



# Миграция планетезималей в экзопланетной системе ТРАППИСТ-1

С. И. Ипатов

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия.

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



**Варианты расчетов.** Экзопланетная система ТРАППИСТ-1 (TRAPPIST-1) состоит из звезды с массой, равной 0.09 массы Солнца, и 7 планет (от *b* до *h* в зависимости от удаления от звезды) с массами от 0.33 до 1.37 массы Земли. Большие полуоси орбит этих планет находятся в диапазоне от 0.012 до 0.062 а.е. Исследовалось движение планетезималей под гравитационным воздействием звезды и семи планет TRAPPIST-1 (от *b* до *h*). Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм RMVS3 из пакета SWIFT (Levison, Duncan, 1994). Расчеты с шагом, равным 0.01, 0.02 и 0.1 земных суток, дали близкие результаты. Изучалась поздняя безгазовая стадия образования почти сформировавшихся планет системы ТРАППИСТ-1. Рассмотренная модель перемешивания тел в зоне планет TRAPPIST-1 также может характеризовать миграцию тел, выброшенных с некоторых планет после столкновений этих планет с некоторыми планетезималами или другими телами. Планетезимали, столкнувшиеся с планетами или звездой или выброшенные на гиперболические орбиты (достигшие 50 а.е. от звезды), исключались из интегрирования. В каждом варианте расчетов начальные значения больших полуосей орбит  $N_p=250$  или  $N_p=1000$  планетезималей варьировались от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$  около большой полуоси орбиты одной из планет, начальные эксцентриситеты их орбит равнялись  $e_0=0.02$  или  $e_0=0.15$ , а их начальные наклонения равнялись  $e_0/2$  рад. Рассматриваемый диск планетезималей располагался вблизи орбиты одной из рассматриваемых планет. Также проводились расчеты при  $a_{\min}=0.07$  а.е. В этих расчетах  $a_{\max}=0.1$  а.е. при  $N_p=250$  и  $a_{\max}=0.09$  а.е. при  $N_p=1000$ .

**Таблица.** Большие полуоси и эксцентриситеты орбит и массы  $m$  (в массах Земли  $m_E$ ) экзопланет системы TRAPPIST-1 и значения  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$  для рассматриваемых дисков вблизи планет *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h*.

планеты	$m/m_E$	$a$ , а.е.	$e$	$a_{\min}$ , а.е.	$a_{\max}$ , а.е.		планеты	$m/m_E$	$a$ , а.е.	$e$	$a_{\min}$ , а.е.	$a_{\max}$ , а.е.
<i>b</i>	1.37	0.0115	0.0062	0.0094	0.0137		<i>f</i>	1.04	0.0385	0.0101	0.0339	0.0427
<i>c</i>	1.31	0.0158	0.0065	0.0137	0.0190		<i>g</i>	1.32	0.0468	0.0021	0.0427	0.0544
<i>d</i>	0.39	0.0223	0.0084	0.0190	0.0258		<i>h</i>	0.33	0.0619	0.0057	0.0544	0.0694
<i>e</i>	0.69	0.0292	0.0051	0.0258	0.0339							

**Результаты расчетов** показали, что на гиперболические орбиты было выброшено не более 3% планетезималей. Столкновений планетезималей с родительской звездой в рассмотренных вариантах расчетов не было. Более половины планетезималей из дисков, первоначально располагавшихся вблизи орбит планет от *b* до *g*, столкнулись с планетами менее чем за 1000 лет, а из дисков *b* - *d* даже за 250 лет. Количество столкновений планетезималей с планетами *c* - *h* за весь рассмотренный интервал времени было больше, чем за 100 тыс. лет не более, чем на 4%. Планетезимали с динамическим временем жизни более 100 тыс. лет обычно выбрасывались на гиперболические орбиты или сталкивались с планетой *h*. Времена эволюции дисков планетезималей у планет *b* - *h* варьировались от 12 тыс. до более чем 60 млн лет.

Доля планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином (по сравнению со столкновениями со всеми планетами), как правило, уменьшалась с увеличением рассматриваемого интервала времени. В каждом варианте расчетов была хотя бы одна планета, для которой количество столкновений планетезималей превышало 25% от числа столкновений планетезималей с планетой-хозяином. Доля столкновений планетезималей с планетой-«хозяином» обычно была меньше для дисков, расположенных дальше от звезды.

При  $N_p=1000$  для дисков *c*-*h* доля  $f_1$  планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином, составляла от 0.37 до 0.63 при  $e_0=0.02$  и от 0.27 до 0.53 при  $e_0=0.15$ . Второе и третье значения ( $f_2$  и  $f_3$ ) доли планетезималей (среди всех исходных планетезималей), столкнувшихся с соседней планетой, находились в диапазонах 0.17–0.28 и 0.11–0.17 при  $e_0=0.02$  и составляли 0.2–0.32 и 0.08–0.19 при  $e_0=0.15$ . Для диска *b* и  $e_0=0.02$  значение  $f_1$  было около 0.78–0.8,  $f_2$  было около 0.18–0.2, а  $f_3$  было около 0.01–0.012 (диапазон для расчетов с шагом  $t_s$ , равным 0.01 и 0.02). Для диска *b* и  $e_0=0.15$   $f_1=0.74$ ,  $f_2$  было около 0.22–0.23, а  $f_3$  было около 0.015–0.021.

Общее число столкновений всех планетезималей с планетами *c* - *h* было больше, чем за 100 тыс. лет (цифры за 100 тыс. лет были представлены в (Ipatov, 2022) не более чем на 4%. Однако последние столкновения планетезималей с планетами могли быть через несколько миллионов лет. Для начального диска вблизи орбиты планеты *h* (с массой  $m_h=0.33m_E$ , где  $m_E$  - масса Земли) число столкновений планетезималей с планетой *g* (с массой  $m_g=1.32m_E$ ) было примерно таким же, как и с планетой *h*.

Планетезимали, мигрировавшие с расстояний больших 0.7 а.е., могли столкнуться со всеми планетами, но большинство их столкновений (>70%) было с планетами *g* и *h*, и доля столкновений была больше для планет, более удаленных от звезды. Планетезимали могли столкнуться со всеми планетами для дисков вблизи орбит планет от *d* до *h*. Следовательно, внешние слои соседних планет в системе TRAPPIST-1 могут включать аналогичный материал, если вблизи их орбит на поздних стадиях аккумуляции планет было много планетезималей.

**Выводы.** Результаты расчетов показали, что несколько планет в системе TRAPPIST-1 аккумулялировали планетезимали, первоначально находившиеся на одинаковом расстоянии от звезды. Если вблизи орбит планет в системе TRAPPIST-1 на поздних стадиях аккумуляции планет было много планетезималей, то внешние слои соседних планет могут включать аналогичный материал.

Столкновений планетезималей с родительской звездой не было.

На гиперболические орбиты было выброшено не более 3% планетезималей. Выброса планетезималей из дисков у планет *b* - *d* обычно не было.

Более половины планетезималей из дисков у планет *b* - *g* столкнулись с планетами менее чем за 1000 лет, а для дисков *b* - *d* даже за 250 лет. Времена эволюции дисков планетезималей у планет *b* - *h* варьировались от 11 тыс. до более чем 60 млн лет.

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

## Литература

Ipatov, S.I. 2022, in Thirteenth Moscow Solar System Symposium (13M-S3). 13MS3-EP-PS-02. P. 378-380.  
Levison, H.F., Duncan, M.J. 1994, Icarus, v. 108, pp. 18–36.