

Э. Д. Кузнецов, О. М. Аль-Шиблави, В. Д. Гусев, Д. С. Устинов

Уральский федеральный университет, проспект Ленина, 51, Екатеринбург, 620000, Россия, eduard.kuznetsov@urfu.ru

Введение

- Наблюдения транснептуновых объектов (ТНО) с помощью космических аппаратов, кривые блеска при покрытии звезд ТНО, кривые блеска ТНО, получаемые в результате фотометрических наблюдений, показывают, что большинство исследованных ТНО являются либо **контактно-двойными**, либо **двойными**, либо **кратными системами**.
- Результаты моделирования показывают, что среди **холодных объектов пояса Койпера** реализуются условия для сохранения тесных двойных ТНО с компонентами примерно равных масс.
- Дальнейшая эволюция этих двойных систем может приводить к формированию **контактно-двойных ТНО** в результате приливного уменьшения большой полуоси орбиты и мягкого слипания компонент.
- Другой сценарий, опять же под действием приливов, может приводить к уходу спутника и формированию **пары ТНО** на близких орбитах.
- Контактно-двойные ТНО также могут быть источниками **пар ТНО** на близких орбитах в случае разрушения контактно-двойного ТНО вследствие удара или вращательного распада при высокой угловой скорости осевого вращения.
- Данная работа посвящена поиску пар ТНО на близких орбитах.

Поиск пар ТНО на близких орбитах

- Поиск молодых пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а.е. выполнялся с использованием **метрики Холшевникова** (Kholshchevnikov et al., 2016) в пространстве кеплеровых орбит.
 - **Метрика ρ_2** определена в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите).
 - **Метрика ρ_5** определена в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов как минимальное значение ρ_2 при всех возможных положениях узлов и перигелиев орбит.
- Анализ метрик ρ_2 и ρ_5 позволяет выделить **кандидатов в молодые пары ТНО**, для которых положения линий узлов и линий аписид должны быть близки, а следовательно, $\rho_2 \approx \rho_5$.
- Использован каталог элементов орбит AstDyS для нумерованных объектов и объектов, наблюдавшихся в нескольких оппозициях, на эпоху MJD 58800 (13.11.2019).
- **Критерии отбора** кандидатов в молодые пары ТНО: $\rho_2 < 0.07$ (а.е.)^{1/2}, $\rho_5 < 0.07$ (а.е.)^{1/2} и $\rho_2 - \rho_5 < 0.015$ (а.е.)^{1/2}. Также отбирались пары, включающие двойные ТНО, при $\rho_2 < 0.12$ (а.е.)^{1/2} и пары, в которых оба ТНО двойные — $\rho_2 < 0.3$ (а.е.)^{1/2}.
- Было обнаружено:
 - **26 пар ТНО** с метрикой $\rho_2 < 0.07$ (а.е.)^{1/2} ($\rho_2^2 < 0.0049$ а.е. = $0.73 \cdot 10^6$ км) (таблица 1),
 - **22 пары, в которых один из ТНО является двойным** при $\rho_2 < 0.12$ (а.е.)^{1/2} ($\rho_2^2 < 0.0144$ а.е. = $2.15 \cdot 10^6$ км) (таблица 2),
 - **11 пар двойных ТНО** при $\rho_2 < 0.3$ (а.е.)^{1/2} ($\rho_2^2 < 0.009$ а.е. = $13.5 \cdot 10^6$ км) (таблица 3).

Обсуждение результатов

- Анализ элементов орбит ТНО, входящих в пары, приведенные в таблице 1, показал, что все объекты можно отнести к **холодным классическим объектам пояса Койпера**. Максимальные эксцентриситеты орбит у ТНО, входящих в пару 2004 VA131 — 2004 VU131, составляют 0.0937 и 0.0945, соответственно. Максимальные наклоны орбит достигают 5° для ТНО пары (500839) 2013 GW137 — 2015 GZ58.
- Наиболее вероятными механизмами образования пар ТНО представляются: разрушение контактно-двойных ТНО в результате удара или вращательной неустойчивости, распад двойных или кратных систем ТНО.
- Возможно, что пара **2004 VA131 — 2004 VU131** с минимальными метриками ρ_2 и ρ_5 (см. таблицу 1) является **самой молодой парой ТНО** из известных на сегодняшний день. Проверка этого вывода требует исследования вероятностной эволюции. Результаты численного моделирования с помощью комплексов программ Orbit9 и Mercury на основе номинальных орбит ТНО 2004 VA131 и 2004 VU131 из каталога AstDyS на эпоху MJD 58800 показывают, что ближайшее к современной эпохе низкоскоростное сближение на расстояние менее радиуса Хилла при скорости, меньшей второй космической, могло реализоваться 15.6 лет назад.

Заключение

- Проведенное исследование является начальным этапом изучения динамических свойств пар ТНО на близких орбитах.
- В дальнейшем предполагается **исследование вероятностной эволюции** пар ТНО с целью уточнения их возраста. Будет использоваться программа **Orbit9**, выполняющая совместное интегрирование уравнений движения восьми больших планет и карликовой планеты Плутон.
- Отдельно будут исследоваться пары, в которые входят **двойные ТНО**. Эти пары представляют особый интерес, т.к. они могли образоваться в результате распада кратных ТНО и/или разрушения контактно-двойных ТНО.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Список литературы

1. Kholshchevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. V. 462. P. 2275–2283.

Таблица 1. Пары ТНО на близких орбитах

Пара ТНО		ρ_2 , (а.е.) ^{1/2}	ρ_5 , (а.е.) ^{1/2}
2004 VA131	2004 VU131	0.0195	0.0054
1999 HV11	2015 VF172	0.0348	0.0316
2003 QL91	2015 VA173	0.0366	0.0331
2013 SD101	2015 VY170	0.0438	0.0392
2002 CY154	2005 EW318	0.0461	0.0377
(88268) 2001 KK76	2015 GV58	0.0542	0.0432
2000 PW29	2015 GL58	0.0587	0.0286
(468422) 2000 FA8	2000 YV1	0.0591	0.0420
2003 QD91	2015 VC173	0.0592	0.0387
2000 ON67	2013 UN17	0.0597	0.0457
2002 FW36	2015 VF170	0.0600	0.0239
(500839) 2013 GW137	2015 GZ58	0.0602	0.0182
(88268) 2001 KK76	2013 UL17	0.0620	0.0445
2013 UR17	2015 GY58	0.0632	0.0518
2000 PM30	2001 OZ108	0.0637	0.0573
2003 QX90	2013 UN17	0.0638	0.0586
1997 CT29	2015 VQ169	0.0643	0.0380
(534405) 2014 TW85	2002 PV170	0.0645	0.0389
2009 UF156	2013 SX100	0.0653	0.0137
1998 WX24	2001 FK185	0.0654	0.0427
(534405) 2014 TW85	2015 GS56	0.0659	0.0594
2003 HZ56	2010 NF146	0.0660	0.0451
(33001) 1997 CU29	1999 CN119	0.0672	0.0598
2004 DM71	2005 EC318	0.0675	0.0505
2002 CS154	2002 VB131	0.0679	0.0674
2003 YN179	2010 NF146	0.0689	0.0539
2001 HA59	2015 VH170	0.0699	0.0515

Таблица 2. Пары ТНО на близких орбитах, в которых один из компонентов является двойным

Двойной ТНО	ТНО	ρ_2 , (а.е.) ^{1/2}	ρ_5 , (а.е.) ^{1/2}
2005 GD187	2001 OG109	0.0731	0.0664
(275809) 2001 QY297	2015 VB169	0.0732	0.0654
(469610) 2004 HF79	1997 CT29	0.0791	0.0546
2005 GD187	2015 VV170	0.0918	0.0664
2002 VD131	(505446) 2013 SP99	0.0976	0.0945
2004 HK79	2015 VB171	0.0996	0.0657
2006 JV58	2004 KF19	0.0998	0.0707
(275809) 2001 QY297	2006 HB123	0.1039	0.0856
2003 QY90	2002 CU154	0.1049	0.0957
2015 RP280	2012 HE85	0.1083	0.0933
2000 CF105	2015 GJ57	0.1110	0.0977
2003 UN284	1996 TK66	0.1124	0.0834
2015 VW168	2013 UL17	0.1133	0.0989
2004 HK79	2004 VB131	0.1135	0.0674
(505447) 2013 SQ99	2004 HE79	0.1141	0.0872
2004 HK79	2015 GA57	0.1144	0.0199
2005 GD187	(420356) Praamzius	0.1148	0.0889
2004 HK79	2004 VV131	0.1159	0.0678
2004 PW117	2015 GT57	0.1174	0.0978
2002 VD131	2002 CZ224	0.1184	0.0983
2004 PW117	2013 TL172	0.1188	0.0265
(469610) 2004 HF79	2013 UL17	0.1209	0.0837

Таблица 3. Пары ТНО на близких орбитах, в которых оба компонента являются двойными

Пары двойных ТНО		ρ_2 , (а.е.) ^{1/2}	ρ_5 , (а.е.) ^{1/2}
2003 QY90	2005 CE81	0.0859	0.0840
2000 CF105	2006 BR284	0.1017	0.0756
(134860) 2000 OJ67	(469610) 2004 HF79	0.1189	0.0981
(364171) 2006 JZ81	(505447) 2013 SQ99	0.1633	0.0828
(469610) 2004 HF79	2003 HG57	0.1634	0.0761
2004 HK79	2007 DS101	0.1726	0.0699
(275809) 2001 QY297	2004 HK79	0.1918	0.0460
2001 QQ322	2003 WU188	0.1961	0.0871
(134860) 2000 OJ67	(524366) 2001 XR254	0.2025	0.0965
(134860) 2000 OJ67	2005 GD187	0.2387	0.0472
(524366) 2001 XR254	2015 VW168	0.3020	0.0980