



# **Миграция планетезималей и пылевых частиц в экзопланетной системе Проксима Центавра**

**С.И. Ипатов**

ГЕОХИ РАН

**siipatov@hotmail.com, <http://siipatov.webnode.ru/>**

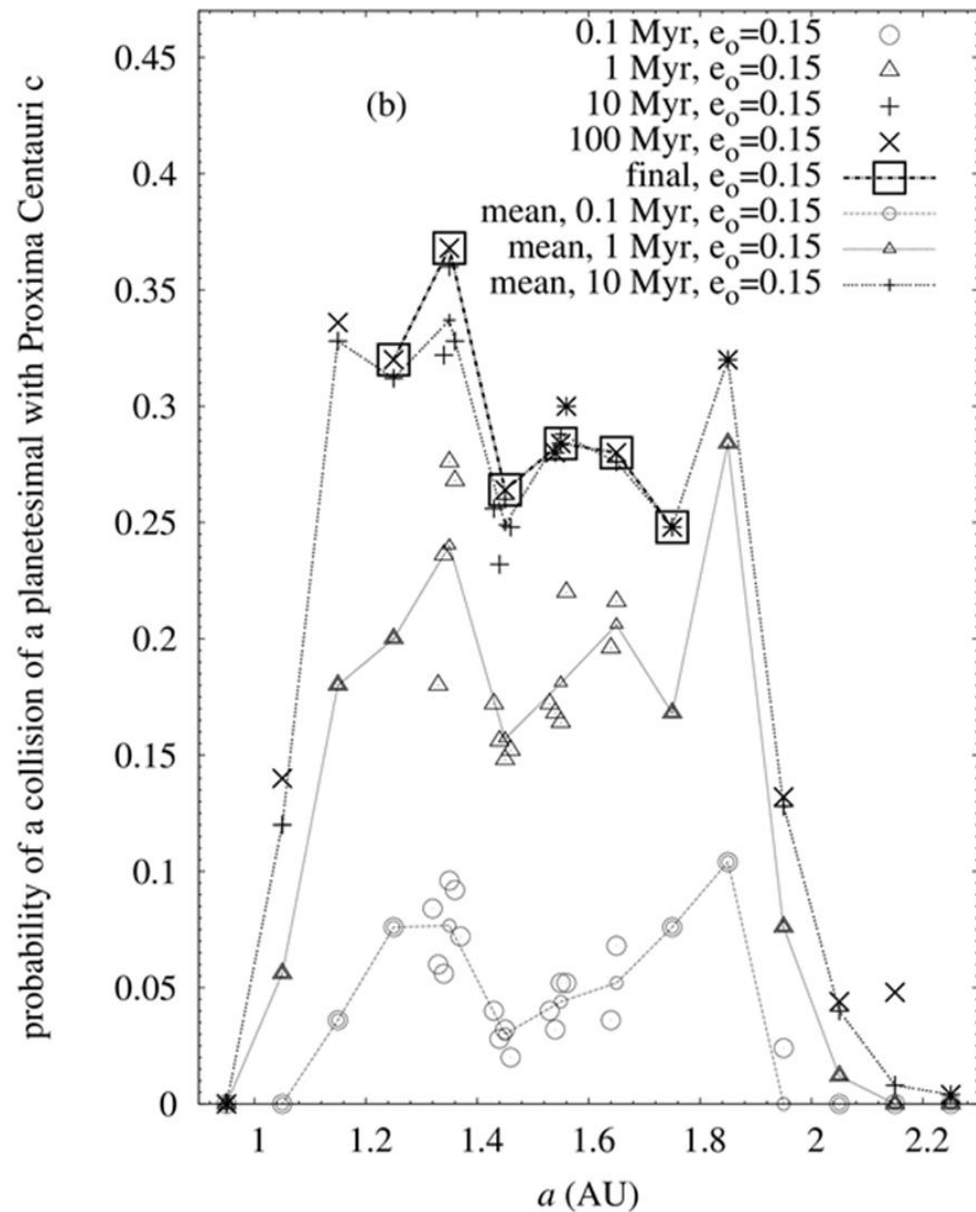
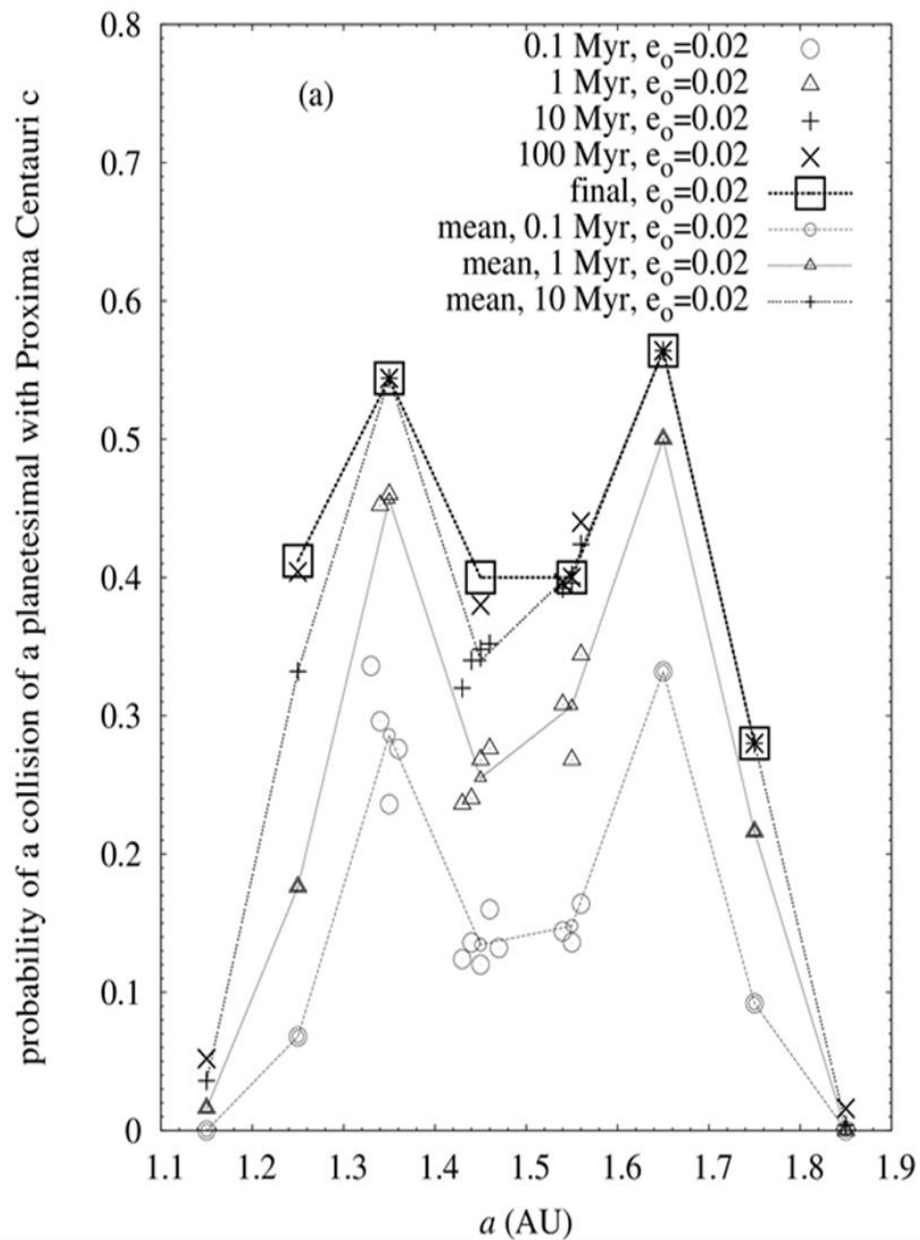
# Варианты расчетов

- В экзопланетной системе Проксима Центавра масса звезды равна **0.12** массы Солнца, а планета *c* ( $a_c=1.489$  а.е.,  $e_c=0.04$ ,  $m_c=7m_E$ ,  $m_E$  - масса Земли) находится за линией льда. Были проведены расчеты миграции планетезималей из зоны питания экзопланеты *c* в том числе к внутренней экзопланете *b* ( $a_b=0.04857$  а.е.,  $e_b=0.11$ ,  $m_b=1.17m_E$ ). Проводились расчеты и для меньшей массы планеты *c*.
- В каждом варианте расчетов начальные значения  $a_0$  больших полуосей орбит планетезималей находились в диапазоне от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}=a_{\min}+0.1$  а.е. Рассмотренные значения  $a_{\min}$  варьировались от **0.9** до **2.2** а.е. Число планетезималей с  $a_0$  было пропорционально  $a_0^{1/2}$ , т.е. поверхностная плотность была пропорциональна  $a_0^{-1/2}$ . Для  $(i+1)$ -й планетезимали значение  $a_0$  вычислялось по формуле  $a_{o(i+1)}=(a_{oi}^2+[(a_{\min}+d_a)^2-a_{\min}^2]/N_o)^{1/2}$ , где  $a_{oi}$  – значение  $a_0$  для  $i$ -й планетезимали,  $d_a=0.1$  а.е.,  $N_o=250$  – количество планетезималей в одном варианте.
- Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись  $e_o=0.02$  или  $e_o=0.15$ . Начальные наклоны орбит планетезималей были равны  $e_o/2$  рад.

# Варианты расчетов

- В проведенных расчетах учитывалось гравитационное влияние звезды и экзопланет  $c$  и  $b$ . Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм из пакета SWIFT.
- Рассматриваемый шаг интегрирования по времени  $t_s$  равнялся 0.1, 0.2, 0.5, 1 или 2 земным суткам, и сравнивались результаты расчетов при разных  $t_s$ .
- В основной серии расчетов  $C$  из интегрирования исключались тела, которые столкнулись с планетами или звездой или достигли сферы Хилла звезды (1200 а.е.).
- Вероятности столкновений планетезималей с планетой  $d$  ( $a_d=0.02895$  а.е.,  $m_d=0.29m_E$ ,  $e_d=i_d=0$ ) рассчитывались на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел (хранящихся с шагом 100 лет) аналогично [Ипатов, 2019].
- В серии  $MP$  планеты рассматривались как материальные точки и вероятности столкновений планетезималей с планетами вычислялись на основе массивов элементов орбит.

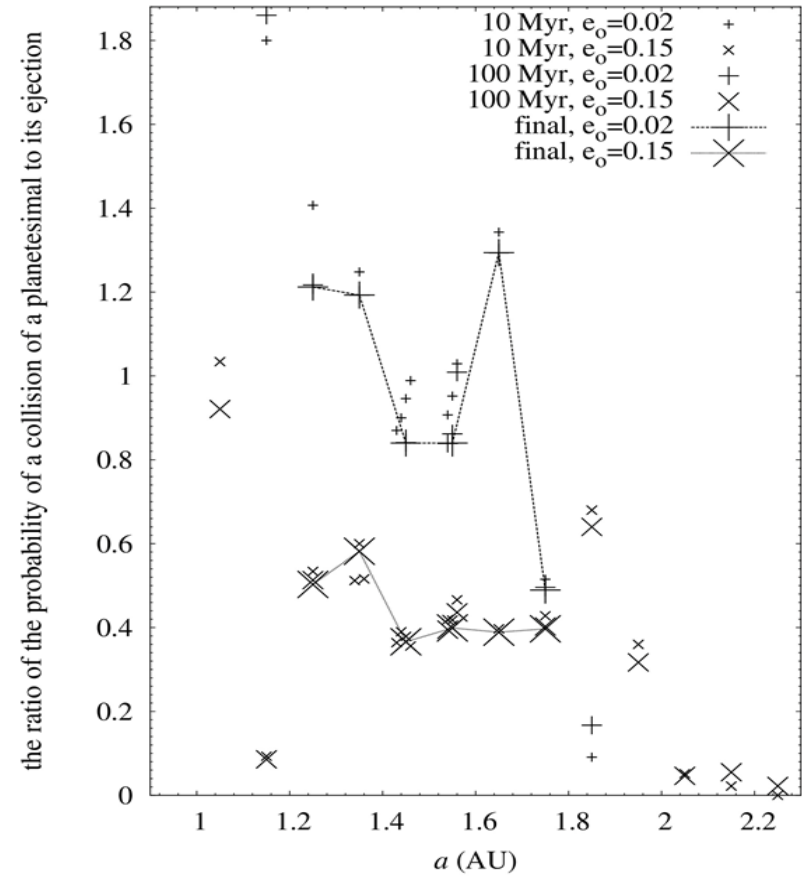
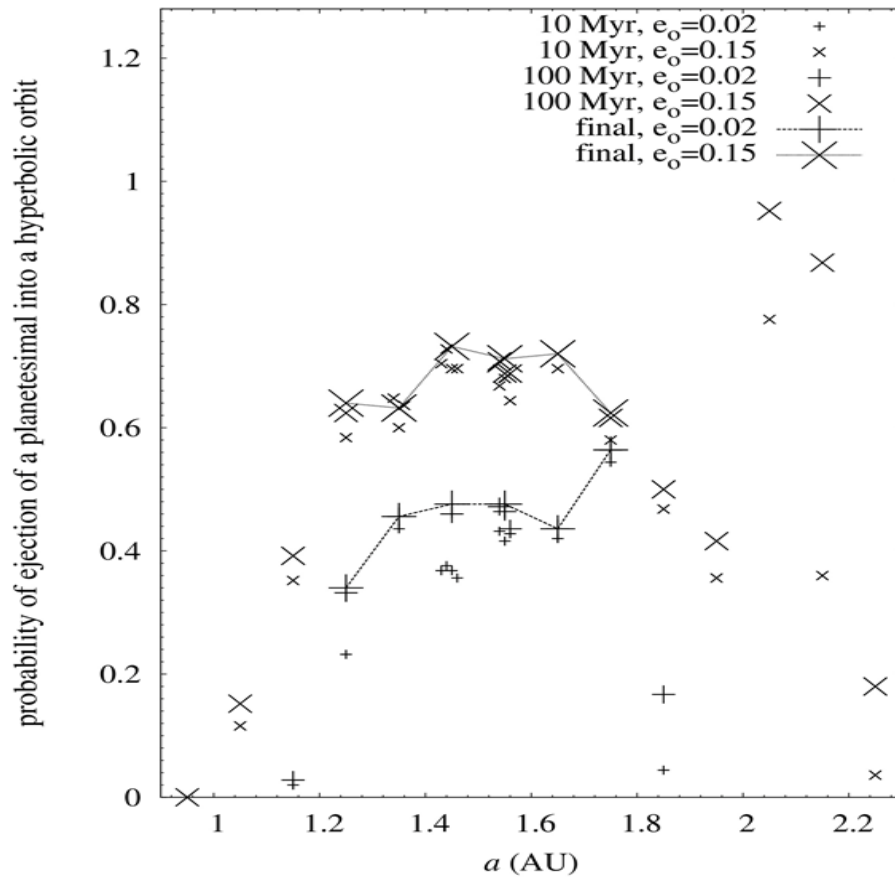
# Вероятность $p_c$ столкновения планетезимали с планетой $c$ в зависимости от больших полуосей начальных орбит планетезималей $a = a_{\min} + 0.05 + a_{ts}$



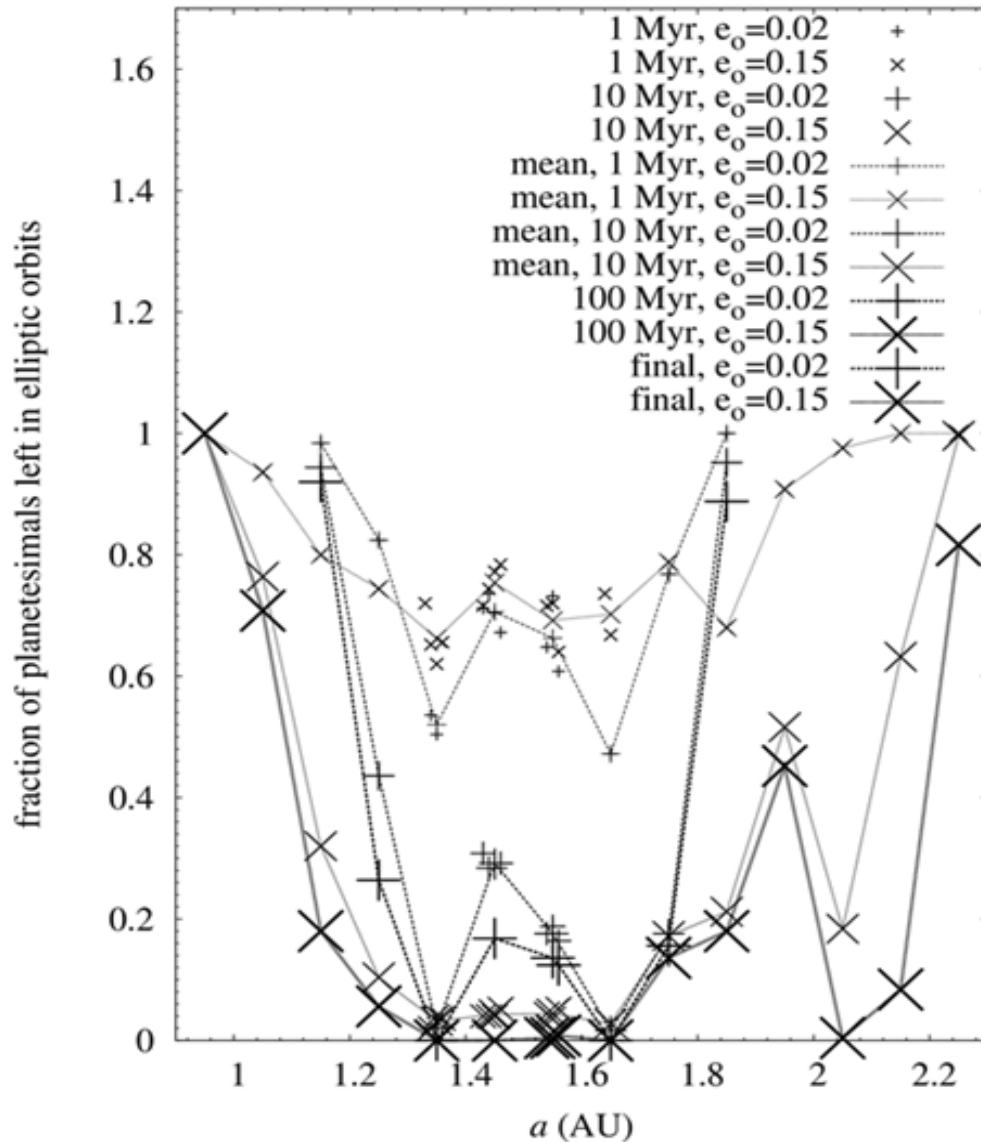
# Вероятность $p_{ej}$ выброса планетезимали на гиперболическую орбиту

В зависимости от  $a=a_{min}+0.05+a_{ts}$  а.е. при  $e_o=0.02$  или  $e_o=0.15$  для нескольких интервалов времени в вариантах С (левый график).

Отношение  $p_{cej}$  вероятности  $p_c$  столкновения планетезимали с планетой с к вероятности ее выброса на гиперболическую орбиту в зависимости от  $a=a_{min}+0.05+a_{ts}$  а.е. (правый график).



# Доля планетезималей, оставшихся на эллиптических орбитах

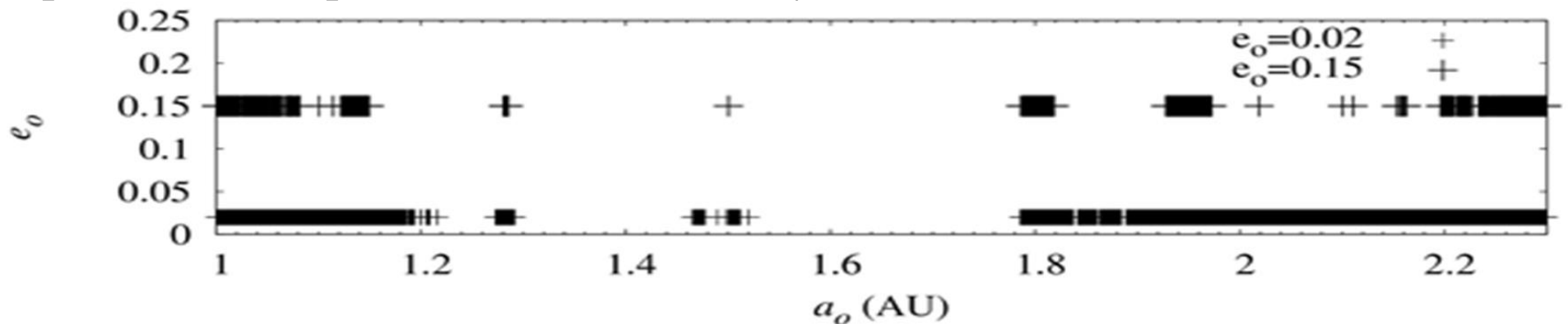


• Рис. Доля планетезималей, оставшихся на эллиптических орбитах, в зависимости от  $a=a_{\min}+0.05+a_{ts}$  а.е. для нескольких интервалов времени (равных 0.1, 1, 10, 100 млн лет и в конечное время, равное нескольким сотням млн лет) в вариантах С. Начальные большие полуоси орбит планетезималей находились между  $a_{\min}$  и  $a_{\min}+0.1$  а.е., а начальные эксцентриситеты  $e_o$  были равны 0.02 или 0.15.  $a_{ts}$  равно 0, -0.03, -0.02, -0.01 и 0.01 а.е. при шаге интегрирования  $t_s$  равном  $1^d$ ,  $0.1^d$ ,  $0.2^d$ ,  $0.5^d$ , и  $2^d$  соответственно. Каждый знак на рисунке соответствует среднему значению для 250 планетезималей. Значения, отмеченные на рисунке как «средние», были усреднены по значениям, полученным при разных  $t_s$ , и могут быть основаны на расчетах примерно с 1000 планетезималами.

# Начальные значения больших полуосей орбит планетезималей, которые еще имели эллиптические орбиты в конце рассматриваемой эволюции

Спустя сотни миллионов лет некоторые планетезимали все еще могли двигаться по эллиптическим орбитам внутри зоны питания планеты  $c$ , которая была в основном очищена от планетезималей. Часто такие планетезимали могли двигаться в некоторых резонансах с планетой, например, в резонансах 1:1 (как троянцы Юпитера), 5:4 и 3:4. Таких оставшихся планетезималей было больше при малых эксцентриситетах. Некоторые планетезимали, двигавшиеся долгое время (1-2 млн лет) по хаотическим орбитам, попадали в резонансы 5:2 и 3:10 с планетой  $c$  и двигались в них минимум десятки миллионов лет.

Для некоторых (обычно резонансных) подобластей  $a_o$ , расположенных вне основной зоны питания планеты  $c$ , планетезимали могли быть выброшены на гиперболические орбиты или могли столкнуться с планетами.



# Зона питания планеты с

• Если рассматривать начальные значения произведения  $a \cdot e$ , характеризующего изменения расстояния от звезды для двигавшихся планеты Проксима-Центавра с и планетезимали (с начальным эксцентриситетом  $e_o$ ), (например,  $e_c \cdot a_c$  и  $e_o \cdot a_{\min002}$ ) то **размеры зоны питания можно оценить по следующим формулам:**

$$a_c - a_{\min002} = 0.04a_c + 0.02a_{\min002} + 2.54a_c \cdot \mu^{1/3}, \quad \text{при } e_o = 0.02$$

$$a_{\max002} - a_c = 0.04a_c + 0.02a_{\max002} + 2.40a_c \cdot \mu^{1/3},$$

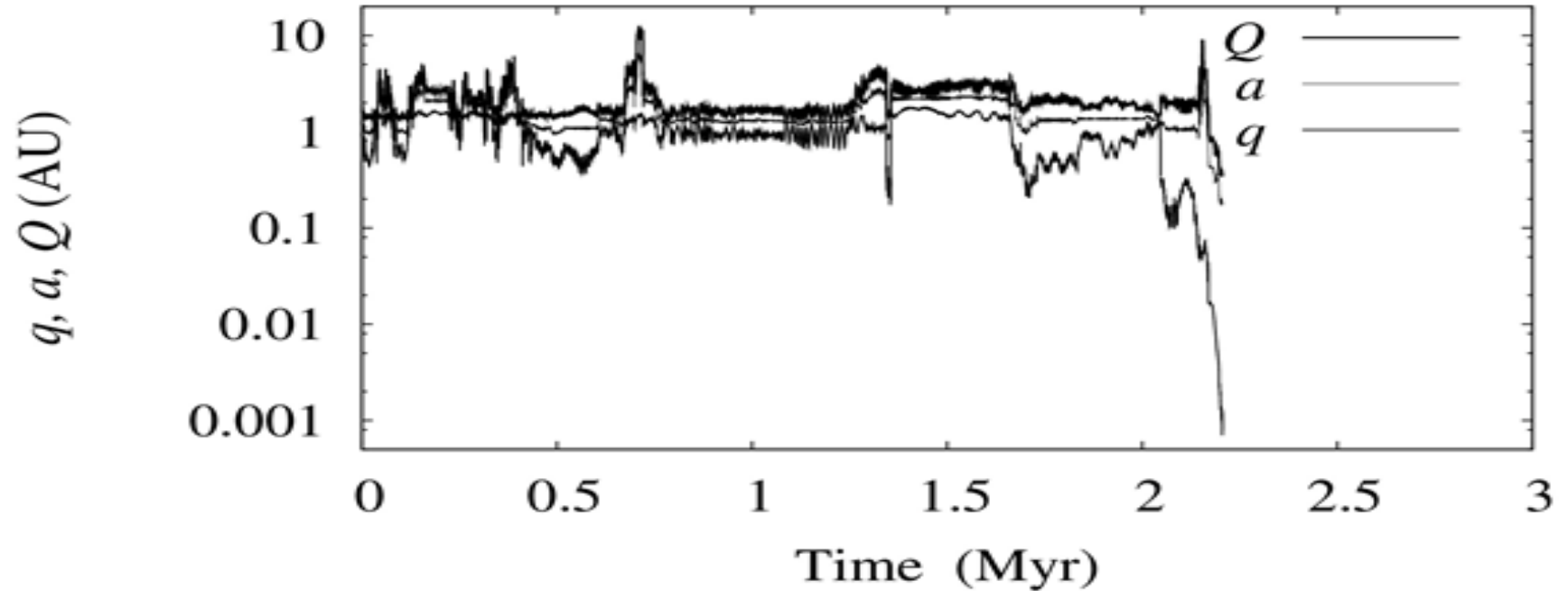
$$a_c - a_{\min015} = 0.04a_c + 0.15a_{\min015} + 2.23a_c \cdot \mu^{1/3}, \quad \text{при } e_o = 0.15$$

$$a_{\max015} - a_c = 0.04a_c + 0.15a_{\max015} + 4.3a_c \cdot \mu^{1/3},$$

где  $a_c$  и  $e_c = 0.04$  - большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты с,  $\mu$  - отношение массы планеты с к массе звезды,  $a_{\min002}$ ,  $a_{\max002}$ ,  $a_{\min015}$  и  $a_{\max015}$  - минимальные и максимальные начальные значения больших полуосей рассмотренных орбит планетезималей для границы зоны питания планеты с **при начальных эксцентриситетах орбит планетезималей, равных 0.02 и 0.15**, соответственно. Коэффициенты перед  $a_c \cdot \mu^{1/3}$  в трех вышеприведенных формулах составляют примерно 2.2–2.5, т.е. близки к коэффициентам в  $\gamma = (2.1–2.45)\mu^{1/3}$  для круговых начальных орбит.



## Столкновения планетезималей, мигрировавших из зоны питания планеты $c$ , с планетой $b$



Пример эволюции со временем большой полуоси  $a$ , перигелийного и афелийного расстояний  $q$  и  $Q$  орбиты планетезимали, столкнувшейся с планетой  $b$  (при  $a_o=1.41566$  а.е.) для варианта расчета  $C$  при  $a_{\min}=1.4$  а.е.,  $e_o=0.15$ ,  $k_c=1$ , и  $t_s=1^d$ .

# Столкновения планетезималей с планетой $b$ или со звездой

Для серии  $C$ , столкновения с планетой  $b$  или со звездой получены только в расчетах при  $e_o=0.15$  с  $a_{\min}$ , равным 1.4 или 1.5 а.е. Время  $t_{\text{col}}$  (в млн лет), прошедшее до таких столкновений, представлено в таблице. Такие столкновения были получены в расчетах с разными шагами интегрирования  $t_s$  и при разных массах планеты  $c$  (или ее зародыша). **Времена  $t_{\text{col}}$ , прошедшие до столкновений планетезималей с планетой  $b$  или звездой, составляли от 1 до 4 млн лет при современной массе планеты  $c$  и около 40-50 млн лет для зародышей планеты  $c$  с массами, равными 0.5 или 0.1 массы планеты  $c$ .**

**Для  $1.2 \leq a_{\min} \leq 1.7$  а.е. и  $e_o=0.15$  вероятность столкновения планетезималей с планетой  $b$  была около  $10^{-3}$ . Для  $e_o=0.02$  вероятность была меньше  $4 \cdot 10^{-4}$ .**

Таблица. Времена  $t_{\text{col}}$  (в млн лет) до столкновений планетезималей с планетой  $b$  или звездой в вариантах расчетов  $C$  с  $e_o=0.15$ ,  $a_{\min}$ , шагом интегрирования  $t_s$  и отношением  $k_c=m_e/m_c$  массы зародыша планеты к массе планеты  $c$ .

|                        |      |      |      |      |      |      |       |       |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| $a_{\min}$ (AU)        | 1.4  | 1.5  | 1.5  | 1.4  | 1.5  | 1.5  | 1.4   | 1.5   |
| $t_s$ (days)           | 1    | 0.5  | 2    | 2    | 0.5  | 1    | 1     | 1     |
| $k_c$                  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0.5   | 0.1   |
| $t_{\text{col}}$ (Myr) | 2.20 | 3.15 | 2.69 | 4.07 | 1.16 | 1.64 | 50.92 | 41.51 |
| Collision with         | b    | b    | b    | star | star | star | star  | b     |

# Вероятности столкновений планетезималей с планетами $b$ и $d$

Для серии расчетов  $MP$  вероятность  $p_b^*$  столкновения одной планетезимали, первоначально находившейся вблизи орбиты экзопланеты  $c$ , с экзопланетой  $b$  была отлична от нуля в 5 из 18 вариантов при  $e_o=0.02$  и в 3 из 6 вариантов при  $e_o=0.15$ . При  $e_o=0.02$  среднее значение  $p_b^*$  для одной из 4500 планетезималей равнялось  $4.7 \cdot 10^{-4}$ , но среди них было две планетезимали с  $p_b=1$ . При  $e_o=0.15$  среднее значение вероятности  $p_b^*$  для одной из 1500 планетезималей равнялось  $2.0 \cdot 10^{-3}$ , но среди них было три планетезимали с  $p_b=1$ . При  $e_o=0.15$  значения  $p_b^*$  для серии расчетов  $MP$  были в 2 раза больше, чем  $p_b$  в серии  $C$ . Следовательно, можно ожидать, что в серии  $C$  вероятность  $p_b$  столкновения планетезимали с планетой  $b$  около  $2 \cdot 10^{-4}$  при  $e_o=0.02$ .

**Таблица.** Вероятности  $p_b^*$  и  $p_d^*$  столкновений планетезимали с планетами  $b$  и  $d$  для серии расчетов  $MP$  при  $T=50$  млн лет.  $p_{b0}^*$  – вероятность столкновения планетезимали с планетой  $b$ , если эксцентриситет орбиты экзопланеты считать равным 0.  $p_{\Sigma b}^*/p_{\Sigma d}^*$  представляет собой отношение сумм вероятностей столкновений планетезималей с Проксимой Центавра  $b$  и  $d$ , рассчитанных для всех столкновений планетезималей с экзопланетами, даже если расчетная вероятность для одной планетезимали может превышать 1.  $p_{\Sigma b0}^*/p_{\Sigma b}^*$  – отношение сумм вероятностей столкновений планетезималей с планетой  $b$  для эксцентриситета ее орбиты, равного 0 и 0.11, рассчитанное для всех столкновений планетезималей с экзопланетой.  $N_b$  и  $N_d$  – количество планетезималей (среди 250 планетезималей в каждом варианте), имеющих ненулевые вероятности столкновений с планетами  $b$  и  $d$ , соответственно.

| $a_{\min}$ (AU) | $e_o$ | $p_b^*$              | $p_d^*$              | $p_{b0}^*$           | $p_{b0}^*/p_b^*$ | $p_{\Sigma b}$ | $p_{\Sigma b}^*/p_{\Sigma d}^*$ | $p_{\Sigma b0}^*/p_{\Sigma b}^*$ | $N_b$ | $N_d$ |
|-----------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|-------|-------|
| 1.2             | 0.02  | 0.004                | 0.004                | 0.004                | 1.0              | 4.92           | 0.02                            | 2.15                             | 1     | 1     |
| 1.3             | 0.02  | 0.00403              | 0.000683             | 0.00402              | 1.0              | 4.04           | 23.7                            | 0.45                             | 3     | 3     |
| 1.4             | 0.02  | 0.00032              | 0.000143             | 0.000423             | 1.32             | 0.08           | 2.24                            | 1.32                             | 1     | 1     |
| 1.5             | 0.02  | $1.28 \cdot 10^{-5}$ | 0                    | $1.78 \cdot 10^{-5}$ | 1.39             | 0.002          | -                               | 1.39                             | 2     | 0     |
| 1.6             | 0.02  | $9.88 \cdot 10^{-5}$ | $3.02 \cdot 10^{-5}$ | 0.000119             | 1.20             | 0.025          | 3.27                            | 1.2                              | 1     | 1     |
| 1.4             | 0.15  | $3.64 \cdot 10^{-6}$ | $2.58 \cdot 10^{-6}$ | $6.22 \cdot 10^{-6}$ | 1.71             | 0.0009         | 1.41                            | 1.71                             | 1     | 1     |
| 1.6             | 0.15  | 0.008                | 0.008                | 0.008                | 1.0              | 23.2           | 0.11                            | 5.68                             | 2     | 2     |
| 1.7             | 0.15  | 0.004                | 0.004                | 0.004                | 1.0              | 9.93           | 0.099                           | 5.01                             | 1     | 1     |

# Миграция планетезималей из зоны питания планеты Проксима Центавра с к внутренним планетам

Общая масса планетезималей и воды, доставленных из зоны планеты  $c$  к планете  $b$ , равна  $m_{c-b}=p_b \cdot m_{fzc}$  и  $m_{ice}=p_b \cdot k_{ice} \cdot m_{fzc}$ , соответственно, где  $m_{fzc}$  – общая масса планетезималей за линией льда, которые могли со временем достигнуть зоны питания экзопланеты Проксима Центавра  $c$ ,  $k_{ice}$  – доля воды в планетезималях,  $p_b$  – вероятность столкновения планетезимали из зоны питания планеты  $c$  с планетой  $b$ .

Для зародыша планеты  $c$  массой в два раза меньшей массы планеты  $c$ , отношение  $p_{cej}=p_c/p_{ej}$  числа столкнувшихся планетезималей к числу планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, было в диапазоне 1.3-1.5 и 0.5-0.6 при  $e_o=0.02$  и  $e_o=0.15$ , соответственно. Эти значения  $p_c/p_{ej}$  мало отличались от значений (0.8-1.3 и 0.4-0.6), полученных при массе планеты  $c$ .

При расчетах было получено, что планетезимали могли столкнуться с планетой  $b$  уже при массе зародыша планеты  $c$  в десять раз меньшей массы планеты  $c$ .

## Суммарная масса планетезималей, доставленных к планете $b$

- **Общая масса планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты планетой  $c$ , могла быть около  $(3.5-7)m_E$ .**
- **Добавляя массу планеты  $c$ , можно сделать вывод о том, что общая масса  $m_{fzc}$  планетезималей в зоне питания планеты  $c$  могла быть не меньше  $10m_E$  и  $15m_E$  при  $e_o=0.02$  и  $e_o=0.15$  соответственно. При расчетах было получено, что вероятность  $p_b$  около  $2 \cdot 10^{-4}$  при  $e_o=0.02$  и около  $10^{-3}$  при  $e_o=0.15$ .**
- **При  $m_{fzc}=10m_E$  и  $p_b=2 \cdot 10^{-4}$  имеем  $m_{c-b}=0.002m_E$ . Это минимальная оценка (соответствующая  $e_o=0.02$ ) суммарной массы планетезималей, доставленных к планете  $b$  из зоны питания планеты  $c$ .**
- **Для  $e_o=0.15$  при  $m_{fzc}=15m_E$  и  $p_b=10^{-3}$  эта оценка равняется  $m_{c-b}=0.015m_E$ . Большие значения  $e_o$  соответствуют росту эксцентриситетов орбит планетезималей из-за их взаимного гравитационного влияния. Рост эксцентриситетов орбит планетезималей мог быть больше при больших массах планетезималей.**

# Сравнение с миграцией тел к Земле

- Приведенные выше оценки сделаны при современной массе планеты  $b$ . Эти оценки могли быть меньше если масса планеты  $b$  была меньше ее современной массы во время ее бомбардировки планетезималями, мигрировавшими из зоны питания планеты  $c$ . Так как планета  $b$  гораздо ближе к звезде, чем планета  $c$ , то можно предположить, что она формировалась быстрее, чем планета  $c$ .
- При усреднении по всем рассматриваемым планетезималям, мигрировавшим из зоны питания планеты Проксима Центавра  $c$ , вероятность столкновения планетезимали с планетами Проксима Центавра  $b$  или  $d$  больше, чем вероятность столкновения с Землей планетезимали, мигрировавшей из зоны планет-гигантов Солнечной системы. Последняя вероятность для одной планетезимали обычно меньше  $10^{-5}$  [Ipatov, 2020].

# Доля воды в планетезималиях

• В [Naghighipour and Winter, 2014] считалось, что в Солнечной системе планетезимали содержали 0.1% воды на расстоянии от Солнца от 2 до 2.5 а.е. и 5% воды на расстоянии от 2.5 до 5 а.е. Однако доля воды в планетезималиях могла быть больше на больших расстояниях от Солнца. В [Ciesla et al., 2015] авторы, проанализировав результаты нескольких работ, посвященных доставке летучих на планеты, пришли к выводу, что первоначальные родительские тела содержали больше воды, чем сегодня можно увидеть в углистых хондритах. В [Ciesla et al., 2015] предположено, что твердые вещества за пределами линии льда должны на ~50% состоять из воды по массе. В [Davidsson et al., 2016] авторы пришли к выводу, что доля льда в комете 67P находится в пределах от 14 до 33 процентов. В [Fulle et al., 2017] предполагалось, что, хотя объемная доля воды в комете 67P и транснептуновых объектах составляет примерно 20%, тела, рожденные вблизи линии льдов, содержали больше воды, чем транснептуновые объекты. В своих исследованиях максимального содержания воды в результате поздней аккреции на планетах TRAPPIST-1 в [Raymond et al., 2022] предполагалось, что поздние ударники содержали 10 процентов воды по массе.

• Обобщая приведенные выше данные, можно предположить, что **доля воды в планетезималиях в зоне питания планеты Проксима Центавра с могла составлять от 10 до 50%.**

# Масса воды, доставленной к планетам $b$ и $d$

- В зависимости от возможного взаимного гравитационного влияния планетезималей общая масса  $m_{c-b}$  вещества, доставленного из зоны питания планеты  $c$  на планету  $b$ , оценивалась выше в пределах от  $2 \cdot 10^{-3} m_E$  до  $1.5 \cdot 10^{-2} m_E$ .
- При доли воды  $k_{ice}$  в планетезималях от 0.1 до 0.5 и различных начальных эксцентриситетах значения  $m_{ice} = k_{ice} \cdot m_{c-b}$  массы воды, доставленной к планете  $b$ , будут находиться в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-4} m_E$  до  $7 \cdot 10^{-3} m_E$ . Если, как в [Schwarz et al., 2018], считать, что  $k_{ice} = 0.5$ , то  $m_{ice}$  будет от  $10^{-3} m_E$  до  $7 \cdot 10^{-3} m_E$ .
- Вероятно, количество воды в планетезималях, столкнувшихся с планетой Проксима Центавра  $b$ , превышало массу воды в земных океанах ( $2 \times 10^{-4} m_E$ ). Количество воды, доставленное на планету  $d$ , было немного меньше (примерно в 2 раза), чем на планету  $b$ . Не вся вода, доставленная на планеты  $b$  и  $d$ , осталась на этих планетах.



# **Движение планетезималей на расстояниях от звезды от 500 до 1200 а.е.**

- Основной выброс планетезималей из большей части зоны питания почти сформировавшейся планеты  $c$  на расстояния от звезды, большие 500 а.е., происходил в течение первых 10 млн лет. Только для планетезималей, первоначально находившихся на краях зоны питания планеты, доля планетезималей, достигших 500 а.е. за время большее 10 млн лет, была больше половины. Отдельные планетезимали могли достигать внешней части сферы Хилла звезды и через сотни миллионов лет.**
- Около 90% планетезималей, достигших 500 а.е. от звезды Проксима Центавра, достигли 1200 а.е. от звезды (т.е. радиуса сферы Хилла звезды) менее, чем за 1 млн лет, при современной массе планеты  $c$ . При этом не более 2% планетезималей, достигших 500 а.е. от звезды, имели афелийные расстояния орбит между 500 и 1200 а.е. в течение более 10 млн лет (но менее нескольких десятков миллионов лет). При массе планеты, равной половине массы планеты  $c$ , доля планетезималей, увеличивших свое максимальное удаление от звезды с 500 до 1200 а.е. менее, чем за 1 млн лет, была около 70-80%.**

# Движение тел во внешней части сферы Хилла

- В рассмотренной модели во внешней части сферы Хилла диск планетезималей был довольно плоским. **Наклонения  $i$  орбит более 80% планетезималей, достигших 500 или 1200 а.е. от звезды, не превышали  $10^\circ$ .** Доля таких планетезималей с  $i > 20^\circ$  в большинстве серий расчетов не превышала 2%. При современной массе планеты  $c$  в среднем по всем вариантам расчетов эта доля не превышала 1%.
- Движение планетезималей рассматривалось внутри (преимущественно в глубине) сферы Хилла звезды Проксима Центавра, а выброшенные планетезималы имели очень мало шансов вернуться в сферу Хилла звезды. Поэтому, вероятно, учет гравитационного влияния звездной двойной системы (Альфа Центавра АВ) не изменит выводов, сделанных в данной работе.
- **Сильно наклоненные орбиты тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра могут быть только в основном за счет тел, пришедших в сферу Хилла извне.**
- Полученные результаты могут быть интересны для понимания движения тел в некоторых других экзопланетных системах, особенно в системах с одной доминирующей планетой. Они могут быть использованы для задания исходных данных для моделей эволюции диска тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра, которые учитывают гравитационные взаимодействия и столкновения тел между собой, а также влияние других звезд.
- **Радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра на порядок меньше радиуса внешней границы облака Хиллса в Солнечной системе и на два порядка меньше радиуса сферы Хилла Солнца.** Поэтому трудно ожидать существования у этой звезды столь же массивного аналога облака Оорта, как у Солнца.

# Миграция пыли от орбиты планеты Проксима Центавра с

Рассматривалась миграция пылевых частиц, начальные орбиты которых были близки к орбите планеты *c*. Начальные эксцентриситеты орбит частиц  $e_0$  равнялись 0.02 или 0.15.

При интегрировании использовался метод Булирша-Штера (Bulirsh-Stoer) из пакета SWIFT (Levison and Duncan, 1994). Относительная ошибка на шаге интегрирования не превышала  $10^{-8}$ .

Миграция пыли изучалась аналогично расчетам (Ipatov, 2010) для Солнечной системы. Учитывалось гравитационное влияние звезды и планет *b* и *c*, эффект Пойтинга-Робертсона (the Poynting-Robertson drag), радиационное давление (radiation pressure) и давление звездного ветра (star wind drag). Отношение давления звездного ветра к давлению из-за эффекта Пойтинга-Робертсона, как и для Солнечной системы, считалось равным 0.35.

В разных вариантах отношение  $\beta$  силы радиационного давления к силе гравитации варьировалось от 0.0002 до 1. Для силикатных частиц Солнечной системы такие значения  $\beta$  соответствуют диаметрам частиц  $d$  от 2000 до 0.4 микрон; причем  $d$  пропорционально  $1/\beta$ .

В Солнечной системе силикатные частицы с  $0.001 \leq \beta \leq 0.1$  соответствуют диаметрам от 4 до 400 микрон. При таких значениях  $\beta$  пылевые частицы эффективно доставляют вещество (в том числе летучие) на планету *b*.

•Levison H.F. and Duncan M.J. Icarus. 1994. 108: 18–36.

•Ipatov S.I. Proc. of IAU Symposium S263. 2010. pp. 41-44. <http://arxiv.org/abs/0910.3017>.

## Миграция пыли от орбиты планеты Проксима Центавра с

- Вероятности столкновений частиц с планетой  $b$  для  $e_0=0.02$  составляли около 0.15-0.2, 0.1, 0.06-0.08 и 0.016-0.03 при  $0.001 \leq \beta \leq 0.004$ ,  $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.02$  и  $0.04 \leq \beta \leq 0.1$ , соответственно.
- Для  $e_0=0.15$  вероятности столкновений частиц с планетой  $b$  составляли около 0.07-0.15, 0.04 и 0.01-0.03 при  $0.001 \leq \beta \leq 0.01$ ,  $\beta=0.02$  и  $0.04 \leq \beta \leq 0.1$ , соответственно.
- Для  $e_0=0.02$  вероятности столкновений частиц с планетой  $c$  были около 0.016-0.05, 0.02 и 0.01-0.02 при  $0.001 \leq \beta \leq 0.004$ ,  $\beta=0.01$  и  $0.02 \leq \beta \leq 0.1$ , соответственно.
- Для  $e_0=0.15$  вероятности столкновений частиц с планетой  $c$  не превышали 0.03 для всех рассмотренных вариантов.
- Хотя начальные орбиты пылевых частиц были близки в орбите планеты  $c$  и масса планеты  $c$  больше, чем масса планеты  $b$ , при  $0.001 \leq \beta \leq 0.1$  (при диаметрах частиц порядка 10-100 микрон) больше частиц сталкивались с внутренней планетой  $b$ , чем с планетой  $c$ .
- При  $\beta \geq 0.4$  большинство частиц выбрасывались на гиперболические орбиты.
- При  $0.004 \leq \beta \leq 0.2$  большинство частиц столкнулись со звездой с максимальной вероятностью столкновения при  $\beta=0.04$ .
- Времена эволюции рассматриваемых пылевых дисков были в основном меньше при большем  $\beta$  (меньшем диаметре частиц). Они составляли 300 лет при  $\beta=1$  и несколько миллионов лет при  $0.004 \leq \beta \leq 0.04$ .

# Выводы по миграции планетезималей и пылевых частиц в системе

## Проксима Центавра

- Проведены расчеты миграции планетезималей в системе Проксима Центавра от внешней планеты  $c$ , расположенной за линией льдов, к небольшим внутренним планетам  $b$  и  $d$ , которые могут находиться в зоне обитаемости. **Суммарная масса планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, превышает массу планетезималей, вошедших в планеты.**
- Хотя только одна из сотен планетезималей достигала орбит внутренних планет, вероятность ее столкновения с этими планетами могла достигать 1. Такая вероятность столкновения, усредненная по всем рассматриваемым планетезималам, составила  $\sim 10^{-4}-10^{-3}$ .
- При усреднении по всем рассматриваемым планетезималам, которые мигрировали из окрестностей орбиты Проксима Центавра  $c$ , **вероятность столкновения планетезимали с экзопланетами  $b$  или  $d$  больше вероятности столкновения с Землей планетезимали, мигрировавшей из зоны питания планет-гигантов Солнечной системы.** Последняя вероятность в расчете на одну планетезималь обычно меньше  $10^{-5}$ .
- На экзопланеты Проксима Центавра  $b$  и  $d$  могло быть доставлено много ледяного материала и летучих веществ.
- Хотя начальные орбиты пылевых частиц были близки в орбите планеты  $c$  и масса планеты  $c$  больше, чем масса планеты  $b$ , при  $0.001 \leq \beta \leq 0.1$  (при диаметрах частиц порядка 10-100 микрон) больше частиц (до 20% начальных частиц) сталкивались с внутренней планетой  $b$ , чем с планетой  $c$ .

• Работа была выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН.

# Литература

- Ипатов С.И. Астрон. вестник. 2019. Т. 53, с. 349-379. <http://arxiv.org/abs/2003.11301>.
- **Ипатов С.И. Устойчивые орбиты в зоне питания планеты Проксима Центавра с // Астрономический вестник. 2023, т. 57, N 3. С. 248-261. <http://arxiv.org/abs/2309.00492>**
- **Ипатов С.И. Движение планетезималей в сфере Хилла звезды Проксима Центавра // Астрономический вестник. 2023, т. 57, N 6, С. 605-622. <http://arxiv.org/abs/2401.09086>**
- **Маров М.Я., Ипатов С.И. Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // Успехи физических наук. 2023, т. 193. N 1. С. 2-32. <http://arxiv.org/abs/2309.00716>**
- Bancelin D., Pilat-Lohinger E., Maindl T.I., Ragossnig F., Schäfer C. Astron. J. 2017. V. 153, 269 (9 pp).
- Canup R.M., Pierazzo E. Lunar Planet. Sci. 2006. V. 37, Abstract 2146.
- Ciesla F.J., Mulders G.D., Pascucci I., Apai D. Astrophys. J. 2015. V. 804, 9 (11 pp.). doi:10.1088/0004-637X/804/1/9.
- Davidsson B.J.R., and 47 co-authors. Astron. Astrophys. 2016. V. 592, A63 (30 p.).
- Fulle M., Della Corte V., Rotundi A., Green S.F., Accolla M., Colangeli L., Ferrari M., Ivanovski S., Sordini R., Zakharov V. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2017. V. 469, S45-S49.
- Haghhighipour N., Winter O.C. Celest. Mech. Dyn. Astr. 2014. V. 124, 235-268. doi: 10.1007/s10569-015-9663-y. arXiv:1512.02852.
- Ipatov S.I. 14th Europlanet Science Congress 2020. EPSC2020-71. doi: 10.5194/epsc2020-71.
- Ipatov S.I. Mixing of planetesimals in the TRAPPIST-1 exoplanetary system // Thirteenth Moscow Solar System Symposium (13M-S3). 2022. 13MS3-EP-PS-02. P. 378-380.
- **Ipatov S.I. Delivery of icy planetesimals to inner planets in the Proxima Centauri planetary system // Meteoritics and Planetary Science. 2023. V. 58. P. 752-774. <https://arxiv.org/abs/2309.00695>**
- Raymond S.N., Izidoro A, Bolmont E., Dorn C., Selsis F., Turbet M., Agol E., Barth P., Carone L., Dasgupta R., Gillon M., Grimm S.L. Nature Astronomy. 2022. V. 6, 80-88.
- Schwarz R., Bazso, A., Georgakarakos N., Loibnegger B., Maindl T.I., Bancelin D., Pilat-Lohinger E., Kislyakova K.G., Dvorak R., Dobbs-Dixon I. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2018. V. 480, 3595-3608. doi: 10.1093/mnras/sty2064.