ОЦЕНКА ВОЗРАСТА ПАР АСТЕРОИДОВ ГРУППЫ ФАЭТОНА

Кузнецов Э.Д., Галиуллин М.И., Левитская Т.И.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, eduard.kuznetsov@urfu.ru

Известно, что метеорный поток Геминиды связан с астероидом (3200) Phaethon, который относится к астероидам, сближающимся с Землей. В работе [Ohtsuka et al., 2006] высказано предположение, что астероид (155140) 2005 UD является фрагментом астероида (3200) Phaethon. Эта же точка зрения обсуждается в работе [Devogèle et al., 2020]. Астероиды (3200) Phaethon и (155140) 2005 UD являются основной и вторичной целями космического проекта Destiny+ японского аэрокосмического агентства JAXA. Запуск космического аппарата Destiny+ запланирован на 2024 финансовый год.

В работе [Hanuš et al., 2016] сделан вывод о том, что орбитальная эволюция астероидов (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC подобна орбитальной эволюции астероида (3200) Phaethon. Анализ разности угловых элементов орбит (долгот узлов и перигелиев) исключает отделение (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC от (3200) Phaethon в недавнем прошлом. Вероятно, эти события имели место более 100 тыс. лет назад.

В работе [Ryabova et al., 2019] было исследовано поведение минимального расстояния пересечения орбиты MOID между орбитами астероидов (3200) Phaethon, (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC на интервале 5 тыс. лет в прошлое. Сделан вывод, что астероиды (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC не являются членами метеороидного комплекса Фаэтон–Геминиды. Также отмечено очень тесное сближение между астероидами (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC, имевшее место в 1422 г.

В настоящей работе выполнено исследование вероятностной эволюции астероидов группы Фаэтона: (3200) Phaethon, (155140) 2005 UD и (225416) 1999 YC на интервалах времени до 1 млн лет с целью получения оценок возраста пар астероидов. Мы используем термин «группа Фаэтона», чтобы отличать ее от «метеороидного комплекса Фаэтон–Геминиды».

Моделирование вероятностной эволюции выполнялось с помощью программы Orbit9, входящей в программный комплекс OrbFit (http://adams.dm.unipi.it/orbfit/). Учитывались возмущения от восьми больших планет, карликовой планеты Плутон, влияние эффекта Ярковского, сжатие Солнца и релятивистские эффекты. Для каждого астероида генерировалось 50 клонов орбит на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений (см., например, [Kuznetsov et al., 2022]). Для этого использовались оскулирующие элементы орбиты и ковариационные матрицы на эпоху MJD 59000 (31.05.2020) с сайта AstDyS (https://newton.spacedys.com/astdys/).

Суточный эффект Ярковского учитывался в форме дрейфа большой полуоси орбиты $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t$. Для (3200) Phaethon использовалось значение $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t = -(6.9 \pm 1.9)\cdot 10^{-4}$ a.e./(млн лет) [Hanuš et al., 2018]. Для (155140) 2005 UD скорость дрейфа $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t$ полагалась равной нулю, т.к. угол наклона оси вращения астероида к плоскости его орбиты $\varphi \approx 87°$ [Huang et al., 2021]. Для астероида (225416) 1999 YC оценок скорости дрейфа большой полуоси по результатам наблюдений нет, поэтому была получена оценка максимума модуля скорости дрейфа $|\mathrm{d}a/\mathrm{d}t|_{\max} = 7.8\cdot 10^{-5}$ a.e./(млн лет) с использованием нормировки физических и динамических параметров астероида по отношению к соответствующим параметрам астероида (101955) Bennu [Spoto et al., 2015; Del Vigna et al., 2018]. Для (225416) 1999 YC рассматривалось пять вариантов эволюции при значениях скорости дрейфа, соответствующих различной ориентации оси вращения астероида относительно плоскости его орбиты: $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t = 0$ при $\varphi = 90°$ или 270°; $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t = \pm 1/2\ |\mathrm{d}a/\mathrm{d}t|_{\max}$ при $\cos(\varphi) = \pm 1/2$ соответственно; $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t = \pm|\mathrm{d}a/\mathrm{d}t|_{\max}$ при $\phi = 0°$ и 180° соответственно.

К стандартным методам определения возраста пар астероидов на близких орбитах относятся: анализ низкоскоростных сближений астероидов (см., например, [Pravec et al., 2019]), анализ минимальных расстояний между орбитами (см., например, [Kuznetsov et al., 2020]), анализ одновременных сближений линий узлов и линий апсид орбит астероидов (см., например, [Rosaev, Plávalová, 2017]).

По результатам моделирования на интервале времени 1 млн лет не были выявлены парные низкоскоростные сближения для астероидов группы Фаэтона. Это связано с тем, что большие полуоси орбит испытывают резкие скачкообразные изменения вследствие частых сближений с планетами земной группы – процесс гравитационного рассеяния. Анализ эволюции расстояний между орбитами, вычисленных с помощью метрик Холшевникова [Kholshevnikov et al., 2016], не выявил тесных сближений орбит. Ин-

тересные результаты были получены при анализе вековой эволюции угловых элементов – долготы восходящего узла Ω и аргумента перицентра g. Моменту образования пары должны соответствовать условия схождения орбит – одновременного обращения в нуль разностей долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и аргументов перицентров Δg сравниваемых орбит.

Анализ эволюции разностей долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и аргументов перицентров Δg показал следующее. Для пары (3200) Phaethon – (155140) 2005 UD на рассматриваемом интервале времени 1 млн лет возможность выполнения условия схождения орбит наступает после момента 100 тыс. лет при интегрировании в прошлое. Это связано с тем, что оба астероида находятся в метастабильном резонансе Лидова-Козаи [Michel, Thomas, 1996], защищающем астероиды от очень тесных сближений с планетами. В случае астероидов, сближающихся с Землей, либрация аргумента перицентра может происходить относительно значений 0° или 180°, а не 90° или 270°, как в классическом случае. Для астероида (3200) Phaethon при интегрировании в прошлое в первые 100 тыс. лет для всех клонов реализуется либрация аргумента перицентра g относительно 0°, а после этого момента возможны переходы к либрации относительно 180°. В случае астероида (155140) 2005 UD на интервале 700 тыс. лет g либрирует относительно 180°, после чего возможны переходы к либрации относительно 0°. Такое поведение аргумента перицентра допускает сближение орбит астероидов (3200) Phaethon и (155140) 2005 UD не ранее 100 тыс. лет назад.

Астероид (225416) 1999 YC также находится в метастабильном резонансе Лидова-Козаи. В отличие от (3200) Phaethon и (155140) 2005 UD аргумент перицентра орбиты астероида (225416) 1999 YC изменяет положение либрации между 0° и 180°, что делает возможным схождение орбиты (225416) 1999 YC как с орбитой (3200) Phaethon, так и с орбитой (155140) 2005 UD. В случае, если астероид (225416) 1999 YC – результат фрагментации астероида (155140) 2005 UD, возраст пары может составлять 100 тыс. лет или более. Если астероид (225416) 1999 YC является фрагментом (3200) Phaethon, то возраст пары превышает 350 тыс. лет, что не противоречит выводам работы [Hanuš et al., 2016].

Полученные результаты указывают на сложную стохастическую и резонансную динамику астероидов группы Фаэтона. В дальнейшем планируется продолжить исследование с применением уточненной модели негравитационных сил, учитывающей влияние эффекта Ярковского и YORP-эффекта на основе теплофизических параметров астероидов.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Del Vigna A., Faggioli L., Milani A., Spoto F., Farnocchia D., Carry B. Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // Astron. and Astrophys. 2018. V. 617. P. A61.
2. Devogèle M., MacLennan E., Gustafsson A., Moskovitz N., Chatelain J., Borisov G., Abe S., Arai T., Fedorets G., Ferrais M., Granvik M., Jehin E., Siltala L., Pöntinen M., Mommert M., Polishook D., Skiff B., Tanga P., Yoshida F. New Evidence for a Physical Link between Asteroids (155140) 2005 UD and (3200) Phaethon // The Planetary Science Journal. 2020. V. 1(1). P. 15.
3. Hanuš J., Delbo M., Vokrouhlický D., Pravec P., Emery J.P., Alí-Lagoa V., Bolin B., Devogèle M., Dyvig R., Galád A., Jedicke R., Kornoš L., Kušnirák P., Licandro J., Reddy V., Rivet J.-P., Világi J., Warner B.D. Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters // Astron. and Astrophys. 2016. V. 592. P. A34.
4. Hanuš J., Vokrouhlický D., Delbo M., Farnocchia D., Polishook D., Pravec P., Hornoch K., Kučáková H., Kušnirák P., Stephens R., Warner B. (3200) Phaethon: Bulk density from Yarkovsky drift detection // Astron and Astrophys. 2018. V. 620. P. L8.
5. Huang J.-N., Muinonen K., Chen T., Wang X.-B. Photometric study for near-Earth asteroid (155140) 2005 UD // Planetary and Space Science. 2021. V. 195. P. 105120.
6. Kholshevnikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. 2275–2283.
7. Kuznetsov E.D., Al-Shiblawi O.M., Gusev V.D. Dynamic Evolution of Pairs of Trans-Neptunian Objects // Solar System Research. 2022. V. 56(2). P. 122–134.
8. Kuznetsov E.D., Rosaev A.E., Plavalova E., Safronova V.S., Vasileva M.A. A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // Solar System Research. 2020. V. 54(3). P. 236–252.
9. Michel P., Thomas F. The Kozai resonance for near-Earth asteroids with semimajor axes smaller than 2AU // Astron. and Astrophys. 1996. V. 307. P. 310–318.
10. Ohtsuka K., Sekiguchi T., Kinoshita D., Watanabe J.-I., Ito T., Arakida H., Kasuga T. Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? // Astron. and Astrophys. 2006. V. 450. P. L25–L28.

11. Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheirich P., Ďurech J., Scheeres D.J., Kušnirak P., Hornoch K., Galad A., Pray D.P., Krugly Yu. N., Burkhonov O., Ehgamberdiev Sh. A., Pollock J., Moskovitz N., Thirouin A., Ortiz J.L., Morales N., Husarik M., Inasaridze R. Ya., Oey J., Polishook D., Hanuš J., Kučakova H., Vraštil J., Vilagi J., Gajdoš Š., Kornoš L., Vereš P., Gaftonyuk N.M., Hromakina T., Sergeyev A.V., Slyusarev I.G., Ayvazian V.R., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Colas F., Vachier F., Slivan S., Skiff B., Marchis F., Ergashev K.E., Kim D.-H., Aznar A., Serra-Ricart M., Behrend R., Roy R., Manzini F., Molotov I.E. Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. V. 333. P. 429–463.
12. Rosaev A., Plávalová E. On the young family of 18777 Hobson // Icarus. 2017. V. 282. P. 326–332.
13. Ryabova G.O., Avdyushev V.A., Williams I.P. Asteroid (3200) Phaethon and the Geminid meteoroid stream complex // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2019. V. 485(3). P. 3378–3385.
14. Spoto F., Milani A., Knezevic Z. Asteroid family ages // Icarus. 2015. V. 257. P. 275–289.