOS III experiment. *Class. Quantum Grav.* 11, A73-A81 (1994).
19. G.E. Pugh, Proposal for a Satellite Test of the Coriolis Prediction of General Relativity, Weapons Systems Evaluation Group Research Memorandum N. 11 (The Pentagon, Washington, 1959).
20. L.I. Schiff, Motion of a Gyroscope According to Einstein's Theory of Gravitation. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 46, 871-82 (1960) and Possible New Test of General Relativity Theory. *Phys. Rev. Lett.* 4, 215-7 (1960).
21. J. Lense and H. Thirring, Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen. *Phys. Z.* 19 156-163, 1918. See also English translation by B Mashhoon, F W Hehl, D S Theiss *Gen. Relativ. Gravit.* 16, 711-750 (1984).
22. B. and I. Friedl?ander *Absolute und Relative Bewegung?* (Berlin: Simion-Verlag, 1896)
23. A. F?oppl, Überreinen Kreiserversuch zur messung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde. *Sitzb. Bayer. Akad.Wiss.* 34, 5-28 (1904), *Phys. Z.* 5, 416; see also A. F?oppl, Über Absolute und Relative Bewegung. *Sitzb. Bayer. Akad.Wiss.* 34, 383-95 (1904).
24. I. Ciufolini, and E. C. Pavlis, A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect, *Nature* 431, 958-960, 2004.
25. I., Ciufolini, Dragging of Inertial Frames, *Nature*, 449, 41-47 (2007).
26. J.C., Ries, R. J. Eanes, and M. M. Watkins, Confirming the Frame-Dragging Effect with Satellite Laser Ranging, *16th International Workshop on Laser Ranging*, 13-17 October 2008, Poznan, Poland. See also J.C. Ries, Relativity in Satellite Laser Ranging, American Astronomical Society, IAU Symposium 261. Relativity in Fundamental Astronomy: Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis (Virginia Beach, VA, USA, 27 April - 1 May 2009).
27. I. Ciufolini, E. C. Pavlis, J. Ries, R. Koenig, G. Sindoni, A. Paolozzi and H. Newmayer, Gravitomagnetism and its Measurement with Laser Ranging to the LAGEOS satellites and GRACE Earth Gravity Models, in *John Archibald Wheeler and General Relativity* I. Ciufolini and R. Matzner eds., 371-434 (Springer Verlag, 2010).
28. I. Ciufolini, A. Paolozzi, E. C. Pavlis, J. Ries, R. Koenig, R. Matzner, G. Sindoni and H. Neumayer, Testing Gravitational Physics with Satellite Laser Ranging, *The European Physical Journal Plus*, 126, 72 (2011).
29. C.W.F. Everitt, Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity, *Phys. Rev. Lett.* 106, 221101 (2011).
30. I. Ciufolini, A. Paolozzi, E. C. Pavlis, J. Ries, R. Koenig, R. Matzner and G. Sindoni, The LARES Space Experiment: LARES Orbit, Error Analysis and Satellite Structure, in *John Archibald Wheeler and General Relativity* I. Ciufolini and R. Matzner eds., 371-434 (Springer Verlag, 2010).
31. I. Ciufolini, A. Paolozzi, E. Pavlis, J. Ries, V. Gurzadyan, R. Koenig, R. Matzner, R. Penrose and G. Sindoni, Testing General Relativity and gravitational physics using the LARES satellite, *The European Physical Journal Plus*, 127, 133 (2012).

32. A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, 3rd Ed., (Princeton Univ. Press, Princeton, 1950).
33. L. D. Landau, and E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields 3rd rev.*, English edn. (Pergamon, London, 1971).
34. C. M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics 2nd edn* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1993).
35. J. C. Hafele and R. E. Keating, Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains, *Science*, 177, 166–68 (1972).
36. J. C. Hafele and R. E. Keating, Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains', *Science*, 177, 168–70 (1972).
37. R. F. C. Vessot and M.W. Levine, A test of the equivalence principle using a space-borne clock', *Gen. Rel. and Grav.*, 10, 181-204 (1979).
38. R. F. C. Vessot, L. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, R. Decher P. B. Eby, C. R. Baugher, J. W. Watt, D. L. Teuber, and F. O. Wills, Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser, *Phys. Rev. Lett.*, 45, 2081-4 (1980).
39. L. Cacciapuoti and Ch. Salomon, Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment, *The European Physical Journal Special Topics*, 172, 57-68 (2009).
40. N. Ashby, Relativity in the Global Positioning System, *Living Rev. Relativity*, 6, (2003).
41. Ya. B. Zeldovich, and I. D. Novikov, *Relativistic Astrophysics Vol. I Stars and Relativity* (Univ. Chicago Press, Chicago, 1971).
42. I. Ciufolini and F. Ricci, Time delay due to spin and gravitational lensing, *Class. and Quantum Grav.* 19, 3863-3874 (2002).
43. I. Ciufolini and F. Ricci, Time delay due to spin inside a rotating shell, *Class. and Quantum Grav.* 19, 3875-3881 (2002).
44. I. Ciufolini, F. Ricci, S. Kopekin and B. Mashhoon, On the Gravitomagnetic Time Delay, *Physics Letters A* 308, 101-109 (2003).
45. A. Tartaglia, Detection of the Gravitomagnetic Clock Effect. *Class. Quantum Grav.*, 17, 783-792 (2000).
46. A. Tartaglia, Geometric Treatment of the Gravitomagnetic Clock Effect. *Gen. Rel. Grav.*, 32, 1745-1756 (2000).
47. A. Tartaglia, Gravitomagnetism, Clocks and Geometry. *European Journ. of Physics*, 22, 105-111 (2001).
48. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity* (Wiley, New York, 1972).
49. A. Einstein, Letter to Ernst Mach. Zurich, 25 June 1913, in ref. [1] p. 544.
50. J.M. Bardeen and J.A. Petterson, The Lense-Thirring Effect and Accretion Disks around Kerr Black Holes. *Astrophysical J.*, 195, L65-7 (1975).
51. D. K. Gill and S. Buchman, Evidence for Patch Effect Forces On the Gravity Probe B Gyroscopes (Stanford Univ., Stanford, April 2007); poster at: http://einstein.stanford.edu/content/aps_posters/EvidenceForPatchEffectForces.pdf
52. B.M. Barker and R.F. O'Connell, The gyroscope test of General Relativity. *Nature* 312, 314 (1984).
53. S.C. Cohen and P.J. Dunn, (Eds.), *LAGEOS Scientific Results*, *J. Geophys. Res.* 90 (B11), 9215 (1985).
54. R. Noomen, S. Klosko, C. Noll and M. Pearlman, eds., *Toward Millimeter Accuracy Proc. 13th Int. Laser Ranging Workshop* (NASA CP 2003-212248, NASA Goddard, Greenbelt, MD, 2003).
55. B. Tapley, J.C. Ries, R.J. Eanes, and M.M. Watkins, *NASA-ASI Study on LAGEOS III*, CSR-UT publication n. CSR-89-3, Austin, Texas (1989), and I. Ciufolini et al., *ASI-*

- NASA Study on LAGEOS III, CNR, Rome, Italy (1989). See also: I. Ciufolini et al., *INFN study on LARES/WEBER-SAT* (2004).
56. Ries J.C., Simulation of an experiment to measure the Lense-Thirring precession using a second LAGEOS satellite, Ph. Dissertation, (Univ. of Texas, Austin, 1989).
 57. G. E. Peterson, Estimation of the Lense-Thirring Precession Using Laser-Ranged SATellites, Ph. Dissertation (Univ. of Texas, Austin, 1997).
 58. I. Ciufolini, Measurement of the Lense-Thirring drag on high-altitude laser-ranged artificial satellites. *Phys. Rev. Lett.* 56, 278-281 (1986).
 59. I. Ciufolini, A comprehensive introduction to the Lageos gravitomagnetic experiment: from the importance of the gravitomagnetic field in physics to preliminary error analysis and error budget, *Int. J. Mod. Phys. A*, 4, 3083-3145 (1989).
 60. I. Ciufolini, E.C. Pavlis, F. Chieppa, E. Fernandes-Vieira, and J. Perez-Mercader, Test of general relativity and measurement of the Lense-Thirring effect with two Earth satellites. *Science*, 279, 2100-2103 (1998).
 61. Rubincam, D. P. Drag on the LAGEOS satellite. *J. Geophys. Res. B*, 95, 4881-4886 (1990).
 62. Lucchesi, D. M. Reassessment of the error modelling of non-gravitational perturbations on LAGEOS II and their impact in the Lense-Thirring derivation. Part II, *Planet. Space Sci.*, 50, 1067-1100 (2002).
 63. W.M. Kaula, *Theory of Satellite Geodesy* (Blaisdell, Waltham, 1966).
 64. I. Ciufolini, On a new method to measure the gravitomagnetic field using two orbiting satellites. *Nuovo Cimento A*, 109, 1709-1720 (1996).
 65. IERS Conventions 2010, G. Petit and B. Luzum, eds., *IERS Technical Note*.
 66. Ch. Reigber, F. Flechtner, R. Koenig, U. Meyer, K. Neumayer, R. Schmidt, P. Schwintzer and S. Zhu, GRACE Orbit and Gravity Field Recovery at GFZ Potsdam - First Experiences and Perspectives, *Eos. Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract G12B-03 (2002).
 67. B. D. Tapley, The GRACE Mission: Status and Performance Assessment, *Eos. Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract G12B-01 (2002).
 68. I. Ciufolini and A. Paolozzi, LARES Successfully Launched in Orbit: Satellite and Mission Description, to appear in *Acta Astronautica* (2013).
 69. I. Ciufolini, B. Moreno Monge, A. Paolozzi, R. Koenig, G. Sindoni, G. Michalak and E. Pavlis, Monte Carlo Simulations of the LARES space experiment to test General Relativity and fundamental physics, to be published (2013).
 70. I. Ciufolini, E. C. Pavlis and R. Peron, Determination of frame-dragging using Earth gravity models from CHAMP and GRACE, *New Astronomy* 11 527-550 (2006).
 71. T. Smith, A. Erickcek, R.R. Caldwell and M. Kamionkowski, The effects of Chern-Simons gravity on bodies orbiting the earth, *Phys. Rev. D*, 77, 024015 (2008).