



# **Некоторые вопросы формирования, эволюции и поиска планетных систем**

**С.И. Ипатов**  
**ГЕОХИ РАН**

[siipatov@hotmail.com](mailto:siipatov@hotmail.com)

<http://siipatov.webnode.ru/>

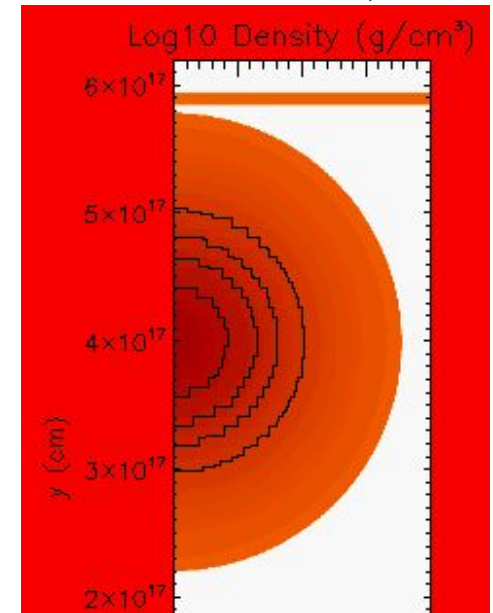
**Коллапс пресолнечного облака, вызванный ударным фронтом, и заброс короткоживущих изотопов (таких как  $^{26}\text{Al}$  и  $^{60}\text{Fe}$ ) в облако. In collaboration with Alan Boss (ApJ, 708, 1268-1280, 2010; ApJL, 686, L119-123, 2008)..**

Алгоритм FLASH использовался при вычислении эволюции пресолнечного облака (initially the Bonner sphere), вызванного движущимся ударным фронтом.

Получено, что удары со скоростями от 5 до 30 км/с могут вызывать коллапс облака и заброс материала фронта в облако.

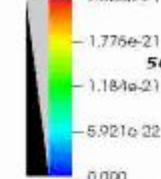
При скоростях  $v=5$  км/с около сферы оставалось больше материала, чем при больших скоростях. Не было сжатия облака при  $\log \text{dens}=-15$ ,  $v \leq 3.5$  и  $v \geq 35$  км/с. Upper figure: Initial data for 2D model.

Lower figure: 3D model,  $v=20$  км/с, 60 Кyr,  $xy$  plane. На нижнем рисунке представлен только материал, не входивший в состав сферы. Видны «пальцы» этого материала.



DB: dustcoll\_hdf5.plt (cnt\_030)  
Cycle: 1255 600 (90109e+12)

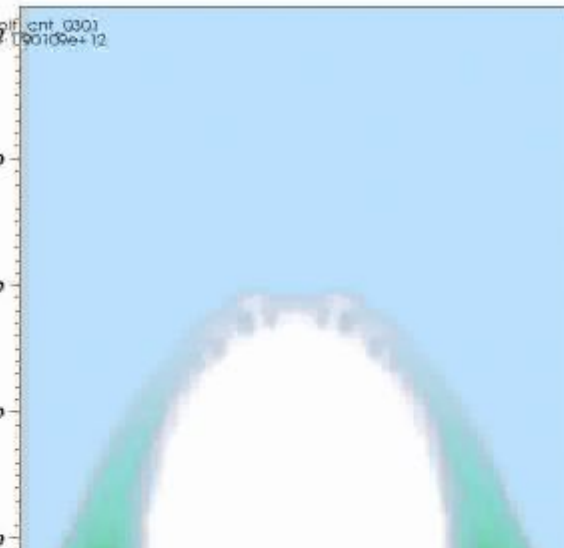
Volume  
Vol: ms 4  
2.368e-21



Max: 2.368e-21  
Min: 0.000

Y-Axis  
( $\times 10^{15}$ ) 300

200



# Формирование планетезималей

- **В 50-80е годы большинство авторов считало, что планетезимали образовались путем сжатия разреженных газопылевых сгущений вследствие гравитационной несустойчивости. В 90е годы были более популярны модели образования планетезималей путем постепенного роста твердых объектов при их столкновениях.**
- **В последние годы были найдены новые аргументы (e.g. Makalkin & Ziglina 2004; Johansen et al. 2007; Cuzzi, Hogan & Shariff 2008; Lyra et al. 2008; Johansen, Youdin & Mac Low 2009) в пользу существования разреженных сгущений.**
- Пыль оседала вертикально, образуя плотный слой.
- При радиальном движении пыль образовывала скопления.
- Из-за турбулентных флуктуаций происходила концентрация сгустков

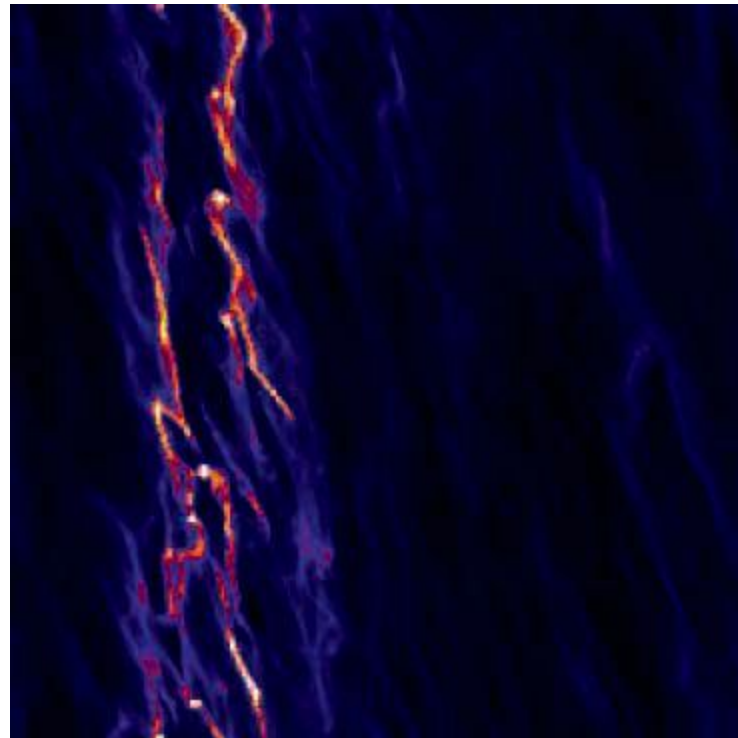
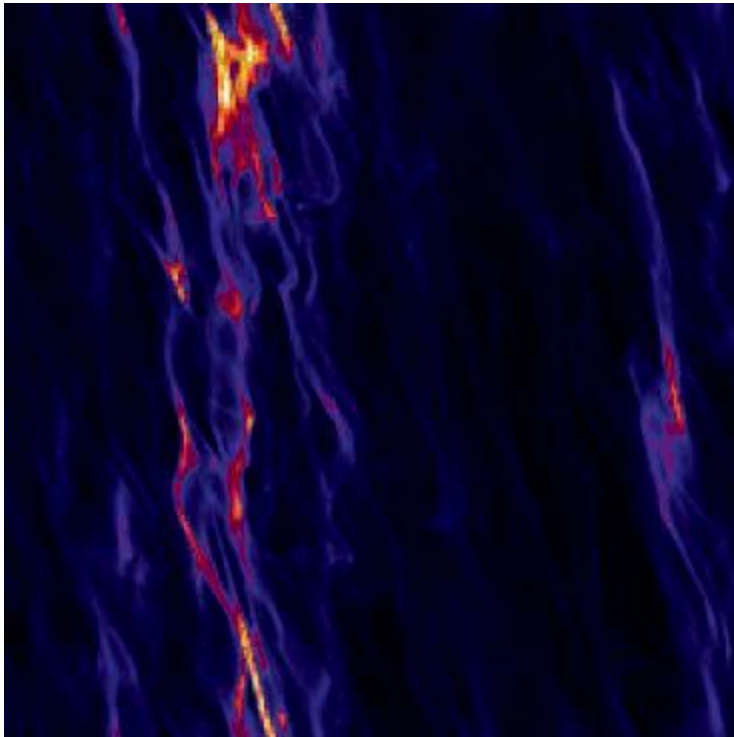
# **-Основные процессы во время формирования планетезималей**

- **1. «склеивание» частиц (микроны -> миллиметры)**
- **2. Вертикальное оседание в тонкие подслои. (микроны -> сантиметры)**
- **3. Гравитационная неустойчивость с участием газа (миллиметры – десятки километров)**
- **4. Сгущения частиц, вызванные неустойчивостью движения (Streaming instabilities). (сантиметры – десятки метров)**
- **5. Гравитационный коллапс, вызванный турбулентной группировкой. (сантиметры – много километров)**
- **6. Парные столкновения. (больше километров)**

## Образование сгущений

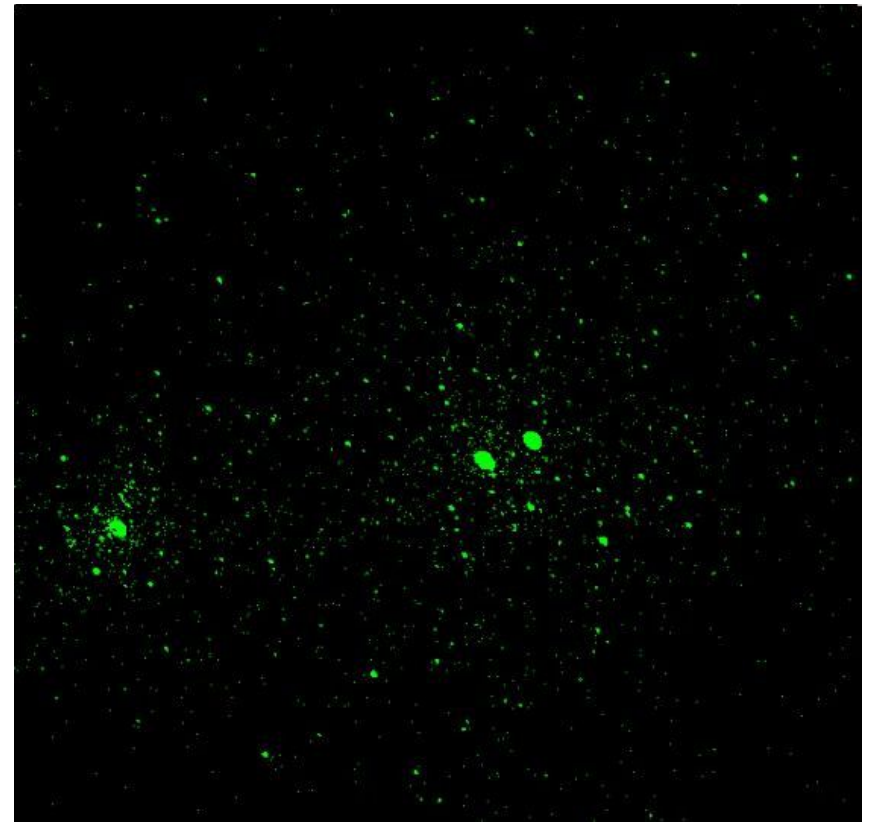
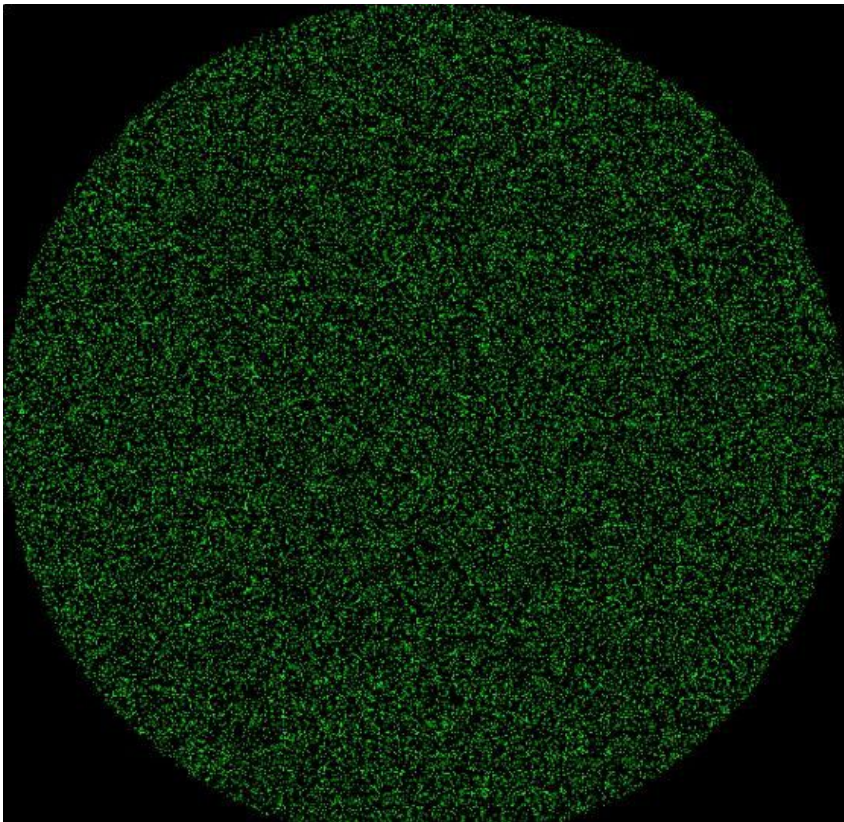
Валуны могли подвергаться эффективному гравитационному коллапсу в плотных областях в средней плоскости диска. Они концентрировались в областях высокого давления турбулентного газа. Эти сгущения увеличивались из-за потоковой неустойчивости, вызванной относительным течением газа и твердого материала. Johansen et al. (2007)

**получили образование сгущений с массами сравнимыми с массами карликовых планет.** Рисунки из работы: A. Johansen, J. S. Oishi, M.-M. Mac Low, H. Klahr, T. Henning, & A. Youdin, Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks, Nature, 2007, 448, 1022-1025



N bodies simulation using the PGKRAV code. David Nesvorn'ý, Andrew N. Youdin, and Derek C. Richardson, FORMATION OF KUIPER BELT BINARIES BY GRAVITATIONAL COLLAPSE, The Astronomical Journal, 140, 785–793, 2010 Sept.

**Моделирование эволюции шарового сгущения, первоначально состоявшего из нескольких тысяч объектов, объединяющихся при столкновениях. Исходное шаровое сгущение имело осевой момент. При предположении, что осевой момент возник при образовании сгущений нельзя объяснить обратные вращения, наблюдаемые у некоторых двойных систем.**





# **Образование спутниковых систем малых тел и системы Земля-Луна**

**Образование транснептуновых спутниковых систем из разреженных сгущений. Родительское сгущение получило момент количества движения, необходимый для формирования спутниковой системы, при столкновении двух сгущений. Начальный момент количества движения сгущения недостаточен для формирования спутниковой системы.**

**Популярна модель мега-импакта для формирования Луны. По моему мнению, механизм формирования системы Земля-Луна мог быть аналогичен рассматриваемому нами механизму формирования спутниковых систем малых тел. Предполагается, что в результате столкновения двух сгущений образовалось родительское сгущение, при сжатии которого образовались твердые зародыши Земли и Луны.**

**Эти зародыши росли за счет выпадения на них планетезималей. Зародыш Луны мог приобрести большую часть своей массы за счет вещества обедненного железом, выбрасываемого с поверхности зародыша Земли при ее многочисленных столкновениях с планетезималами.**

# **-Моделирование эволюции дисков тел**

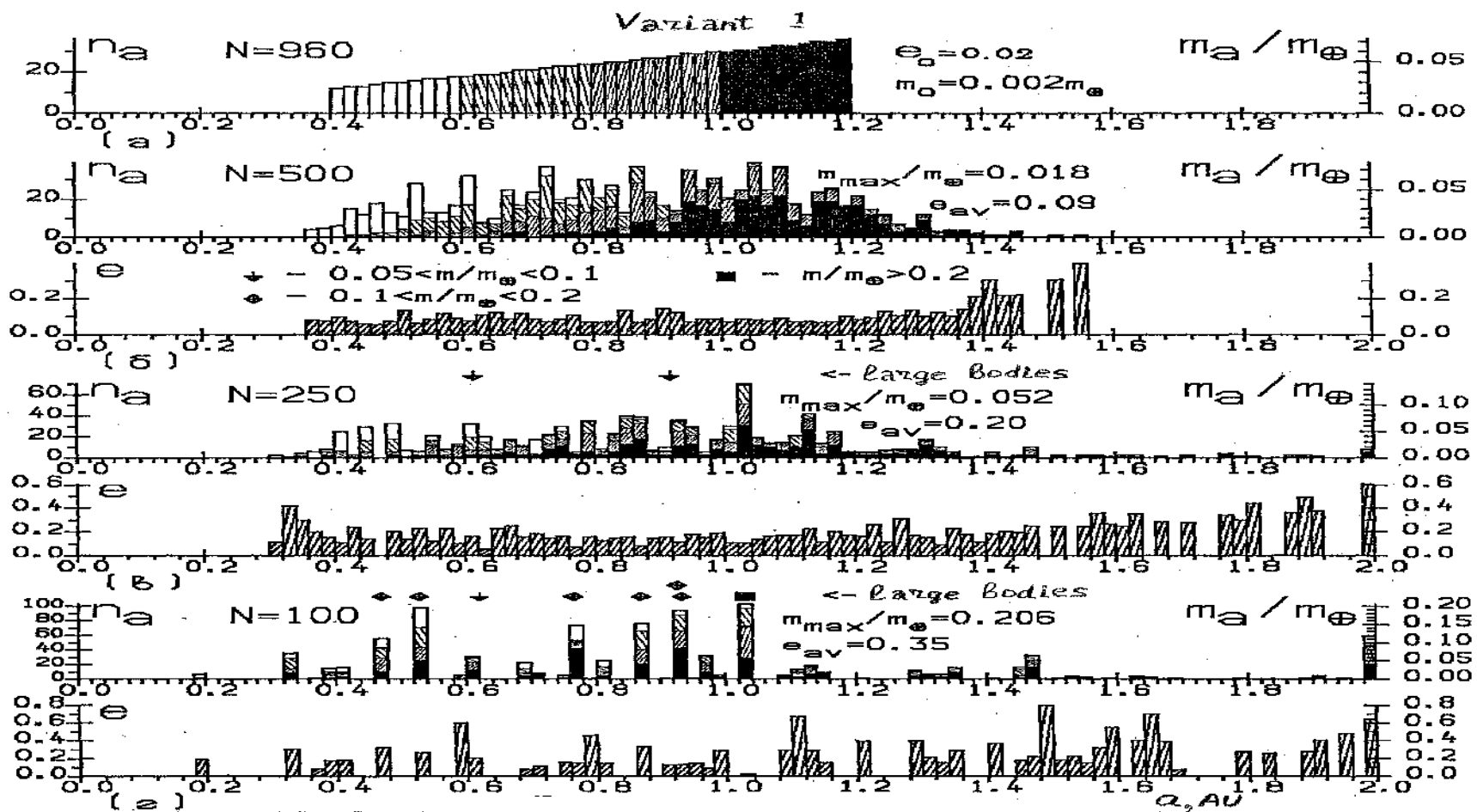
**В 80е годы я проводил расчеты эволюции дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях.**

**-В статье 1987 (Ipatov S.I., *Earth, Moon, and Planets*, v. 39, 101-128, 1987), за 5 лет до открытия первого транснептунового объекта, основываясь на моих расчетах формирования планет-гигантов, я предположил, что кроме транснептуновых объектов, сформировавшихся дальше 30 а.е. от Солнца и движущихся по слабо-эксцентричным орбитам, в этой зоне по сильно-эксцентричным орбитам движутся объекты, сформировавшиеся в зоне планет-гигантов.**

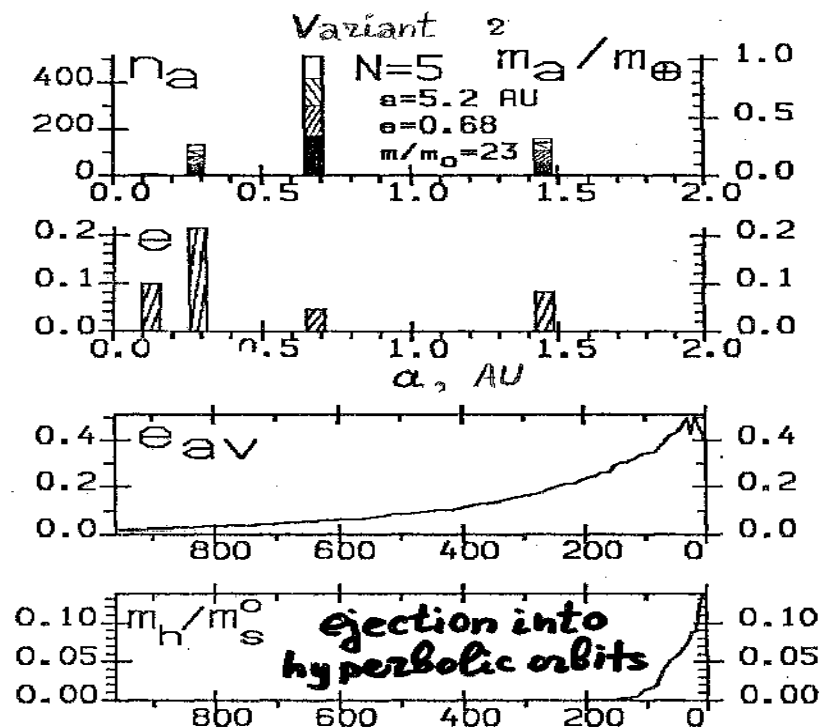
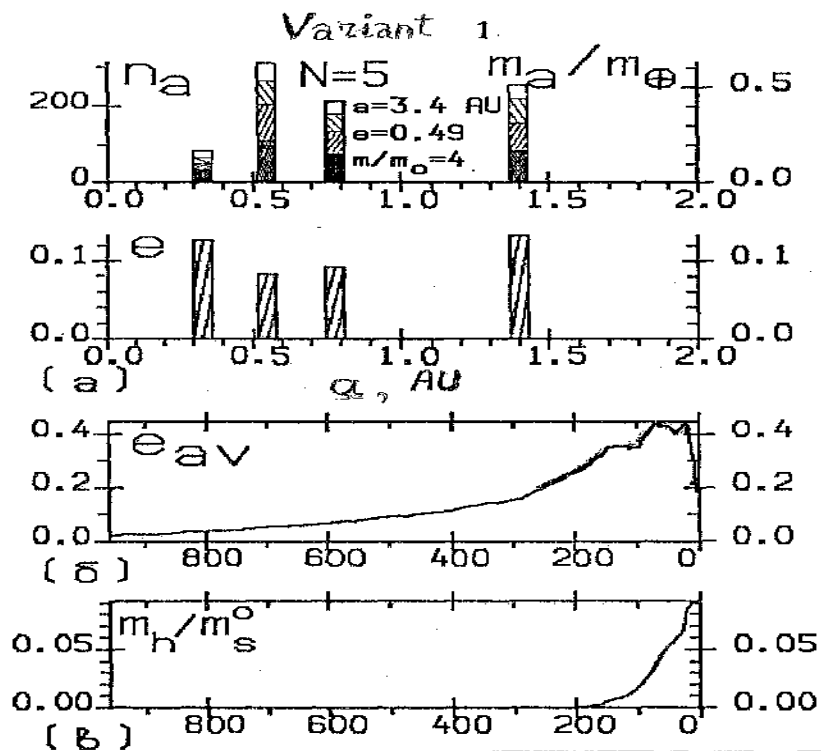
**Мои расчеты (опубликованные в 1991 г) показали, что зародыши Урана и Нептуна могли увеличить большие полуоси своих орбит с  $\leq 10$  а.е. до их современных значений, двигаясь по орбитам с малыми эксцентриситетами, из-за гравитационных взаимодействий с планетезималями, мигрировавшими с расстояний больших 10 а.е. к Юпитеру, который выбрасывал их на гиперболические орбиты. В этих старых расчетах взаимное гравитационное влияние учитывалось методом сфер. Позднее аналогичные расчеты были проведены другими учеными, использовавшими более мощные компьютеры и учитывавшими резонансы между планетами.**



**Перемешивание планетезималей в зоне питания планет земной группы. В начальный момент времени планетезимали принадлежали четырем группам в зависимости от их больших полуосей орбит. В ходе эволюции происходило сильное перемешивание вещества и состав образовавшихся планет был почти одинаков. (Ипатов, Астрон. вестник, 1993).**

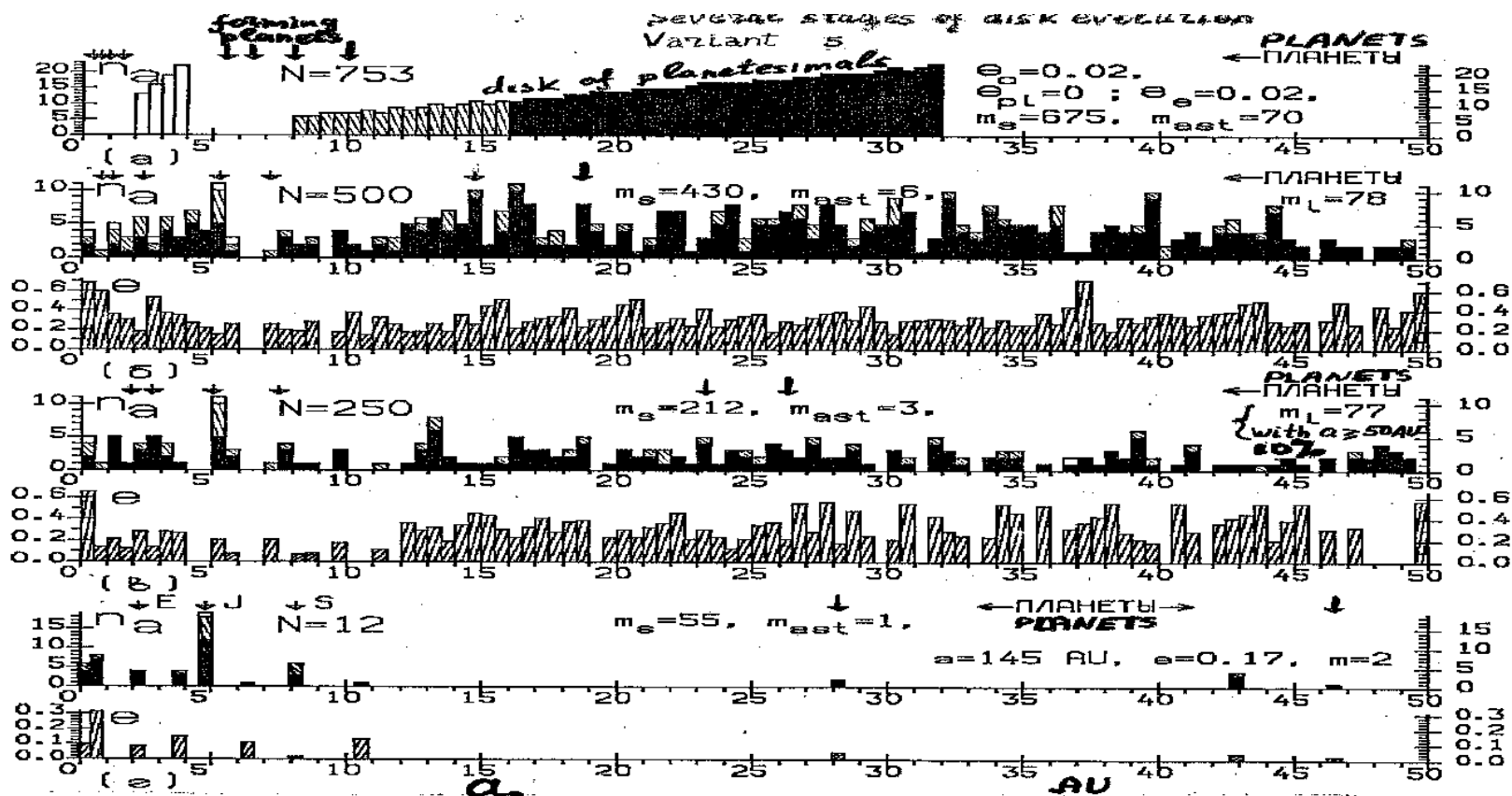


**Перемешивание планетезималей в зоне планет земной группы. Состав наибольших планет, сформировавшихся на различных расстояниях, был аналогичен для различных планет и был близок к составу начального диска.**



# Миграция зародышей Урана и Нептуна

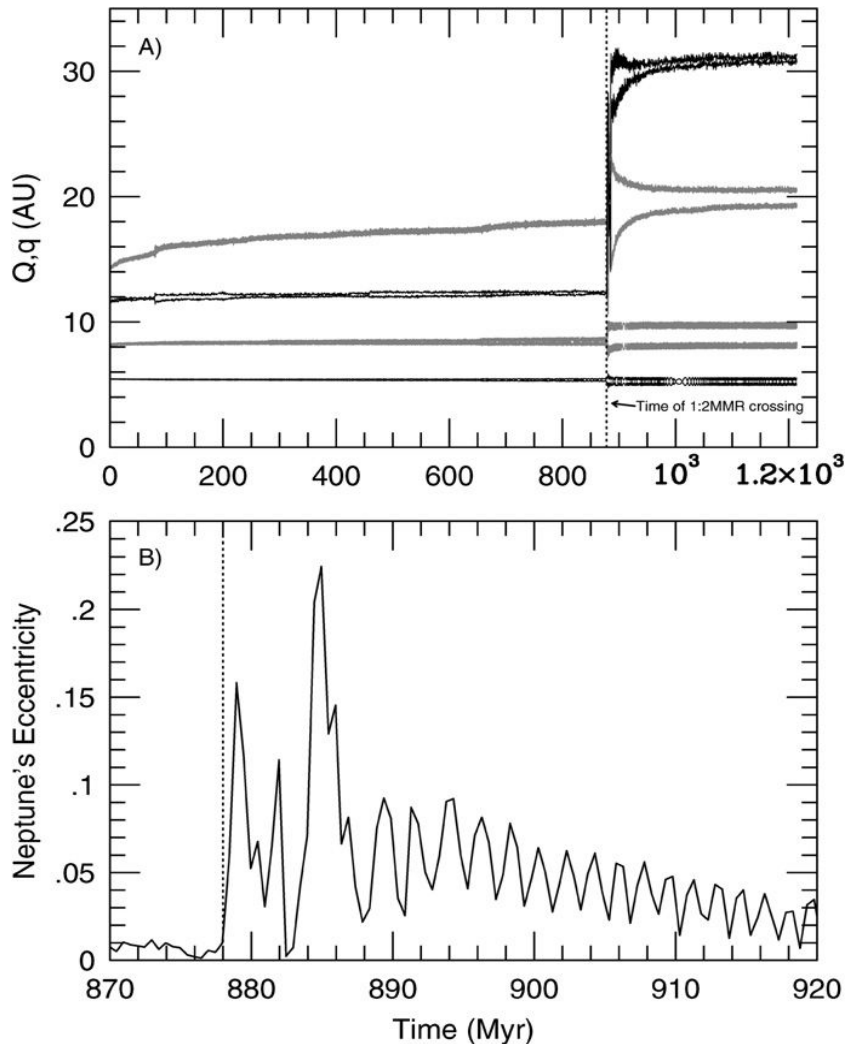
Распределение планетезималей по большим полуосям их орбит на нескольких стадиях эволюции диска. (ПАЖ, 1991; LPSC, 607-608, 1991; Астрон. вестник, 1993.). Общая масса планетезималей равнялась 135 массам Земли. Стрелки указывают положения планет. Начальные значения больших полуосей орбит планет-гигантов: 5.5, 6.5, 8 и 10 а.е.



# Миграция зародышей Урана и Нептуна

Результаты, опубликованные Ипатовым в 1991-1993. Начальные эксцентриситеты орбит зародышей Урана и Нептуна (с массами, равными 10 масс Земли): 0.75 и 0.82 (слева), 0.02 (справа). Результаты, полученные методом сфер действия, близки к результатам, полученным через 10 лет E.W. Thommes, M.J. Duncan, и H.F. Levison (Nature, 1999, v. 402, 635-638; Astron. J., 2002, v. 123, 2862-2883) путем численного интегрирования. **Позднее расчеты аналогичных моделей проводились другими**

**Модель Ниццы.** Внешний край диска находился на расстоянии  $\sim 34$  а.е. Масса диска равнялась  $\sim 35 M_{\oplus}$ .



- Эволюция перигелиев и афелиев орбит планет-гигантов в модели Ниццы. **Юпитер и Сатурн попадали в резонанс 1:2** через 878 млн. лет (*Gomes et al., 2005*).
- На нижнем слайде приведен эксцентриситете Нептуна.
- В моделях, полученных численным интегрированием, большую роль в эволюции играл **резонанс 1:2 Юпитера и Сатурна, который приводил к резким изменениям больших полуосей орбит Урана и Нептуна.**

# Моделирование миграции планетезималей

Учитывалось гравитационное влияние всех планет или их зародышей. В ряде вариантов расчетов рассматривались все планеты.

В других вариантах вместо планет земной группы рассматривались зародыши этих планет с массами, составлявшими 0.1 или 0.3 от современных масс планет. В случае зародышей планет земной группы с массами, меньшими в 10 раз современных масс планет, Уран и Нептун не рассматривались. Влияние газа не учитывалось.

При моделировании миграции тел использовался симплектический интегратор из пакета интегрирования Swift (Levison, Duncan, 1994).

В каждом варианте расчетов рассматривалось 250 планетезималей с начальными значениями  $a$  больших полуосей орбит от  $a_{omin}$  до  $a_{omin} + d_a$  а.е. Число тел с  $a_0$  было пропорционально  $a_0^{1/2}$ .

Проведены расчеты миграции планетезималей из зоны (от 0.3 до 2.0 а.е.), разделенной на семь областей (0.3-0.5, 0.5-0.7, 0.7-0.9, 0.9-1.1, 1.1-1.3, 1.3-1.5 и 1.5-2 а.е.). Для каждой области проводились отдельные расчеты. Ранее (например, Ипатов, Астр. вестн. 1993) рассматривалась эволюция дисков тел, объединяющихся при столкновениях, более широкие области и только доли тел, пришедших из разных областей, в уже образовавшихся планетах (а не на разных стадиях их роста).

Начальные эксцентриситеты  $e_0$  орбит тел равнялись 0.05 или 0.3, а наклоны  $i_0$  (в рад.) равнялись  $e_0/2$ . Средние эксцентриситеты, равные 0.3, могли быть достигнуты вследствие взаимного гравитационного влияния планетезималей при эволюции диска планетезималей в зоне питания планет-гигантов (Ипатов 1987, 1993).

# **Вычисление вероятностей столкновений планетезималей с планетами**

**Столкновения тел с планетами не моделировались. Полученные при расчетах массивы элементов орбит мигрировавших тел в ходе их динамических времен жизни использовались при вычислении вероятностей их столкновений с планетами, с Луной, или с их зародышами.** Элементы орбит планетезималей записывались с шагом в 500 лет.

По сравнению с моделированием эволюции дисков тел, объединяющихся при столкновениях, **такой подход позволяет получить большую статистику вероятностей столкновений тел с планетами и их зародышами.** В частности, он позволяет оценивать вероятности столкновений за некоторые интервалы времени, а не за все время эволюции диска.

- Массы планетезималей при расчетах считались нулевыми, но **на основе полученных вероятностей столкновений планетезималей с зародышами делались оценки роста зародышей планет.** При этих оценках суммарная масса вещества в зоне питания планет земной группы немного превышала современную массу планет земной группы.
- **Из-за неучитываемого взаимного гравитационного влияния планетезималей, модельные расчеты показывают минимальную оценку перемешивания вещества.**



## ***-Вычисления характерного времени до сближения двух объектов до сферы радиуса $r_s$***

**При оценках вероятности сближения мигрирующего тела (частицы) с планетой рассматривались орбиты во все моменты времени, когда возможно сближение (за динамическое время жизни тела).**

- $T_2 = 6.28 \cdot k_p \cdot T_s \cdot R \cdot k_v / (r_s \cdot k_{fi})$  - planar model,
- $T_3 = T_2 \cdot \Delta i \cdot R / r_s$  - spatial model;
- $R$  is the distance of encounter from the Sun,  $k_{fi}$  is the sum of angles (in radians) with apices in the Sun, within which the distance between orbits is less than  $r_s$ ,  $T_s$  is the synodic period of revolution,  $k_p = P_2 / P_1$ , where  $P_2 > P_1$ ,  $P_i$  is a period of revolution of the  $i$ -th body around the Sun.
- In order to take into account that velocity at distance  $R$  from the Sun differs from the mean velocity, we used coefficient  $k_v = \sqrt{2a/R - 1}$ .

**В отличие от подхода Орлик (1951) и Arnold (1965) для текущих элементов орбит характерное время до столкновения  $T$  зависело дополнительно от ориентации орбит и синодического периода.**

- Ipatov, S.I., Evolution times for disks of planetesimals, *Soviet Astronomy*, v. 32 (65), 560-566 (1988).
- Ipatov, S.I. and Mather, J.C., Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets, *Advances in Space Research*, v. 33, 1524-1533 (2004).

# ВЫВОДЫ

- Зародыши планет земной группы, массы которых были порядка одной десятой от масс современных планет или меньше, аккумулялировали в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. **Внутренние слои планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты этой планеты.**
- При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели масс современных планет и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог попадать во внутренние слои планет земной группы и влиять на их состав.
- При массах зародышей Земли и Венеры порядка трети масс современных планет вероятности выпадений планетезималей, сформировавшихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а.е. от Солнца, на эти зародыши отличались не более, чем вдвое.
- В рассмотренной модели, в которой тела объединялись с планетами при любых столкновениях, **Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн. лет.** В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а.е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру. Учет выброса вещества при столкновениях тел с планетами может увеличить время аккумуляции планет.

# Выводы

- Суммарная масса планетезималей, мигрировавших из каждой из частей области, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а.е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в 2 раза. **Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать одинаковый для этих планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы.**
- **На конечных стадиях формирования планет земной группы планетезимали, первоначально находившиеся на расстоянии от 1.1 до 2.0 а.е. от Солнца, могли входить в состав Земли и Марса в отношении, не сильно отличавшемся от отношения масс этих планет.**
- **Формирование зародыша Марса с начальной массой, в несколько раз меньшей массы Марса, в результате сжатия разреженного сгущения может объяснить относительно быстрый рост основной массы Марса.**
- **Можно предположить также формирование зародыша Меркурия с массой около 0.02 от массы Земли при сжатии сгущения. Ранее предположения о таких массах зародышей Марса и Меркурия, образовавшихся при сжатии сгущений, не делались.**

## Выводы

- Доля планетезималей, выпавших на Солнце, могла превышать 10% для начальных расстояний планетезималей от Солнца в диапазонах от 0.3 до 0.5 а.е. и от 1.1 до 2.0 а.е.
- Доля планетезималей, выброшенных из зоны питания планет земной группы на гиперболические орбиты, не превышала 10%. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся в зоне питания планет земной группы, с Юпитером составляла не более нескольких процентов от вероятности ее столкновения с Землей, а вероятности столкновений планетезималей с Сатурном были в среднем на порядок меньше, чем с Юпитером.
- Приведенные выше оценки формирования зародышей планет земной группы основывались на расчетах для модели, учитывающей гравитационное влияние планет-гигантов и зародышей планет земной группы. Учет взаимного гравитационного влияния планетезималей может увеличить перемешивание вещества в зоне питания планет земной группы, а также вероятность столкновений планетезималей с Солнцем и их выброс на гиперболические орбиты.

# Выводы

- При отношении масс зародышей Земли и Луны, равном 81 (отношению масс Земли и Луны), отношение вероятностей выпадений планетезималей на зародыши Земли и Луны в рассмотренных вариантах не превышало 54 и было максимально при массах зародышей примерно в три раза меньших современных масс этих небесных тел.
- Особенности формирования планет земной группы можно объяснить даже при относительно плавном уменьшении большой полуоси орбиты Юпитера за счет выброса им планетезималей на гиперболические орбиты, без рассмотрения миграции Юпитера к орбите Марса и обратно («модель большого поворота», **the Grand Tack model**) и без резких изменений орбит планет-гигантов, попадавших в резонанс, в модели Ниццы (**the Nice model**). В последние годы формирование планет земной группы рассматривалось в основном в рамках этих двух моделей.
- Результаты опубликованы в статье:
- **Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // Астрон. вестн., 2019. Т. 53. № 5. С. 349-379. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39180392>**

## Миграция малых тел. Начальные данные.

**Несколько лет назад я исследовал эволюцию орбит  $>30,000$  малых тел (в основном комет семейства Юпитера и астероидов). Учитывалось гравитационное влияние минимум 7 планет. Часть расчетов проводилась с помощью метода Булирша-Стоуера, а часть с помощью симплектического интегратора.**

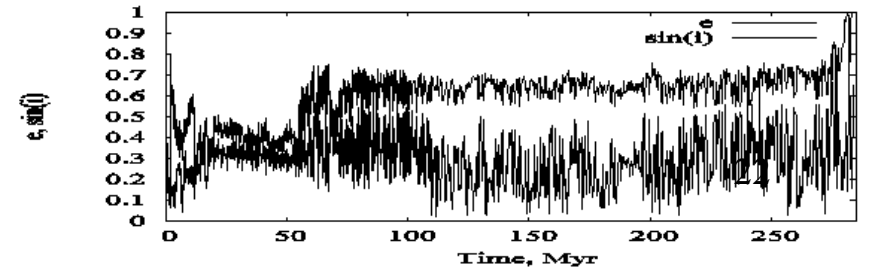
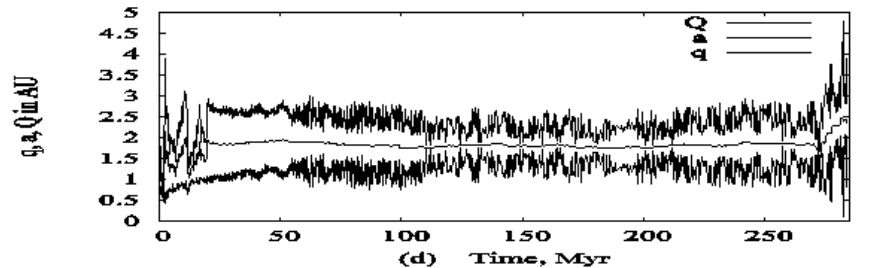
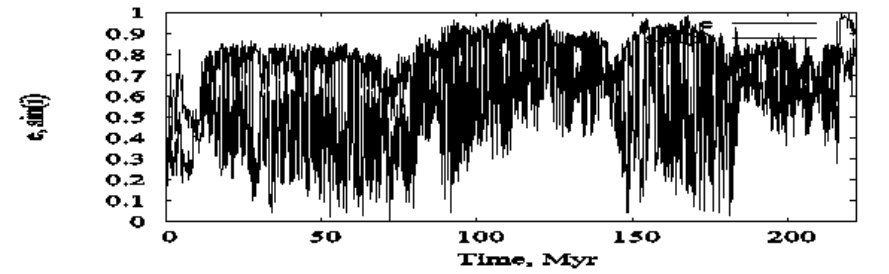
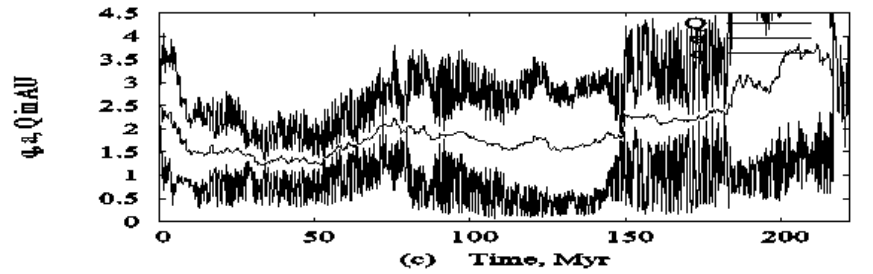
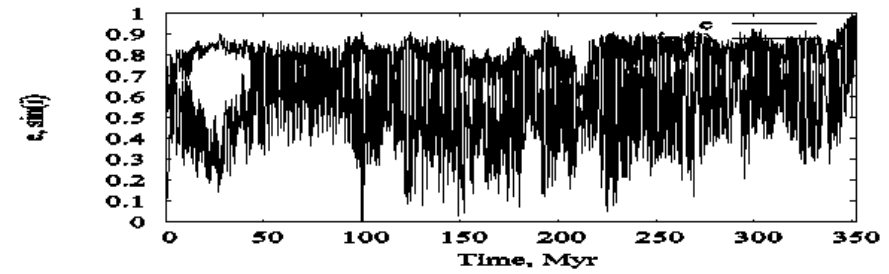
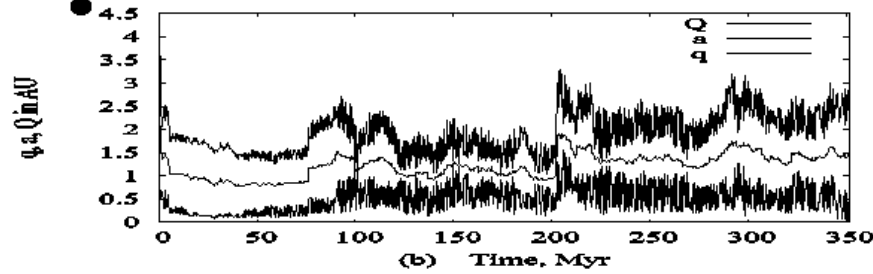
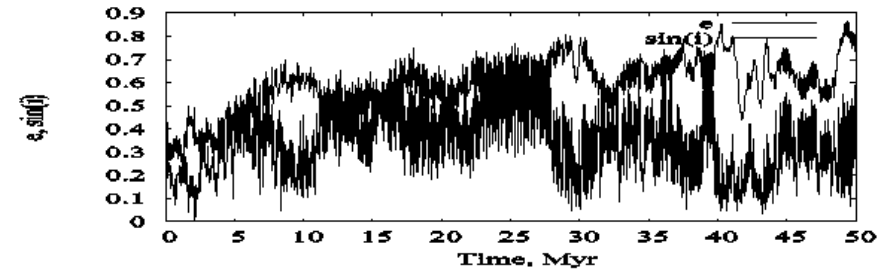
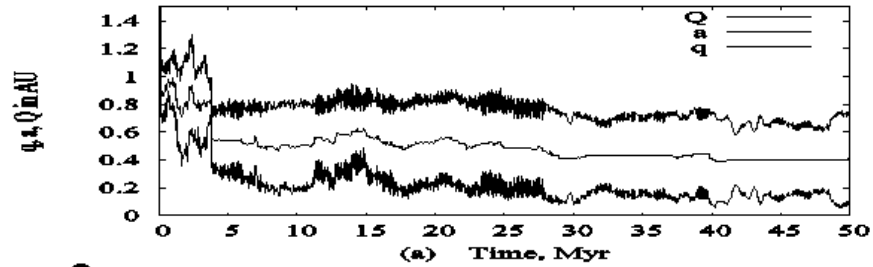
The orbital evolution of  $>30,000$  bodies with initial orbits close to those of Jupiter-family comets (JFCs), Halley-type comets, long-period comets, and asteroids in the resonances 3/1 and 5/2 with Jupiter, and also of  $>20,000$  dust particles produced by these small bodies was integrated a few years ago. Gravitational influence of 7 planets (Venus-Neptune) was taken into account. For dust particles, we also consider radiation pressure, Poynting-Robertson drag and solar wind drag.

*Methods of integration.* We used the SWIFT package by Levison and Duncan (Icarus, 1994, v. 108, 18-36). Evolution of N orbits was calculated using the **Bulirsh-Stoer method (BULSTO)** with the error per integration step less than  $\varepsilon=10^{-9}$ , or  $\varepsilon=10^{-8}$ , or some value between these two values. Also  $\varepsilon=10^{-12}$  and  $\varepsilon=10^{-13}$  were used. We also used a **symplectic method** with an integration step  $3 \leq d_s \leq 10$ , or  $d_s = 30$  days (RMVS3).

Based on a set of orbital elements during evolution, recently we studied **the probabilities of collisions** of migrating particles and bodies (during their dynamical lifetimes) with all planets. **На основе элементов орбит мигрировавших частиц и тел, записанных с шагом 10-500 лет, вычислялись вероятности их столкновений с планетами.**

**Изменения со временем больших полуосей (слева) эксцентриситетов и  $\sin i$  (справа).** Среднее время динамической жизни ОПОЮ порядка 100 тыс. лет. Однако среди рассмотренных 30,000 ОПОЮ было несколько объектов, которые переходили на орбиты, лежащие внутри орбиты Юпитера, и двигались по ним в течение десятков млн. лет.

10P (a, d), 2P (b), resonance 3:1 ©. BULSTO (a-c), RMVS (d)





**-- Распределение всех мигрировавших объектов при расчетах методом BULSTO.** (время в млн. лет, в течение которого  $a$  было в интервале шириной в 0.005 а.е. (a-b) или 0.1 а.е. (c-d)). Хотя только небольшая часть мигрировавших объектов имела  $a < 2$  а.е., среднее время, проводимое объектами, первоначально пересекавшими орбиту Юпитера, на орбитах с  $a < 2$  AU было сравнимо со временем при  $a = 3$  а.е.

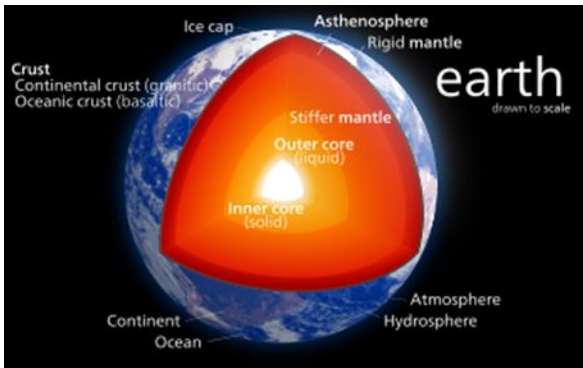
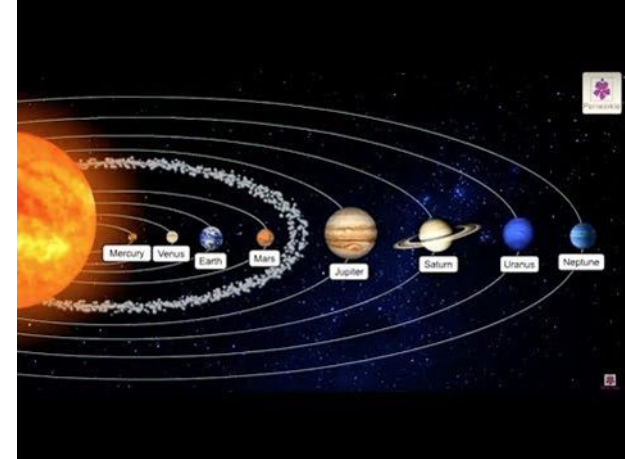
# **-Миграция объектов из зон планет-гигантов и транснептуновых объектов к орбите Земли**

- Результаты исследований миграции тел, включая транснептуновые объекты, свидетельствуют в пользу по крайней мере одного из следующих выводов:
  - *доля 1-км бывших транснептуновых объектов среди объектов, пересекающих орбиту Земли, может достигать нескольких десятков процентов,*
  - *но более вероятно, что большинство бывших 1-км транснептуновых объектов, перешедших на орбиты пересекающие орбиту Земли, дезинтегрировались в миникометы и пыль за время, составляющее меньшую часть их динамических времен, если эти динамические времена достаточно большие.*
- **Относительно небольшая часть ( $\sim 0.0001-0.001$ ) объектов, пересекавших орбиту Юпитера, которые перешли на орбиты, лежащие внутри орбиты Юпитера, и двигались по таким орбитам более 1 млн. лет, может вносить большой вклад в объекты, пересекающие орбиту Земли. Вероятность столкновения такого объекта с планетой земной группы может быть больше, чем у 10,000 других объектов, пересекавших орбиту Юпитера.**
- **Бывшие объекты, пересекавшие орбиту Юпитера, могли получить любые орбиты объектов, сближающихся с Землей, и объектов, движущихся внутри орбиты Земли, и могли двигаться по таким орбитам в течение миллионов лет.**

# Доставка воды и летучих к планетам земной группы

- Актуальность задачи доставки воды и летучих к планетам земной группы обусловлена тем, что Земля и планеты земной группы формировались в высокотемпературной ( $\sim 1000^\circ\text{K}$ ) зоне протопланетного диска, где вода и летучие не удерживались, а сосредотачивались за «снеговой линией» на расстоянии  $R > 3.5$  а.е.
- **Вода в океане Земли и ее отношение D/H могут быть результатом смешивания воды из нескольких экзогенных и эндогенных источников с высоким и низким отношениями D/H.**

# Эндогенные и экзогенные источники воды



- **Эндогенные источники воды** могли включать прямую адсорбцию водорода из небулярного газа в расплавы магмы с последующей реакцией  $\text{H}_2$  с  $\text{FeO}$  и *аккумуляцию воды частицами протопланетного диска до начала диссипации* газа во внутренней части ранней Солнечной системы и оказать влияние на отношение D/H в океанах Земли.
- **Экзогенные источники** включали *миграцию тел из внешней части главного пояса астероидов и миграцию планетезималей из-за орбиты Юпитера*. В ряде работ внешний пояс астероидов рассматривался как основной источник воды на Земле.

## Выпадение планетезималей на Землю

- Вероятности  $p_E$  столкновения планетезимали с Землей при  $n_{pl} = 7$ .

|                                 |                                     |                                     |                                       |                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| $a_{\text{omin}}, \text{ а.е.}$ | <b>2.5</b>                          | <b>5.</b>                           | <b>7.5</b>                            | <b>10</b>                           |
| $e_o=0.3$                       | <b><math>5 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b><math>4 \cdot 10^{-6}</math></b> | <b><math>3.8 \cdot 10^{-4}</math></b> | <b><math>2 \cdot 10^{-6}</math></b> |
| $e_o=0.05$                      | <b><math>2 \cdot 10^{-2}</math></b> | <b><math>6 \cdot 10^{-6}</math></b> | <b><math>2 \cdot 10^{-6}</math></b>   | <b><math>3 \cdot 10^{-5}</math></b> |

|                                 |                   |                   |                   |                   |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $a_{\text{omin}}, \text{ а.е.}$ | 15                | 20                | 30                | 40                |
| $e_o=0.3$                       | $1 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-7}$ | $6 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ |
| $e_o=0.05$                      | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-7}$ | $8 \cdot 10^{-7}$ |

- Большинство выпадавших на Землю планетезималей выпадало на нее за время, не превышавшее 20 млн. лет, как для планетезималей из зоны питания Земли, так и с начальных расстояний в диапазоне 5-30 а.е. от Солнца при рассмотрении всех планет-гигантов (выпавших из зоны питания Юпитера и Сатурна, если Уран и Нептун еще не сформировались).

# Доставка на Землю воды и летучих

- При общей массе планетезималей в зоне питания Юпитера и Сатурна  $\sim 100$  масс Земли и при  $p_E = 2 \times 10^{-6}$  общая масса планетезималей, столкнувшихся с Землей, равна массе земных океанов.

Значение  $p_E$  могло в несколько раз превышать  $2 \times 10^{-6}$ .

- Некоторая часть (вероятно около  $1/3$ ) состава планетезималей могла приходиться на воду и летучие.

- Некоторые планетезимали, содержащие воду, пришли к Земле из-за орбиты Сатурна.

# -Времена выпадения планетезималей

Планетезимали из-за орбиты Юпитера могли выпасть на Землю и Луну в процессе их роста, и вещество, включая воду и летучие вещества, доставленные из-за орбиты Юпитера, было включено во внутренние слои Земли и Луны.

Доставка вещества на Землю и Луну из зоны Урана и Нептуна зависела от того, когда эти гигантские планеты приобрели большие массы и начали двигаться на орбитах, близких к современным орбитам.

После того, как планетезимали из этой зоны начали испытывать значительное влияние этих планет-гигантов, характерное время до выпадения планетезималей на Землю и Луну часто не превышало 20 млн. лет, но небольшая часть планетезималей могла выпадать на Землю через сотни миллионов лет.



# -Вероятности столкновений планетезималей с Луной и Солнцем

- Рассчитанные вероятности столкновений с Луной  $p_M$  планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Юпитера, были примерно в 16-17 раз меньше вероятностей столкновений с Землей  $p_E$ .
- Из-за меньшей массы Луны доля вещества, испарившегося и выброшенного с Луны при столкновениях с ней планетезималей, была больше, чем при столкновениях с Землей.
- Это дополнительно уменьшает массу доставленных на Луну воды и летучих.
- Вероятность  $p_{Sun}$  столкновений планетезималей с Солнцем была существенной только для тел в астероидном поясе. При  $e_o = 0.3$  составляли 0.17 для  $a_m = 2$  а.е., 0.04 для  $a_m = 2.5$  а.е. и 0.76 для  $r_f = 2.5$  а.е.
- Для всех других расчетов  $p_{Sun} < 0.01$ , а  $p_{Sun} = 0$  для большинства расчетов для  $a_m$  или  $r_f$  не меньших 5 а.е.

# Вероятности столкновений планетезималей с Марсом, Венерой и Меркурием

- Для сильно эксцентричных орбит планетезималей вероятность их столкновения с планетой  $p_{pl} \sim m_{pl}^{2/3}$  ( $m_{pl}$  - масса планеты); поэтому отношение  $p_{pl}/m_{pl}$  больше для меньших масс планет.
- Согласно расчетам масса воды, полученной Марсом за счет планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Юпитера, была примерно в два-три раза больше, чем для Земли (в расчете на единицу массы планеты). В абсолютных значениях масса воды, доставленной на Марс, была в 3-5 раз меньше массы воды, доставленной на Землю (Маров, Ипатов, 2018).
- Масса воды, доставленной к Венере и Меркурию, рассчитанная на единицу массы планеты, была немного больше, чем для Земли.
- Полученные оценки свидетельствуют в пользу существования древних океанов на Марсе и Венере (Marov, Grinspoon, 1998).

# Выводы по миграции планетезималей

- Вероятности столкновений планетезималей пз-за орбиты Юпитера с Землей  $p_E$  и Луной  $p_M$ , рассчитанные для 250 планетезималей, могут отличаться в несколько десятков раз для разных вариантов расчетов с почти одинаковыми орбитами.
- При рассмотрении тысяч планетезималей вероятность столкновения планетезималей с Землей для начальных значений их больших полуосей орбит между 5 и 10 а.е. может превышать  $2 \times 10^{-6}$ , по крайней мере, в несколько раз.
- В среднем для области между 20 и 40 а.е. эта вероятность может быть около  $10^{-6}$ .
- Для планетезималей, мигрировавших из главного пояса астероидов,  $p_E \sim 10^{-4}-10^{-2}$ , т.е. намного больше.
- Масса воды, доставленной планетезималами из-за орбиты Юпитера, могла достигать массы земных океанов.

# **-Выводы по миграции планетезималей**

- Отношение вероятностей столкновений рассматриваемых планетезималей с Землей к вероятностям их столкновений с **Луной** было в основном в диапазоне от 16 до 17. Отношение массы принесенной воды и летучих было больше из-за большего испарения воды и выброса вещества при столкновениях планетезималей с Луной.
- Отношение массы вещества, доставленного на планету, к массе планеты для Марса было примерно в два-три раза больше, чем для Земли. Такие отношения для Меркурия и Венеры были не меньше, чем для Земли.

# Выброс вещества с комет

**В 2005 г ударный модуль КА Deep Impact столкнулся с кометой Tempel 1. Через  $t_e \sim 10$  с после столкновения был локальный максимум количества наблюдаемого вещества, выброшенного за единицу времени, (в основном частиц диаметром  $d < 3$  микрон) с типичными проекциями скоростей  $v_p \sim 100$  м/с. При  $1 < t_e < 3$  с и  $8 < t_e < 50$  с оцениваемый выброс вещества был существенно больше, чем теоретического монотонного экспоненциального уменьшения. Эта разница была связана с тем, что столкновение спровоцировало дополнительный выброс вещества.**

При  $t_e \sim 55-72$  с выброс вещества быстро уменьшился и направление от места выброса на наиболее яркий пиксель быстро вернулось к направлению, которое было до 10 с. Это могло быть связано с резким уменьшением дополнительного выброса, который начался при  $t_e \sim 10$  с.

**Анализ наблюдений облака вещества, выброшенного после столкновения кометы с КА Дип Импакт, и выбросы вещества с различных комет свидетельствуют в пользу существования в кометах больших полостей, наполненных пылью и газом под давлением и расположенных под значительной частью поверхностей комет. Верхняя граница относительно больших полостей может располагаться на глубине 5-10 метров.**

## **Формирование кратеров на Луне в течение последнего миллиарда лет**

•Согласно (Bottke et al., 2007), недавнее катастрофическое разрушение большого астероида главного пояса 160 млн лет назад могло увеличить современное число объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) с диаметром  $d > 1$  км по сравнению со средним значением числа ОСЗ с диаметром  $d > 1$  км, полученным для интервала в 1.1 млрд лет.

•Анализируя возрасты Коперниканских кратеров (то есть кратеров с возрастом менее 1.1 млрд лет), Mazrouei и др. (2019) пришли к выводу о том, что вероятность столкновения ОСЗ с Луной выросла в 2.6 раза 290 млн. лет назад.

•Нами рассматривалось возможное изменение потока кратерообразующих тел в течение последнего миллиарда лет и обсуждается возможность увеличения этого потока в течение последних 300 млн лет. Эти оценки используют данные о диаметрах лунных кратеров с возрастом не более 1.1 млрд лет, данные о числе околоземных объектов, оценки вероятностей столкновений околоземных объектов с Луной, и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников.

•Оценки вероятностей столкновений объектов, пересекающих орбиту Земли, (ОПОЗ, ЕСОs) с Землей базировались на подходе, описанном в (Ipatov, Mather, 2004a).

**Таблица.** Число  $N_{\text{reg}15}$  кратеров с возрастом не более 1.1 млрд. лет и с диаметрами не меньшими 15, соответственно. Эти числа получены для морей видимой стороны Луны и для областей, равной или близкой к площади поверхности Луны, на основе данных работ (Mazrouei и др., 2019) и (Losiak и др., 2015).  $r_{\text{reg}}$  - отношение площади рассматриваемой области к площади Луны.

|                                   | Mazrouei и др., 2019 | Mazrouei и др., 2019 | Losiak и др., 2015. | Losiak и др., 2015. |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| $r_{\text{reg}}$                  | 0.155                | 0.8264               | 0.155               | 1.0                 |
| $N_{\text{reg}15}$                | 12                   | 44                   | 29                  | 53                  |
| $N_{\text{reg}15}/r_{\text{reg}}$ | 77                   | 53                   | 187                 | 53                  |

- Для полной поверхности Луны для значений  $T_E$ , равных 100 и 67 млн. лет, значения  $N_{\text{est}} = N_{\text{est-ful}}$  равны 267 и 398<sub>36</sub>



# -Сравнение числа наблюдаемых кратеров с данными для модели

- **Оценки  $N_{\text{obs}}$  экстраполяции числа кратеров с возрастом не более 1.1 млрд. лет на всю поверхность Луны соответствуют значениям  $N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$  в таблице. Все эти значения  $N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$  не превышают 187, то есть меньше 267 и 398 (оценок числа  $N_{\text{est-ful}}$  кратеров для рассматриваемой модели) по крайней мере в 1.4 и 2.1 раза (для значений  $T_E$ , равных 100 и 67 млн. лет).**
- **Значения  $N_{\text{obs}} = N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$ , полученные на основании анализа кратеров из области Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны, рассмотренных в работе (Mazrouei и др., 2019), не превышают 77 и меньше 267 и 398 по крайней мере в 3.5 и 5.2 раз, соответственно.**
- **Если исходить из данных (Mazrouei и др., 2019) и (Losiak и др., 2015), относящихся ко всей (или почти всей) поверхности Луны, то значения  $N_{\text{obs}} = N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$  не превышают 53, то есть меньше  $N_{\text{est-ful}}$  не менее, чем в 5 раз.**

# **Сравнение числа наблюдаемых лунных кратеров с их числом, полученным на основе числа ОСЗ**

**Основной результат статьи (Mazrouei и др., 2019) состоит в том, что вероятность столкновения ОСЗ с Луной возросла в 2.6 раза 290 млн. лет назад.**

Для модели, в которой вероятность столкновения ОСЗ с Луной равнялась современному значению за последние 290 млн. лет, а до этого в течение 810 млн. лет была в 2.6 раза меньше современного значения, число образовавшихся кратеров составило бы 0.6 (была бы в 1.7 раз меньше) от оценки, полученной на основании современного числа ОСЗ.

Таким образом, все наши оценки  $N_{est}$  и  $N_{obs}$  допускают рост вероятности столкновения с Луной в **2.6 раз<sup>obs</sup> 290 млн. лет назад.**

С этим выводом работы (Mazrouei и др., 2019) лучше согласуются наши оценки, основанные на известных кратерах из области Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны. Поэтому можно предположить, что число кратеров на единице площади для всей поверхности Луны могло быть примерно таким же, как и для упомянутой выше области, то есть быть больше современного значения.

# Времена жизни ОСЗ

• Gladman и др. (2000) получили, что **медианное время жизни ОСЗ составляет около 10 млн. лет.** В (Ипатов, 2019) медианное время динамической жизни тел с большими полуосями начальных орбит, не превышавшими 1.5 а.е., и начальными эксцентриситетами, равными 0.05 или 0.3, не превышало 20 млн. лет.

• **Поэтому, возможно, что разрушение астероида, вызвавшего современное увеличение** (по сравнению со средним значением за последний миллиард лет) **числа ОСЗ, произошло не только 160 млн. лет назад, как считалось в (Bottke и др., 2007), а сравнительно недавно.** Для современного увеличения числа ОСЗ вследствие разрушения астероида, произошедшего 160 млн. лет, нужно, чтобы большинство образовавшихся при разрушении осколков начали пересекать орбиту Земли через время, большее 100 млн. лет после разрушения.

• Bottke и др. (2007) считали, что миграция осколков к резонансам 7:2 с Юпитером и 5:9 с Марсом происходила под влиянием **эффекта Ярковского** и YORP эффекта. Mazrouei и др. (2019) также предполагают, что **миграция осколков в резонансы, переводившие осколки к Земле, была медленной из-за негравитационных сил.**

• Nesvorný и др. (2002) считали, что семейство астероида (832) Karin образовалось 5.8 млн. лет назад. Большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты этого астероида равны 2.865 а.е., 0.08 и  $1^\circ$ , соответственно. Это семейство находится недалеко от резонанса 5:2 с Юпитером (2.82 а.е.).

# **Выводы по формированию лунных кратеров**

Было проведено сравнение количества лунных кратеров с диаметром большим 15 км и возрастом, не превышающим 1.1 млрд. лет, с оценками числа кратеров, которые могли образоваться за 1.1 млрд. лет, если бы число околоземных объектов с диаметром большим 1 км и элементы их орбит за это время были близки к их современным значениям.

Сравнение проводилось для кратеров на всей поверхности Луны и для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. При этих оценках использовались значения характерных времен, прошедших до столкновений этих объектов с Луной, и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников, породивших эти кратеры.

**Наши оценки не противоречат увеличению числа околоземных объектов после возможных катастрофических разрушений больших астероидов главного пояса, которые могли произойти в течение последних 300 млн. лет. В частности, они согласуются с выводом работы (Mazrouei и др.) о том, что вероятность столкновения с Луной возросла в 2.6 раза 290 млн. лет назад.**

**Число известных кратеров с возрастом менее 1.1 млрд. лет на единице площади для области в районе Океана Бурь и морей видимой стороны Луны превышает (для кратеров с диаметром не менее 15-18 км не менее, чем в 1.45 раза, в зависимости от методов определения возраста кратеров) аналогичное среднее число для всей поверхности Луны.**

## **Миграция пыли. Начальные данные и методы интегрирования**

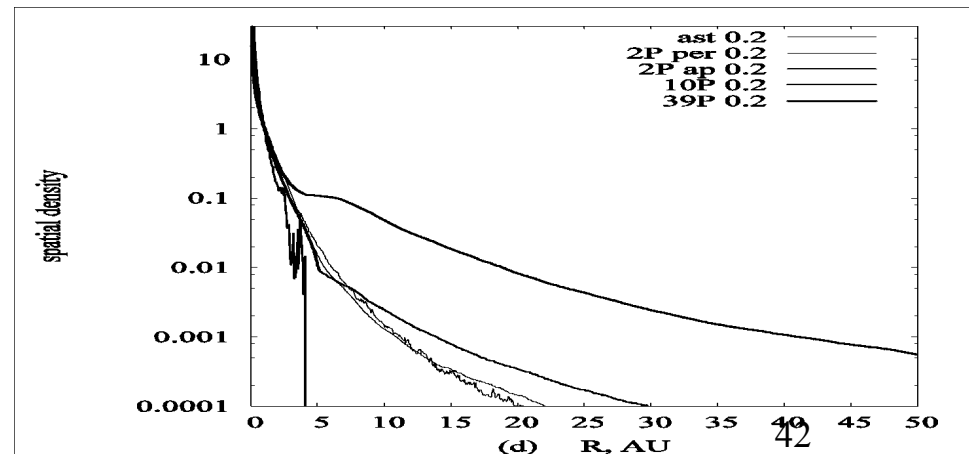
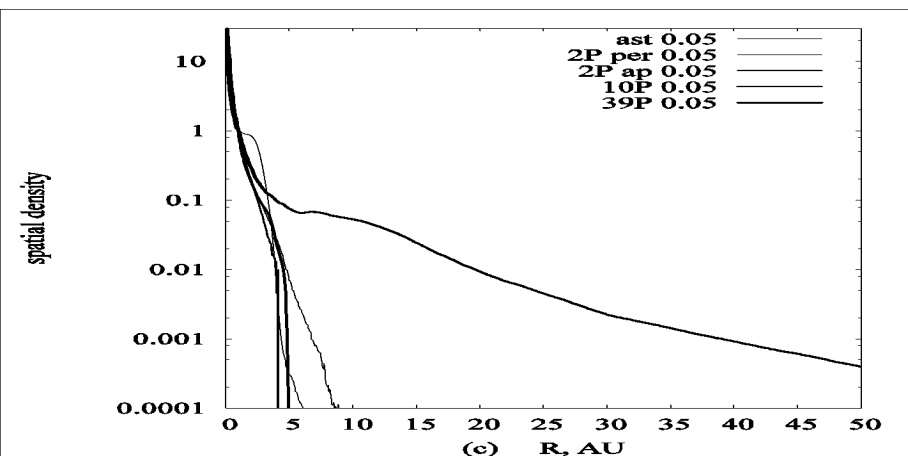
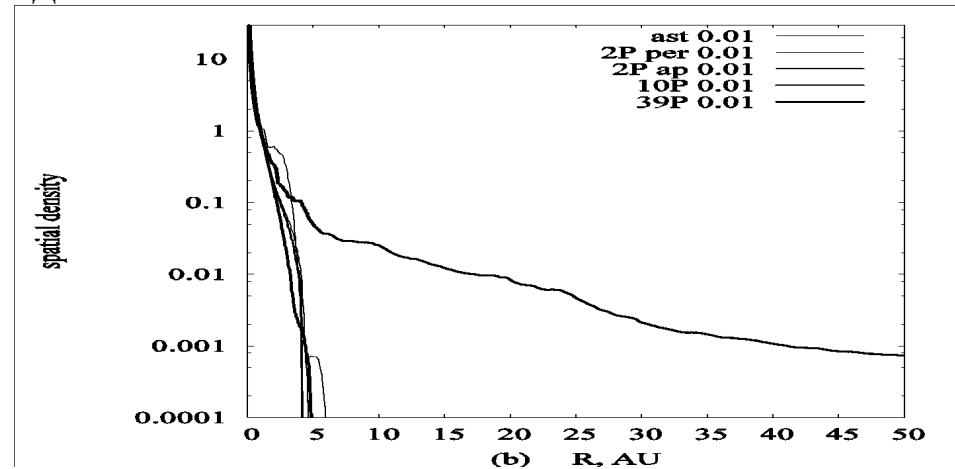
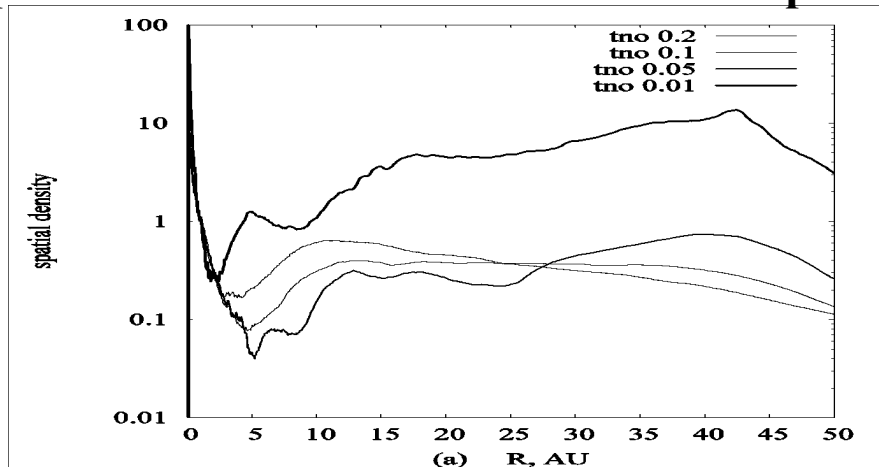
Хотя количество вещества, доставленного пылью, меньше, чем телами, **пыль могла быть более эффективной, чем тела, в доставке органического вещества к планетам.** Это связано с тем, что **пылевые частицы не подвергались интенсивному нагреву (usually higher than 100-150 C) когда они проходили через атмосферу.**

Основными источниками межпланетной пыли являются кометы, астероиды и транснептуновые объекты.

- **Эволюция орбит 20,000 пылевых частиц исследовалась до тех пор, пока частицы не покидали Солнечную систему или не сталкивались с Солнцем. При интегрировании использовался метод Булирша-Стоуера (BULSTO). Учитывалось гравитационное влияние всех планет, радиационное давление, эффект Пойтинга-Робертсона, солнечный ветер.**
- **Рассматривался широкий диапазон размеров частиц (от 1 микрона до нескольких миллиметров). Вычисления проводились для значений  $\beta$  (отношения силы радиационного давления к гравитационной силе) от 0.0001 до 0.4. Для силикатных частиц с плотностью 2.5 г/см<sup>3</sup> такие значения  $\beta$  соответствуют диаметрам частиц  $d$  равным от 4700 до 1.2 микрон, соответственно. Для водяного льда диаметры  $d$  в 2.5 раза больше, чем для силикатных частиц.**

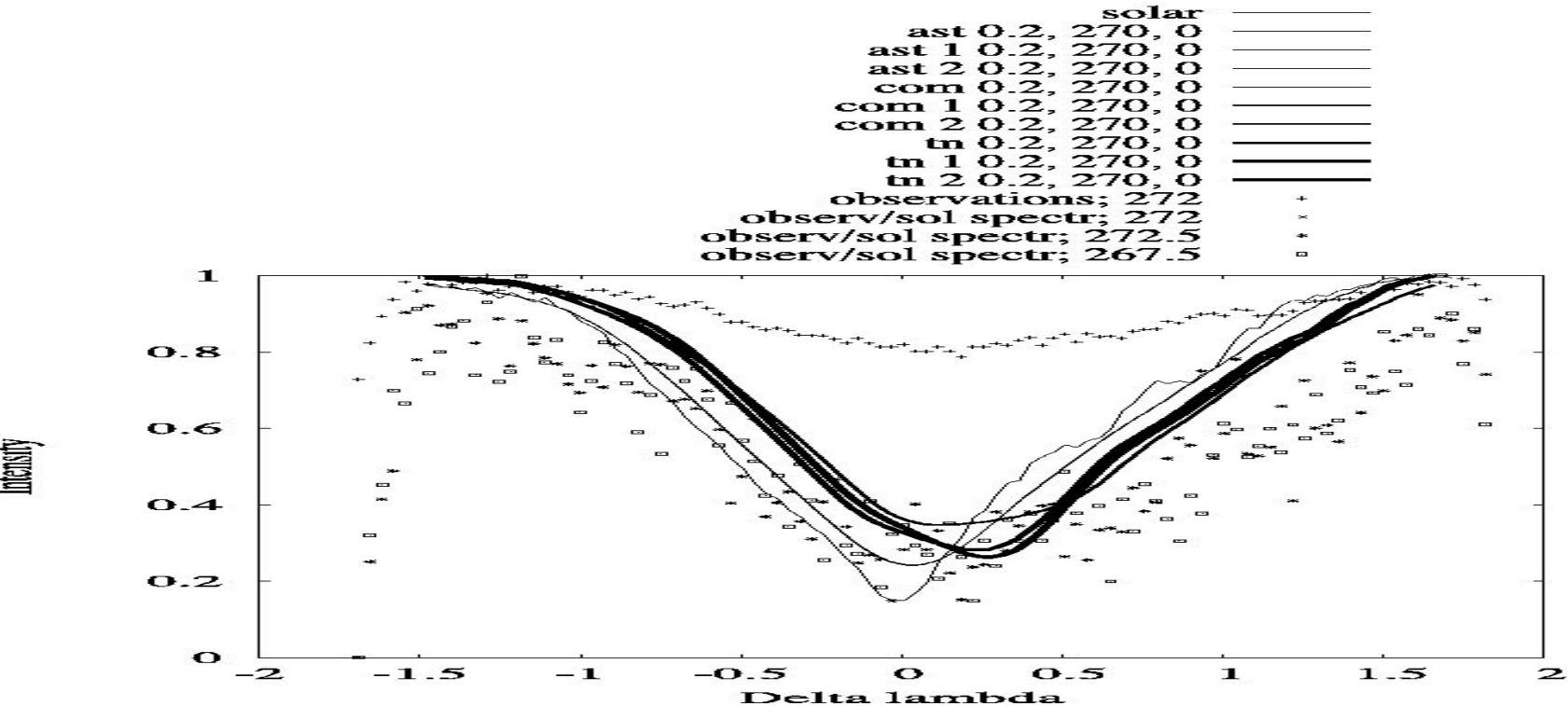
- Ipatov, S.I., Mather, J.C., and Taylor, P.A., *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1017, pp. 66-80 (2004).
- Ipatov, S.I. and Mather, J.C., *Advances in Space Research*, v. 37, N 1, 126-137 (2006)

**Число мигрирующих частиц в единице объема на различных расстояниях  $a$  от Солнца для частиц, стартовавших с различных малых тел. Наблюдения показали, что число частиц в единице объема примерно постоянно на расстоянии 3-18 а.е. от Солнца [Humes D.H., J. Geophys. Res., 1980, 85, 5841]. Поэтому, полученные графики показывают, что астероидные частицы не доминируют на расстоянии  $a > 3$  а.е., транснептуные частицы не доминируют на расстоянии 3-7 а.е., и значительная часть частиц на расстоянии 3-7 а.е. имеет кометное происхождение.**



# Форма линии Фраунговера, полученная в нашей модели, и при наблюдениях спектра зодиакального света около линии абсорбции Mg I $\lambda 5184$

При исследовании источников зодиакального облака мы также использовали результаты наблюдений спектра зодиакального света. В работе (Reynolds, Madsen and Moseley, ApJ, 2004, 612, 1206) приведены результаты наблюдений формы линии Фраунговера около линии Mg I  $\lambda 5184$  для различных значениях элонгации (угла с вершиной в Земле между направлениями на Солнце и место наблюдения)



## **Вычисление графиков ‘скорость-элонгация’**

На основе распределения мигрирующих пылевых частиц в Солнечной системе мы моделировали форму линии Фраунговера для различных источников частиц.

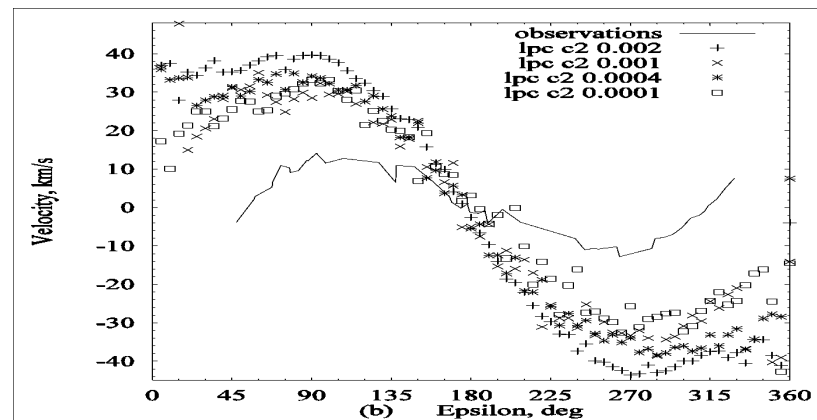
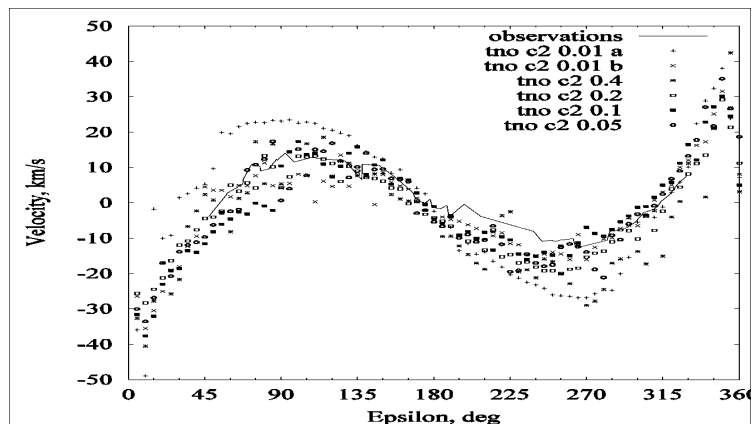
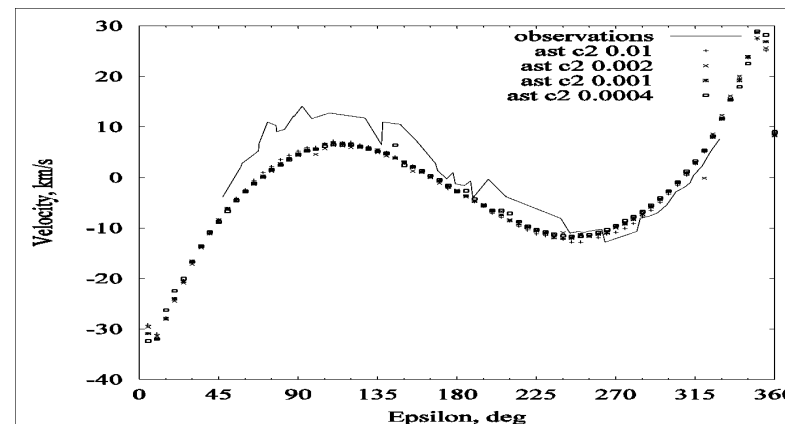
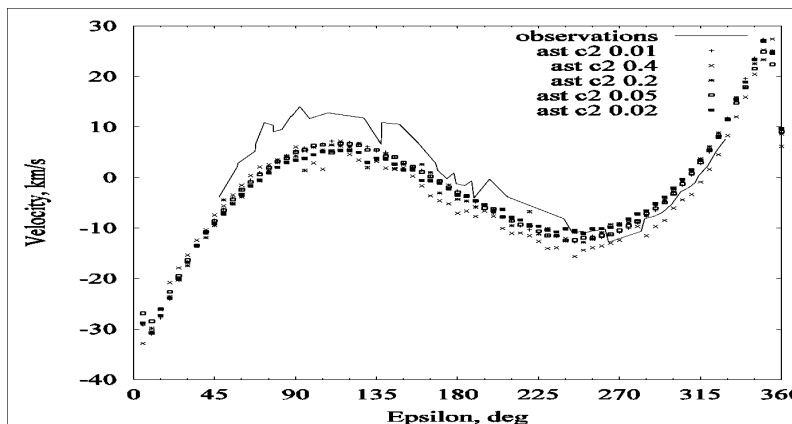
**Сравнивая спектры (форму линии Фраунговера) для модели и для солнечного света, мы определяли характерную скорость пылевых частиц для рассматриваемого значения элонгации.**

*Based on our plots of the intensity of the scattered light obtained at the Earth vs.  $\Delta\lambda$  ( $\lambda$  is the length of the wave near the solar Mg I  $\lambda 5184$  absorption line and  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ , where  $\lambda_0$  corresponds to the minimum of solar spectrum near this line) we calculated the shift  $\Delta\lambda_s$  of the plot, which is based on our model distribution of dust particles, relative to the plot of the solar spectrum. Considering that  $v/c = \Delta\lambda_s/\lambda$  (where  $v$  is a characteristic velocity of particles and  $c$  is the velocity of light), we calculated the characteristic velocity of particles at different elongations.*

*Графики скоростей частиц в зависимости от элонгации (угла с вершиной в Земле между направлениями на Солнце и место наблюдения) сравнивались с графиками, полученными при наблюдениях by Reynolds et al. (2004).*



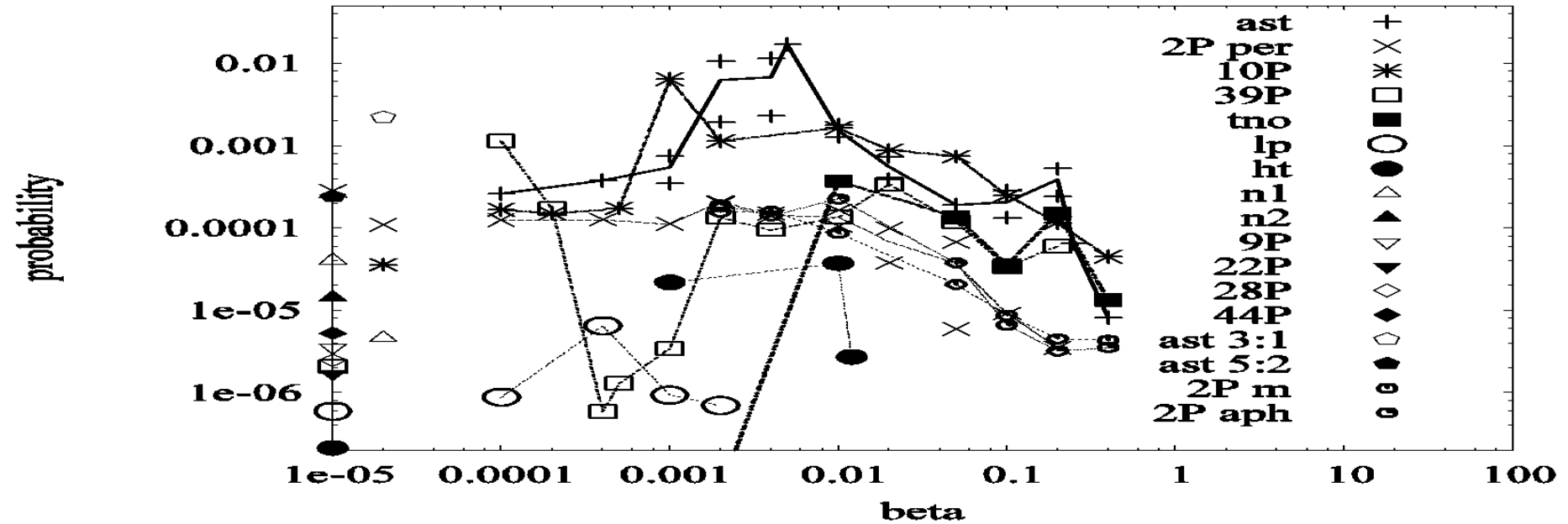
**Графики «скорость-элонгация» для астероидных, транснептуновых и кометных зодиакальных частиц. Для астероидной пыли кривые «скорость-элонгация» ниже наблюдательной кривой при элонгации  $\epsilon < 240$  град. Для транснептуновых частиц наблюдательная кривая находится в основном внутри области кривых для различных  $\beta$ . Для частиц, порождаемых долгопериодическими кометами и кометами типа комета Галлея ( $e=0.97$ ), график выше наблюдательной кривой при  $\epsilon < 180$  град и ниже при  $\epsilon > 180$  град.**



# Источники зодиакальных частиц

- Comparison of the WHAM observations (both of velocity and width of Mg I line) and the observations of the number density with the results based on our models for particles originating from different small bodies testify in favour of a considerable fraction of particles originating from comets, including those originating beyond Jupiter's orbit, and trans-Neptunian objects, but it did not contradict to 30% of asteroidal dust needed for explanation of formation of dust bands.
- **На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что доли астероидных частиц, кометных частиц, образовавшихся внутри орбиты Юпитера, и частиц, образовавшихся за орбитой Юпитера, могут быть порядка 1/3 каждая, с возможным отклонением от 1/3 до 0.1-0.2.**
- Средний эксцентриситет зодиакальных частиц на расстоянии 1-2 а.е. от Солнца, который лучше удовлетворяет наблюдениям, находится между 0.2 и 0.5, и возможно близок к 0.3.
- Ipatov, S.I., Kutyrev, A., Madsen, G.J., Mather, J.C., Moseley, S.H., Reynolds, R.J. (e.g., 37th LPSC, #1471, 2006; Icarus, v. 194, N. 2, 769-788, 2008)

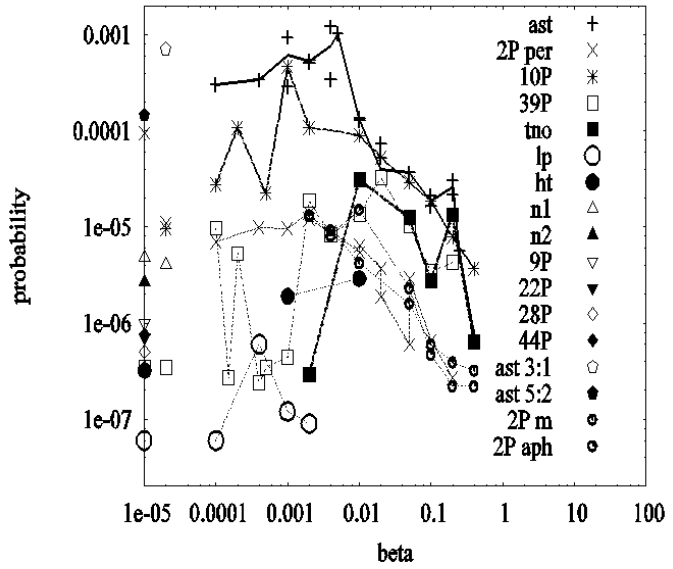
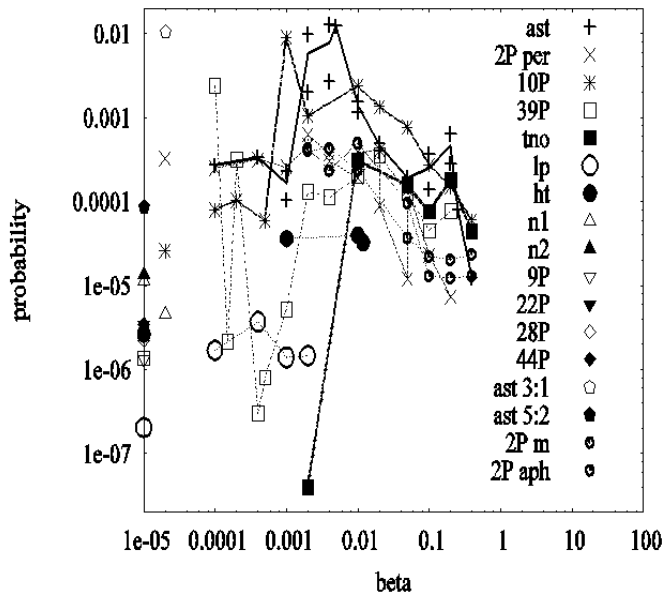
# Вероятности столкновений мигрирующих частиц с Землей



Вероятность  $P$  столкновения пылевых частиц и тел (за время их динамической жизни) с Землей в зависимости от  $\beta$  (отношения радиационного давления и гравитационной силы) для частиц, стартовавших с астероидов (ast), транснептуновых объектов (tno), Comet 2P/Encke at perihelion (2P per), Comet 2P/Encke at aphelion (2P aph), Comet 2P/Encke in the middle between perihelion and aphelion (2P m), Comet 10P/Tempel 2 (10P), Comet 39P/Oterma (39P), long-period comets (lp) at  $e=0.995$  and  $q=0.9$  AU, and Halley-type comets (ht) at  $e=0.975$  and  $q=0.5$  AU (for lp and ht runs, initial inclinations were from 0 to 180°). If there are two points for the same  $\beta$ , then a plot is drawn via their mean value. Для кометных и астероидных пылевых частиц вероятность  $P$  имела максимум ( $\sim 0.001-0.005$ ) при  $0.002 \leq \beta \leq 0.01$ , т.е. при  $d \sim 100 \mu\text{m}$  (это значение  $d$  находится в соответствии с наблюдательными данными). Эти значения вероятности  $P$  обычно (кроме кометы Comet 2P) были больше на порядок величины, чем для родительских комет.

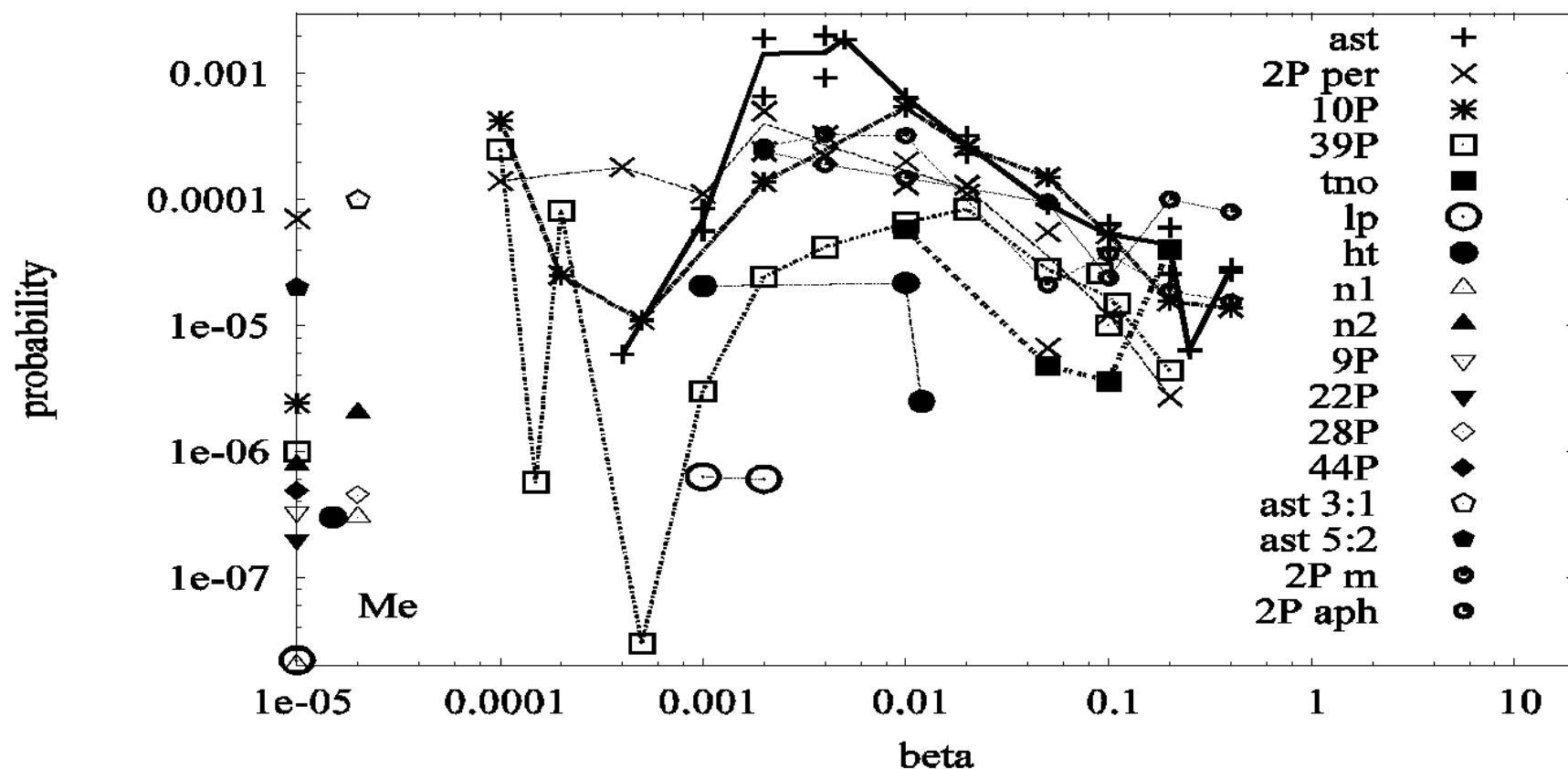
# -Вероятности столкновений пылинок с Венерой (левый график) и с Марсом (правый график)

Вероятности столкновений частиц с Венерой были такого же порядка, как с Землей, а вероятности столкновений с Марсом были на порядок меньше.



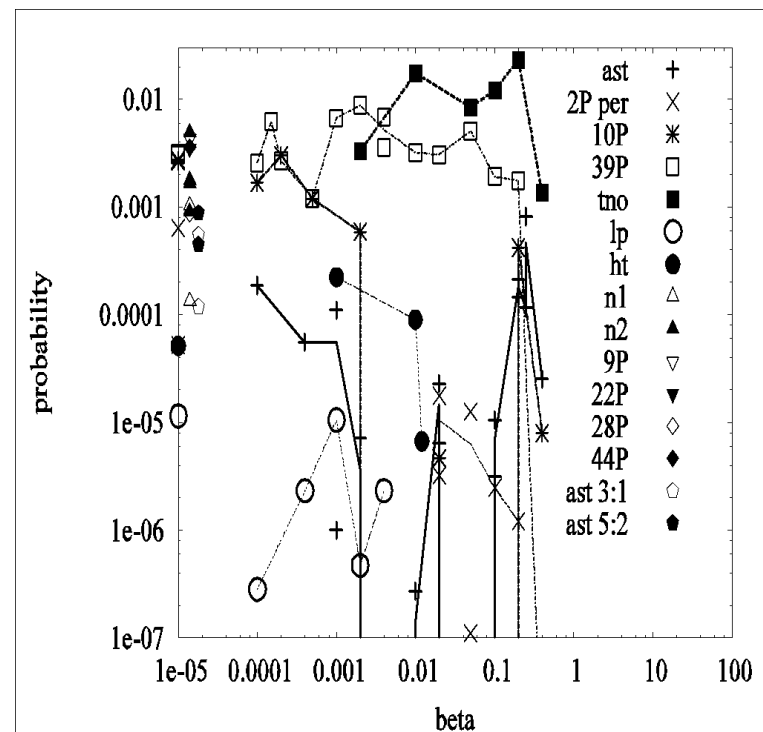
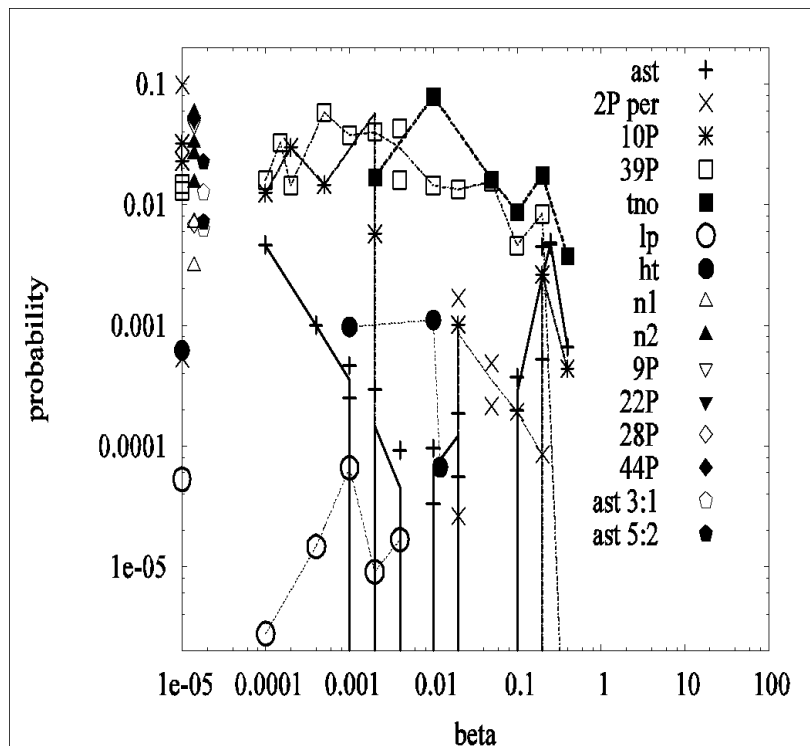
# -Вероятности столкновений мигрирующих частиц с Меркурием в зависимости от $\beta$ (отношения силы радиационного давления и гравитационной силы)

В зависимости от источника пыли вероятности столкновений частиц с Меркурием были больше или меньше, чем с Марсом.



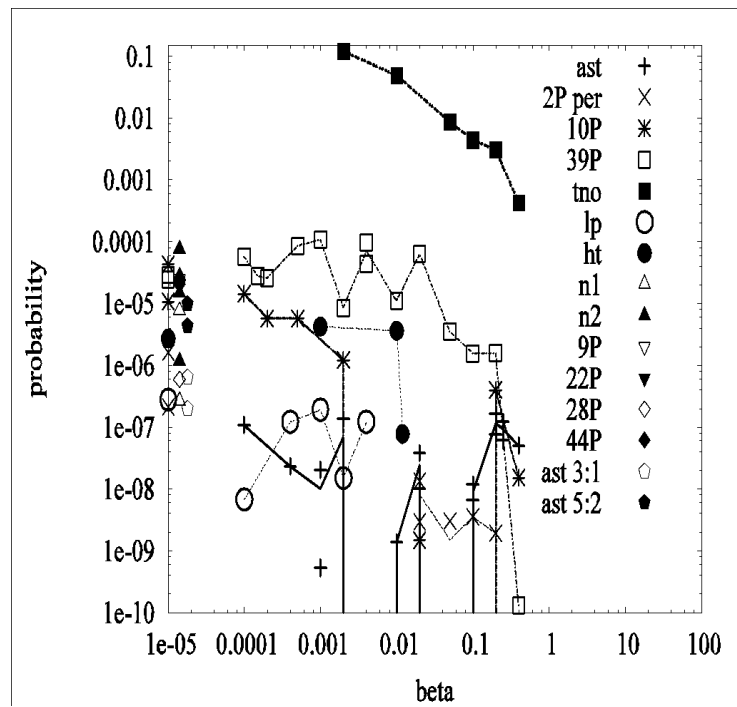
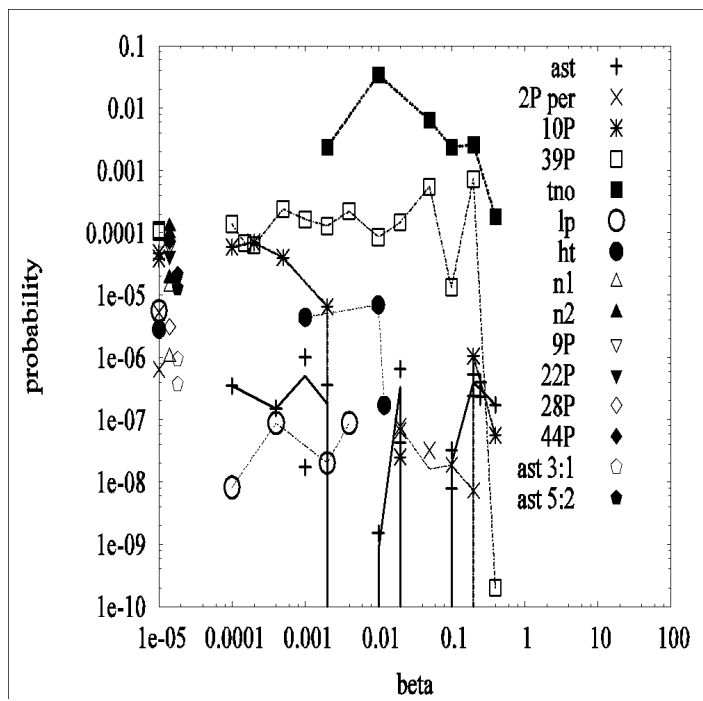
# -Вероятности столкновений частиц с Юпитером (левый график) и Сатурном (правый график)

Вероятности столкновений частиц с Юпитером могли достигать **0.01-0.1** для частиц, первоначально двигавшихся за орбитой Юпитера.



# -Вероятности столкновений частиц с Ураном и Нептуном

Вероятности столкновений мигрировавших частиц (кроме транснептуновых частиц) с другими планетами-гигантами меньше, чем с Юпитером. Общая вероятность столкновений рассмотренной частицы или тела со всеми планетами не превышала 0.2.



# Экзопланеты

По состоянию на 3 августа 2019 года, достоверно подтверждено существование 4115 экзопланет в 3061 планетных системах, из которых в 669 имеется более одной планеты. Следует отметить, что количество надёжных кандидатов в экзопланеты значительно больше. Так, по проекту «Кеплер» на март 2019 года числилось ещё 2423 кандидата, однако для получения ими статуса подтверждённых планет требуется их повторная регистрация с помощью наземных телескопов.

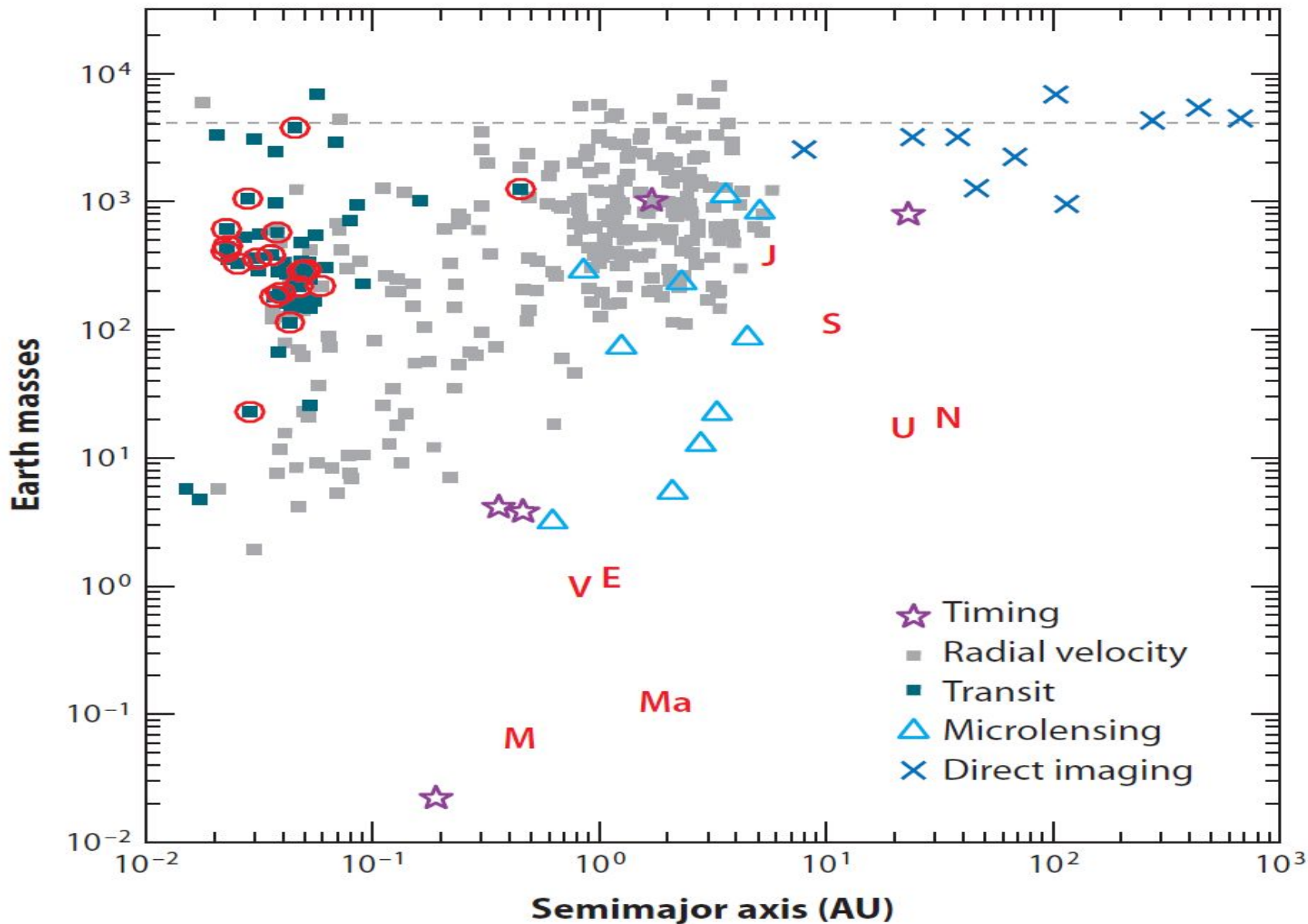
Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь в настоящее время оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из которых ~ от 5 до 20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными». Также, согласно текущим оценкам, около 34 процентов солнцеподобных Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь в настоящее время оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из которых ~ от 5 до 20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными». Также, согласно текущим оценкам, около 34 процентов солнцеподобных звёзд имеют в обитаемой зоне планеты, сравнимые с Землёй.

Подавляющее большинство открытых экзопланет обнаружено с использованием различных непрямых методик детектирования, а не визуального наблюдения.

**Большинство известных экзопланет — газовые гиганты Большинство**



# Массы и большие полуоси экзопланет

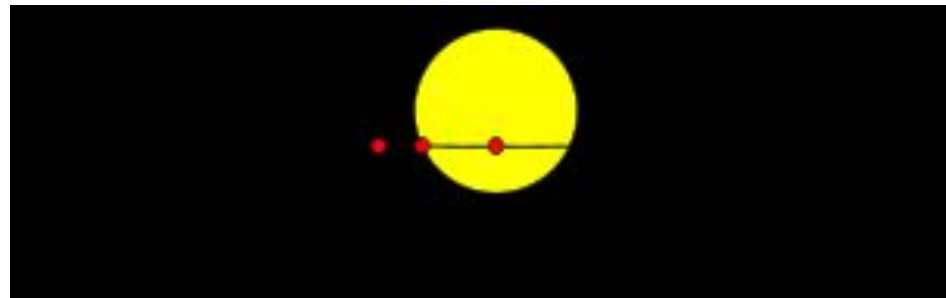
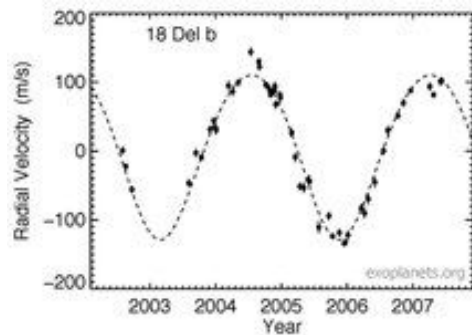


# Методы поиска экзопланет

Метод Доплера — спектрометрическое измерение радиальной скорости звезды.

Это самый распространённый метод. С его помощью можно обнаружить планеты с массой не меньше нескольких масс Земли, расположенные в непосредственной близости от звезды, и планеты-гиганты с периодами до примерно 10 лет. **Планета, обращаясь вокруг звезды, как бы раскачивает звезду, и мы можем наблюдать доплеровское смещение спектра звезды.**

Этот метод позволяет определить амплитуду колебаний радиальной скорости для пары «звезда — одиночная планета», массу планеты, период обращения, эксцентриситет и нижнюю границу значения массы экзопланеты ..



**Транзитный метод** связан с прохождением планеты на фоне звезды. В этот момент **светимость** звезды уменьшается. Метод позволяет определить размеры планеты, а в сочетании с методом Доплера — плотность планет. Дает информацию о наличии и составе атмосферы. Следует понимать, что этим методом можно обнаружить лишь те планеты, орбита которых лежит в одной плоскости с точкой наблюдения.

## -Методы поиска экзопланет

**Метод гравитационного микролинзирования.** Между наблюдаемым объектом (звездой, галактикой) и наблюдателем на Земле должна быть другая звезда (она выступает в роли линзы), фокусирующая своим гравитационным полем свет наблюдаемой звёздной системы. Если у звезды-линзы есть планеты, то появляется асимметричная кривая блеска и возможно отсутствие ахроматичности. У этого метода крайне ограниченное применение. Метод чувствителен к планетам с малой массой, вплоть до земной. На сентябрь 2011 года было открыто 13 планет.

**Астрометрический метод.** Основан на изменении собственного движения звезды под гравитационным воздействием планеты. С помощью астрометрии были уточнены массы некоторых экзопланет, в частности, Эпсилона Эридана b. Будущее этого метода связано с орбитальными миссиями, такими, как SIM.

**Радионаблюдение пульсаров.** Если вокруг пульсара. Если вокруг пульсара вращаются планеты, то излучаемый сигнал имеет осциллирующий. Если вокруг пульсара вращаются планеты, то излучаемый сигнал имеет осциллирующий характер. Мощные направленные пучки излучения образуют в пространстве конические поверхности. Если на такой поверхности окажется Земля, тогда возможно зарегистрировать данное излучение. На март 2010 года у двух пульсаров найдено пять планет (3+2).

**Прямое наблюдение.** Существует метод получения прямых изображений экзопланет посредством изолирования их от света звезды. Наиболее ярким примером такого метода является изображение четырёх планет системы HR 8799. Этот метод лучше всего работает для горячих и удалённых (~ 10-100 а.е.) от своей звезды планет. Эти планеты горячи из-за остаточного тепла от их образования. Поэтому прямое изображение тяготеет к выбору молодых звёзд<sup>[22]</sup>.

Предполагается, что космический телескоп имени Джеймса Вебба благодаря огромному зеркалу 6,5 м и высокой разрешающей способности, будет способен напрямую обнаруживать экзопланеты, а также подробно изучать состав их атмосфер

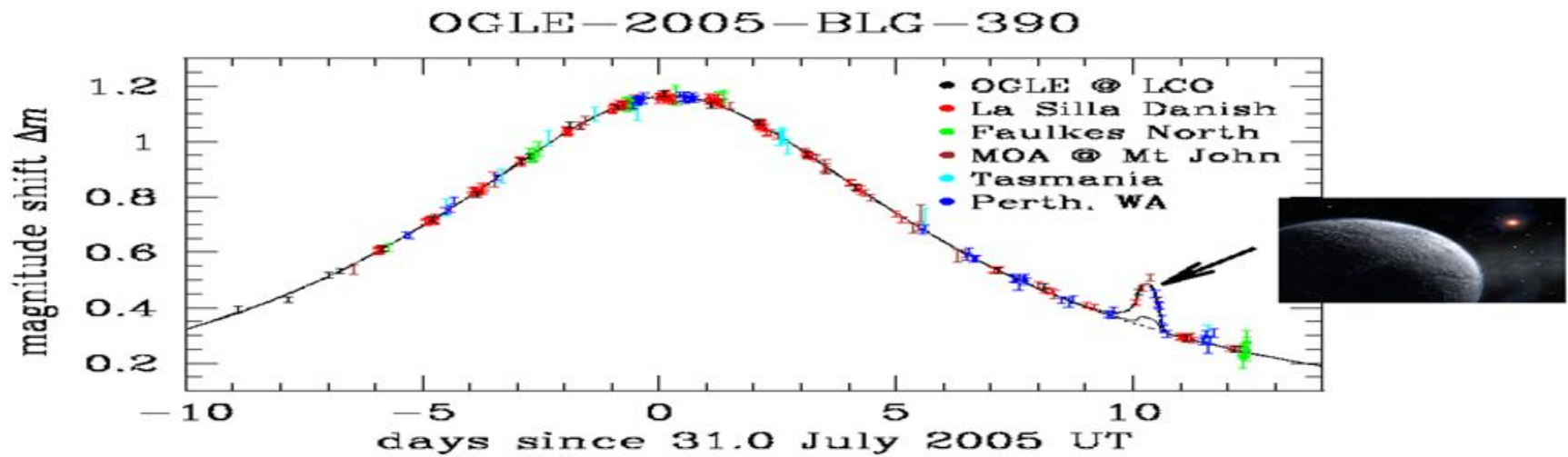
# Gravitation Microlensing



Если луч света от звезды-источника по пути к Земле проходит мимо звезды-линзы, то наблюдаемая яркость звезды-источника может усиливаться (из-за искривления траектории движения света). Если у звезды-линзы есть планета, то она может вызывать изменение яркости звезды-источника.

Deviations typically last a few hours or a few days. 2009 Gliese 581 e is an exoplanet with 1.9 Earth masses.

На слайде приведен пример изменения яркости звезды при событии микролинзирования. Маленький пик соответствует планете около звезды-линзы. Микролинзирование позволяет находить планеты небольших масс на достаточно большом расстоянии от звезды (планеты, на которых возможна жизнь).

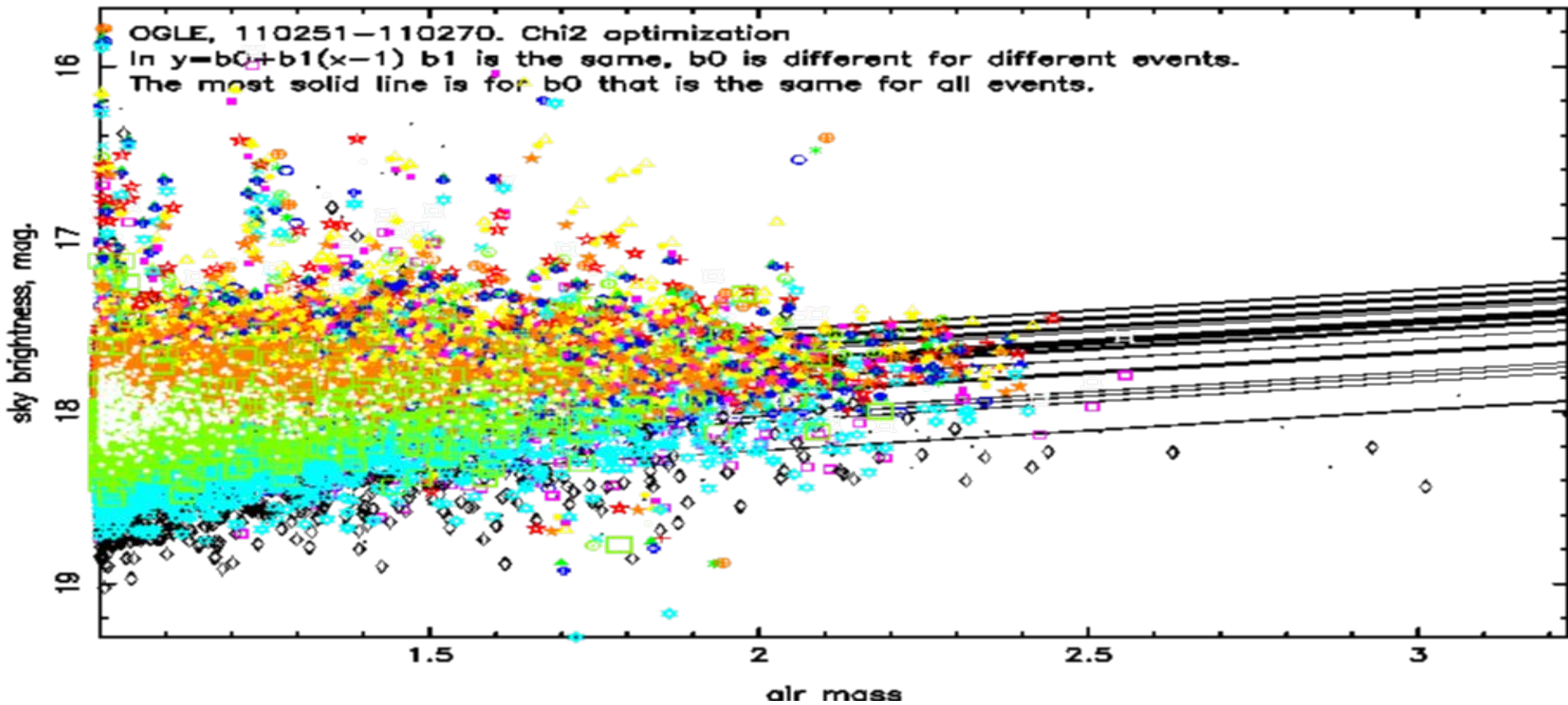


- The 15% blip lasting about 24 hrs that revealed 5-Earth-mass planet OGLE-2005-BLG-390 impressively demonstrated the sensitivity of ongoing microlensing efforts to Super-Earths. Had an Earth-mass planet been in the same spot, it would have been detectable from a 3% signal lasting 12 hrs. The detection of less massive planets requires photometry at the few per cent level on Galactic bulge main-sequence stars, which, given the crowding levels, becomes possible with images of angular resolution below about 0.4".

# **Модель яркости звездного неба и алгоритм оптимального выбора целей для наблюдений при поиске экзопланет методом микролинзирования**

- На основе данных наблюдений, полученных в 2011 с помощью четырех телескопов, использующихся для поиска планет методом микролинзирования, построена модель яркости звездного неба. Эта модель является частью алгоритма оптимального выбора целей для наблюдений при поиске экзопланет методом микролинзирования.
- Алгоритм позволяет определять какие цели доступны для наблюдений в различное время и какие цели следует выбирать для того, чтобы максимизировать вероятность обнаружения экзопланет.
- Ниже я остановлюсь более подробно на этих исследованиях.

sky brightness (In mag.) vs. air mass for moon below the horizon

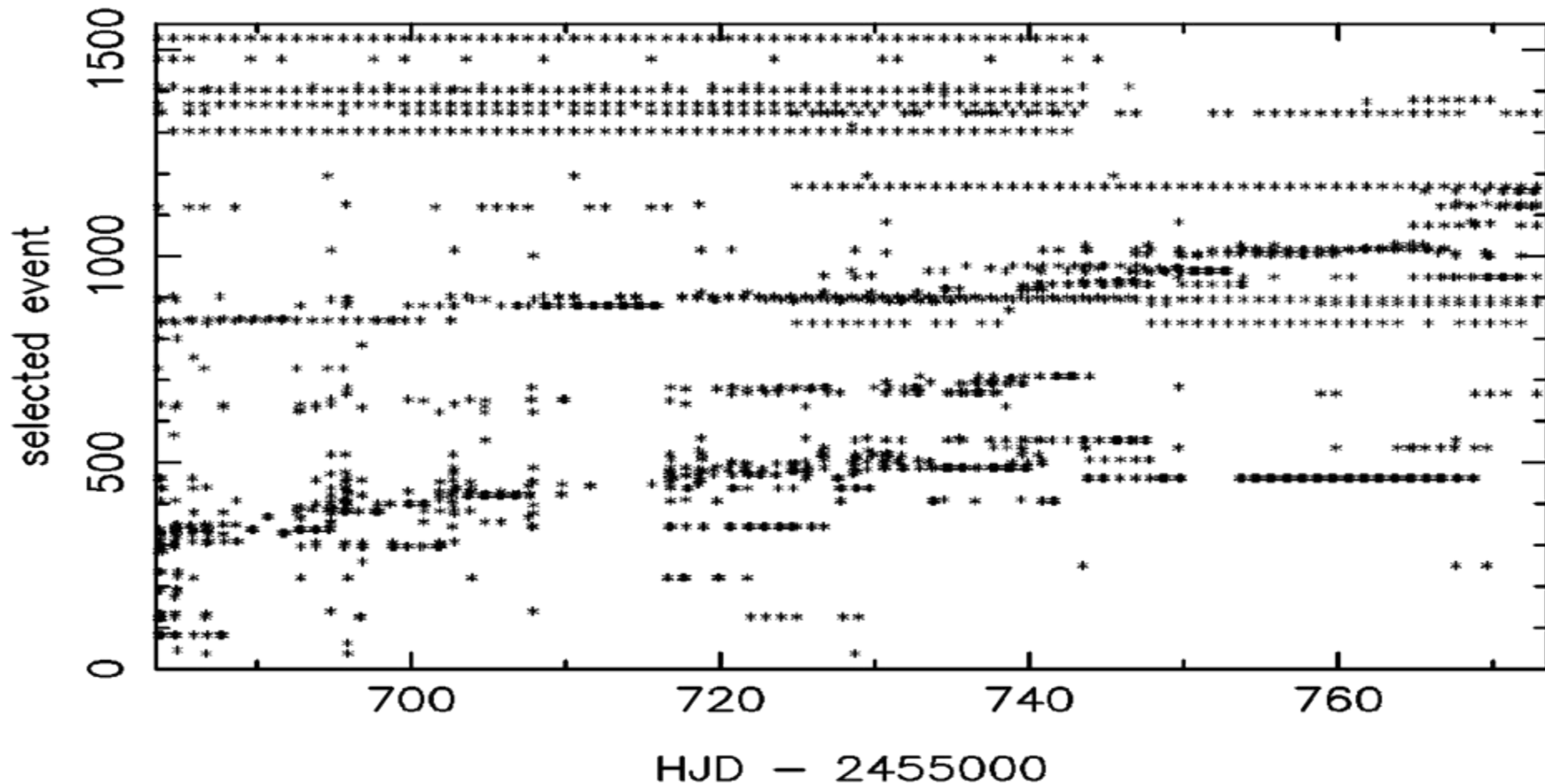


**Зависимость яркости звездного неба (зв. величина, mag) от air mass ( $1 / \cos$  (угла между направлением на звезду и зенитом) ) в случае, когда Луна находится ниже горизонта. Различные линии соответствуют различным наблюдениям 20 различных событий микролинзирования с помощью телескопа OGLE. The lines are for the  $\chi^2$  optimization ( $b = b_1 \cdot a + b_0$ ) with different  $b_0$  (different values for different events) and the same  $b_1$ . The most solid line is for the model for which  $b_0$  is the same for all events. For the Moon below the horizon, the values of  $b_0$  (which characterize sky zenith brightness near different events) differ typically but not more that 1 mag. Как один из элементов алгоритма сравнения эффективности телескопов была построена модель звездного неба с различными параметрами для разных телескопов.**



# Интервалы времени, в течение которых лучше наблюдать различные события микролинзирования (для увеличения вероятности обнаружения экзопланеты)

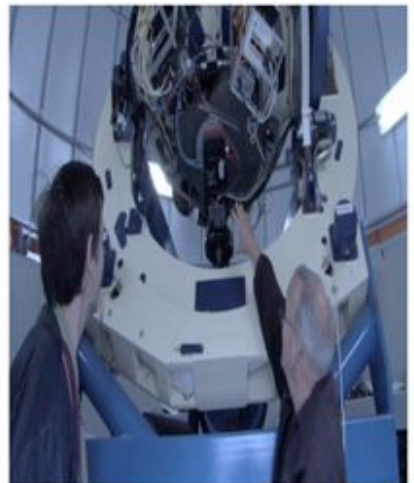
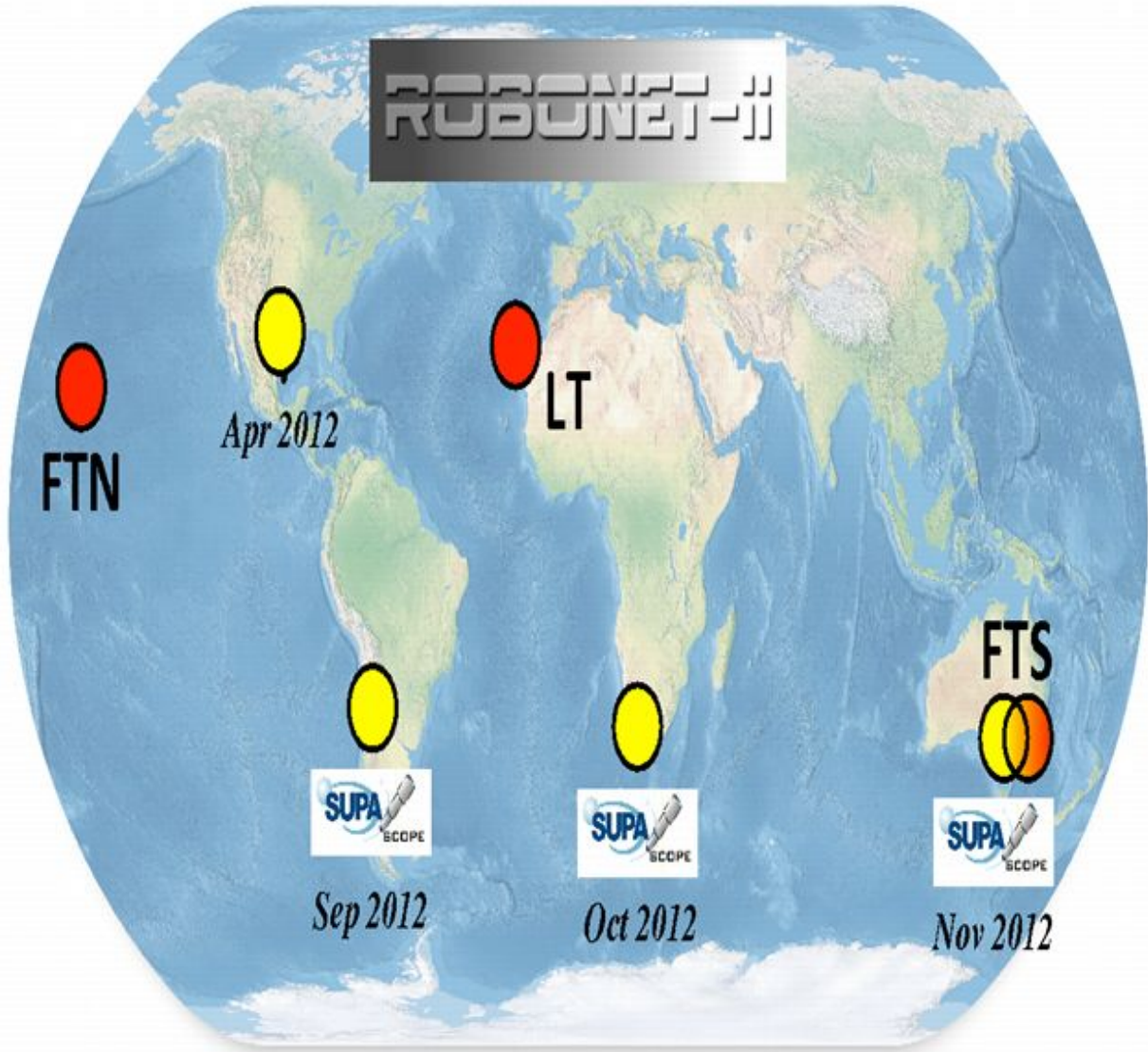
best events selected for observations



Time intervals for events selected for observations with OGLE (at actual times of peaks of light curves). Considered events: 1110001-111562. 60



# Telescope network



-  2m telescopes
  - Faulkes North (FTN)
  - Faulkes South (FTS)
  - Liverpool (LT)
-  3 x 1m clusters (LCOGT/SUPA)

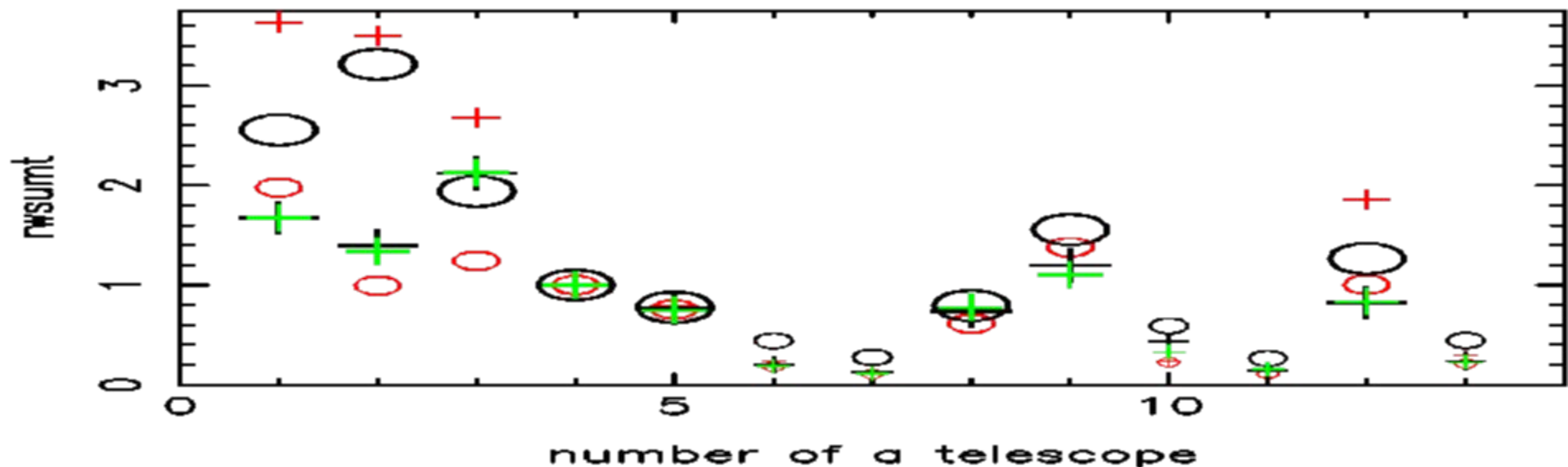
## Target observability

- The observability of a target is limited by its own position on the sky, as well as that of the Sun and the Moon, and telescopes moreover have pointing restrictions. Taking the LT (from <http://telescope.livjm.ac.uk/>) as example, we particularly require:
- Air mass of target  $> 3$  or
- $\cos(\text{zenith of the Sun}) < \sin(-8.8^\circ)$  or
- Altitude of a target:  $\text{alt} < \text{altmin} = 25^\circ$  or  $\text{alt} > \text{altmax} = 87^\circ$  or
- Hour angle:  $ha < ha_{\text{min}}$  or  $ha > ha_{\text{max}}$ . For LT there are no limits on  $ha$ :  $ha_{\text{min}} = -12$  h and  $ha_{\text{max}} = 12$  h. For 1-m telescopes,  $ha_{\text{min}} = -5$  h and  $ha_{\text{max}} = 5$  h.

### **Было рассмотрено 13 телескопов (с номерами $N_t$ от 1 до 13):**

- 1. 2m FTS - Faulkes Telescope South - Siding Springs, Australia.
- 2. 2m FTN - Faulkes Telescope North - Haleakela, Hawaii.
- 3. 2m LT - Liverpool Telescope - La Palma, Canary Islands.
- 4. 1.3m OGLE - The Optical Gravitational Lensing Experiment - Las Campanas, Chile.
- 5-7. Three 1m CTIO - Cerro Tololo Inter-American Observatory in Chile .
- 8. 1m MDO - McDonald observatory in Texas.
- 9-11. Three 1m SAAO - South African Astronomical Observatory.
- 12-13. Two 1m SSO - Siding Spring Observatory near Coonabarabran, New South Wales, Australia.

relative efficiency of observations,  $r_{wsumt}$



Относительная эффективность  $r_{wsumt} = (w_{sum} / w_{sumOGLE}) / (t_{sum} / t_{sumOGLE})$  вероятности обнаружения экзопланет (в случае 1562 событий, доступных для наблюдений) в зависимости от номера телескопа в случае, когда 1 м телескопы (с CCD камерой Sinistro), расположенные в одном месте наблюдают различные события в одно и то же время. Black or red *crests* and *ellipses* are for the 100-day time interval beginning from *April 22* and *August 1*, 2011, respectively. The signs for calculations with actual values of  $t_0$  (the time corresponding to the peak of a light curve) and with random values of  $t_0$  ( $t_0 = R_{NDM} \cdot (t_{mx} + 2t_E) - t_E + t_o$ , where  $t_E$  is the time scale equal to the ratio of the angular Einstein radius to the relative proper motion,  $R_{NDM}$  is a random value between 0 and 1,  $t_{mx}$  is the duration of the considered time interval,  $t_o$  is the beginning of the interval) are black greater and red smaller, respectively. Green crests are for actual values of  $t_0$  and 90-day interval beginning from April 22, 2011. Small signs are for non-priority telescopes. For random values of  $t_0$ , the number of light curve peaks was greater.

Спасибо за внимание



**--Выбор события с максимальной зоной возможного нахождения планеты.** Отношение S/N сигнала к шуму и, следовательно, зоны  $w$  нахождения изолированной планеты пропорционально квадратному корню от времени  $S/N = (\Delta t / \tau)^{1/2}$ ,  $w = g_i \Delta t^{1/2}$ .

Here  $\tau$  is the exposure time required to reach S/N=1. Коэффициент  $g_i$  зависит от яркости цели, усиления яркости при микролинзировании, характеристик телескопа и детектора, условий наблюдения (air mass, sky brightness, seeing). Значения  $g_i$  использовались для сравнения вероятности обнаружения планет для различных событий микролинзирования.

The simulator evaluates 'goodness' of available targets in real time, and observes the one offering the greatest increase in  $w$  with exposure time. **Moves to a new target occur when the increase in  $w$  for the new target is better than the current target, accounting for the slew time required to move to the new target.**

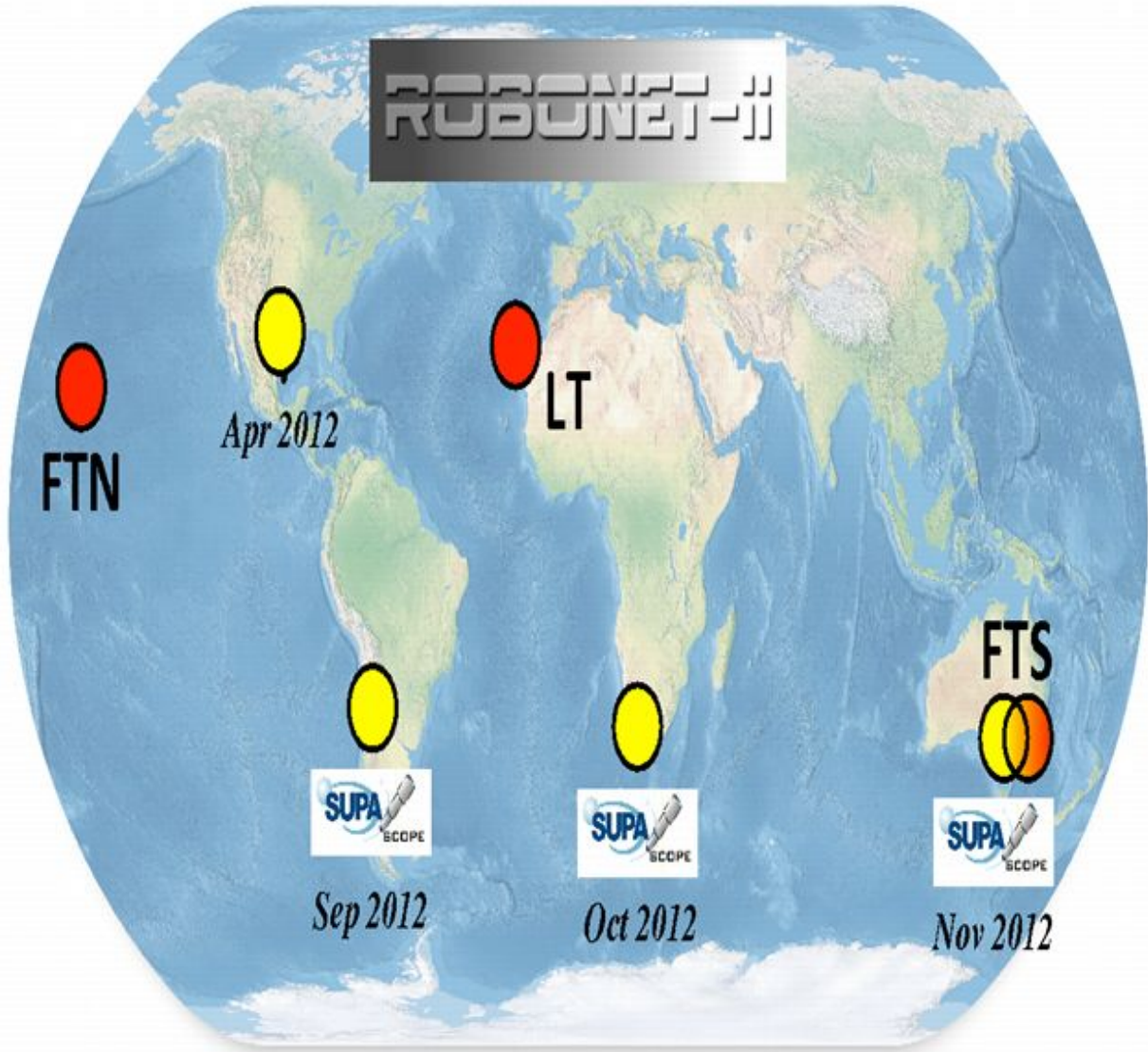
As the CCD camera takes a finite time  $t_{read}$  to read out, and the telescope takes a finite time  $t_{slew}$  to slew from one target and settle into position on the next, the on-target exposure time accumulated during an observation time  $t$  is  $\Delta t = t - t_{slew} - n \times t_{read}$  ( $t_{slew} \sim 30-100$  s,  $t_{read} \sim 10-20$  s).

At a time step  $\Delta t$  the detection area of  $i$ -th event increases by  $g_i [(\Delta t + t_{done})^{1/2} - t_{done}^{1/2}]$ , where  $t_{done}$  is an exposure time already has been done. For a new target, the area is  $g_i (\Delta t - t_{slew})^{1/2}$ . For a **choice of a best event**, we compared  $g_i [(t_{plan} + t_{done})^{1/2} - t_{done}^{1/2}]$  for a current target with  $g_i [t_{slew}^{1/2}]$  for a new target, where  $t_{plan} = 2t_{slew}$ . All but one of the targets require slew time before the exposure can begin. See [1] for details.

[1] Horne K., Snodgrass C., Tsapras Y., MNRAS, 2009, v. 396, 2087-2102.



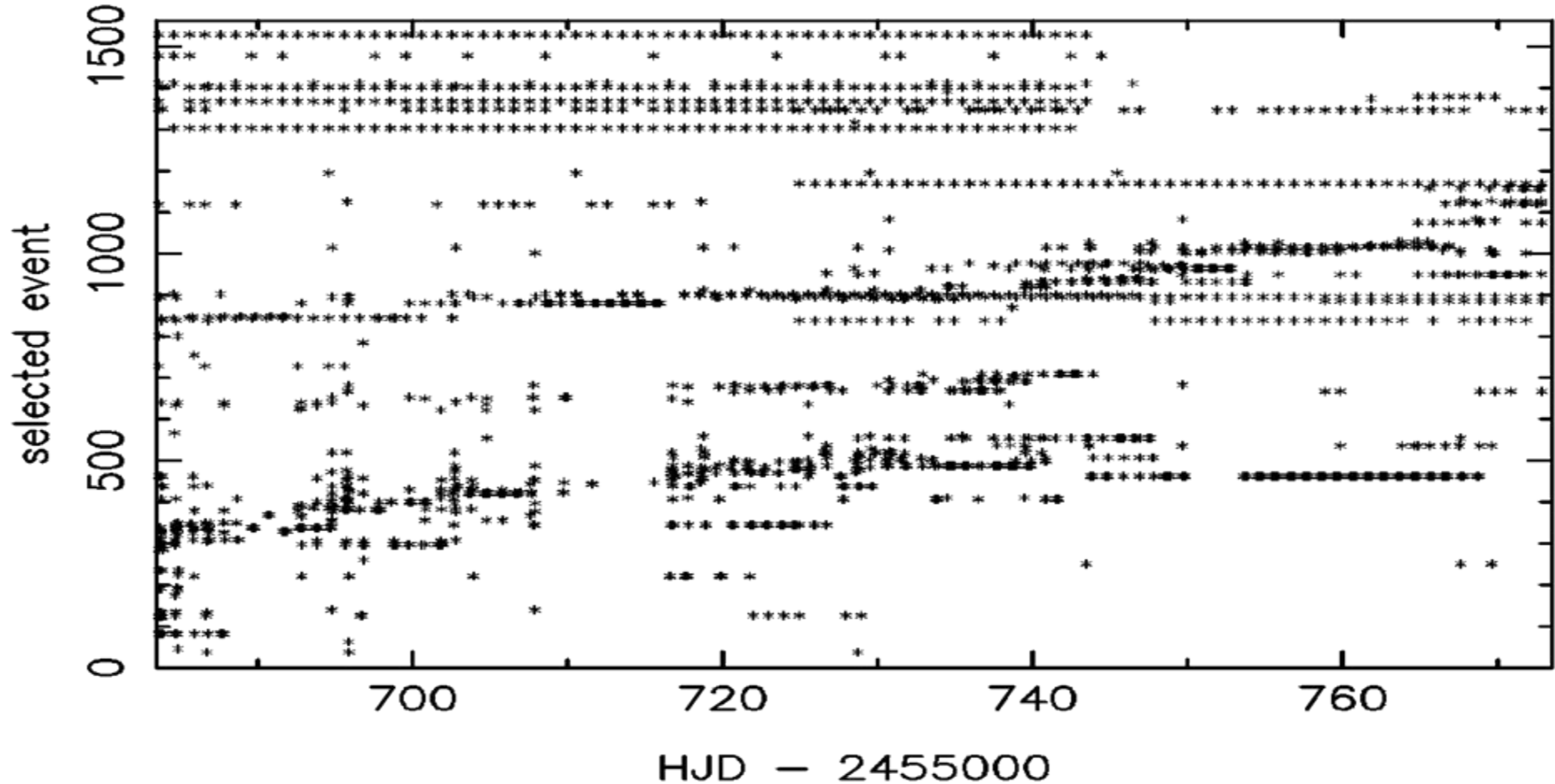
# Telescope network



- 2m telescopes
  - Faulkes North (FTN)
  - Faulkes South (FTS)
  - Liverpool (LT)
- 3 x 1m clusters (LCOGT/SUPA)

# Интервалы времени, в течение которых лучше наблюдать различные события микролинзирования (для увеличения вероятности обнаружения экзопланеты)

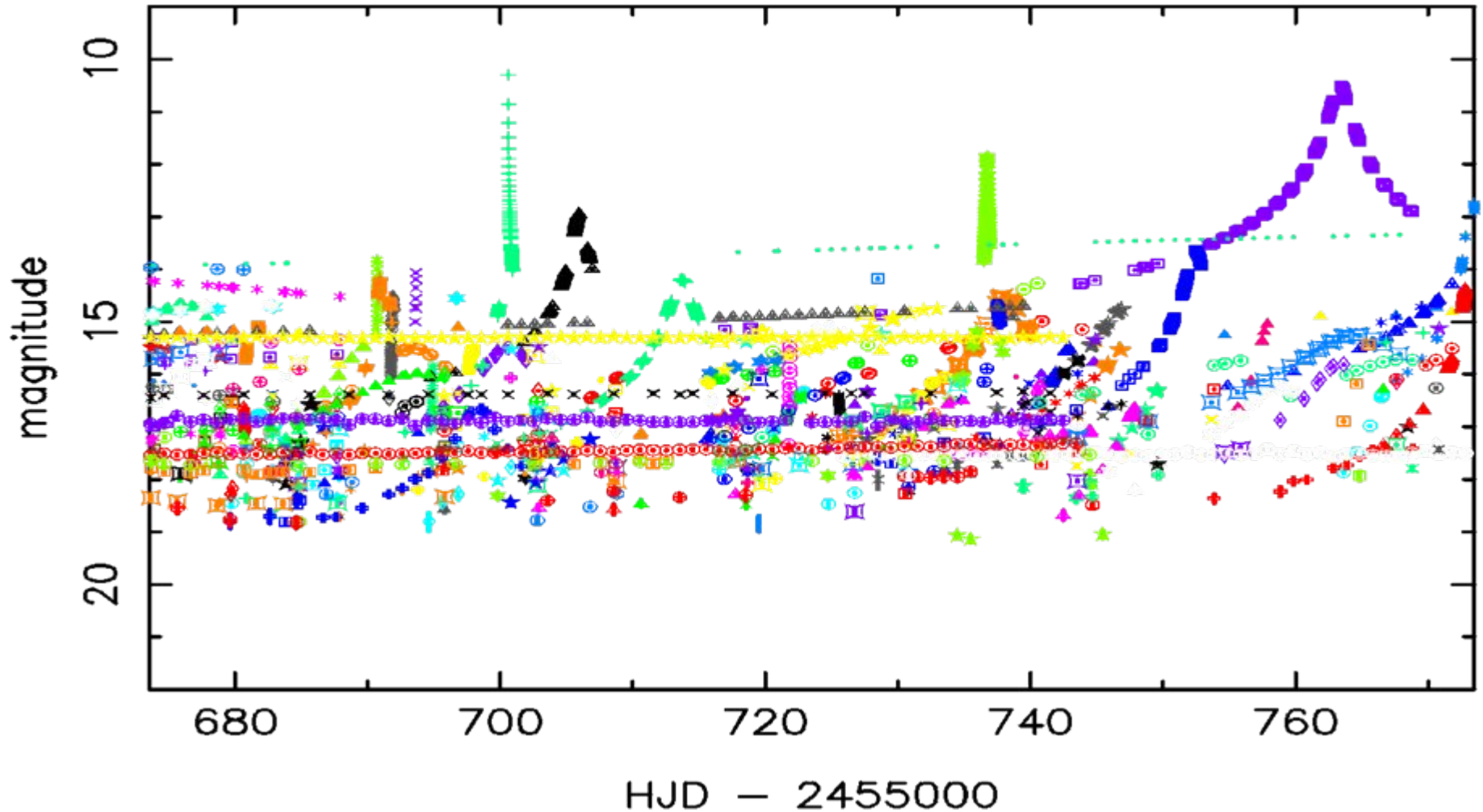
best events selected for observations



Time intervals for events selected for observations with OGLE (at actual times of peaks of light curves). Considered events: 1110001-111562. 68

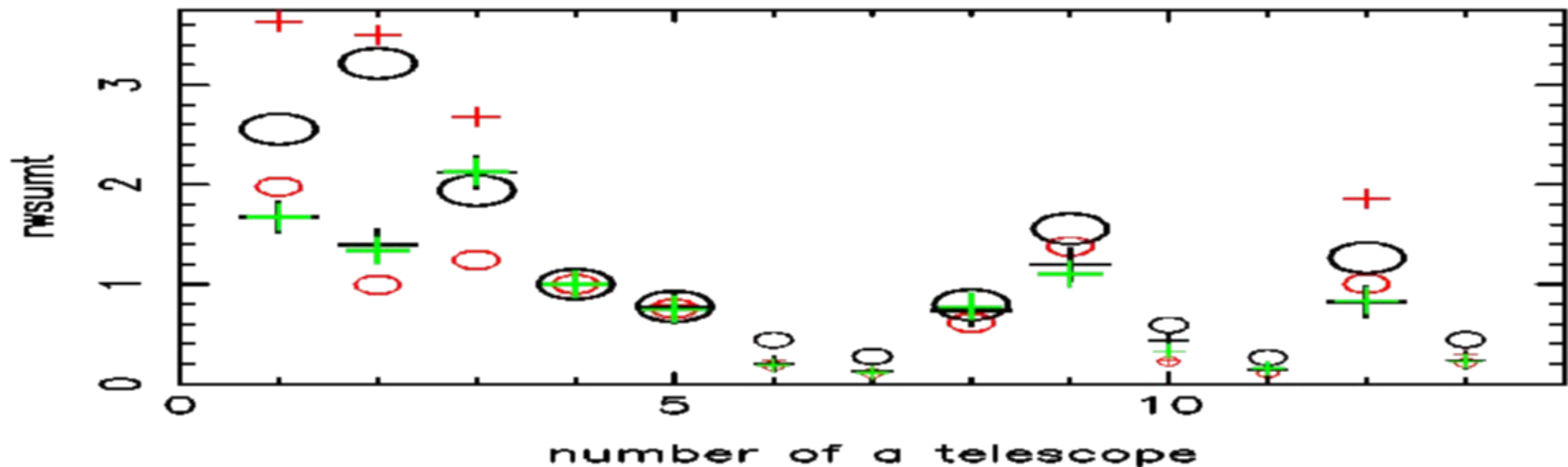


# light curves for simulated events



**Кривые яркости (with error bars) для событий микролинзирования, выбранных для наблюдения с OGLE (at actual times of peaks of light curves). Рассмотренные события: 110001-111562.**

relative efficiency of observations,  $r_{wsumt}$



Относительная эффективность  $r_{wsumt} = (w_{sum} / w_{sumOGLE}) / (t_{sum} / t_{sumOGLE})$  вероятности обнаружения экзопланет (в случае 1562 событий, доступных для наблюдений) в зависимости от номера телескопа в случае, когда 1 м телескопы (с CCD камерой Sinistro), расположенные в одном месте наблюдают различные события в одно и то же время. Black or red *crests* and *ellipses* are for the 100-day time interval beginning from *April 22* and *August 1*, 2011, respectively. The signs for calculations with actual values of  $t_0$  (the time corresponding to the peak of a light curve) and with random values of  $t_0$  ( $t_0 = R_{NDM} \cdot (t_{mx} + 2t_E) - t_E + t_o$ , where  $t_E$  is the time scale equal to the ratio of the angular Einstein radius to the relative proper motion,  $R_{NDM}$  is a random value between 0 and 1,  $t_{mx}$  is the duration of the considered time interval,  $t_o$  is the beginning of the interval) are black greater and red smaller, respectively. Green crests are for actual values of  $t_0$  and 90-day interval beginning from April 22, 2011. Small signs are for non-priority telescopes. For random values of  $t_0$ , the number of light curve peaks was greater.

# Сравнение эффективности 2-м телескопов с телескопом OGLE для поиска экзопланет

OGLE observed a little more than 200 galactic bulge fields. For 1500 events in 2011, it means that **typically there could be ~10 events in one field** (the ratio 1500/200 is 7.5). For telescopes other than OGLE (exclusive for LT), typically there can be only one event in the field of view.

In our calculations for 1562 events (and ~100 days time interval), the value of  $w_{sum}$  (or  $w_{sumo}$ ) for the best events chosen for observations was usually considerably greater than for typical 10 other events (which are not the best at the current moment of time).

Therefore, we can use the values of  $w_{sum}$  (or  $w_{sumo}$ ) calculated only for the best events for comparison of the efficiency of different telescopes for a search for new exoplanets.

**Телескопы с широким полем зрения, такие как OGLE, более эффективны для поиска новых событий микролинзирования. Тем не менее, наши результаты показывают, что при поиске экзопланет, основанном на уже обнаруженных событиях, 2-м телескоп сети LCOGT в среднем более эффективен (за единицу времени наблюдений), чем OGLE, и эффективность 1-м телескопа с камерой Sinistro CCD может быть близка к эффективности OGLE, as the ratio of values of  $w_{sum}$  (or  $w_{sumo}$ ) per unit of time for the 2-m telescopes to that for OGLE usually is in the range of 1.4-2.1, and that for 1-m telescopes is mainly in the range of 0.8-1.2.**

- The values of  $w_{sum}$  obtained at our approach are close to those obtained for the choice of events selected for observations according to Dominik et al. (Astron. Nachr, 2010, v. 331, No 7, 671-691).