

СБЛИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ С РАДИОИСТОЧНИКАМИ В 2009-2050 гг. И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ

Малкин З.М., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Во время тесных видимых сближений планет Солнечной системы с астрометрическими радиоисточниками видимое положение последних изменяется из-за релятивистских эффектов, и таким образом эти явления могут служить тестом общей теории относительности, что и было успешно продемонстрировано в экспериментах 1988 и 2002 гг. по измерению смещений радиоисточников во время сближений с Юпитером. Анализ, проведенный в настоящей работе, показал, что при наблюдении источника вблизи края планетного диска, фактически во время покрытий, релятивистский эффект может быть измерен на современном уровне точности для всех планет. Однако покрытия радиоисточников довольно редкие явления. В то же время, из всех планет только Юпитер и Сатурн дают значимый релятивистский эффект при их углом сближении с радиоисточником на расстояние нескольких радиусов планеты. В результате этого анализа составлен каталог предстоящих покрытий и сближений планет и геодезических радиоисточников на 2009–2050 гг., который может быть использован для планирования экспериментов по тестированию теорий гравитации и в других целях. Для всех вошедших в каталог явлений рассчитаны основные релятивистские поправки для наземных и космических (Земля – Луна) баз интерферометра.

1. Введение

К настоящему времени кроме общепринятой в среде физиков и астрономов общей теории относительности (ОТО) предложены альтернативные теории гравитации. Наиболее серьезные из них не противоречат имеющимся наблюдательным фактам, однако прогнозируют отличие природы от ОТО при условиях, отличающихся от наблюдаемых до сих пор, либо предсказывают отличие наблюдаемых величин от ОТО за пределами достигнутой точности наблюдений. Поэтому тестирование теорий гравитации с использованием разных методов и все более точных наблюдений является весьма актуальной астрономической и физической задачей.

Одним из предложенных тестов ОТО являются наблюдения радиоисточников методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) в моменты их видимых тесных сближений с планетами Солнечной системы (Treuhaf и Lowe, 1991; Koreikin, 2001; Fomalont и Koreikin, 2003, 2008). В частности, в этих работах описаны наблюдения релятивистской задержки сигнала радиоисточника в моменты близкого прохождения Юпитера в 1988 и 2002 гг. Аналогичные наблюдения Юпитера и Сатурна по предложению О.А.Титова запланированы Комитетом по наблюдательным программам Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии IVS в 2008–2009 гг. (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/opc.html>). Однако обработка результатов уже проведенных экспериментов показала, что не на все вопросы, которые ставили их инициаторы, были получены однозначные ответы, в частности, из-за недостаточной точности результатов, что объясняется, в первую очередь, довольно большим угловым расстоянием между Юпитером и радиоисточником. Поэтому необходимо проведение дальнейших наблюдений в наиболее благоприятных условиях, в первую очередь при более тесных сближениях (в дальнейшем мы будем иметь в виду видимые сближения) и покрытиях.

Нужно заметить, что проведенные до сих пор наблюдения носят, во многом, случайный характер, т.е. инициатор того или иного эксперимента использует ближайшее прохождение планеты рядом с известным астрометрическим радиоисточником. Другой

исследователь, желающий провести аналогичный эксперимент, вынужден проводить свой поиск предстоящих сближений. При этом наиболее интересные явления, т.е. наиболее тесные сближения, могут быть пропущены. К тому же наблюдения релятивистских эффектов, обусловленных отклонением и гравитационной задержкой радиосигнала вблизи планеты, требуют значительных, обычно международных, ресурсов и планируются загодя. Поэтому желательно иметь возможность заблаговременного планирования экспериментов при наиболее выгодных условиях.

Целью настоящей работы является составление каталога сближений планет Солнечной системы с астрометрическими радиоисточниками и покрытий радиоисточников планетами для удобного дальнейшего планирования наблюдений. В процессе работы оказалось, что две считавшиеся очевидными характеристики подобных экспериментов являются ошибочными. Во-первых, такие явления происходят намного чаще, чем принято считать. Во-вторых, один из наиболее интересных релятивистских эффектов, связанных со скоростью распространения гравитации, может эффективно наблюдаться не только для планет-гигантов, но и для остальных планет и даже для Плутона. Кроме того, развитие космической техники делает реальным проведение РСДБ-наблюдений с базами в несколько сот тысяч километров, на которых также могут наблюдаться основные релятивистские эффекты для всех планет, включая наиболее крупные карликовые.

Полный вариант работы, включающий расчеты сближений и покрытий на период до 2050 г., опубликован в статье (Малкин и др., 2009), которая рекомендуется для ссылок на это исследование.

2. Наблюдаемые эффекты

В случае наблюдения радиоисточника вблизи планеты можно наблюдать два релятивистских эффекта, вносящих вклад в измеряемую интерферометрическую задержку, определяемую как разность прихода фронта электромагнитной волны, излученной радиоисточником, на две антенны базы РСДБ. Этими эффектами являются задержка Шапиро Δ и задержка распространения гравитационного взаимодействия Δ_p , обусловленная распространением луча вблизи движущегося тела, в нашем случае планеты. Как показано в (Koreikin, 2001), их измерение позволяет определить два фундаментальных релятивистских параметра: ППН параметр γ (равен 1 в ОТО) и параметр распространения гравитационного взаимодействия δ (равен 0 в ОТО, т.е. скорость распространения гравитации равна скорости света). Величина указанных эффектов может быть оценена по формулам, полученным Koreikin (2001, уравнение (13)), которые после очевидных преобразований приводятся к виду

$$\Delta \cong \frac{2(1+\gamma)GMrB}{c^3 R d}, \quad \Delta_p \cong (1+\delta) \frac{\Delta v}{cd} \quad (1)$$

где GM – планетоцентрическая гравитационная постоянная, B – длина базы интерферометра, r – видимый угловой радиус планеты, d – угловое расстояние между направлениями со станции на источник и центр планеты, R – радиус планеты, v – ее орбитальная скорость, c – скорость света. Очевидно, что Δ и Δ_p достигают максимальной величины при наблюдениях на краю планетного диска, т.е. $d = r$. Для этого случая (1) может быть переписано в рамках ОТО как

$$\Delta \cong \frac{4GM B}{c^3 R}, \quad \Delta_p \cong \frac{\Delta v}{cr}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что при наблюдении на краю диска Δ не зависит от размера видимого диска, т.е. от расстояния до планеты, а Δ_p достигает максимальной величины при максимальном удалении планеты от Земли. Числовые значения максимальных наблю-

даемых релятивистских эффектов приведены в табл. 1 для случая наземной и космической (Земля – Луна) базы интерферометра. Учитывая линейную зависимость рассматриваемых эффектов от B , приведенные значения легко могут быть пересчитаны на любую базу.

Таблица 1. Максимальная величина релятивистских эффектов при наблюдении на краю планетного диска, нс

База, тыс. км	Эффект	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
8	Δ	0.01	0.06	0.02	2.1	0.77	0.27	0.33	0.00
	Δ_p	0.15	0.32	0.13	1.2	0.68	0.73	1.14	0.09
400	Δ	0.5	3.2	0.75	110	39	14	16	0.05
	Δ_p	7.3	16	6.7	62	34	37	57	4.3

Следует отметить, что релятивистские эффекты, имеющие величину порядка единиц нс, могут быть измерены с использованием наиболее простой интерферометрической техники определения групповой задержки. В то же время эффекты на уровне единиц пикосекунд могут быть измерены только методом дифференциальных фазовых измерений при тщательном планировании наблюдательного эксперимента. Есть вполне обоснованная надежда, что точность измерения релятивистских эффектов существенно возрастет с вводом в строй РСДБ-станций нового поколения в стандарте VLBI2010 (Behrend и др., 2008).

Таблица 2. Величина релятивистских эффектов при удалении центра планеты от радиоисточника на $30''$, нс

База, тыс. км	Эффект	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
8	Δ	0.00	0.01	0.00	1.1	0.20	0.02	0.01	0.00
	Δ_p	0.00	0.01	0.00	0.33	0.04	0.00	0.00	0.00
400	Δ	0.04	0.51	0.05	56	9.8	0.78	0.60	0.00
	Δ_p	0.05	0.41	0.03	17	2.2	0.12	0.08	0.00

Результаты расчетов показывают, что почти все планеты в моменты максимального сближения с радиоисточниками обеспечивают вполне измеримые релятивистские эффекты даже на земных базах, особенно для Δ_p . Однако, уже при увеличении расстояния от центра планеты до радиоисточника до $30''$ величина релятивистских эффектов для земной базы становится практически неизмеримой с достаточной точностью для всех планет кроме Юпитера и Сатурна (табл. 2).

3. Предвычисление покрытий и сближений

На основании результатов, полученных в предыдущем разделе, можно сделать вывод, что имеет смысл предвычислять моменты покрытий для всех планет от Венеры до Нептуна, а более подробные обстоятельства сближений предвычислять для Юпитера и Сатурна. При этом будут охвачены все явления сближений планет с радиоисточниками, обеспечивающие наиболее заметные релятивистские эффекты в распространении сигнала. Их число представляется вполне достаточным для практического планирования экспериментов без привлечения наблюдений Меркурия, Марса и карликовых планет, для которых релятивистские эффекты хотя и могут быть измерены, но со сравнительно большой относительной ошибкой. Впрочем, опущенные в этой работе данные легко могут быть восполнены авторами по запросу заинтересованных лиц.

Основные расчеты обстоятельств сближений планет с радиоисточниками были выполнены с помощью программ APPROACH и OCCULT, которые используют данные и среду программной системы ЭПОС (Эфемеридная Программа для Объектов Солнечной системы, Львов, Цекмейстер, 2009). Координаты источников взяты из каталога Годдардского центра космических полетов НАСА, США (Petrov, 2008) с добавлением недостающих источников каталога ICRF-2 (Feu и др., 2004). Всего оказалось 3958 источников, список которых и их оптические характеристики могут быть найдены на http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/sou_car.dat.

Список покрытий радиоисточников планетами приведен в табл. 3, а обстоятельства сближений Юпитера и Сатурна с радиоисточниками – в табл. 4 и 5 соответственно. В таблицах показаны обстоятельства всех покрытий и сближений на расстояние, не превышающее 10', в 2009–2050 гг. Для Урана и Нептуна покрытий на рассмотренном интервале времени нет. Интересной особенностью полученного нами списка является наличие кратных сближений, возникающих из-за видимого петлеобразного движения планет. При этом планета приближается к радиоисточнику с разных сторон, что может вызвать дополнительный экспериментальный интерес для изучения влияния движущейся планеты на задержку сигнала (член Δ_p).

Таблица 3. Ближайшие покрытия планетами астрометрических радиоисточников

Дата г м д	Планета	Источник	α, δ (J2000.0)		Регионы видимости (в скобках – небольшая часть региона)
			h m s	° ' "	
2011 02 26.6	Венера	1946–200	19 49 53	–19 57 13	(Ю.Америка), Антарктида
2011 05 03.8	Марс	0127+084	1 30 28	+ 8 42 46	С.Америка
2012 12 24.4	Венера	1631–208	16 34 30	–20 58 26	Африка, (Азия), Ю.Америка, Антарктида
2015 08 06.8	Венера	0947+064	9 50 03	+ 6 15 04	Америка
2020 01 16.7	Венера	2220–119	22 22 56	–11 44 26	(Европа), Африка, Ю.Америка
2020 07 17.7	Венера	0446+178	4 49 13	+17 54 32	Америка

Таблица 4. Ближайшие сближения Юпитера с астрометрическими радиоисточниками

Дата г м д	Источник	α и δ источника, J2000		d "	r "	Δ пс	Δ_p пс
		h m s	° ' "				
2009 03 08.6	2104–173	21 07 27	–17 08 10	277	16	127	4.1
2011 07 03.6	0210+119	2 13 05	+12 13 11	341	18	116	3.0
2011 09 13.1	0229+131	2 31 46	+13 22 55	149	23	328	20
2012 02 04.0	0201+113	2 03 47	+11 34 45	490	19	83	1.5
2012 02 20.3	0210+119	2 13 05	+12 13 11	342	18	114	3.0
2013 02 28.1	0420+210	4 23 02	+21 08 02	216	19	191	8.0
2013 10 23.0	0723+219	7 26 14	+21 53 20	123	20	343	25
2013 11 07.0	0725+219	7 28 21	+21 53 06	388	21	114	2.6
2013 11 22.1	0723+219	7 26 14	+21 53 20	351	21	132	3.4

В табл. 4 и 5 видимый угловой диаметр планет вычислен по их среднему радиусу. Значения Δ и Δ_p вычислены для длины базы 8 тыс. км. При этом использовалась формула, с очевидностью следующая из (1) (для ОТО):

$$\Delta = \frac{4GM B}{c^3 D d}, \quad (3)$$

где D – расстояние от Земли до планеты. Для других баз, в том числе космических, легко сделать пересчет путем пропорционального изменения приведенных значений. Как показали результаты эксперимента 2002 г. (Fomalont и Koreikin, 2003) релятивистская

задержка $\Delta p \approx 6$ пс (точнее, эквивалентное ей отклонение луча в 51 мкс дуги) оказалась вполне измеримой на радиоинтерферометре VLBA, США, дополненном 100-м антенной в Эффельсберге, Германия, с ошибкой около 20%. Более далекие сближения, очевидно, имеет смысл наблюдать с космическим интерферометром, для которого наблюдаемый эффект будет больше во столько раз, во сколько база космического интерферометра больше базы наземного.

Таблица 5. Ближайшие сближения Сатурна с астрометрическими радиоисточниками

Дата г м д	Источник	α и δ источника, J2000		d "	r "	Δ пс	Δp пс
		h m s	° ' "				
2009 02 10.2	1125+062	11 27 37	+ 5 55 32	80	9	92	7.7
2009 06 26.0	1109+076	11 12 10	+ 7 24 49	146	8	44	2.0
2015 06 19.1	1548–177	15 51 15	–17 55 02	156	9	44	1.9
2015 11 19.1	1614–195	16 17 27	–19 41 32	64	7	88	9.1

Необходимо отметить, что приведенные выше обстоятельства сближений вычислены для центра Земли. Для реального наблюдателя угловые расстояния будут отличаться от значений, приведенных, в табл. 4 и 5, на величину, достигающую примерно R_0/D , где R_0 – расстояние от центра Земли до середины базы интерферометра, в зависимости от позиционного угла и ориентации базы. Понятно, что это отличие максимально в эпохи противостояний и для наземного интерферометра может достигать до 3" для Юпитера и 1" для Сатурна. Что касается данных табл. 3, они рассчитаны для наземных наблюдений, для космического интерферометра расчет покрытий целесообразно проводить для его конкретной конфигурации.

4. Заключение

В настоящей работе проведено вычисление обстоятельств сближений планет Солнечной системы с астрометрическими радиоисточниками на период 2009–2050 гг. Особый интерес представляют собой покрытия радиоисточников планетами, в моменты которых релятивистские эффекты достигают своей максимальной величины. Это позволяет измерять указанные эффекты с минимальной относительной ошибкой, что имеет первостепенное значение для тестирования теорий гравитации. При этом могут эффективно использоваться все планеты от Венеры до Нептуна.

Наши расчеты показали, что видимые сближения планет с радиоисточниками и даже их покрытия планетами совсем не такие редкие события, как принято считать. При расширении списка радиоисточников в зоне эклиптики увеличится и число рассматриваемых здесь явлений, что еще больше расширит возможности проведения соответствующих экспериментов.

Литература

- Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. ЭПОС – эффективный инструмент для исследования и эфемеридной поддержки наблюдений объектов Солнечной системы. Труды настоящей конференции, с. 179–184.
- Малкин З. М., Львов В. Н., Цекмейстер С. Д. Предстоящие сближения планет с радиоисточниками и возможности их использования для проверки ОТО. Астрон. вестник, 2009, т. 43, No. 4, 327-332.
- Behrend D., Boehm J., Charlot P., et al. Recent Progress in the VLBI2010 Development. In: Observing our Changing Earth: Proc. 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 2-13, M.G. Sideris (Ed.), IAG Symposia, 2008. V. 133. P. 833–840.
- Fey A.L., Ma C., Arias E.F., et al. The second extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-Ext.2. Astron. J. 2004. V. 127. P. 3587–3608.

- Fomalont E.B., Kopeikin S.M.* The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results. *Astrophys. J.* 2003. V. 598. P. 704–711.
- Fomalont E.B., Kopeikin S.M.* Radio interferometric tests of general relativity. A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry, *Proceedings IAU Symposium No. 248*, W.-J. Jin, I. Platais, M. Perryman (eds.). 2008. P. 383–386.
- Kopeikin S.M.* Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry. *Astrophys. J.* 2001. V. 556. P. L1–L5.
- Petrov L.* *Goddard VLBI astrometric catalogue 2008b*, <http://vlbi.gsfc.nasa.gov/solutions/>.
- Treuhaft R.N., Lowe S.T.* A measurement of planetary relativistic deflection. *Astron. J.* 1991. V. 102. P. 1879–1888.

CLOSE APPROACHES OF PLANETS TO GEODETIC RADIO SOURCES IN 2009–2050 AND THEIR USE FOR TESTING OF PHYSICAL THEORIES

Malkin Z.M., L'vov V.N., Tsekmejster S.D.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

During close angular approaches of solar system planets to astrometric radio sources, the apparent positions of these sources shift due to relativistic effects and, thus, these events may be used for testing the theory of general relativity; this fact was successfully demonstrated in the experiments on the measurements of radio source position shifts during the approaches of Jupiter carried out in 1988 and 2002. An analysis performed within the frames of the present work, showed that when a source is observed near a planet's disk edge, i.e., practically in the case of occultation, the current experimental accuracy makes it possible to measure the relativistic effects for all planets. However, radio occultations are fairly rare events. At the same time, only Jupiter and Saturn provide noticeable relativistic effects approaching to the radio sources at angular distances of about a few planet radii. Our analysis resulted in the creation of a catalog of forthcoming occultations and approaches of planets to astrometric radio sources for the time period of 2008–2050, that can be used for planning experiments on testing gravity theories and other purposes. For all events included in the catalog, the main relativistic effects are calculated both for ground-based and space (Earth-Moon) interferometer baselines.