



Брзе пруге Сунчевог система

Које извиру из 5:2 резонанце

Наташа Тодоровић

Астрономска опсерваторија у Београду

29. новембар 2016.



Увод

- У овом тренутку откривено је 584 826 малих тела у Сунчевом систему
- <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/>
- 15 254 објеката у близини Земље (ОБЗ)
- Near Earth Objects (NEOs)
- <http://newton.dm.unipi.it/neodys/>

Дефиниција ОБЗ

Дефиниција

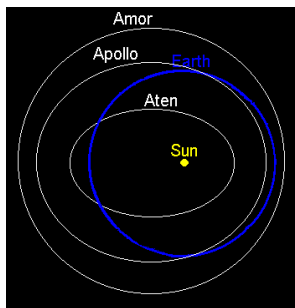
Објекти у близини Земље су они објекти чије је перихелско растојање мање од $q < 1.3AU$.

Rabinowitz, D. L., Bowell, E., Shoemaker, E. M. and Muinonen, K., 1994, (T. Gehrels and M. S. Matthews, Eds.), 285, Univ. of Arizona Tucson

Amors $1.02AU \leq q \leq 1.3AU$

Apollos $a \geq 1AU, q \leq 1.02AU$

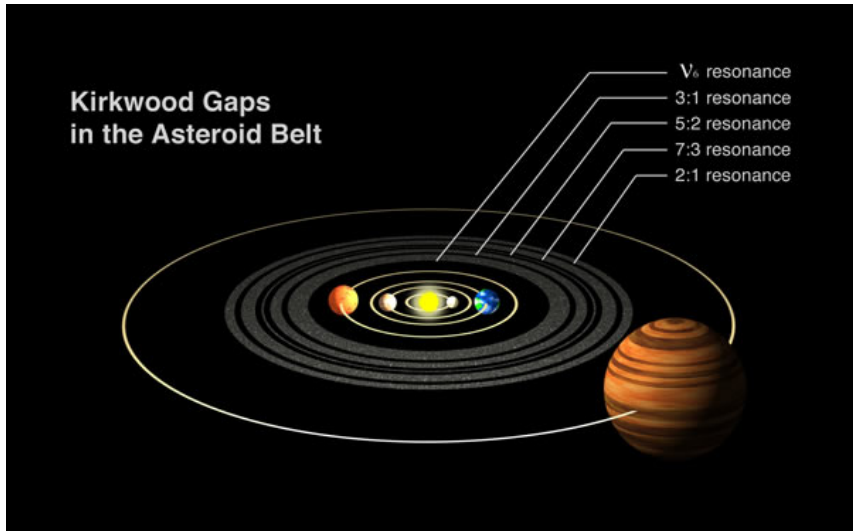
Athens $a < 1AU, Q \geq 0.983AU$



Нека својства ОБЗ

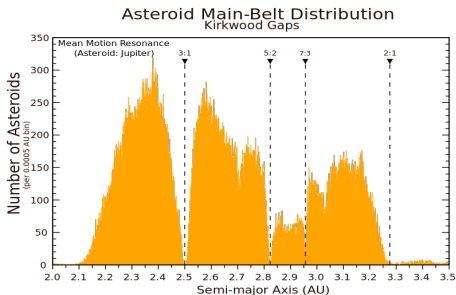
- Кратко бораве у близини Земље ($T \sim 10^6 - 10^7$ година)
- Што наводи на закључак да нису ту од почетка, тј. да
- Постоји механизам који 'довози' астероиде у ОБЗ.
- Механизме транспорта у ОБЗ потражићемо најпре у најјачим резонанцама Астероидног прстена.

Расподела у Астероидном прстену није равномерна



Систематска нумеричка анализа главних резонанци у Астероидном прстену

- *Gladman, B.J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappalá, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschlé, C., Levison, H. F., Bailey, M., Duncan, M., 1997, Science, 277, 197*
- Секуларна резонанца ν_6 , 3 : 1 и 5 : 2 РСК са Јупитером извори ОБЗ
- **5:2 резонанца нема способност транспорта веће количине материјала у ОБЗ.**
- *Bottke, W., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J-M., Levison, H., Michel, P. and Metcalfe, T., 2002, Icarus, 156, 399*



Метеорске кише Геминиде



Астероид Фајетон - (3200) Pheaton

- Матично тело Геминида је астероид Фајетон (3200 Pheaton)
- Спектрални тип указује на то да је Фајетон био члан Палас фамилије која се налази у спољном делу Астероидног прстена.
- Вероватноћа да је Фајетон стигао из спољног прстена је 0 (*Bottke et al, Icarus 2002*)
- 5:2 и 7:3 РСК укупно имају вероватноћу 1% (*de León, J., Campins, H., Tsiganis, K., Morbidelli, A. and Licandro, J., 2010, A&A, 513, A26*).
- Низ других примера

Неслагање

Спектрална анализа

- Све већи број ОБЗ и метеора који су стигли из спољног прстена преко 5:2 резонанце.

Динамчки модели

- 5:2 резонанца и спољни прстен не могу да емитују велику количину материјала у ОБЗ.

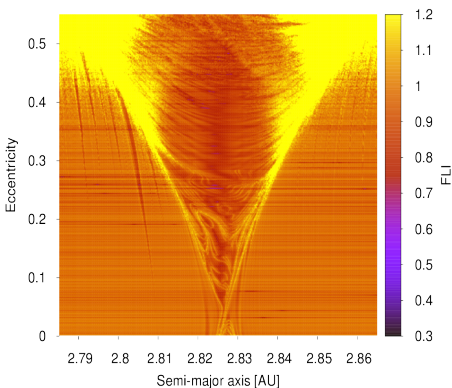
Циљ

- Циљ нам је да преиспитамо динамику 5:2 резонанце.

Метод

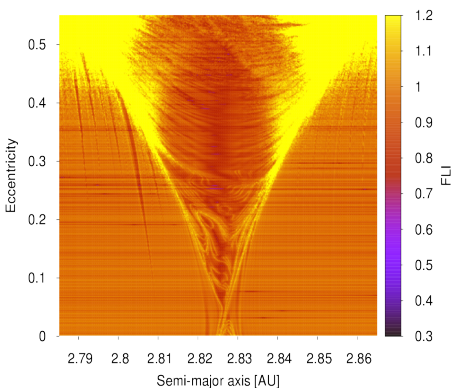
- Мапирамо 5:2 резонанцу
- Користимо индикатор хаоса - Брзи Индикатор Љапунова
- FLI - Fast Lyapunov Indicator
- софтвер ORBIT9
- <http://adams.dm.unipi.it/orbit/>

Динамички профил 5:2 резонанце у средњем кретању



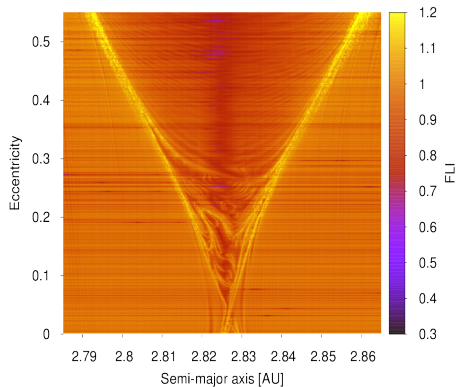
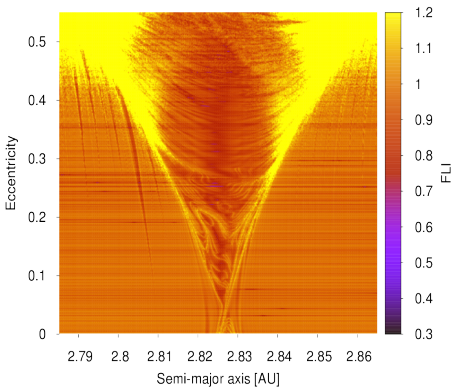
- $[a, e] = [2.785, 2.865] \times [0.0, 0.55]$
- Инклинација $i = 10 \text{ deg}$
- Средња аномалија $M = 99 \text{ deg}$
- Лонгитуда перихела $\omega = 70 \text{ deg}$
- Лонгитуда чвора $\Omega = 260 \text{ deg}$
- Модел укључује све планете

Нумерички параметри

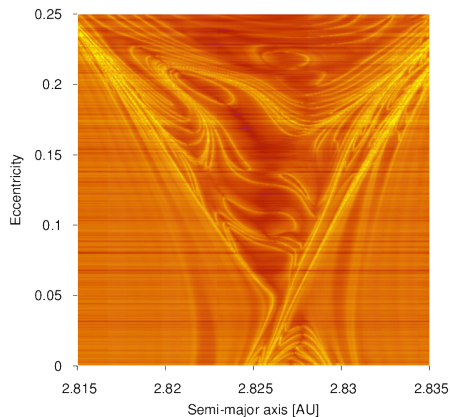


- 500 × 500 тачака
- FLI за 10 000 година
- Хаотичне орбите имају високу вредност FLI - жуте
- Стабилније орбите имају нижу вредност FLI - црвене
- 30 минута рачунског времена
- Сепаратриса, $e > 0.3$ хаотично
- Велики број слабих резонанци ван 5:2 резонанце
- Јасна структура хаоса у резонанци за $e < 0.3$

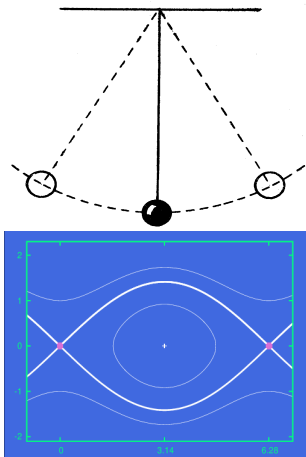
Динамички профил 5:2 резонанце у средњем кретању са и без унутрашњих планета



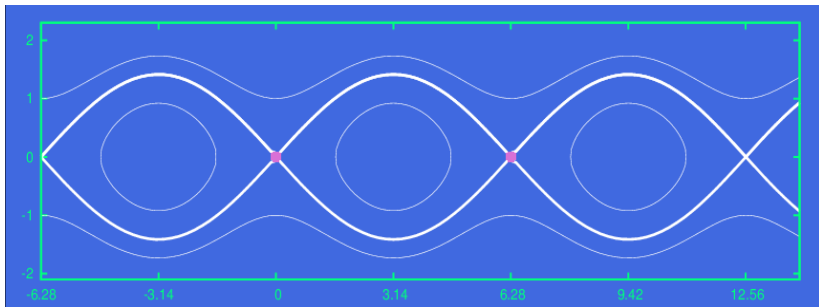
Фина структура хаоса у 5:2 резонанци на малим ексцентричностима



Клатно - резонанца

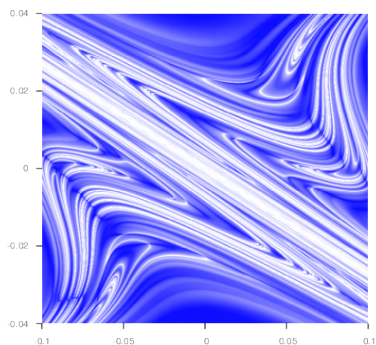


- Кретање клатна је динамички еквивалентно кретању у резонанци
- Стабилна или елиптична тачка (+)
- Нестабилна или хиперболичка тачка •
- Сепаратриса
- Унутар сепаратрисе - либрација
- Изван сепаратрисе - кружно кретање
- Горња грана сепаратрисе - Стабилна многострукост W_S
- Доња грана сепаратрисе - Нестабилна многострукост W_U

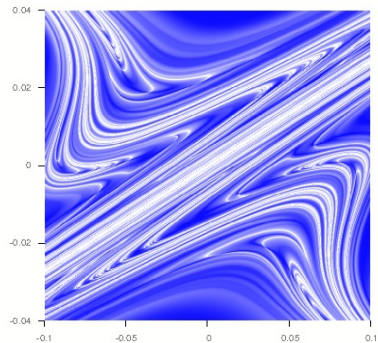
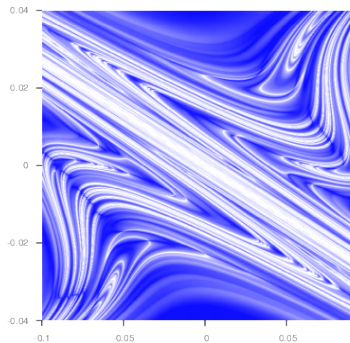


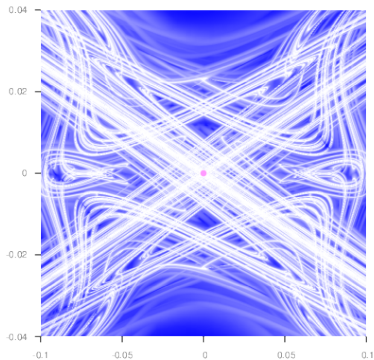
- Систем је интеграбилан, периодичан, симетричан (идеализован систем).
- Када укључимо поремећај - хиперболичке тачке прве потпадају под дејство поремећаја.
- Сепаратриса тј. стабилна и нестабилна многострукост W_s и W_n , се деформишу у околини нестабилне тачке.

Деформација стабилне многуструкости W_S у околини хиперболичке тачке



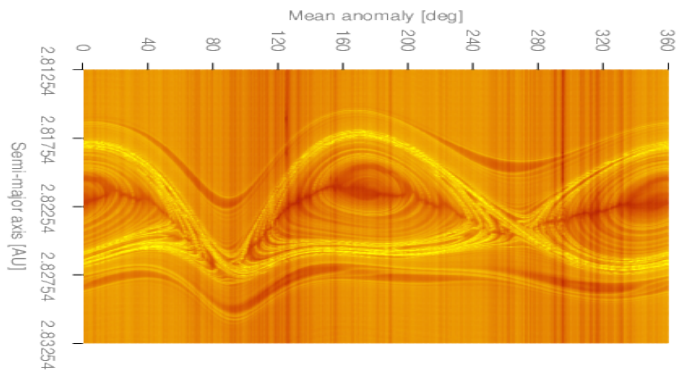
- Хиперболичке стабилне многуструкости W_S
- Не налазе се само у равни слике
- Хиперболичке структуре су извори нестабилности.

Хиперболичке многострукости W_S и W_N 

Хиперболичке многострукости W_S и W_n 

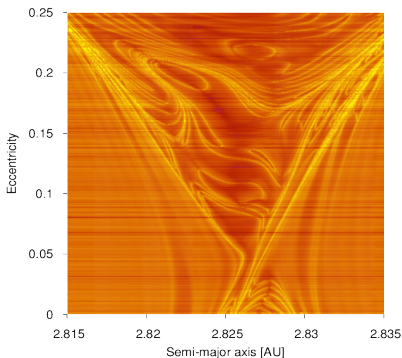
- $W_S \cap W_n = \{\text{хомоклиничке тачке}\}$
- Хомоклиничких тачака има бесконачно много.
- Хомоклиничке тачке отварају могућност преласка са једне многострукости на другу (са W_S на W_n).
- Овај механизам лежи у основи динамичког транспорта у фазном простору.
- Представља основни принцип хаотичне дифузје која се генерише у резонанци.

Фазни профил 5:2 резонанце



- (a, M)
- $(a, e, i, M, \Omega, \omega)$

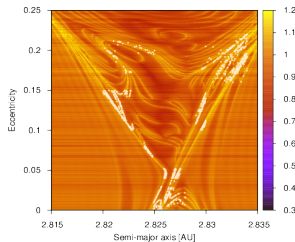
Хиперболичке многострукости 5:2 резонанце

 $(a, e, i, M, \Omega, \omega)$ 

- Хиперболичке многострукости су извори **брзог транспорта**.
- *Simo, NATO ASI Ser, 1999*
Villac, B. F., 2008, CMDA, 2008
Koon et al, Marsden Books. 2011
- Користимо ORBIT9 и реалан модел Сунчевог система → ове структуре су реалне.
- 2D пресек 6D простора
- Парцијалан увид у динамику реалног простора.

1000 фиктивних астероида на хиперболичким многострукостима

- 1000 фиктивних астероида (беле тачке)
- Интегралимо их на 5Myr
- $a < 0$ хипербола -тело је **напустило** систем
- $e > 1$ парабола -тело је **напустило** систем
- $a > 100\text{AU}$ -тело је **напустило** систем
- Судари-колизије нису регостровани



Транспорт у оклину Земље



Транспорт у оклину Земље

Ранији резултати

- **10%** има шансу да стигне у ОБЗ јер остатак избацује Јупитер (*Morbidelli and Gladman, Meteoritics Planet. Sci., 1998*)
- **8%** долази из спољног дела Астероидног прстена (*Bottke et al, 2002*),
- **6%** долази из области иза 5:2 РСК (*de Elía and Brunini, A., A&A, 2007*)
- Време $\sim 10^5$ година

Транспорт у оклину Земље

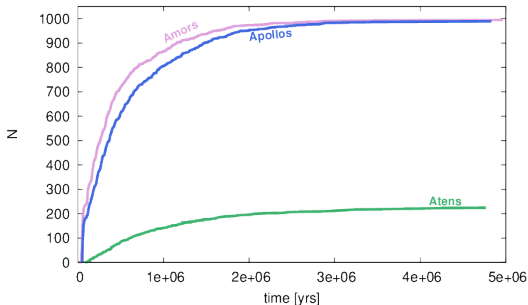
Ранији резултати

- **10%** има шансу да стигне у ОБЗ јер остатак избацује Јупитер (*Morbidelli and Gladman, Meteoritics Planet. Sci., 1998*)
- **8%** долази из спољног дела Астероидног прстена (*Bottke et al, 2002*),
- **6%** долази из области иза 5:2 РСК (*de Elía and Brunini, A., A&A, 2007*)
- Време $\sim 10^5$ година

Ове интеграције

- Од 1000 објеката **995** је стигло у близину Земље
- **99.5%** је у неком тренутку имало $q < 1.3AU$
- Ову разлику приписујемо избору почетних услова

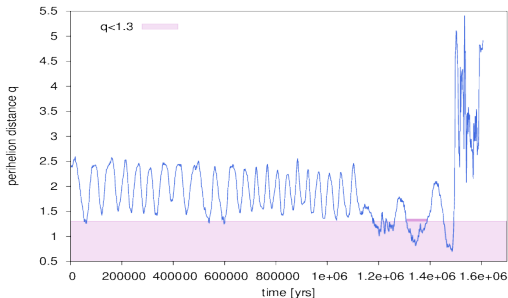
Транспорт у оклину Земље - број објеката



- Број објеката који су транспортовани у три области ОБЗ
- Амор 995, Аполо 991 и Атен 225
- Први регистровани уласци у ОБЗ после 35 000, 49 500 и 82 000 година
- $T_{med} = \{0.26Myr, 0.35Myr, 0.68Myr\}$

Време проведено у близини Земље

- Тешкоће због вишеструких долазака у ОБЗ
- Пример вишеструких улазака у ОБЗ за један тест објекат на слици.
- ОБЗ је осенчена област испод $q < 1.3AU$
- Средња вредност првог боравка у ОБЗ је $T = 37000$ година
- Средња вредност најдужег боравка у ОБЗ је $T = 1.9Myr$
- *Bottke at al, 2002*: $T \sim 2Myr$



Миграције ка Сунцу

	Gladman et al 1997	Bottke et al 2002	овде
Број објеката	146	359	1000
Време интеграције (Myr)	100	100	5
$a < 2AU$ (%)	1.4	< 6	25.3
$a < 1AU$ (%)	0	-	23.4
$q < 0.005AU$ (%)	7.5	-	7

Сан грејзери $q < 0.005AU$

- $q = a(1 - e)$
- Од 70 објеката који су достигли вредност $q < 0.005$,
69 објеката $e \rightarrow 1$, 1 објекат $a \rightarrow 0$

Блиски прилази

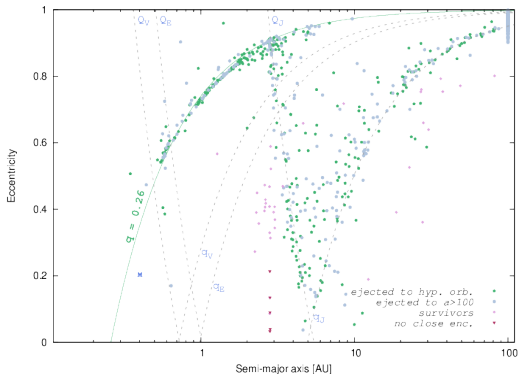
Импровизација колизије

ORBIS не региструје колизије. Зато бројимо објекте који су имали блиске прилазе са сваком планетом у моделу, на удаљеност која одговара радијусу Хилове сфере за сваку планету. Понављамо интеграције за мање удаљености d док год постоје блиски прилази.

Планета	%
Венера	46.0
Земља	57.4
Марс	63.0
Јупитер	98.5
Сатурн	67.3
Уран	42.6
Нептун	25.1
без блиских прилаза	0.6

- $d = 0.007AU$ за унутрашње планете
- $D = 0.7AU$ за спољашње планете
- 574 тела поново интегралимо за $d = 0.001AU$
- 5 тела прилазе Земљи на удаљеност $d \leq 0.001AU$
- 2 тела су имала прилазе за $d = 0.0007AU$
- Вероватноћа судара са Земљом је
- **5:2 PCK је $P_{col} \simeq 10^{-4}$**
- *Morbidelli and Gladman. 1998*
- *de Elía and Brunini, 2007*

Коначне дестинације

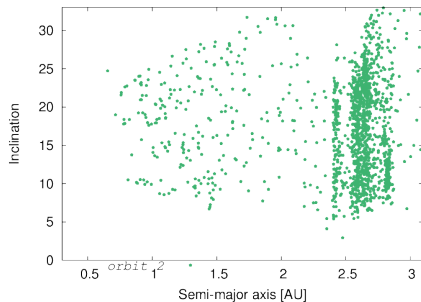
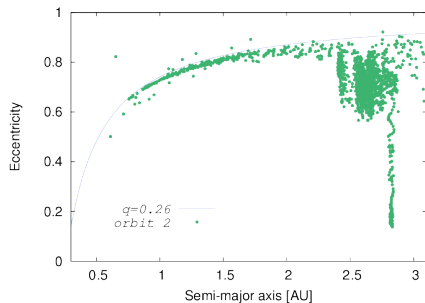


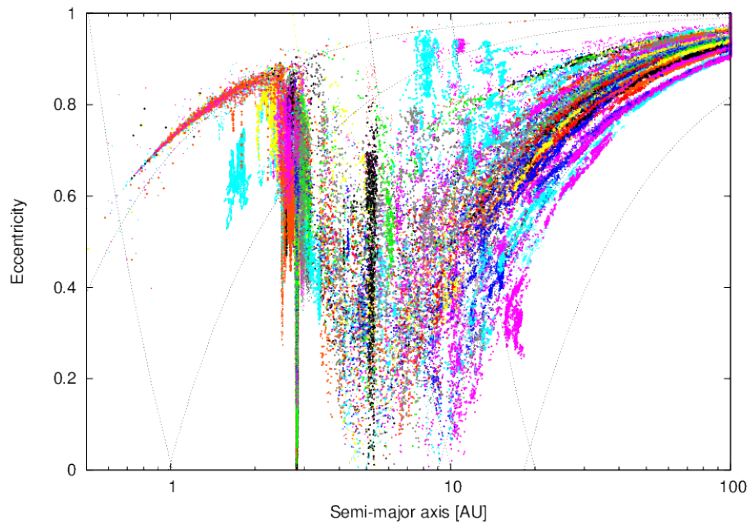
- 42 преживела, 6 је остало у 5:2 резонанци и није имало блиске прилазе
- 320 је избачено на хиперболичке орбите
- 638 је избачено на $a > 100AU$.

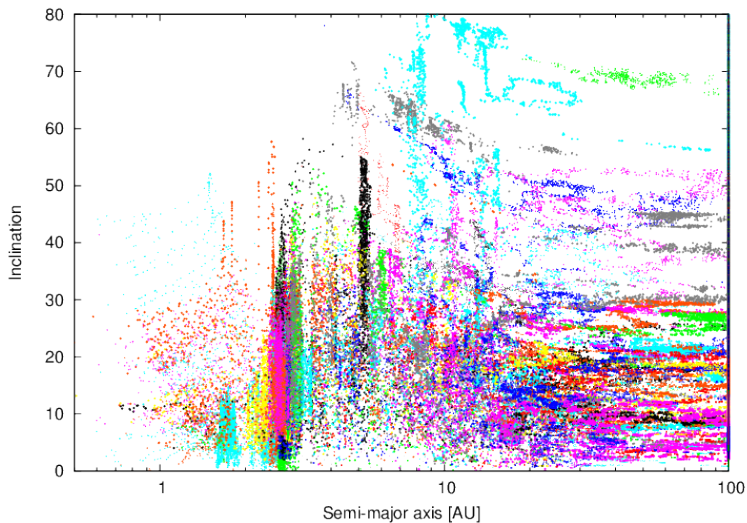
Bottke et al 2002 - sink - сливник

- Астероидни појас → резонанце → ОБЗ → синк
- Астероидни појас → 5:2 резонанца → ОБЗ → $q \simeq 0.26AU$
- **синк** - траса дуж које мала тела падају на Сунце или напуштају Сунчев систем
- Расподела астероида указује на то да постоји доња граница у перихелском растојању (*Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Delbò, M. & Michel, P., 2016, Nature.*)

$q \simeq 0.26AU$ је транзитна рута за један астероид



Путање за 70 тест објеката у равни (a, e)

Путање за 70 тест објеката у равни (a, i)

Астероид Фајетон - (3200) Pheaton

- Потражили смо оне објекте чија је орбита слична орбити Фајетона
- $(a_{Ph}, e_{Ph}, i_{Ph}) = (1.271, 0.889, 22.243)$
- Критеријуми: $|a - a_{Ph}| < 0.1, |e - e_{Ph}| < 0.1, |i - i_{Ph}| < 3$
- 80 од 1000 објеката задовољава ове критеријуме
- 8% вероватноћа
- 0% вероватноћа да је стигао из спољног прстена (*Bottke et al.2002, Icarus*).
- 1% вероватноћа да је стигао преко једне од 5:2 или 7:3 РСК (*de León et al, 2010, A&A*).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40

MNRAS 000, 1–10 (2016)

Preprint 22 November 2016

Compiled using MNRAS L^AT_EX style file v3.0

The Precise and Powerful Chaos of the 5:2 Mean Motion Resonance with Jupiter

Nataša Todorović ^{*}*Belgrade Astronomical Observatory, Volgina 7, P.O.Box 74 11060 Belgrade, Serbia*

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

ABSTRACT

This work reexamines the dynamics of the 5:2 mean motion resonance with Jupiter located in the Outer Belt at $a \sim 2.82$ AU. First, we compute dynamical maps revealing the precise structure of chaos inside the resonance. Being interested to verify the chaotic structures as sources of natural transportation routes, we additionally integrate 1000 massless particles initially placed along them and follow their orbital histories up to 5 Myr. As many as 99.5% of our test particles became Near-Earth Objects, 23.4% migrated to semi-major axis below 1 AU and more than 57% entered the Hill sphere of Earth. We have also observed a borderline defined by the $q \simeq 2.6$ AU perihelion distance along which particles escape from the Solar System.

Key words: minor planets, asteroids, general – meteorites, meteors, meteoroids – chaos – diffusion

1 INTRODUCTION

Some of the most important resonances in our Solar System are those capable of driving bodies from different parts of the Main Belt down to the neighborhood of Earth, to the so-called Near Earth Object (NEO) region. By convention

ies to the NEO region unfold mostly due to three Main Belt resonances: the 1 ν secular resonance located at $a \sim 2.1$ AU, 3:1 and 5:2 mean motion resonances (MMRs) with Jupiter, at $a \sim 2.50$ AU and $a \sim 2.82$ AU respectively. The 5:2 resonance, the subject of our study, was considered as the



Крај