

Исследование динамической эволюции внесолнечных планетных систем на длительных интервалах времени

А.С. Перминов
Э.Д. Кузнецов
УрФУ, 2017

Современная звездная астрономия – 2017
Екатеринбург, 14-16 июня

Введение

- Рассматривается орбитальная эволюция внесолнечных четырехпланетных систем **HD141399** и **HD160691**
- Используется, построенная авторами, численно-аналитическая теория движения **первого порядка по массам планет** для **четырёхпланетной задачи**
- Определяется характер орбитальной эволюции в зависимости от значений варьируемых начальных параметров (наклоны и восходящие узлы орбит)
- Исследуется устойчивость планетных систем в зависимости от значений изменяемых параметров
- Проводится сравнение полученных результатов с данными численного интегрирования

Разложение гамильтониана четырёхпланетной задачи

- Гамильтониан записывается в системе координат Якоби

$$h = -\frac{Gm_0}{2} \sum_{k=1}^4 \frac{m_k}{a_k} + \mu \times Gm_0 \left\{ \sum_{i=2}^4 \frac{m_i (2\vec{r}_i \vec{R}_i + \mu \vec{R}_i^2)}{r_i \tilde{R}_i (r_i + \tilde{R}_i)} - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{m_i m_j}{|\vec{\rho}_i - \vec{\rho}_j|} \right\},$$

где $\vec{R}_i = \sum_{k=1}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \vec{r}_k$, $\tilde{R}_i = \sqrt{\vec{r}_i^2 + 2\mu \vec{r}_i \vec{R}_i + \mu^2 \vec{R}_i^2}$, μ – малый параметр.

- Строится разложение в ряд Пуассона $h = h_0 + \sum A_{kn} x^k \cos n\lambda$ по элементам второй системы Пуанкаре и степеням малого параметра

$$L = \kappa M \sqrt{a}$$

$$\lambda = l + \omega + \Omega - \text{средняя долгота}$$

$$\xi_1 = \sqrt{2L(1 - \sqrt{1 - e^2})} \cos(\omega + \Omega) \quad \eta_1 = -\sqrt{2L(1 - \sqrt{1 - e^2})} \sin(\omega + \Omega)$$

$$\xi_2 = \sqrt{2L\sqrt{1 - e^2}(1 - \cos I)} \cos \Omega \quad \eta_2 = -\sqrt{2L\sqrt{1 - e^2}(1 - \cos I)} \sin \Omega$$

где a – большая полуось, e – эксцентриситет, I – наклон, ω – аргумент периастра, Ω – долгота восходящего узла орбиты, l – средняя аномалия

Метод Хори-Депри

- Разложение гамильтониана построено в оскулирующих элементах. Для исключения короткопериодических возмущений и увеличения шага интегрирования проводится процедура осреднения по средним долготам (быстрые переменные)
- Осреднение гамильтониана проводится с помощью **метода Хори-Депри**
- На основе осредненного гамильтониана строятся уравнения движения в средних элементах Пуанкаре
- Для перехода между оскулирующими элементами и средними используются функции замены переменных
- Все аналитические преобразования выполнялись в системе компьютерной алгебры **Piranha** (Ф. Бискани)
- Полученные уравнения интегрируются **методом Эверхарта 15-го порядка** с шагом 100 – 1000 лет.

Система звезды HD141399

$$M_{\star} = 1.07 (\pm 0.08) M_{\odot}$$

$$m = 7.2^m \quad Sp = K0 V$$

$$\alpha = 15^h 46^m 54.0^s$$

$$R_{\star} = 1.46 (\pm 0.15) R_{\odot}$$

$$r_{\star} \approx 118 \text{ св. лет}$$

$$\beta = +46^{\circ} 59' 11''$$

	b	c	d	e
$m \cdot \sin I$	0.451 (± 0.03)	1.33 (± 0.08)	1.18 (± 0.08)	0.66 (± 0.1)
a , a.e.	0.415 (± 0.011)	0.689 (± 0.02)	2.09 (± 0.06)	5.0 (± 1.5)
e	0.04 (± 0.02)	0.048 (± 0.009)	0.074 (± 0.025)	0.26 (± 0.22)
ω , $^{\circ}$	270 (± 80)	220 (± 40)	220 (± 30)	350 (± 20)
T_p , MJD	56998 (± 15)	56838 (± 10)	56923 (± 65)	58900 (± 800)
T_{orb} , JD	94.44 (± 0.05)	201.99 (± 0.08)	1069.8 (± 6.7)	5000 ($_{-2000}^{+560}$)

Система звезды HD160691 (μ Ara)

$$M_{\star} = 1.08 (\pm 0.05) M_{\odot}$$

$$m = 5.15^m \text{ Sp} = \text{G3 IV-V}$$

$$\alpha = 17^{\text{h}}44^{\text{m}}08.0^{\text{s}}$$

$$R_{\star} = 1.245 (\pm 0.255) R_{\odot}$$

$$r_{\star} \approx 50 \text{ св. лет}$$

$$\beta = -51^{\circ}50'02''$$

	c	d	b	e
$m \cdot \sin I$	0.03321	0.5219	1.676	1.814
a , a.e.	0.09094	0.921	1.5 (± 0.02)	5.235
e	0.172 (± 0.04)	0.0666 (± 0.0122)	0.128 (± 0.017)	0.0985 (± 0.0627)
ω , $^{\circ}$	212.7 (± 13.3)	189.6 (± 9.4)	22.0 (± 7.0)	57.6 (± 43.7)
T_p , MJD	52991.1 (± 0.4)	52708.7 (± 8.3)	52365.6 (± 12.6)	52955.2 (± 521.8)
T_{orb} , JD	9.6386 (± 0.0015)	310.55 (± 0.83)	643.25 (± 0.9)	4205.8 (± 758.9)

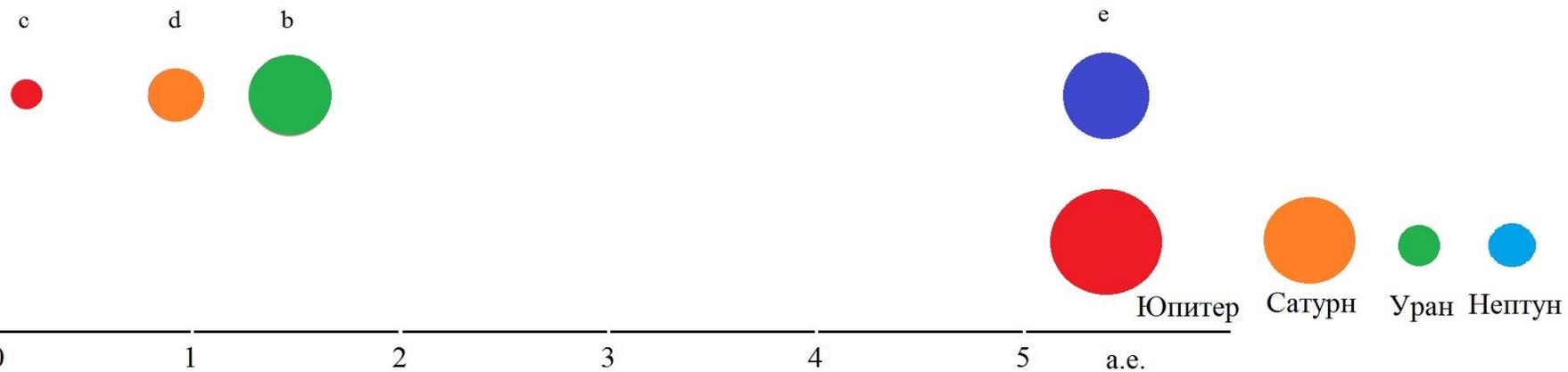
Сравнение систем

Современная звездная астрономия - 2017

HD141399

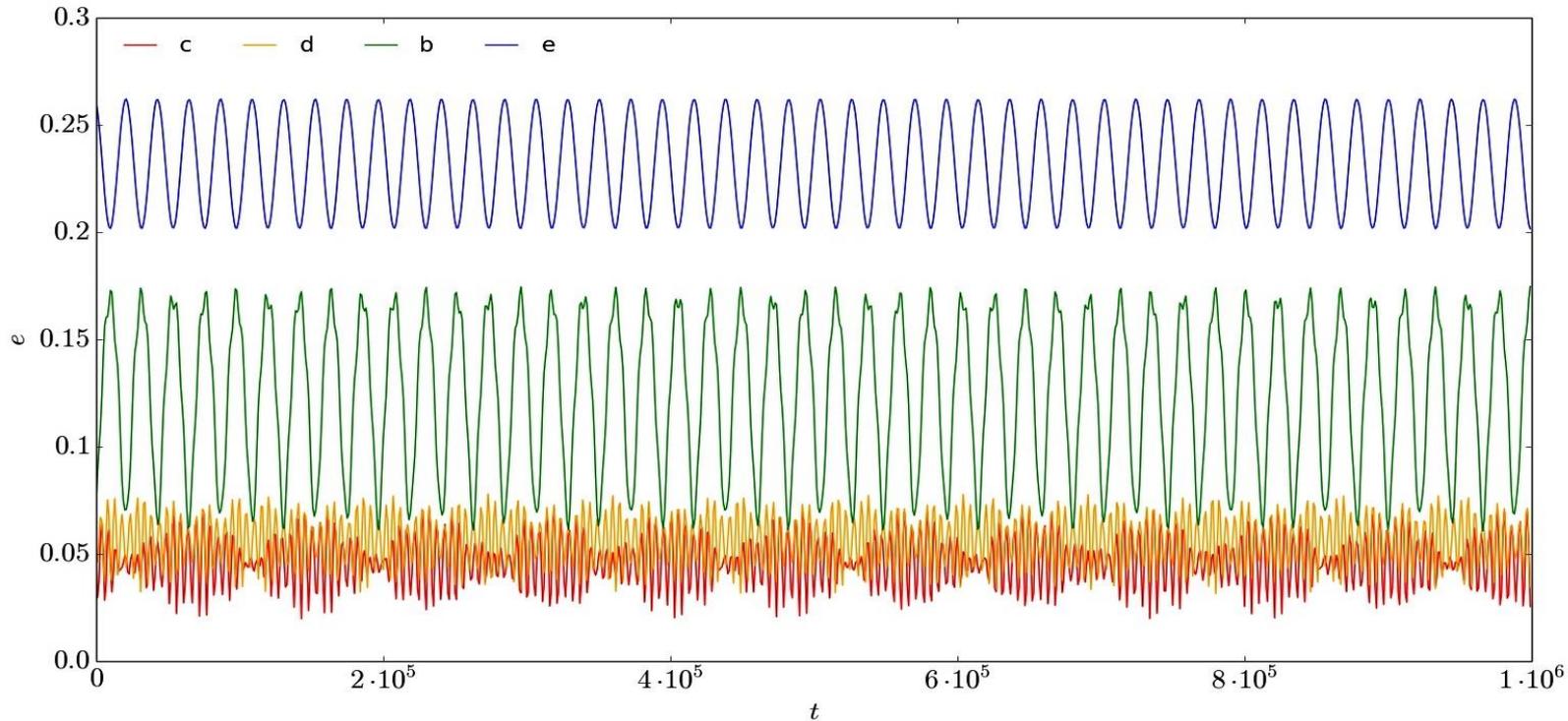


HD160691



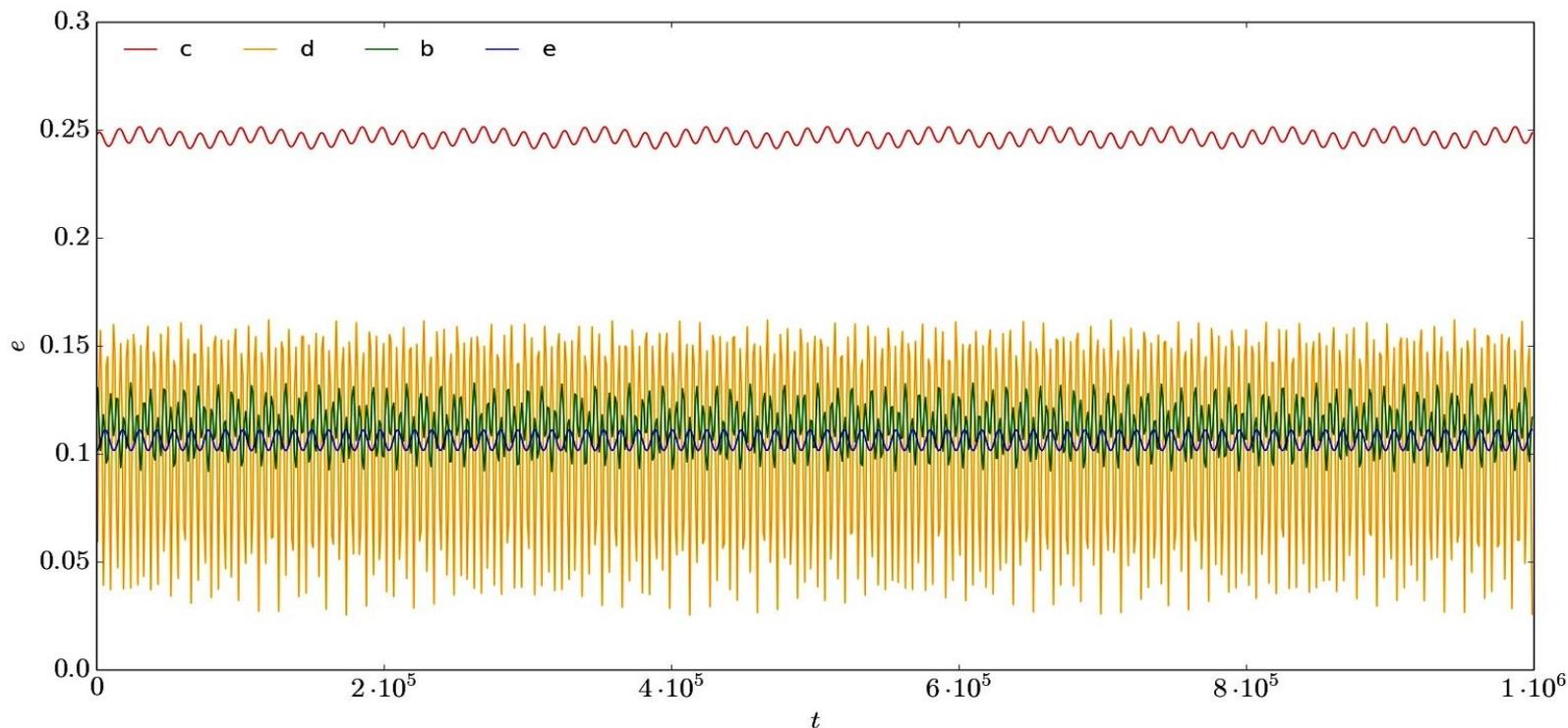
HD141399 – плоская задача

Современная звездная астрономия - 2017



	e_{mean}	e_a	P , ГОДЫ
b	0.0455	0.0257	5107
c	0.0547	0.0232	5107
d	0.1177	0.0570	21761
e	0.2319	0.0303	27761

HD160691 – плоская задача



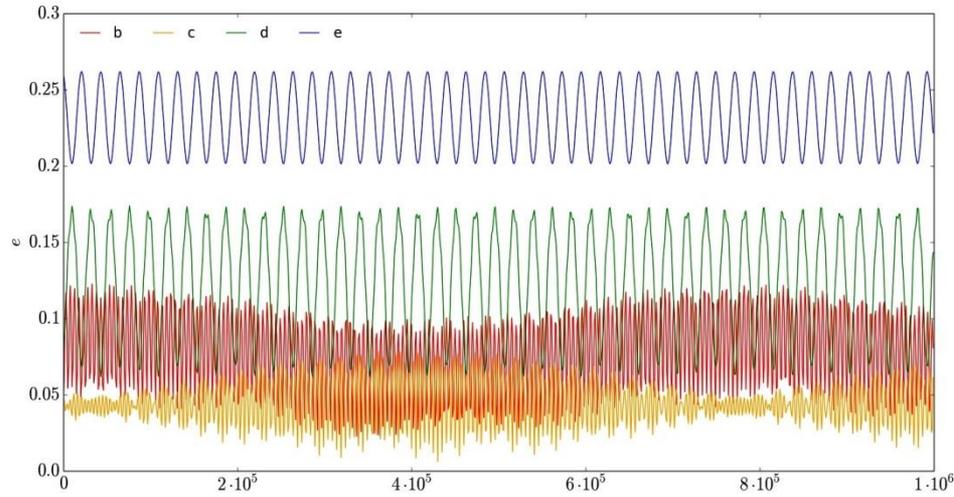
	e_{mean}	e_a	P , ГОДЫ
c	0.2464	0.0052	14099
d	0.0936	0.0684	4678
b	0.1123	0.0206	11917
e	0.1062	0.0049	11917

Варьирование начальных значений элементов орбит

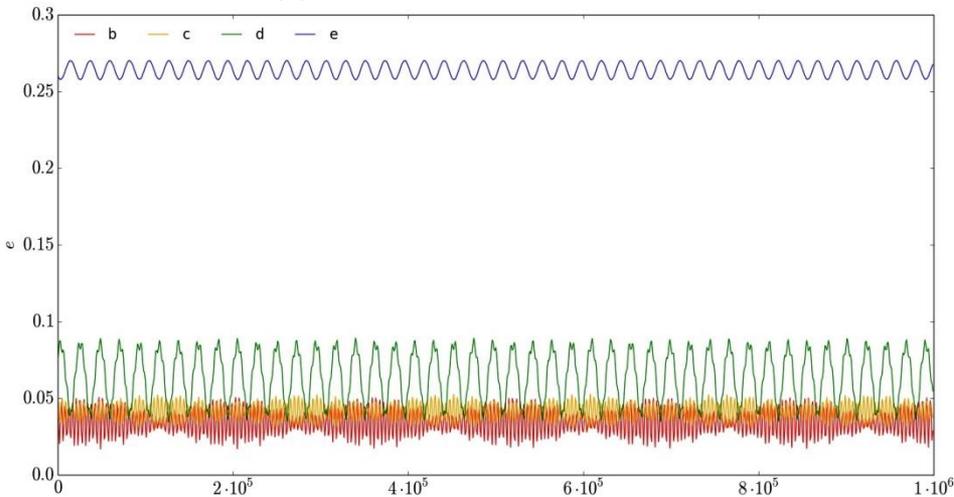
Для обеих систем:

- В качестве основной плоскости системы выбрано начальное положение плоскости орбиты ближайшей к звезде планеты, для нее всегда $I_0 = 0^\circ$ (планеты HD141399 b и HD160691 c)
- Начальные значения наклонов остальных орбит равны между собой и принимаются последовательно равными $I_0 = 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$
- Отсчет восходящих узлов начинается от произвольно выбранного направления на восходящий узел орбиты первой планеты, для нее $\Omega_0 = 0^\circ$ (планеты HD141399 b и HD160691 c)
- Восходящие узлы орбит остальных 3-х планет варьируются с шагом 90° и 36° , давая, соответственно, 64 и 1000 различных орбитальных конфигураций
- Массы и большие полуоси орбит планет не варьируются

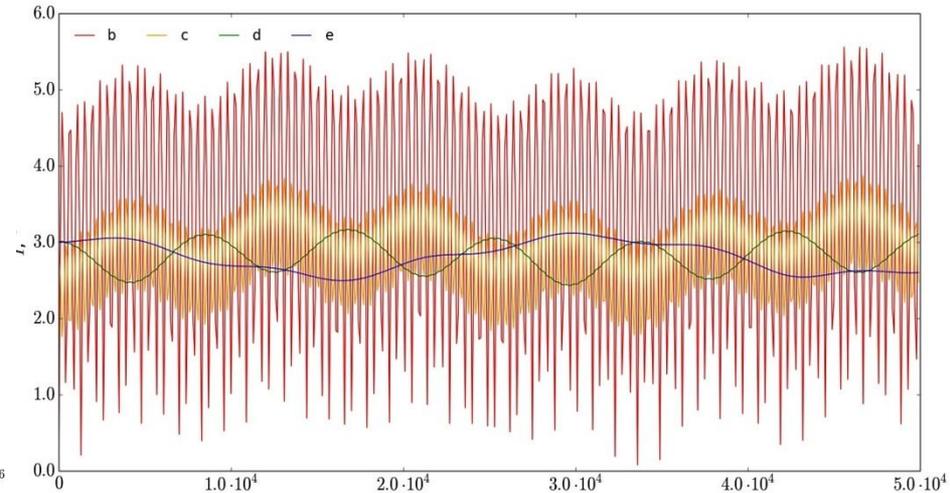
HD141399 – примеры орбитальной эволюции



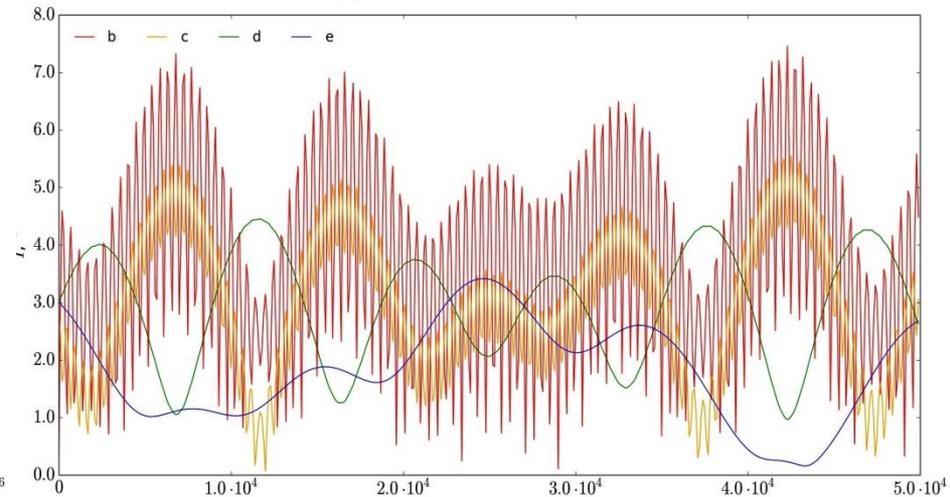
$$I_{c,d,e} = 3^\circ; \Omega_c = 270^\circ, \forall \Omega_d, \forall \Omega_e$$



$$I_{c,d,e} = 3^\circ; \forall \Omega_c, \Omega_d = 270^\circ, \Omega_e = 0^\circ$$



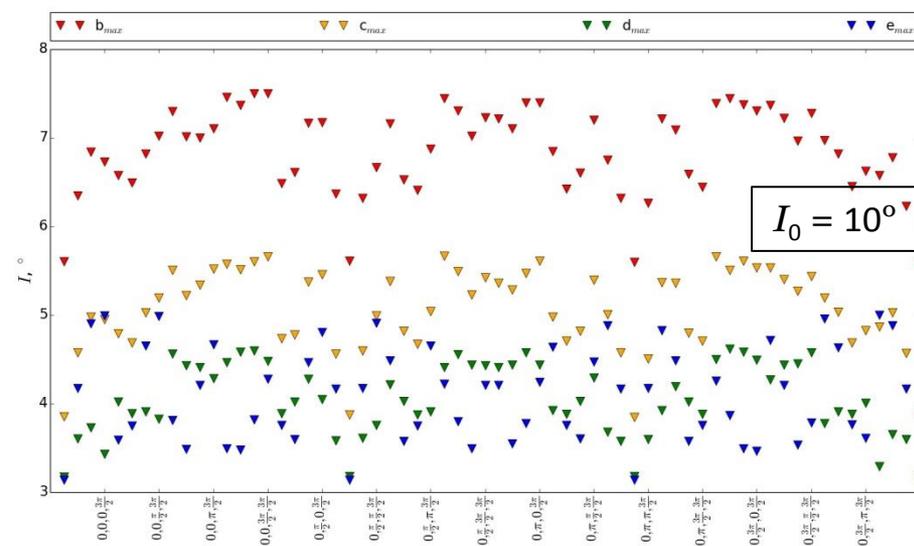
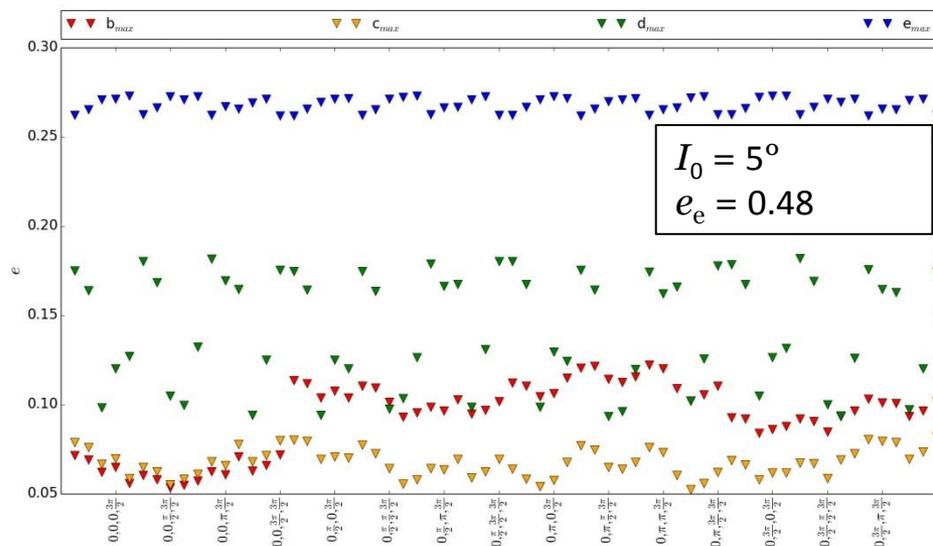
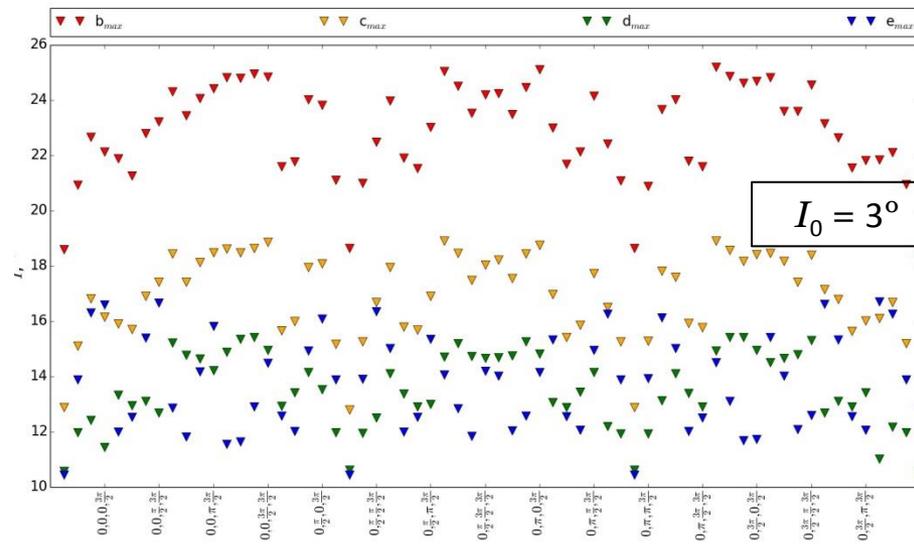
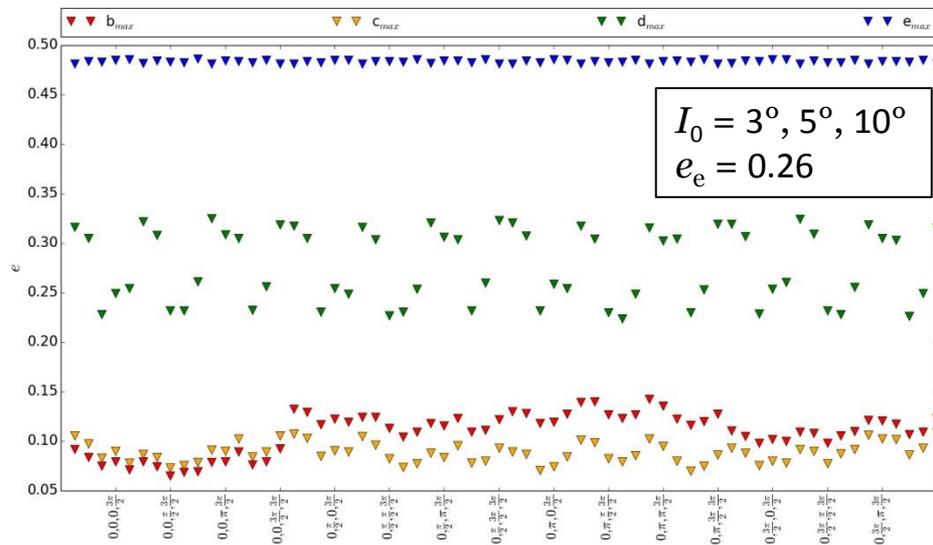
$$I_{c,d,e} = 3^\circ; \forall \Omega_c, \Omega_d, \Omega_e$$



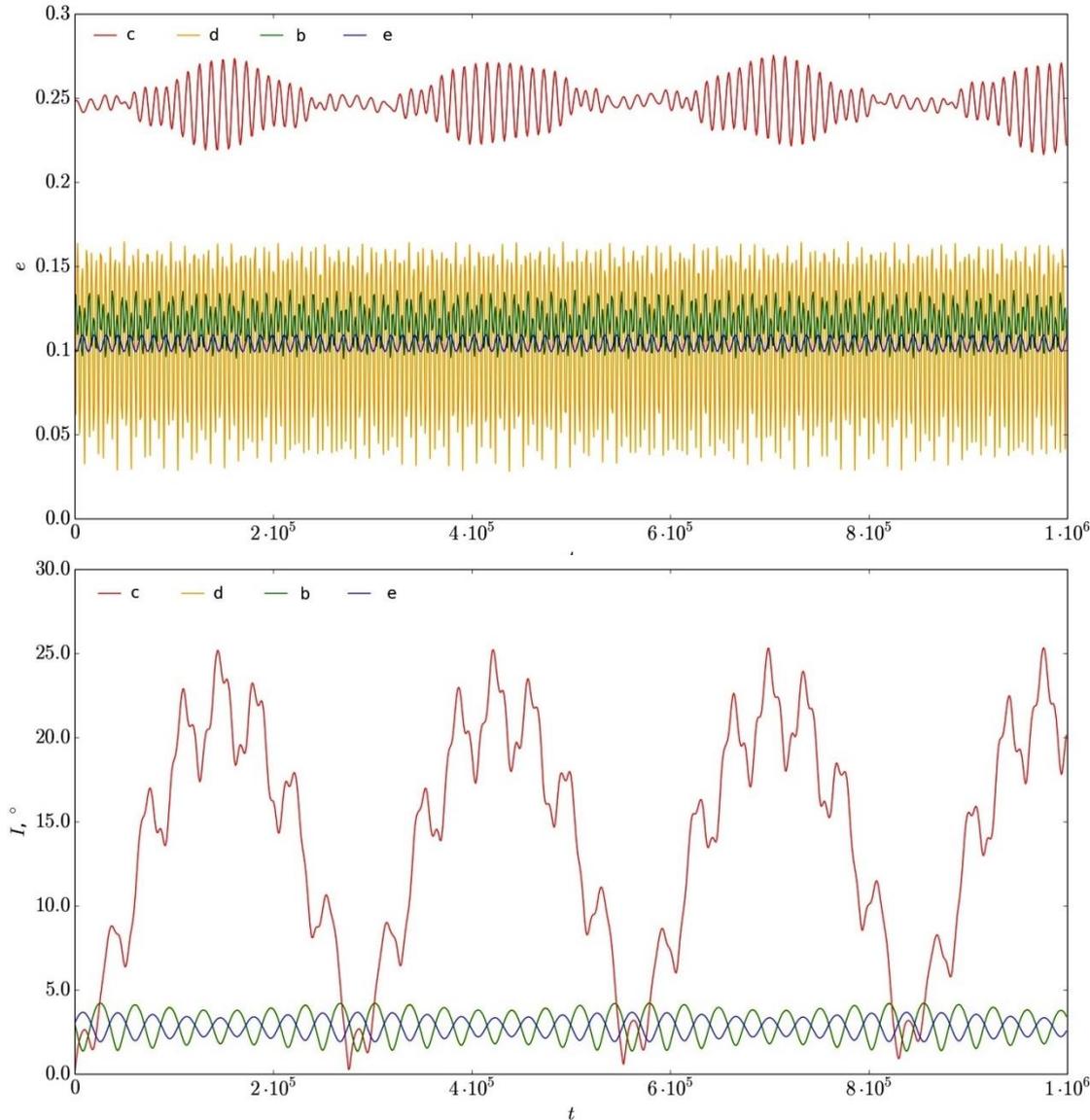
$$I_{c,d,e} = 3^\circ; \Omega_c = \Omega_d = \Omega_e$$

HD141399 – e_{\max} , I_{\max}

Современная звездная астрономия - 2017

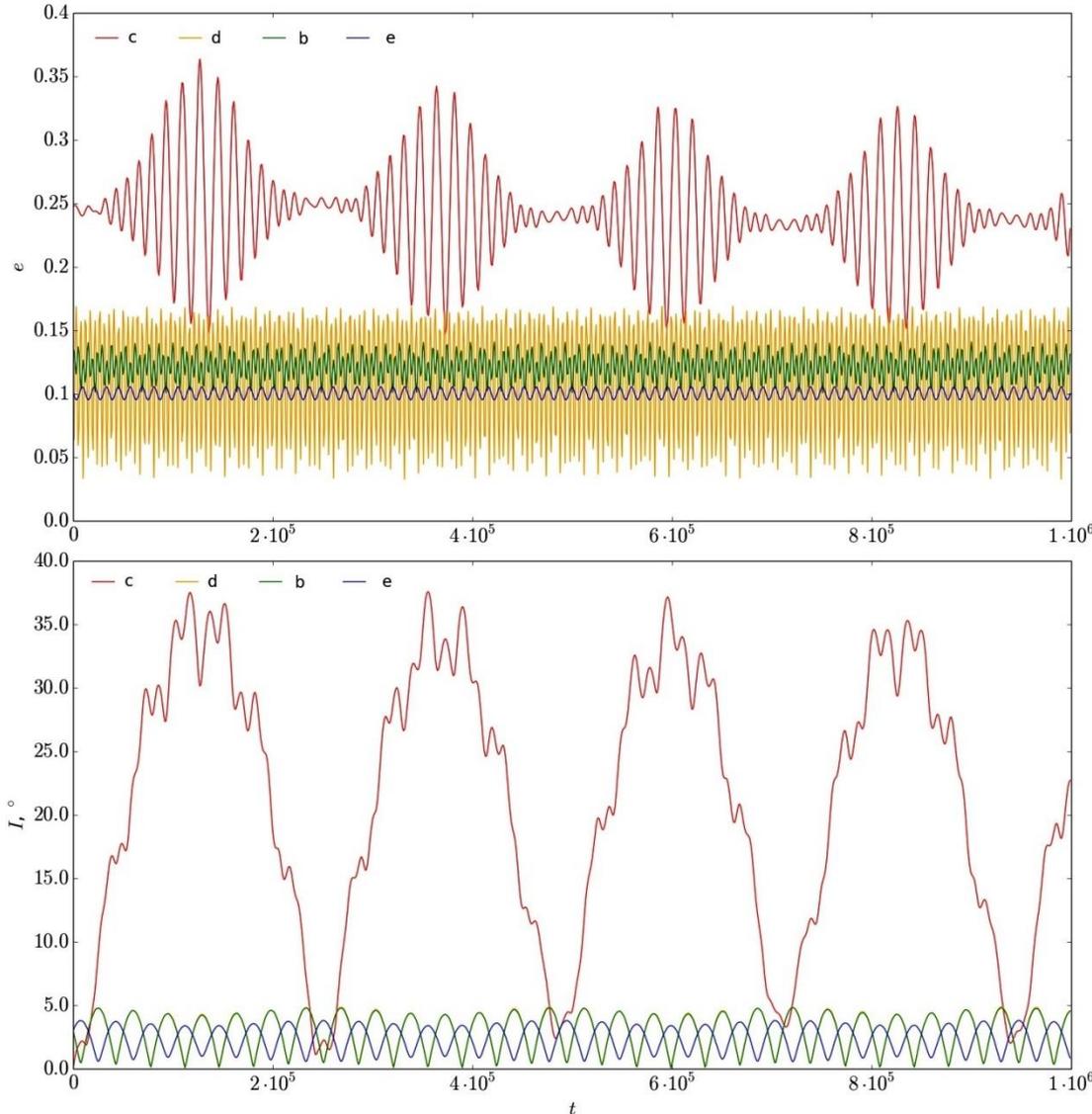


HD160691 – примеры орбитальной эволюции



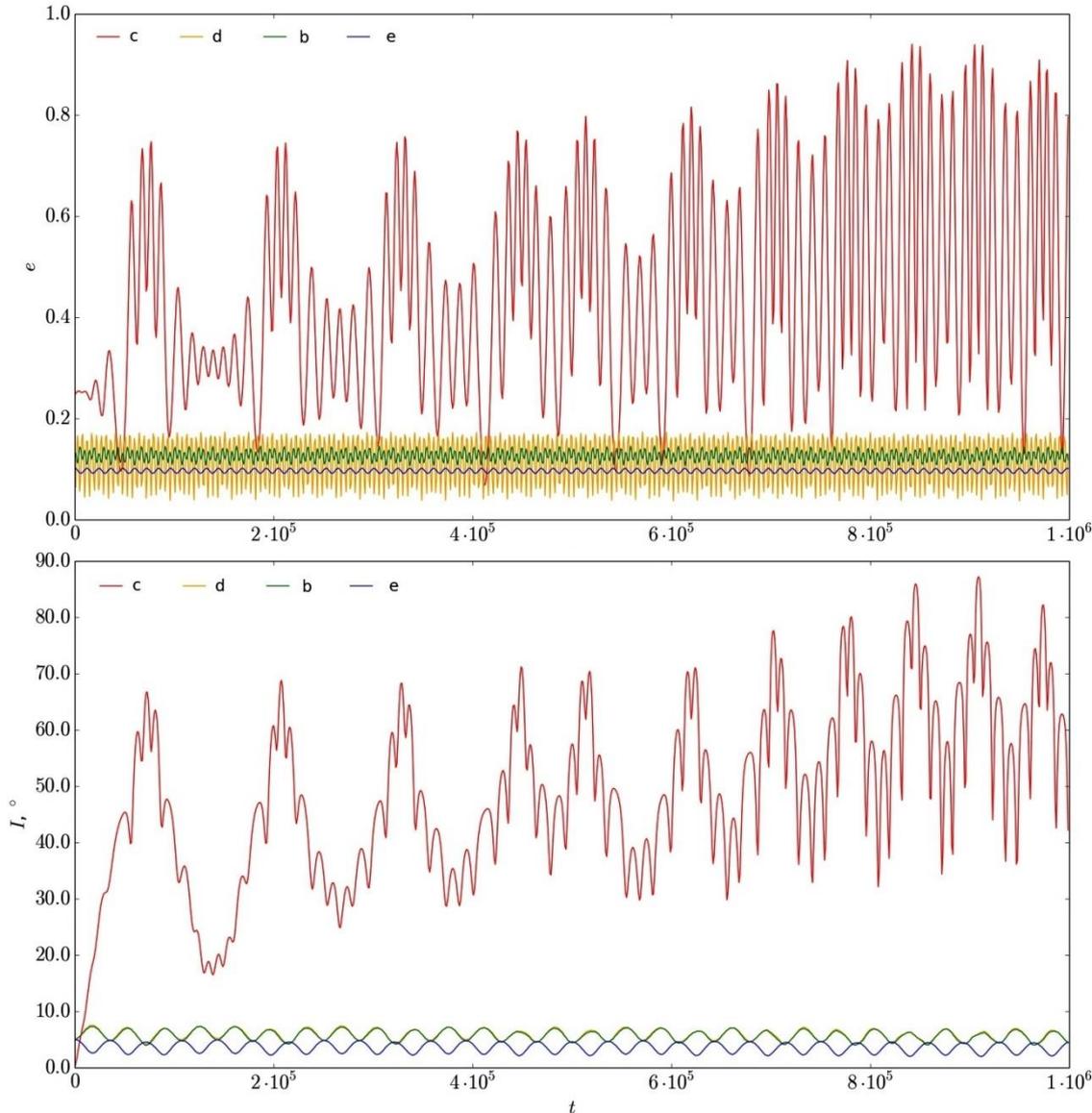
- Качественные отличия в зависимости от НУ наблюдаются только в поведении наклона и эксцентриситета первой планеты (e_c и I_c)
- $I_0 = 3^\circ$; $\Omega_b = \Omega_e$
 $I_0 > 3^\circ$; $\Omega_d = \Omega_b = \Omega_e$
 характер эволюции e_b аналогичен плоской задаче, амплитуда колебаний I_b не превышает 4°
- $I_0 = 3^\circ$; $|\Omega_b - \Omega_e| = 90^\circ$
 в эволюции e_b наблюдаются «биения» с периодом до $2 \cdot 10^5$ лет, максимальный наклон орбиты возрастает до 25°

HD160691 – примеры ТИПИЧНОЙ ЭВОЛЮЦИИ



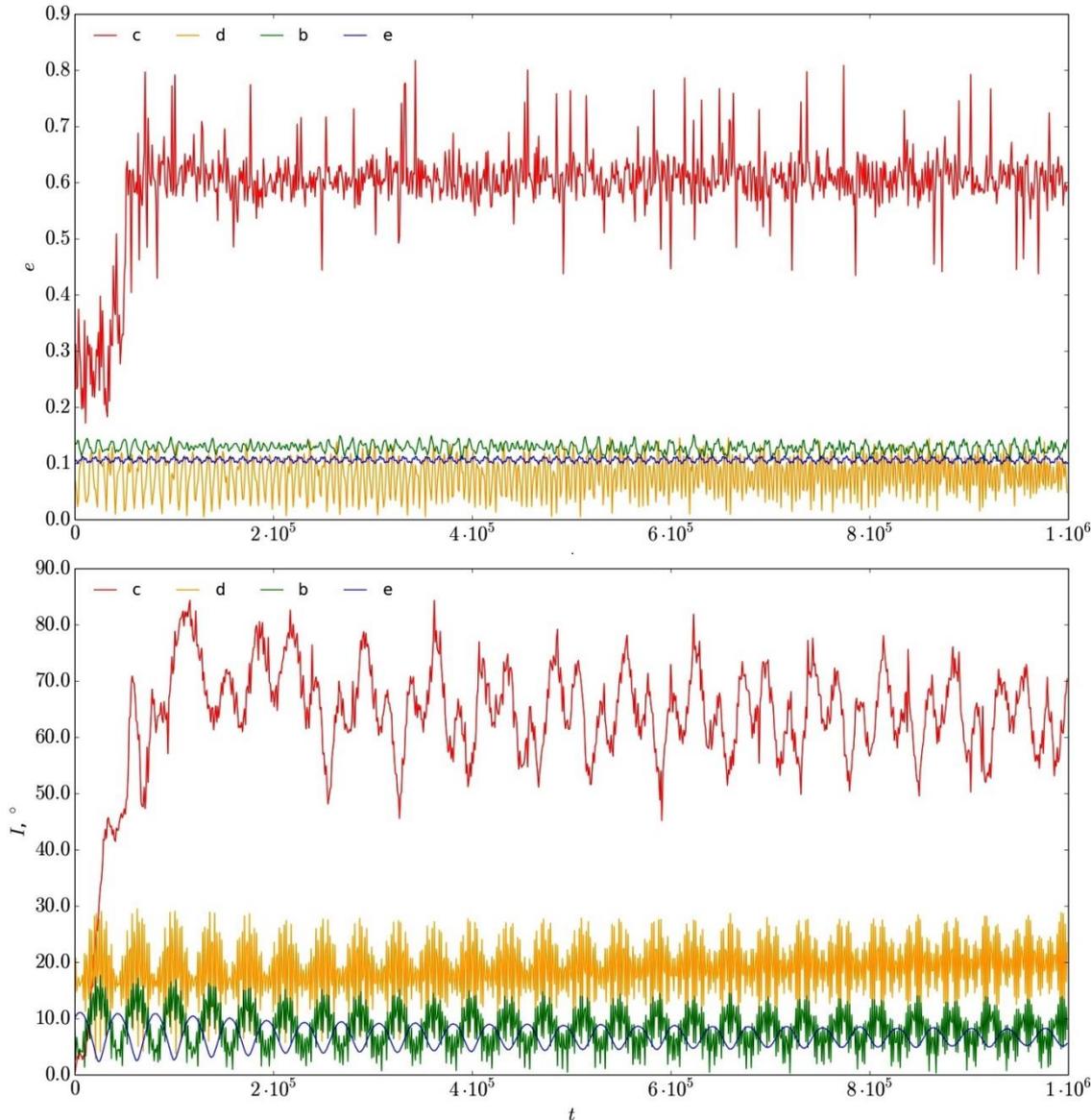
- $I_0 = 3^\circ$; $|\Omega_b - \Omega_e| > 90^\circ$
амплитуда «биений»
эксцентриситета возрастает с
ростом разности долгот
восходящих узлов,
максимальное значение
наклона также увеличивается
- $I_0 > 3^\circ$
подобный характер эволюции
наблюдается только для
разности $|\Omega_b - \Omega_e| \leq 90^\circ$

HD160691 – примеры типичной эволюции



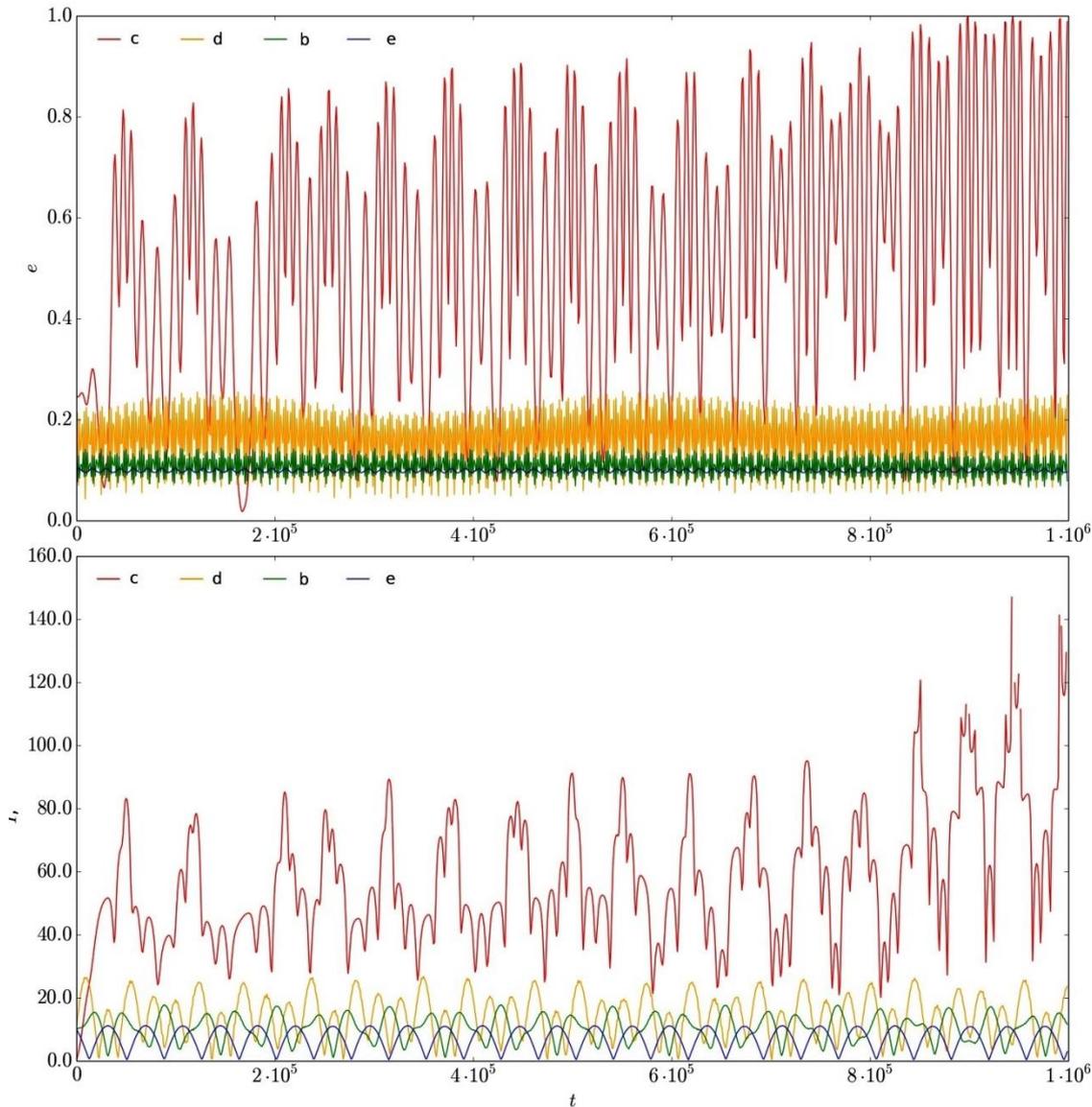
- $I_0 \geq 5^\circ$
практически при всех значениях
долгот восходящих узлов
наблюдается следующее
поведение e_c и I_c :
 $e_c \rightarrow 1, I_c \rightarrow 90^\circ$
(графики приведены для случая
 $I_0 = 10^\circ; \Omega_d = \Omega_b = 90^\circ, \Omega_e = 270^\circ$)

Сравнение с результатами численного интегрирования



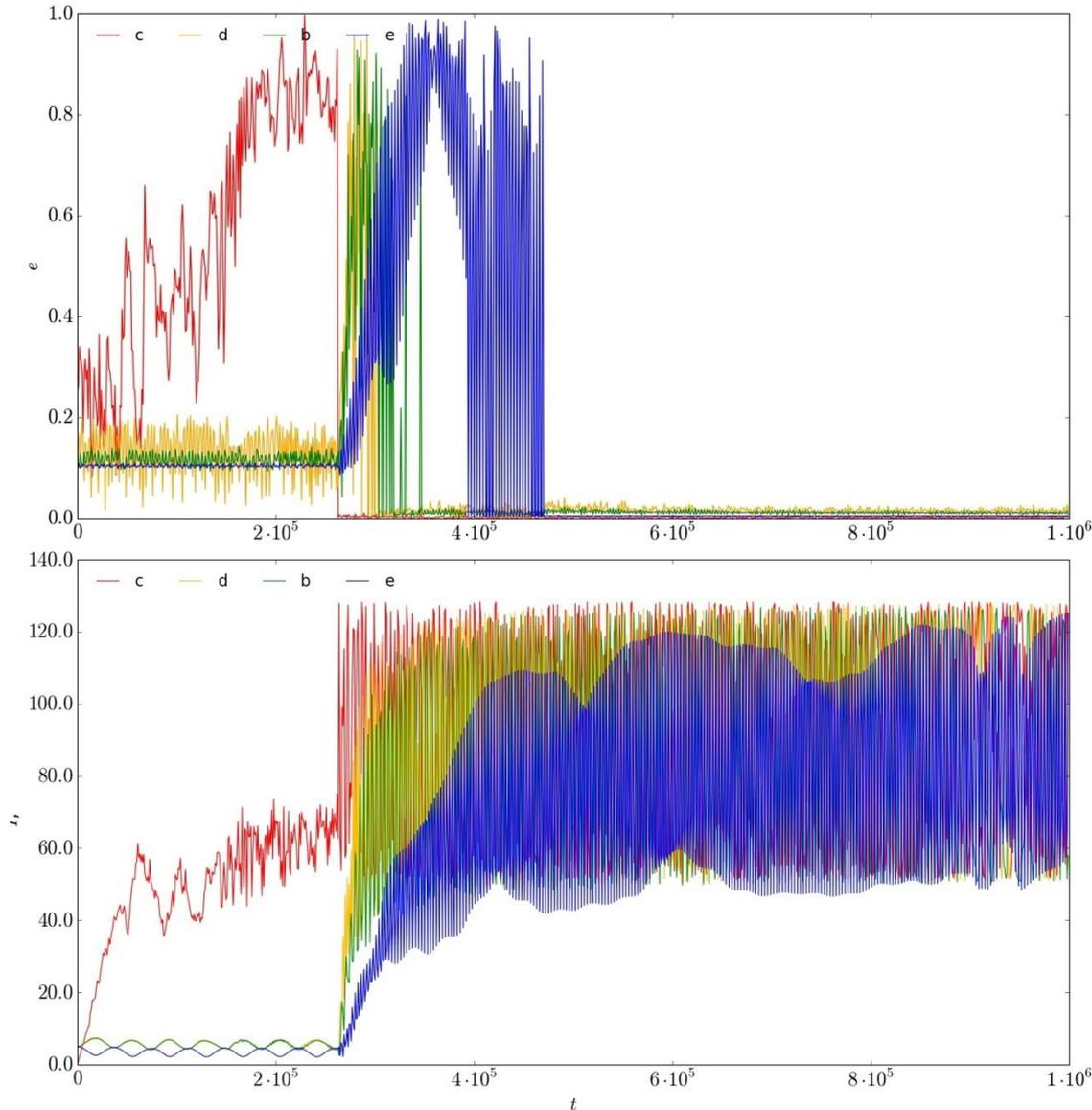
- Рассмотрим результаты полученные с помощью численного интегратора Грегга-Булриша-Штера 20 порядка для приведенного выше случая (интегрирование проводилось с шагом 5 дней)
- графики приведены для случая $I_0 = 10^\circ$; $\Omega_d = \Omega_b = 90^\circ$, $\Omega_e = 270^\circ$

HD160691 – примеры ТИПИЧНОЙ ЭВОЛЮЦИИ



- графики приведены для случая $I_0 = 10^\circ$; $\Omega_d = 90^\circ$, $\Omega_b = 270^\circ$, $\Omega_e = 0^\circ$
- $e_c \rightarrow 1$
- I_c достигает значения 140°
ретроградное вращение

Сравнение с результатами численного интегрирования



- Рассмотрим результаты полученные с помощью **численного интегратора Грегга-Булриша-Штера 20 порядка** для приведенного выше случая (интегрирование проводилось с шагом 5 дней)
- графики приведены для случая $I_0 = 10^\circ$; $\Omega_d = 90^\circ$, $\Omega_b = 270^\circ$, $\Omega_e = 0^\circ$

Выводы

- Проведен анализ характера орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем HD141399 и HD160691 с помощью осредненной численно-аналитической теории движения первого порядка по массам планет
- Поскольку исследуемые планетные системы являются наблюдаемыми, они, **скорее всего**, пришли в равновесное состояние, а значит, рассмотренные случаи орбитальной эволюции с экстремально большими значениями эксцентриситетов и наклонов соответствуют **«маловероятным»** начальным значениям наклонов и восходящих узлов орбит
- Таким образом, можно определить границы допустимых значений элементов орбит

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!