

К вопросу о существовании семейства Сатурна: постоянные Радзиевского-Тиссерана для комет Дарре и Тутля

Усанин В.С.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Ранее считалось общепризнанным деление комет на семейства Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Современная классификация оставляет только семейство Юпитера, а периодические кометы с большими афелийными расстояниями относятся к галлеевскому типу. Переход от старой классификации к новой до сих пор вызывает критику. В качестве одной из характеристик динамической связи комет с планетами предлагался критерий Радзиевского-Тиссерана. Эта постоянная в рамках ограниченной задачи трех тел величина имеет смысл большой полуоси орбиты второго тела, то есть возмущающей планеты. Хотя критерий уже применялся практически, конкретная методика его использования для комет, наблюдавшихся во многих появлениях, пока отсутствовала, что ставило под сомнение полученные результаты. В данной работе критерий Радзиевского-Тиссерана рассмотрен вначале на примере кометы Дарре (6P), достоверно относящейся к семейству Юпитера. Выявлены параметры распределения количества пар появлений по значениям постоянной Радзиевского-Тиссерана, являющиеся более устойчивыми и лучше обнаруживающие присутствие Юпитера. Далее та же методика применена к комете Тутля (8P), наиболее изученной из тех, что могли бы относиться к семейству Сатурна. Показано, что с точки зрения критерия Радзиевского-Тиссерана основным возмущающим телом для кометы Тутля является Юпитер, в области большой полуоси орбиты Сатурна особенности распределения отсутствуют. Таким образом, подтверждается новая классификация. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Concerning the existence of the Saturn family: Radzievskij-Tisserand constants for comets 6P/d'Arrest and 8P/Tuttle

Usanin V.S.

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

Earlier, the division of comets into the families of Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune was regarded as undoubted. The modern classification retains only the Jupiter family, and comets with larger aphelion distances belong to the Halley type. The transition from the old classification to the new one still raises criticism. The Radzievskij-Tisserand criterion was proposed as a measure of the dynamical relation of comets to planets. This quantity, which is constant within the framework of the restricted three-body problem, fits the orbital semimajor axis of the second body, that is, the perturbing planet. Although this criterion was already applied practically, the exact technique of its use for comets observed in multiple apparitions was not still elaborated, which made obtained results doubted. The present work starts with the application of the Radzievskij-Tisserand criterion to 6P/d'Arrest as an example of an undoubted Jupiter-family comet. The most robust and the most sensitive to the Jupiter's presence parameters of the distribution of apparition pairs in Radzievskij-Tisserand constant are revealed. Next, the same technique is applied to 8P/Tuttle which is the most studied of the presumed Saturn family comets. It is shown that, in the aspect of the Radzievskij-Tisserand criterion, Jupiter is the main perturbing body for 8P/Tuttle. Any feature of the distribution in the Saturn's semimajor axis vicinity is not present. So, the new classification is confirmed. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.006

1. Введение

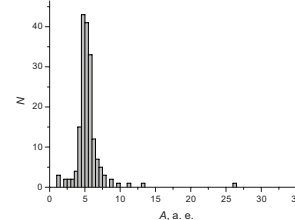
В круговой ограниченной задаче трех тел постоянная Тиссерана, выраженная через элементы орбиты третьего тела (кометы) и большую полуось орбиты второго тела (планеты) вокруг первого (Солнца), является приближительным законом сохранения. Приравняв выражения для постоянной Тиссерана в два момента времени (появления кометы), В.В. Радзиевский получил формулу, определяющую радиус A орбиты планеты, вызвавшей изменение элементов кометной орбиты [1]:

$$A = \left(\frac{2\sqrt{(1+e_1)q_1} \cos i_1 - 2\sqrt{(1+e_2)q_2} \cos i_2}{a_2^{-1} - a_1^{-1}} \right)^{2/3},$$

где q , e , i , $a = q/(1-e)$ — перигелийное расстояние, эксцентриситет, наклон и большая полуось кометной орбиты, индексы 1 и 2 относятся к двум появлениям одной и той же кометы. До сих пор постоянная Радзиевского-Тиссерана применялась мало [2, 3], поэтому оставались неясны следующие аспекты. Каково влияние на A погрешностей в элементах орбит, которое должно быть сильнее на коротких промежутках времени? Каково влияние на A негравитационных эффектов, которое накапливается на длинных промежутках времени? (В.В. Радзиевский связывал с негравитационными эффектами отрицательные значения A , но результат возведения в дробную степень не может быть отрицательным числом.) И, как следствие первых двух, какой выбор появлений 1 и 2 является предпочтительным? Поскольку семейство Юпитера есть как

Таблица 1: Значения A (в а. е.), вычисленные для пар появлений кометы Дарре по элементам орбиты из SBDB.

	1678	1851	1857	1870	1877	1890	1897	1910	1923	1943	1950	1963	1970	1976	1982	1989	1995	2002	2009
2015	—	6.60	6.48	—	4.35	4.25	4.38	11.35	4.69	4.90	4.73	4.68	5.60	5.61	5.17	5.18	4.83	4.60	4.99
2009	—	6.83	6.68	1.14	4.47	4.38	4.47	—	4.76	4.92	4.76	4.73	5.65	5.65	5.20	5.20	4.67	2.20	
2002	—	6.95	6.78	1.29	4.40	4.32	4.42	—	4.67	4.86	4.70	4.66	5.69	5.70	5.27	5.28	5.16		
1995	1.49	7.21	7.00	2.92	4.50	4.42	4.50	—	4.75	4.89	4.75	4.72	5.72	5.73	5.29	5.30			
1989	3.86	—	26.37	4.65	4.88	4.81	4.84	4.36	5.03	5.05	4.98	4.98	6.05	6.05	4.76				
1982	3.87	—	35.44	4.65	4.88	4.81	4.84	4.37	5.03	5.05	4.98	4.98	6.07	6.07					
1976	4.84	4.55	4.54	5.34	5.33	5.28	5.29	5.26	5.45	5.40	5.36	5.39	6.11						
1970	4.82	4.49	4.47	5.32	5.32	5.27	5.27	5.24	5.44	5.39	5.35	5.38							
1963	8.65	5.87	5.82	5.56	7.75	—	2.18	5.71	4.64	5.49	4.93								
1950	7.61	5.80	5.75	5.44	5.76	7.23	9.79	5.58	4.76	6.31									
1943	7.40	5.82	5.78	5.54	5.94	6.82	7.46	5.65	5.11										
1923	13.29	6.03	5.97	5.98	3.14	3.31	3.88	6.07											
1910	2.60	6.01	5.91	6.31	5.53	5.32	5.34												
1897	7.39	5.69	5.65	5.13	4.49	5.52													
1890	7.72	5.69	5.65	5.09	3.57														
1877	8.82	5.80	5.75	5.31															
1870	—	6.05	5.97																
1857	5.04	4.66																	
1851	5.06																		



в старой, так и в новой классификации [4], элементы орбиты кометы этого семейства, имеющей долгую историю наблюдений, могут быть применены для калибровки методики, и только после этого постоянная Радзиевского-Тиссерана станет инструментом решения вопроса о существовании семейств Сатурна, Урана и Нептуна.

2. Методика и результаты расчетов

В данной работе элементы орбит взяты из онлайн-сервиса Лаборатории реактивного движения [5]. В Small-Body Database Browser (SBDB) находятся элементы, полученные из наблюдений. Их изменения от появления к появлению кометы могут быть следствием как различных по природе возмущений, так и ошибок наблюдений. Через веб-интерфейс системы HORIZONS получены элементы, являющиеся результатом численного интегрирования с параметрами, имеющимися в системе; изменения этих элементов свободны от ошибок наблюдений, но зависят от модели негравитационных эффектов. Через telnet-интерфейс HORIZONS параметры объекта могут быть заданы пользователем (в данном случае это элементы последнего появления кометы из SBDB, но без негравитационных параметров).

Комета Дарре (6P) — представитель семейства Юпитера (афелийное расстояние $Q = 5.646$ а. е.), наблюдается с 1678 г., имеет почти постоянные негравитационные параметры. В табл. 1 приведены значения A для всех пар появлений кометы Дарре по элементам орбиты из SBDB и соответствующая гистограмма распределения количества пар появлений N . Прочерки означают отрицательные значения $A^{3/2}$, жирным шрифтом выделены рассматриваемые отдельно пары взаимно дальних (в углу) и близких (на диагонали) по времени появлений. Подобные вычисления были выполнены также по элементам из HORIZONS с негравитационными эффектами и без них. Статистические параметры распределения N по A по всем вариантам вычислений — средние и медианные значения A , а также среднеквадратические отклонения σ_A — даны в табл. 2. Лишь в трех случаях из 11 (27%) отрицательные значения $A^{3/2}$ достоверно связаны с негравитационными эффектами. В пяти случаях (45%) они сохраняются и при учете только гравитационных возмущений. В остальных трех случаях причинами могут быть как немоделируемая часть негравитационных эффектов, так и ошибки наблюдений. Разница между параметрами, вычисленными по элементам из наблюдений и из численного интегрирования с негравитационными эффектами, не носит качественного характера.

Наиболее близка к большой полуоси орбиты Юпитера ($a_{Ю} = 5.204$ а. е.) медиана A кометы Дарре без негравитационных эффектов по парам взаимно дальних появлений, однако она сильно изменяется от негравитационных эффектов и имеет большую дисперсию. По совокупности всех факторов (меньшая дисперсия, меньшие негравитационные эффекты, близость к $a_{Ю}$) наиболее устойчивыми для дальнейших вычислений можно считать среднее по парам взаимно близких появлений и медиану по всем парам появлений. Негравитационные эффекты увеличивают дисперсию.

Комета Тутля (8P) по старой классификации относилась к семейству Сатурна ($Q = 10.373$ а. е.), наблюдается с 1790 г. На основании вышеизложенного, для нее получены результаты, представленные в табл. 3 и 4. Главный максимум распределения N по A находится в области орбиты Юпитера, около орбиты Сатурна ($a_C = 9.582$ а. е.) особенностей нет. Среднее A по всем наблюдениям близко к a_C , но, как показано на примере кометы Дарре, этот параметр не устойчив (это значение возникает от усреднения всего с одной сильно выпадающей парой появлений).

Таблица 2: Статистические параметры распределения количества пар появлений кометы Дарре по A , вычисленные по элементам орбиты из SBDB и HORIZONS.

	Параметр	По наблюдениям	С негравитационными эффектами	Без негравитационных эффектов
	$N(A^{3/2} < 0)$	11	8	5
По всем парам появлений	Среднее A , а. е.	5.62	5.77	5.37
	Медиана A , а. е.	5.27	5.27	5.29
	σ_A , а. е.	3.06	4.21	1.76
Взаимно дальние появления	Среднее A , а. е.	5.95	5.65	5.58
	Медиана A , а. е.	4.47	4.44	5.23
	σ_A , а. е.	5.21	5.27	2.16
Взаимно близкие появления	Среднее A , а. е.	5.15	5.13	5.16
	Медиана A , а. е.	5.30	5.30	5.31
	σ_A , а. е.	0.93	0.93	0.85

Таблица 3: Значения A (в а. е.), вычисленные для пар появлений кометы Тутля по элементам орбиты из SBDB.

	1790	1858	1871	1885	1899	1912	1926	1939	1967	1980	1994
2007	7.23	7.33	6.61	7.09	19.21	1.08	—	200.16	6.35	7.14	4.96
1994	6.65	6.34	6.09	6.27	7.33	—	13.06	7.93	5.82	5.92	
1980	7.27	7.57	6.32	7.03	2.50	4.20	3.67	2.26	5.59		
1967	8.41	—	7.40	—	4.43	4.66	4.42	4.20			
1939	6.12	4.91	5.08	5.01	0.96	5.32	4.89				
1926	5.87	4.91	5.04	4.97	4.40	6.14					
1912	5.90	5.10	5.16	5.14	4.93						
1899	6.32	5.26	5.30	5.31							
1885	7.42	5.58	5.27								
1871	9.24	5.36									
1858	7.15										

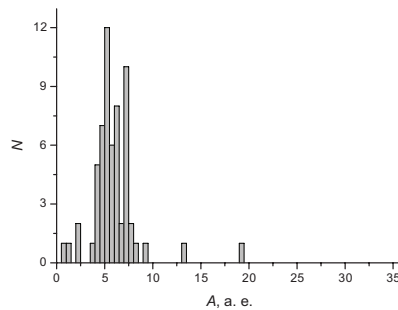


Таблица 4: Статистические параметры распределения количества пар появлений кометы Тутля по A , вычисленные по элементам орбиты из SBDB и HORIZONS.

	Параметр	По наблюдениям	Без негравитационных эффектов
По всем парам появлений	Среднее A , а. е.	9.11	7.36
	Медиана A , а. е.	5.71	5.81
	σ_A , а. е.	24.59	8.74
Взаимно близкие появления	Среднее A , а. е.	5.43	5.44
	Медиана A , а. е.	5.31	5.30
	σ_A , а. е.	0.74	0.76

3. Заключение

Рассмотрены особенности практического применения постоянной Радзиевского-Тиссерана. Показано, что Юпитер является основным возмущающим телом для кометы Тутля, по старой классификации типичной кометы семейства Сатурна.

Автор благодарен заведующей научной библиотекой ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» Елене Владимировне Костылёвой за предоставление необходимой литературы.

Работа выполнена за счет средств субсидии 3.6714.2017/8.9, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. V. P. Tomanov, *Kometnyj Tsirkulyar*, **328**, 1984.
2. V. V. Radzievskii and V. P. Tomanov, *Sov. Astron.*, **30**, 121, 1986.
3. O. A. Gorshkova and V. V. Kuzmichev, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, **22**, 208, 2006.
4. B. G. Marsden, *P&SS*, **57**, 1098, 2009.
5. J. D. Giorgini, D. K. Yeomans, A. B. Chamberlin, P. W. Chodas, et al., in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #28*, 25.04, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts (1996).