

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМПАКТНЫХ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

61 VIR, GJ 3138, HD 39194



А.С. Перминов, Э.Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

Пулково-2018, ГАО РАН
03.10.2018

ВВЕДЕНИЕ

- Цели работы:
 - исследование качественного характера орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем **61 Vir**, **GJ 3138** и **HD 39194**;
 - определение допустимых значений неизвестных элементов орбит на основе результатов моделирования орбитальной эволюции.
- Используется, построенная авторами, осредненная численно-аналитическая теория движения второго порядка по массам планет
- Уравнения движения построены в элементах второй системы Пуанкаре с использованием системы координат Якоби.
- Элементы орбит варьируются в пределах, задаваемых погрешностью их определения из наблюдений.
- Интегрирование проводится методом Эверхарта 7 порядка на интервале времени 1 млн лет с шагом 1000 лет.

ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТ И МАССЫ

61 Vir (Sp. G5V, $\mathfrak{M}_* = 0.95 \pm 0.03 \mathfrak{M}_\odot$)

	b	c	d
$M \sin I, M_J$	0.016	0.0573	0.072
$a, \text{a.e.}$	$0.050201 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	0.2175 ± 0.0001	0.476 ± 0.001
e	0.12 ± 0.11	0.14 ± 0.06	0.35 ± 0.09
$\omega, ^\circ$	105 ± 54	341 ± 38	314 ± 20

GJ 3138 (Sp. M0V $\mathfrak{M}_* = 0.681 \mathfrak{M}_\odot$)

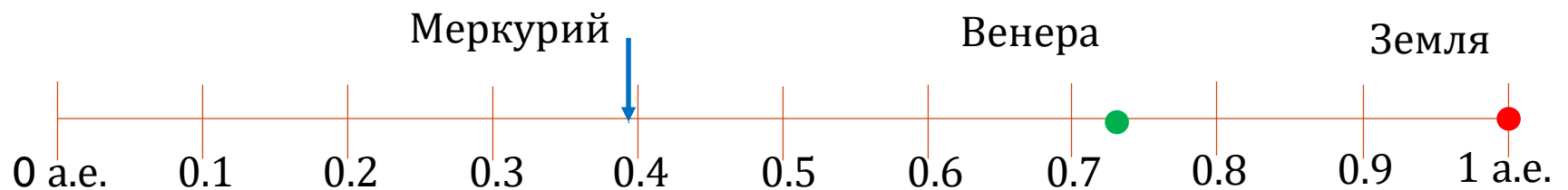
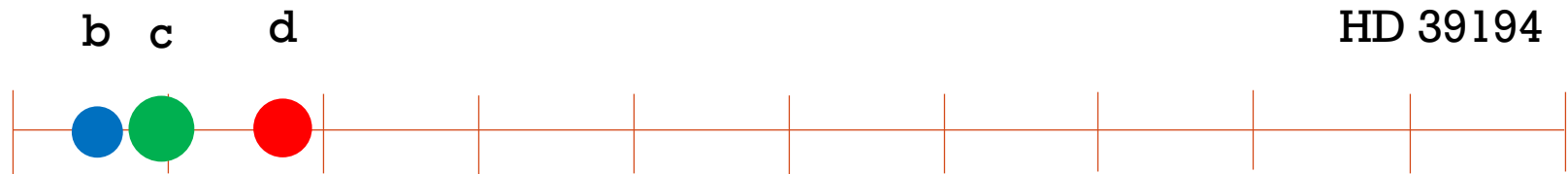
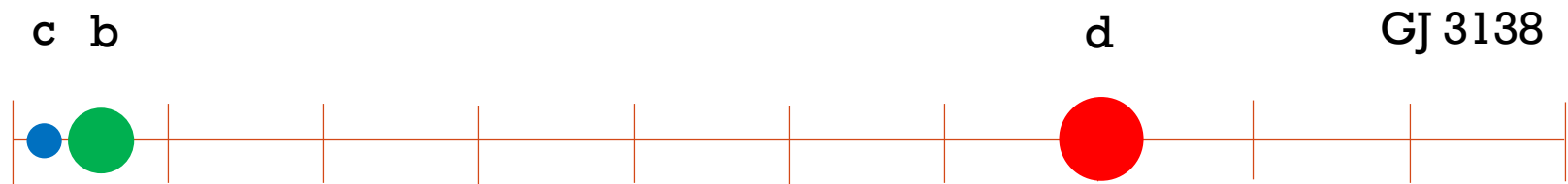
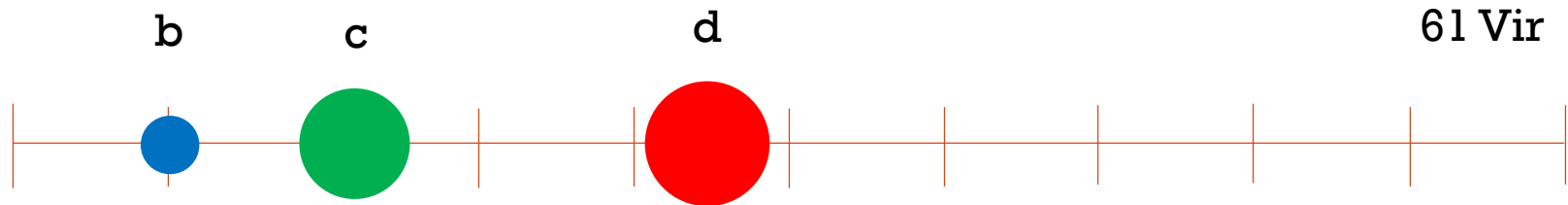
	c	b	d
$M \sin I, M_J$	$0.0056_{-0.001}^{+0.0011}$	0.0132 ± 0.0019	$0.033_{-0.0066}^{+0.0072}$
$a, \text{a.e.}$	0.0197 ± 0.0005	0.057 ± 0.001	$0.698_{-0.019}^{+0.018}$
e	$0.19_{-0.13}^{+0.18}$	$0.11_{-0.07}^{+0.11}$	$0.32_{-0.21}^{+0.2}$

HD 39194 (Sp. K0V, $\mathfrak{M}_* = 0.72 \mathfrak{M}_\odot$)

	b	c	d
$M \sin I, M_J$	0.0117 ± 0.001	0.0187 ± 0.00148	0.0162 ± 0.0026
$a, \text{a.e.}$	0.0519 ± 0.0008	0.0954 ± 0.0016	0.172 ± 0.0029
e	0.2 ± 0.1	0.11 ± 0.006	0.2 ± 0.16

Приведены массы планет и кеплеровские элементы орбит в барицентрической системе координат (exoplanet.eu)

ГЕОМЕТРИЯ СИСТЕМ



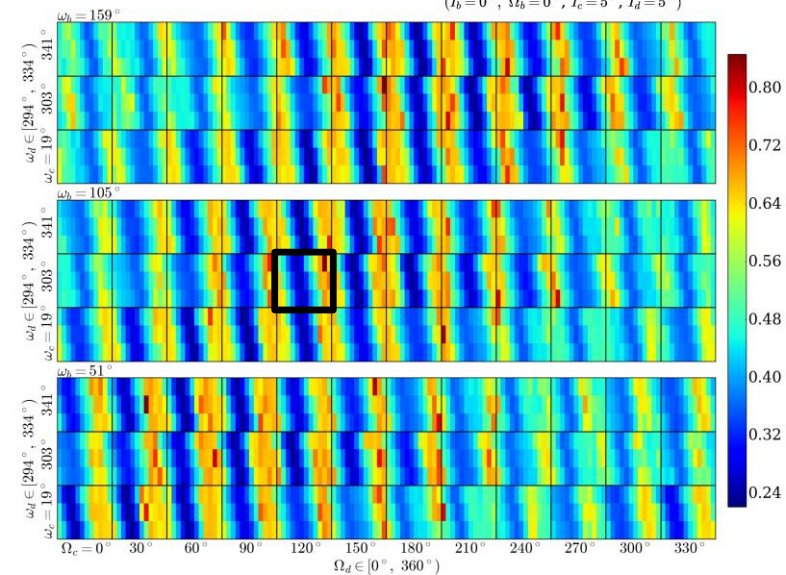
ВАРЬИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ

- Начальные значения наклона плоскости орбиты I и долготы восходящего узла орбиты Ω ближайшей к звезде планеты выбираются равными нулю в силу произвольности ориентации основной плоскости системы координат в пространстве.
- Начальные значения наклонов орбит внешних планет выбираются равными друг другу и варьируются в диапазоне $[0^\circ, 45^\circ]$ с шагом 5° .
- Различные пространственные конфигурации орбит планет относительно друг друга достигаются варьированием начальных значений долгот восходящих узлов Ω и аргументов перицентров ω .
- Также варьируются начальные значения эксцентриситетов орбит e в пределах ошибок, получаемых из наблюдений.
- Массы планет не варьируются.

61 VIR B: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ $I_0 = (0^\circ, 5^\circ, 5^\circ)$

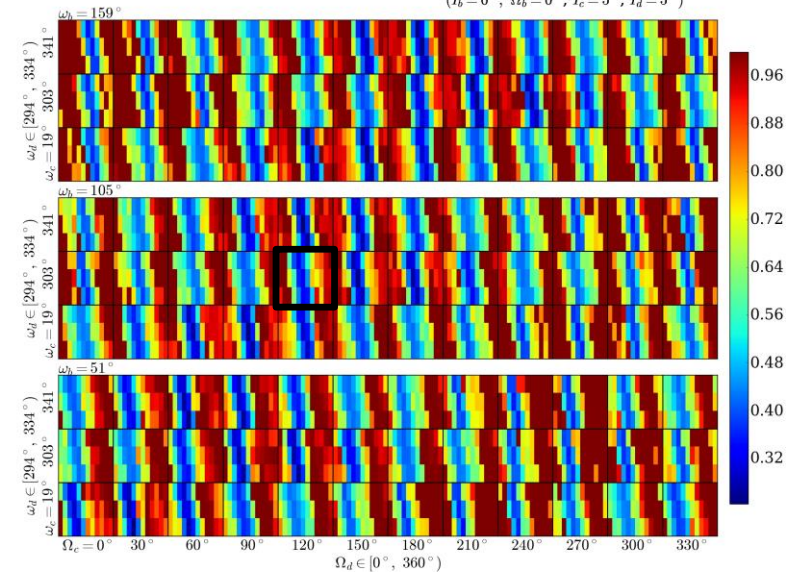
$$e_0 = (0.12, 0.14, 0.35)$$

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$

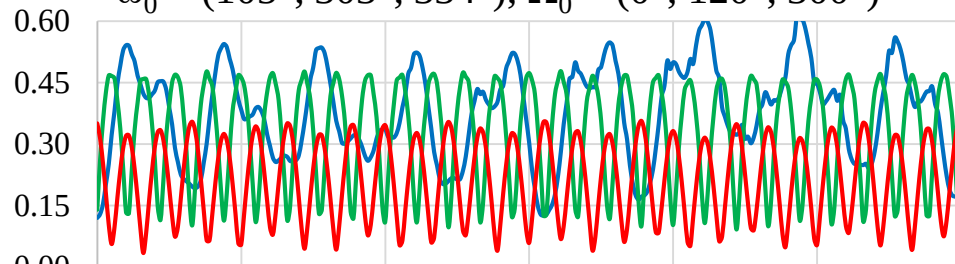


$$e_0 = (0.23, 0.20, 0.44)$$

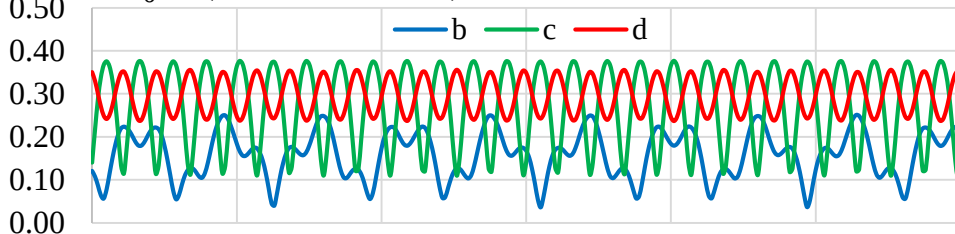
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



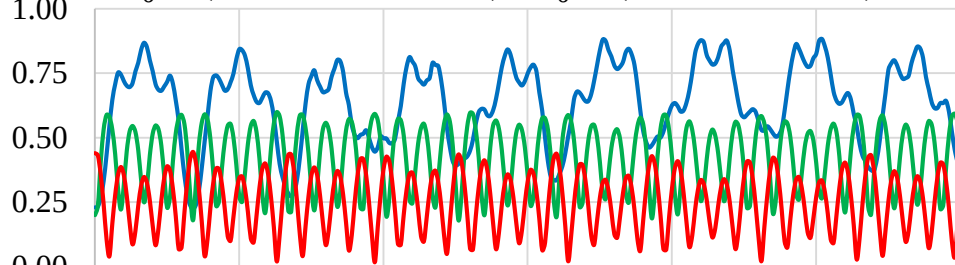
$$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 300^\circ)$$



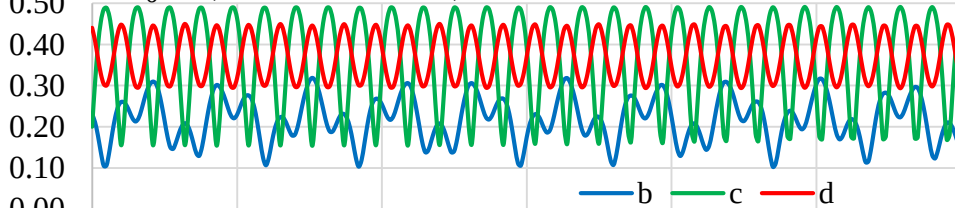
$$\Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$$



$$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 300^\circ)$$



$$\Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$$

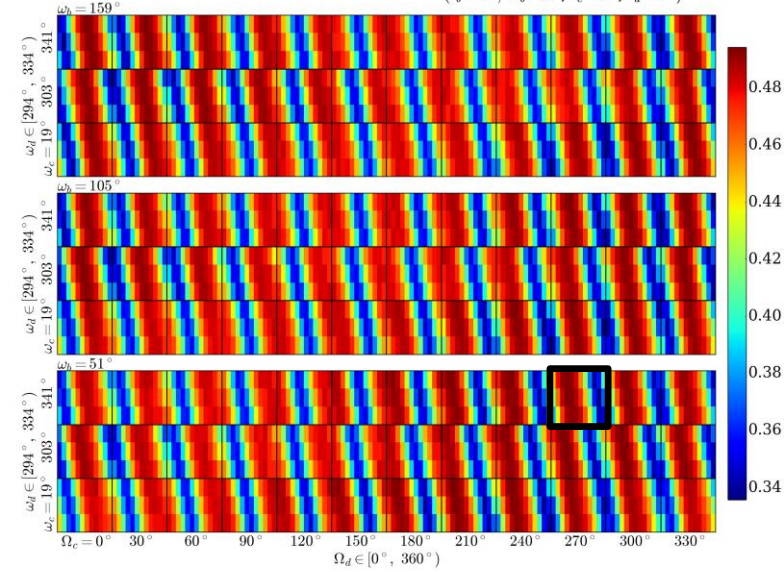


0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3
млн лет

61 VIR C: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ $I_0 = (0^\circ, 5^\circ, 5^\circ)$

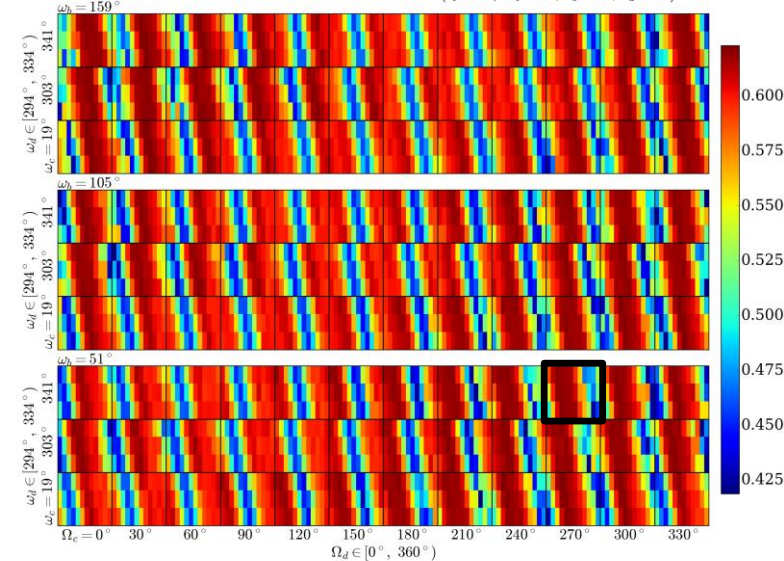
$e_0 = (0.12, \mathbf{0.14}, 0.35)$

$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$

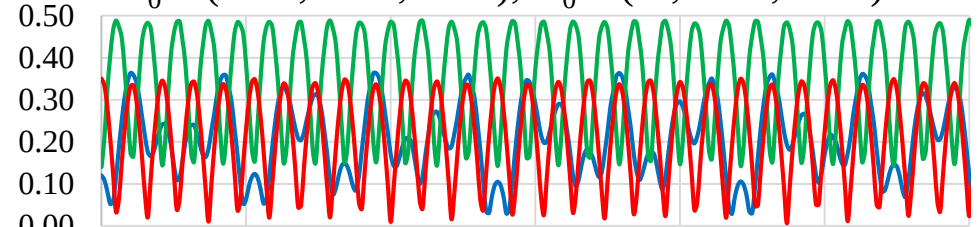


$e_0 = (0.23, \mathbf{0.20}, 0.44)$

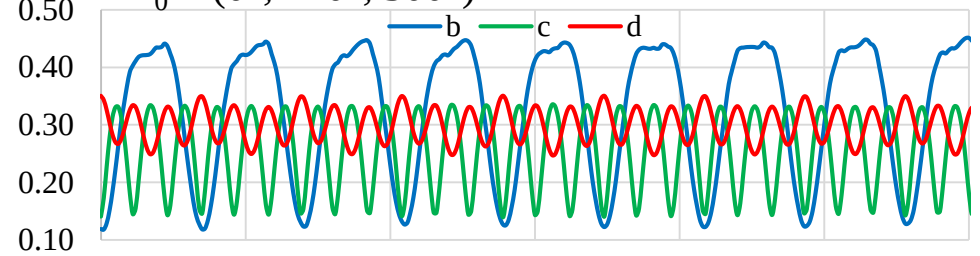
$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$



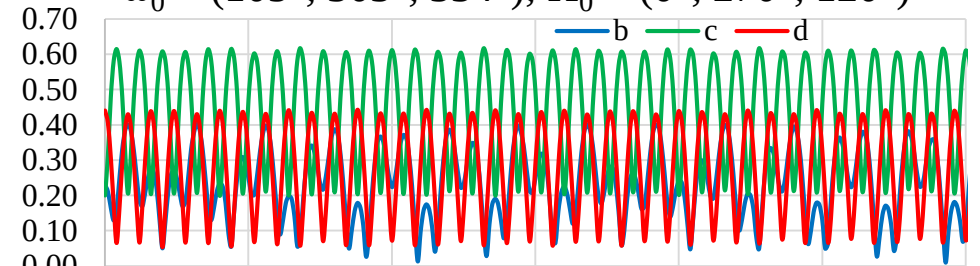
$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 270^\circ, 120^\circ)$



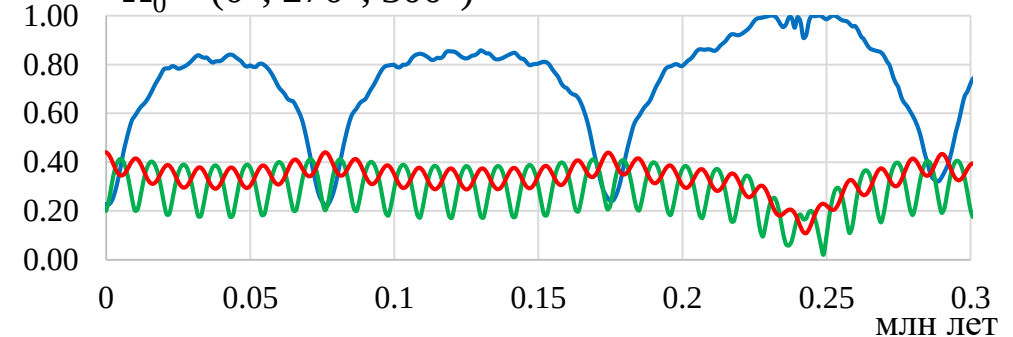
$\Omega_0 = (0^\circ, 270^\circ, 300^\circ)$



$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 270^\circ, 120^\circ)$



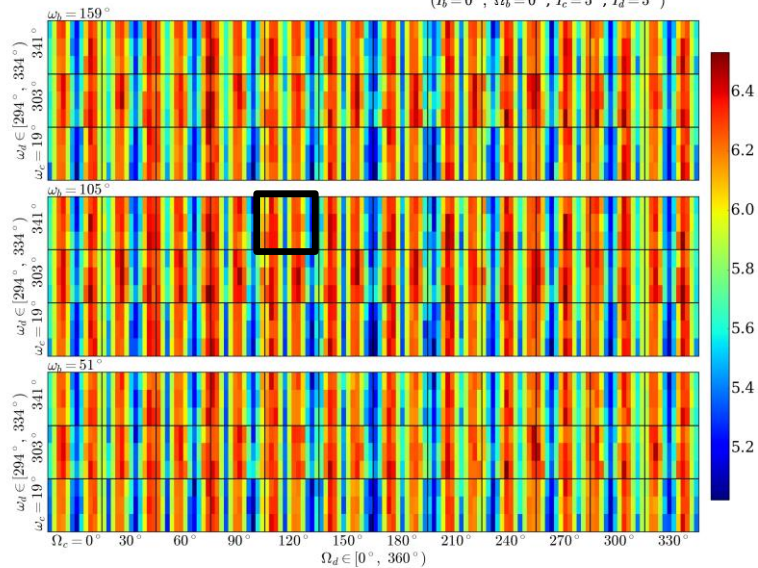
$\Omega_0 = (0^\circ, 270^\circ, 300^\circ)$



61 VIR D: МАКСИМАЛЬНЫЕ НАКЛОНЫ ОРБИТ $I_0 = (0^\circ, 5^\circ, 5^\circ)$

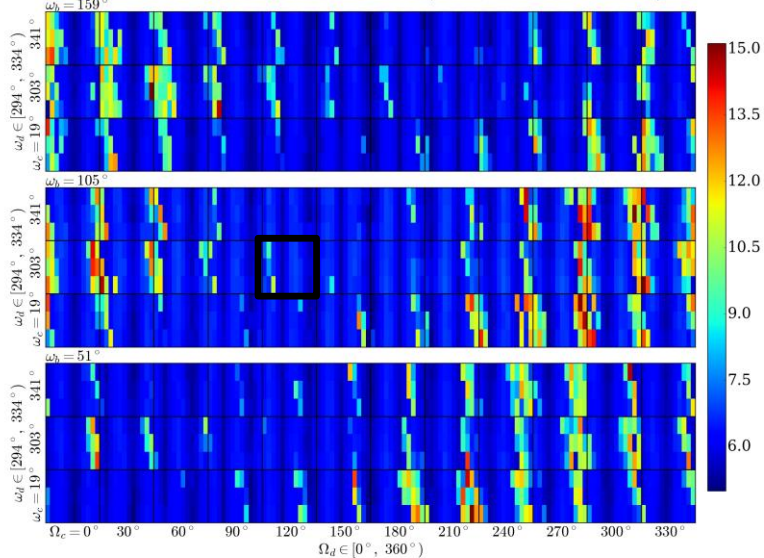
$e_0 = (0.12, 0.14, \mathbf{0.35})$

($I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ$)

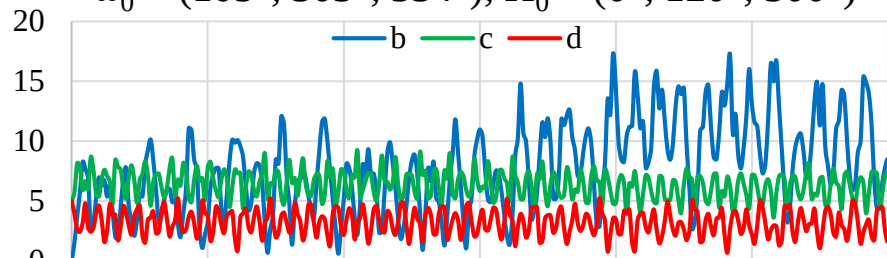


$e_0 = (0.23, 0.20, \mathbf{0.44})$

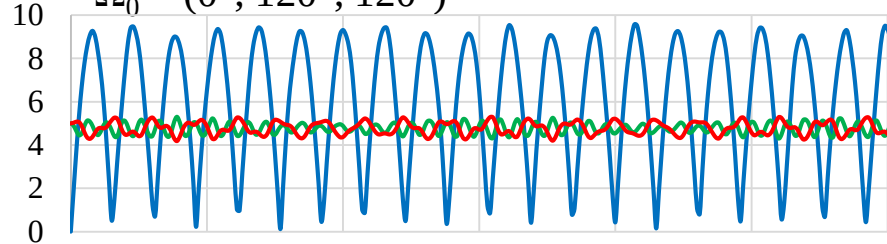
($I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ$)



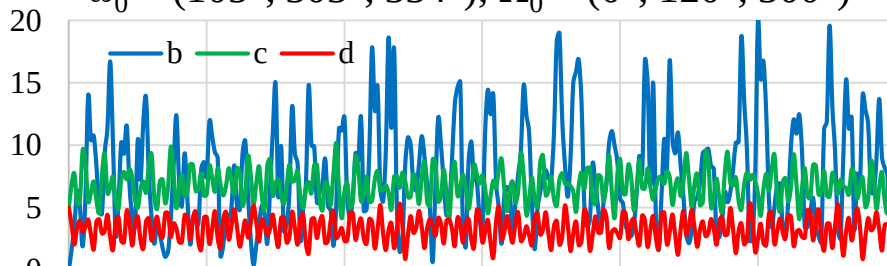
$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 300^\circ)$



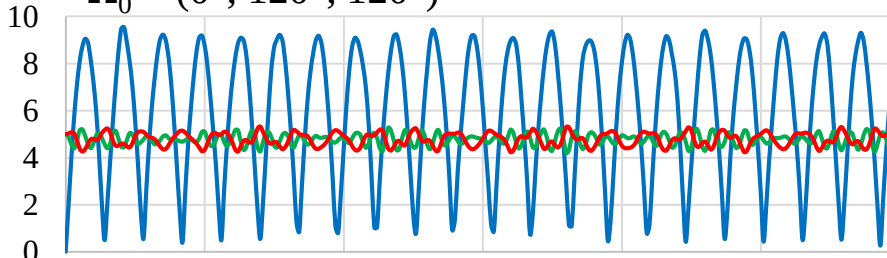
$\Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$



$\omega_0 = (105^\circ, 303^\circ, 334^\circ); \Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 300^\circ)$



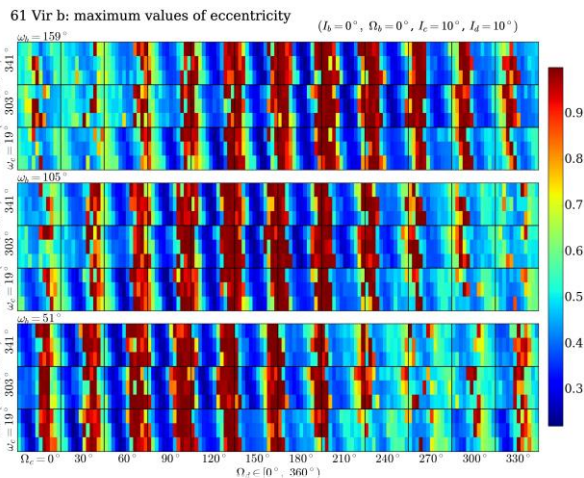
$\Omega_0 = (0^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$



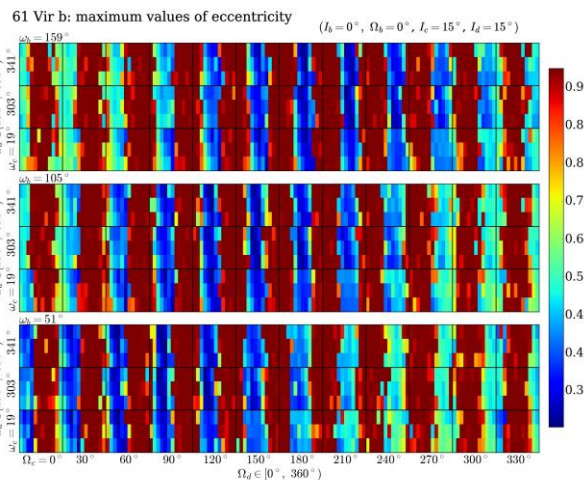
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3
млн лет

61 VIR: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ

$$e_0 = (0.12, 0.14, 0.35)$$

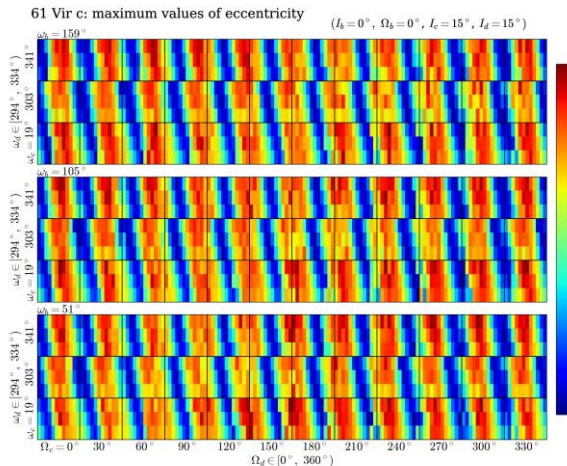


$$I_0 = 10^\circ, e_{\max} \in (0.2, 1)$$

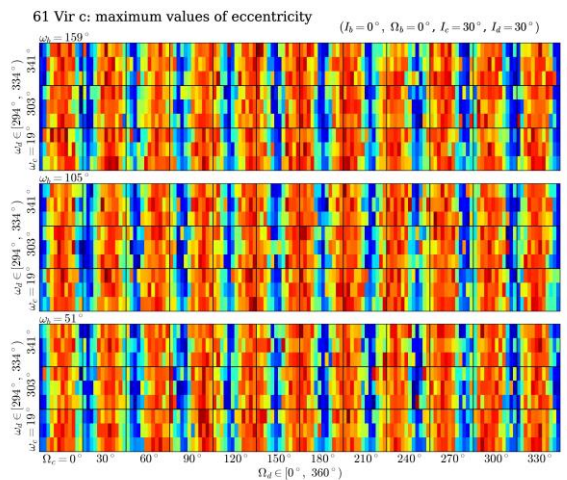


$$I_0 = 15^\circ, e_{\max} \in (0.2, 1)$$

b

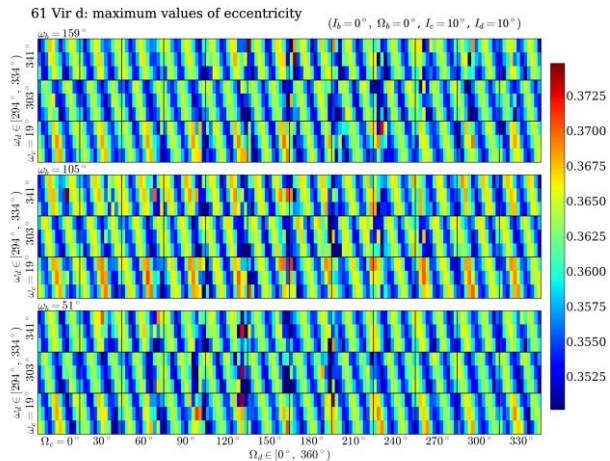


$$I_0 = 10^\circ, e_{\max} \in (0.35, 0.55)$$

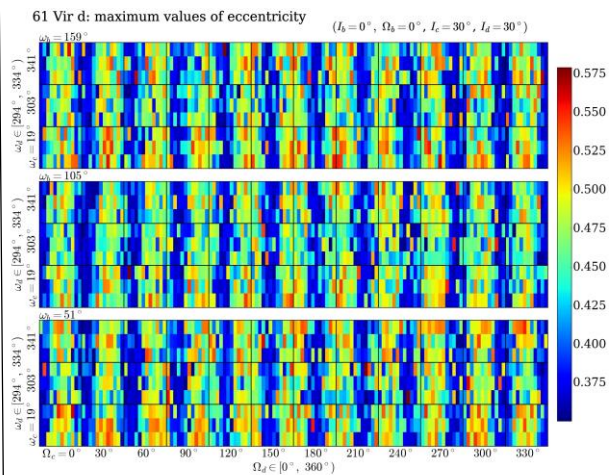


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.4, 0.8)$$

c



$$I_0 = 10^\circ, e_{\max} \in (0.35, 0.375)$$

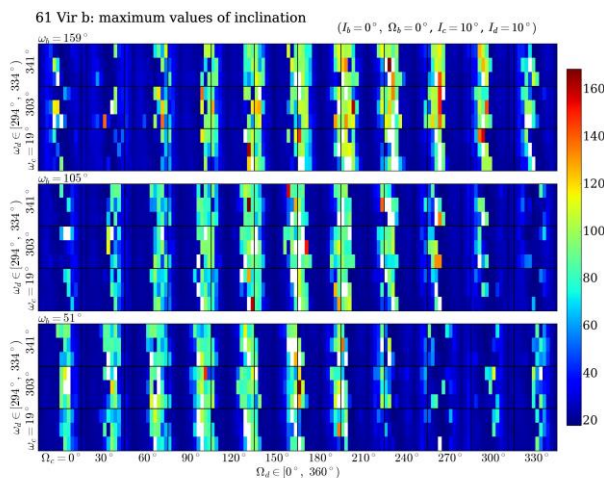


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.35, 0.58)$$

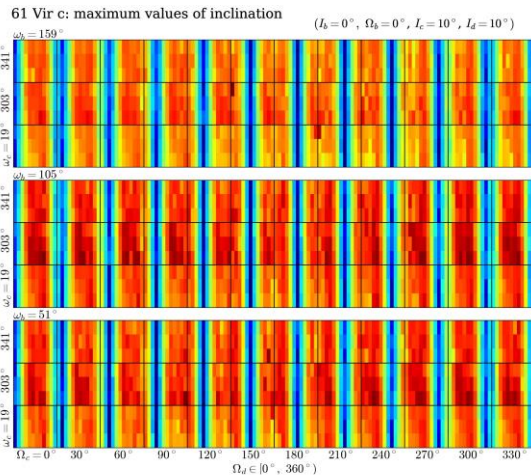
d

61 VIR: МАКСИМАЛЬНЫЕ НАКЛОНЫ ОРБИТ

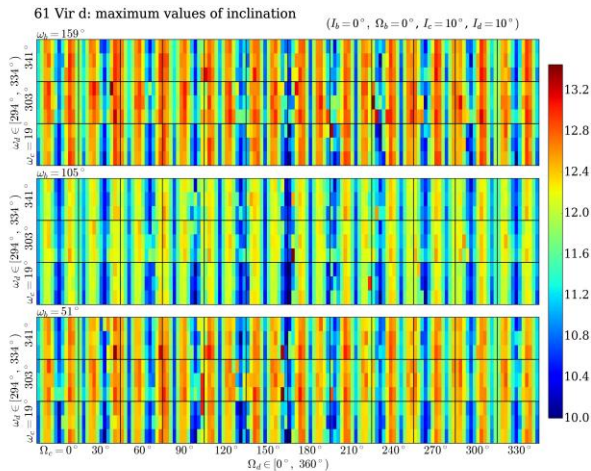
$$e_0 = (0.12, 0.14, 0.35)$$



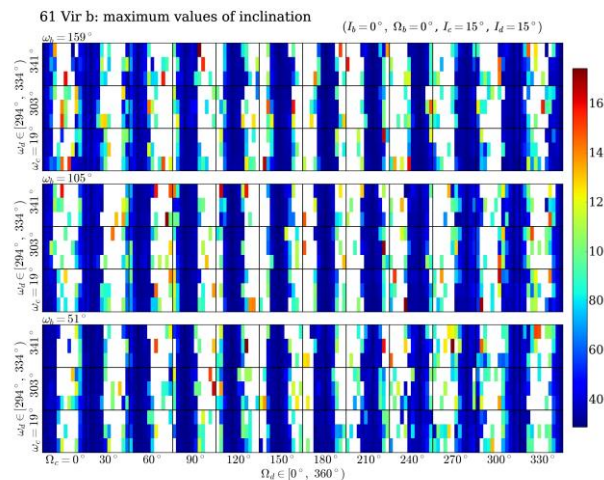
$$I_0 = 10^\circ, I_{\max} \in (20^\circ, 160^\circ)$$



$$I_0 = 10^\circ, I_{\max} \in (10^\circ, 20^\circ)$$

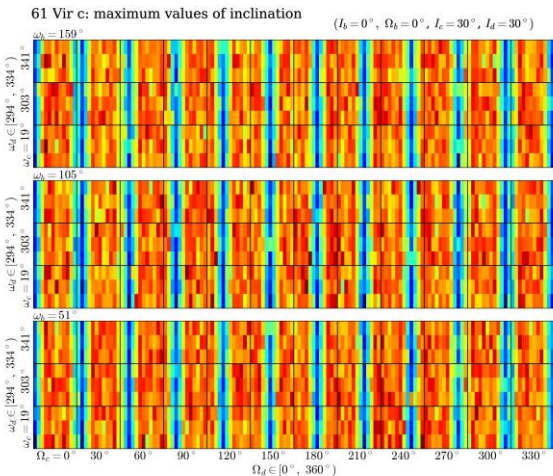


$$I_0 = 10^\circ, I_{\max} \in (10^\circ, 13^\circ)$$



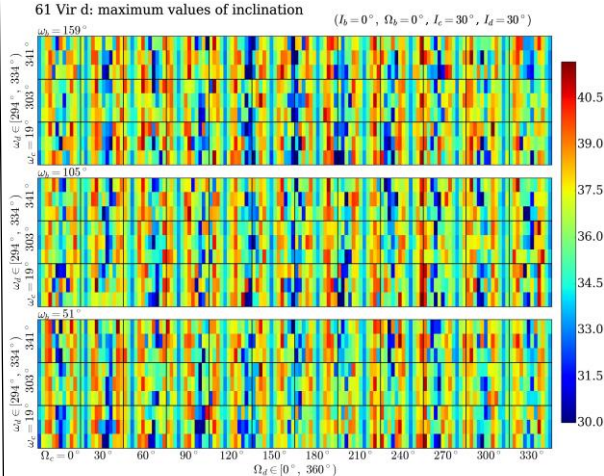
$$I_0 = 15^\circ, I_{\max} \in (40^\circ, 180^\circ)$$

b



$$I_0 = 30^\circ, I_{\max} \in (33^\circ, 57^\circ)$$

c



$$I_0 = 30^\circ, I_{\max} \in (30^\circ, 41^\circ)$$

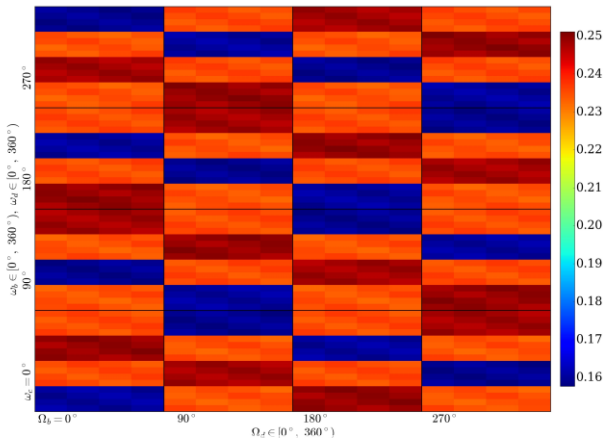
d

GJ 3138: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ

$$e_0 = (0.19, 0.11, 0.32)$$

GJ 3138 b: maximum values of eccentricity

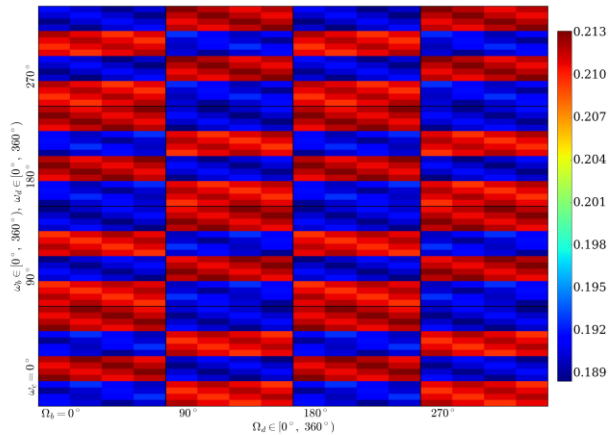
($I_c = 0^\circ$, $\Omega_c = 0^\circ$, $I_b = 5^\circ$, $I_d = 5^\circ$)



$$I_0 = 5^\circ - 20^\circ, e_{\max} \in (0.16, 0.25)$$

GJ 3138 c: maximum values of eccentricity

($I_c = 0^\circ$, $\Omega_c = 0^\circ$, $I_b = 5^\circ$, $I_d = 5^\circ$)



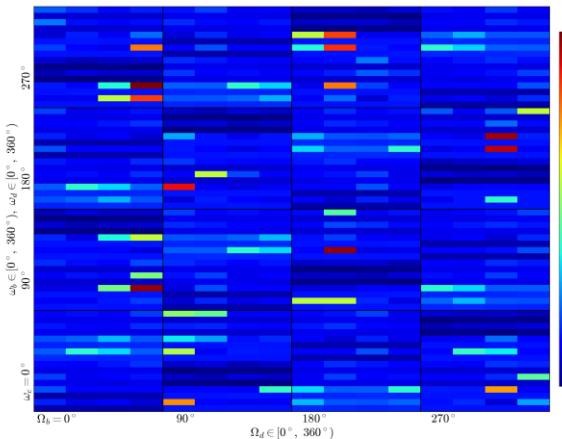
$$I_0 = 5^\circ - 20^\circ, e_{\max} \in (0.19, 0.21)$$

$e_{\max} \approx e_0$,
отличие не более
чем на 0.00005

$$I_0 = 5^\circ - 20^\circ$$

GJ 3138 b: maximum values of eccentricity

($I_c = 0^\circ$, $\Omega_c = 0^\circ$, $I_b = 30^\circ$, $I_d = 30^\circ$)

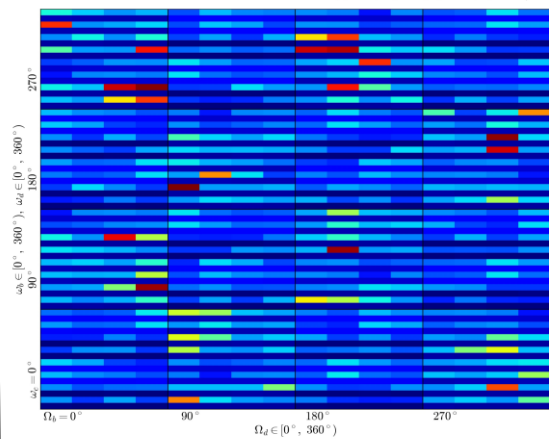


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.16, 0.82)$$

c

GJ 3138 c: maximum values of eccentricity

($I_c = 0^\circ$, $\Omega_c = 0^\circ$, $I_b = 30^\circ$, $I_d = 30^\circ$)

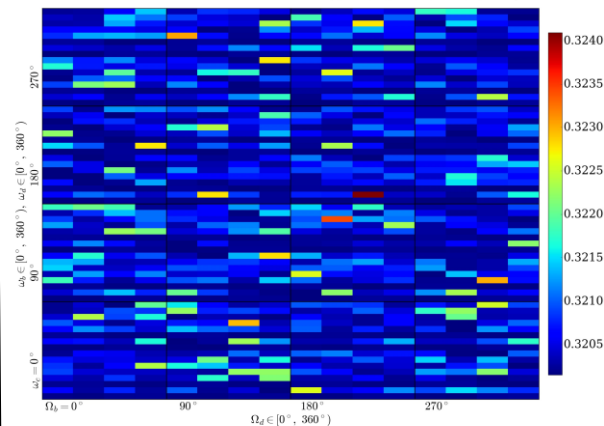


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.24, 0.88)$$

b

GJ 3138 d: maximum values of eccentricity

($I_c = 0^\circ$, $\Omega_c = 0^\circ$, $I_b = 45^\circ$, $I_d = 45^\circ$)



$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.321, 0.324)$$

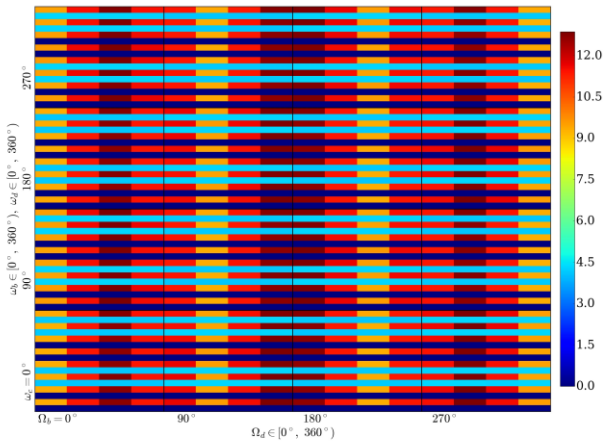
d

GJ 3138: МАКСИМАЛЬНЫЕ НАКЛОНЫ ОРБИТ

$$e_0 = (0.19, 0.11, 0.32)$$

GJ 3138 c: maximum values of inclination

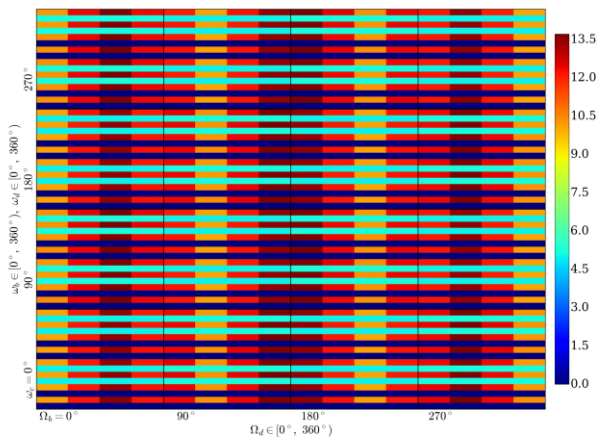
$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 13^\circ)$$

GJ 3138 b: maximum values of inclination

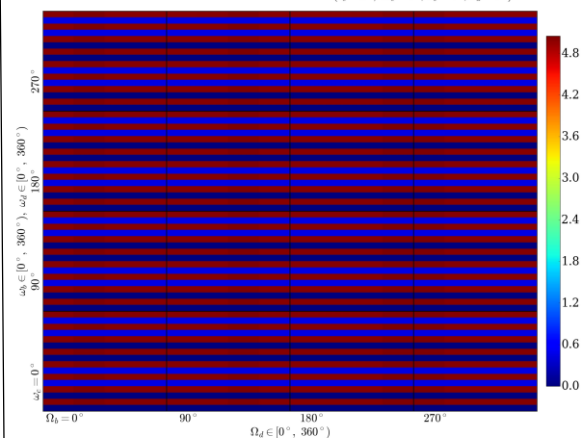
$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 14^\circ)$$

GJ 3138 d: maximum values of inclination

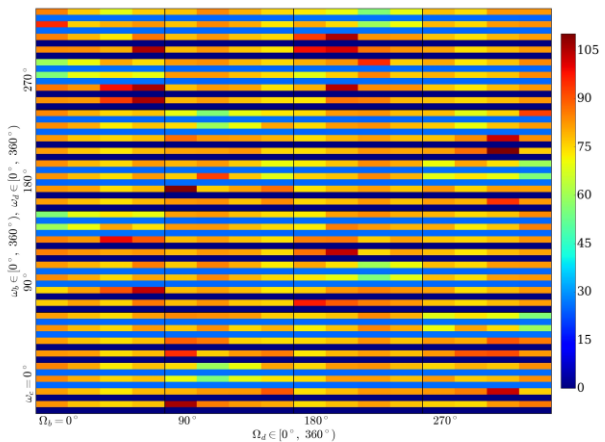
$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 5^\circ)$$

GJ 3138 c: maximum values of inclination

$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 30^\circ, I_d = 30^\circ)$$

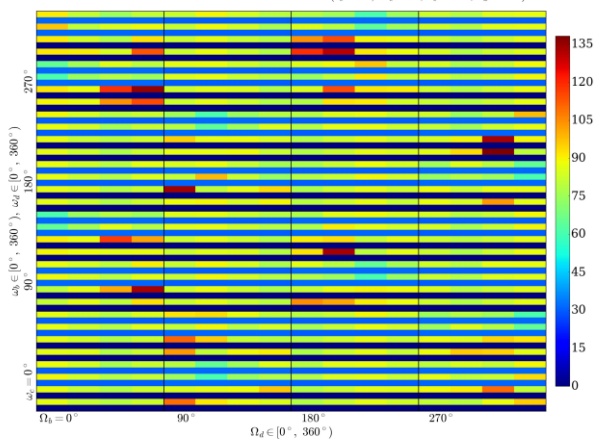


$$I_0 = 30^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 105^\circ)$$

c

GJ 3138 b: maximum values of inclination

$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 30^\circ, I_d = 30^\circ)$$

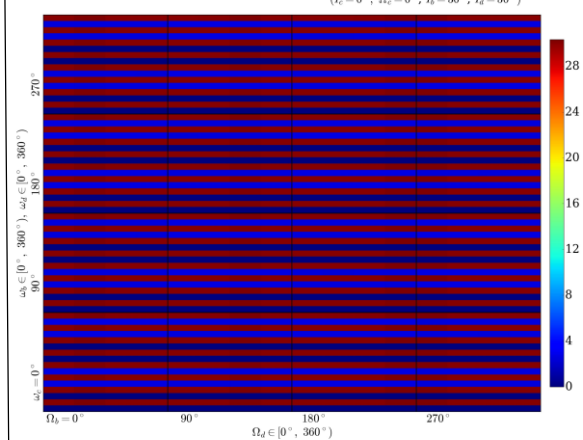


$$I_0 = 30^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 135^\circ)$$

b

GJ 3138 d: maximum values of inclination

$$(I_c = 0^\circ, \Omega_c = 0^\circ, I_b = 30^\circ, I_d = 30^\circ)$$



$$I_0 = 30^\circ, I_{\max} \in (0^\circ, 30^\circ)$$

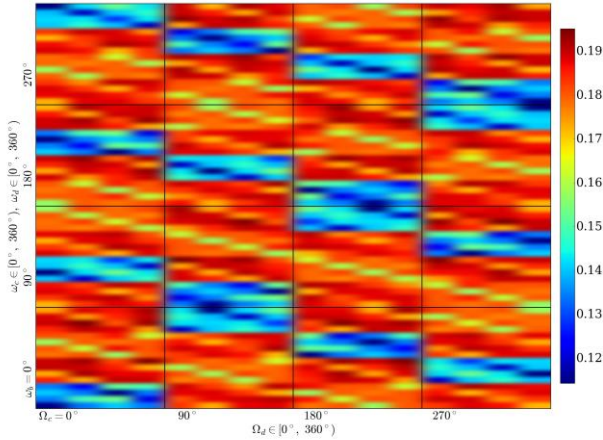
d

HD 39194: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ

$$e_0 = (0.1, 0.104, 0.04)$$

HD 39194 b: maximum values of eccentricity

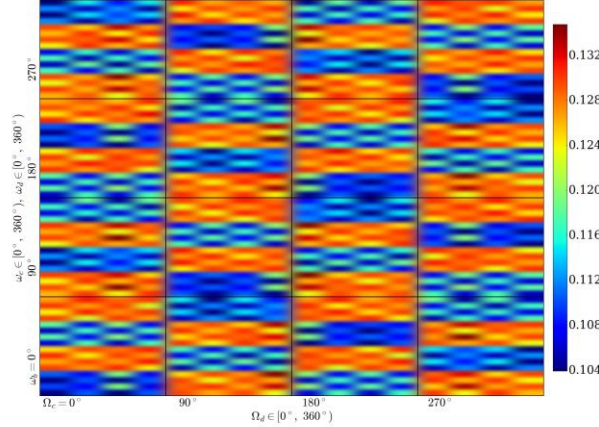
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.12, 0.20)$$

HD 39194 c: maximum values of eccentricity

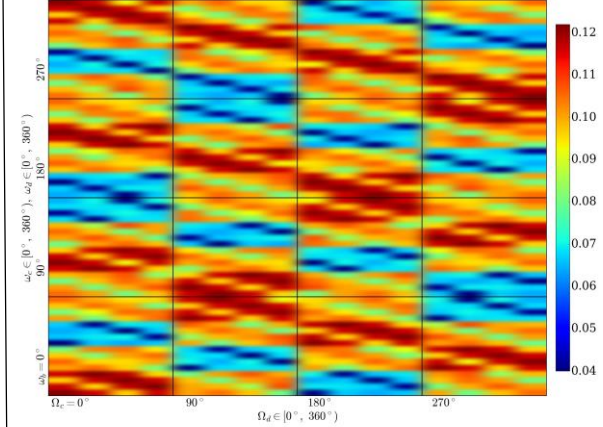
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.1, 0.14)$$

HD 39194 d: maximum values of eccentricity

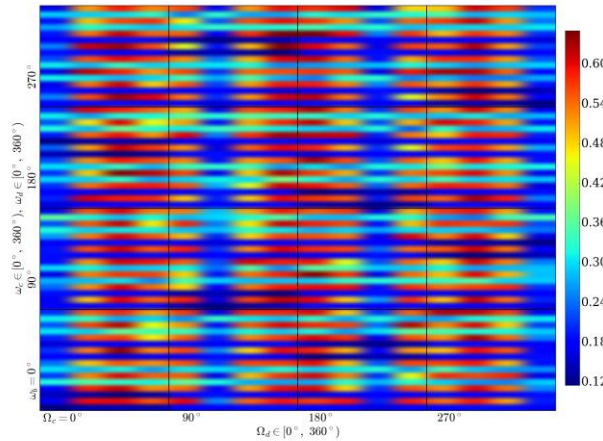
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.04, 0.12)$$

HD 39194 b: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 20^\circ, I_d = 20^\circ)$$

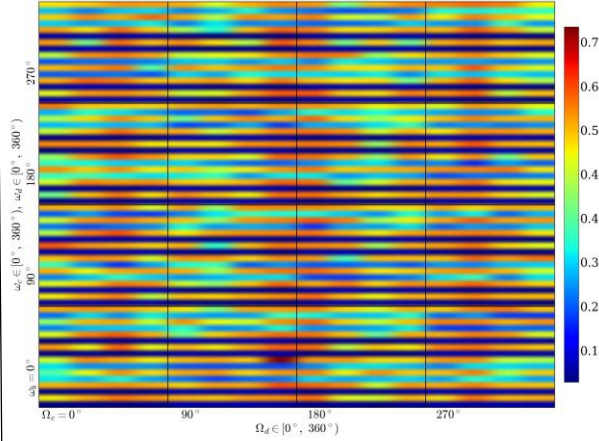


$$I_0 = 20^\circ, e_{\max} \in (0.12, 0.64)$$

b

HD 39194 c: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 30^\circ, I_d = 30^\circ)$$

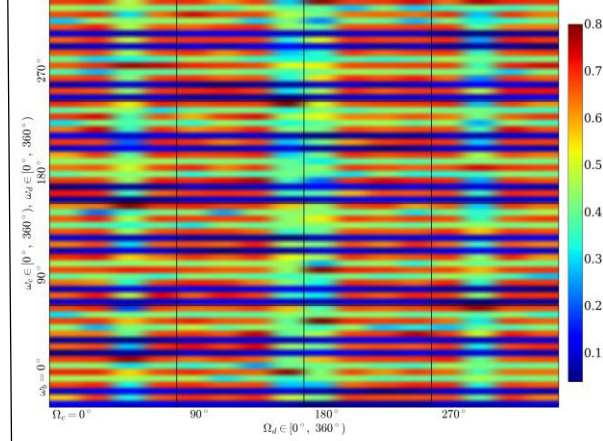


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.14, 0.72)$$

c

HD 39194 d: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 40^\circ, I_d = 40^\circ)$$



$$I_0 = 40^\circ, e_{\max} \in (0.1, 0.8)$$

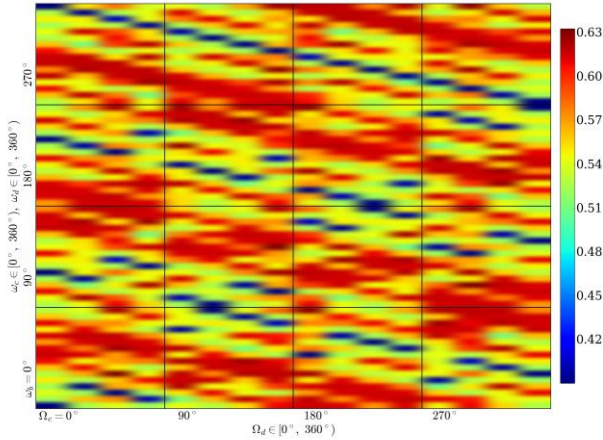
d

HD 39194: МАКСИМАЛЬНЫЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ

$$e_0 = (0.3, 0.116, 0.36)$$

HD 39194 b: maximum values of eccentricity

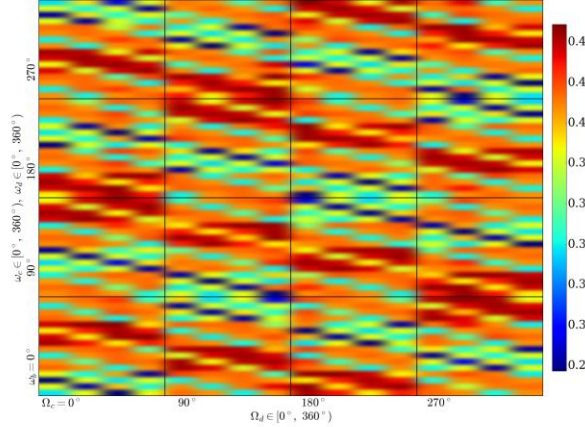
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.40, 0.63)$$

HD 39194 c: maximum values of eccentricity

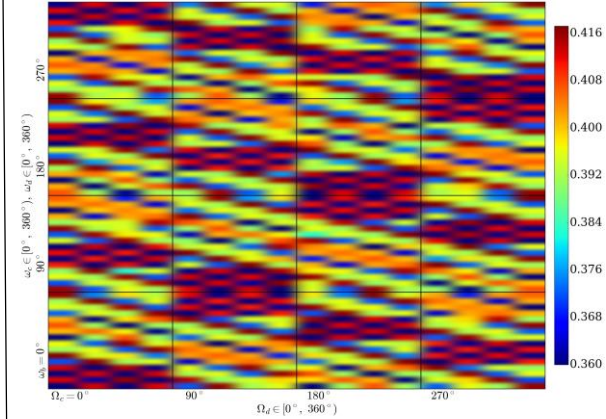
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.28, 0.45)$$

HD 39194 d: maximum values of eccentricity

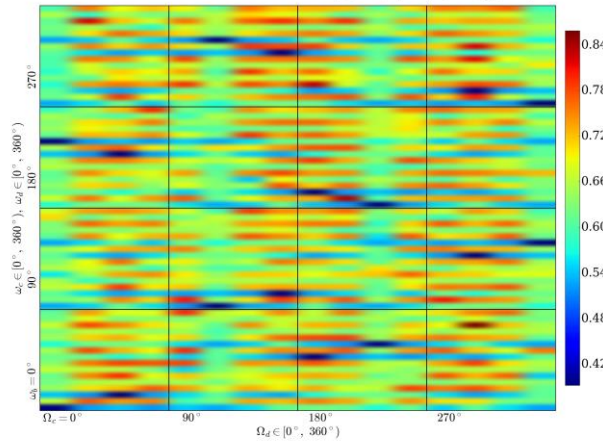
$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 5^\circ, I_d = 5^\circ)$$



$$I_0 = 5^\circ - 15^\circ, e_{\max} \in (0.36, 0.42)$$

HD 39194 b: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 20^\circ, I_d = 20^\circ)$$

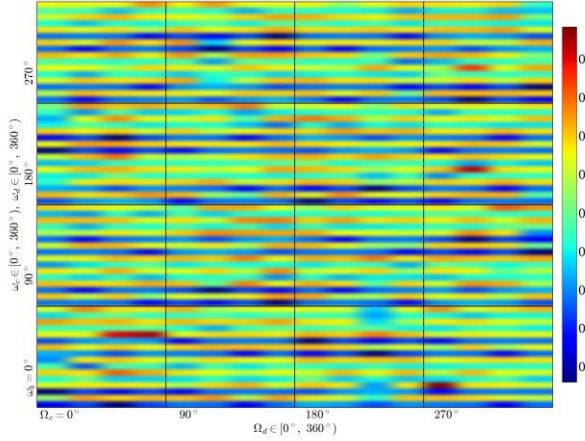


$$I_0 = 20^\circ, e_{\max} \in (0.42, 0.84)$$

b

HD 39194 c: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 30^\circ, I_d = 30^\circ)$$

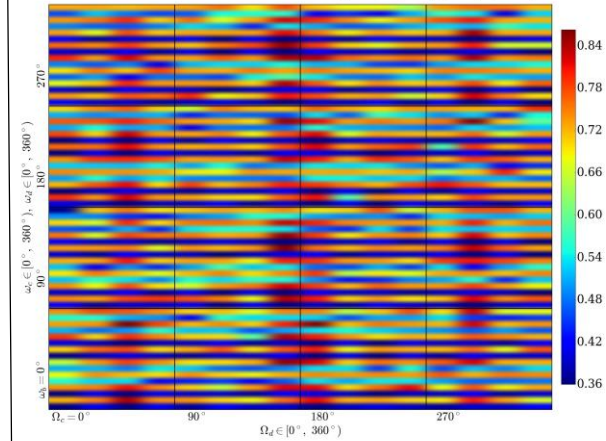


$$I_0 = 30^\circ, e_{\max} \in (0.30, 0.80)$$

c

HD 39194 d: maximum values of eccentricity

$$(I_b = 0^\circ, \Omega_b = 0^\circ, I_c = 40^\circ, I_d = 40^\circ)$$



$$I_0 = 40^\circ, e_{\max} \in (0.36, 0.84)$$

d

ВЫВОДЫ

- Показан способ, позволяющий по результатам анализа моделирования орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем, определять диапазоны изменения неизвестных или известных с ошибками элементов орбит.
- Предположение о стабильности наблюдаемых планетных систем позволяет исключить начальные условия ведущие к экстремальному росту эксцентриситетов и наклонов орбит планет, и выявить начальные условия при которых элементы орбит сохраняются малыми на всем интервале моделирования.
- В дальнейшем планируется развить способ исследования динамических и резонансных характеристик внесолнечных планетных систем путем анализа уравнений движения и функций замены переменных, определяющих разности между оскулирующими и средними элементами.

A detailed space illustration. In the upper left, a bright yellow star is surrounded by several planets of varying sizes and colors (blue, grey, brown) on elliptical orbits. In the lower right, a large planet with a prominent ring system is shown. The background is a dark, star-filled space with a glowing, hazy nebula in shades of orange and yellow. The text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!" is written in a bold, red, serif font across the center of the image.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!