

# Судьба осколков образования Луны: геофизические следствия Гигантского столкновения

А. В. Бялко<sup>1</sup>, М. И. Кузьмин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической физики РАН им. Ландау, [alexey@byalko.ru](mailto:alexey@byalko.ru)

<sup>2</sup>Институт геохимии СО РАН, [mikuzmin@igc.irk.ru](mailto:mikuzmin@igc.irk.ru)

В 1986 году я был в Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре и присутствовал на докладе Камерона (A.G.W.Cameron) об образовании Луны при Гигантском столкновении. Он показал фильм, основанный на компьютерных расчетах, прообраз того, который вы только что видели. Физические, а теперь и геологические следствия этого сценария образования Луны занимали меня более 30 лет.

Академик Михаил Иванович Кузьмин внес большой вклад в геологическую историю древнейших пород Земли и Луны. Он активно поддержал концепцию воздействия осколков образования Луны на эволюцию земной коры, атмосферы и океана. Наша совместная статья подана в ЖЭТФ.

# Структура доклада

Концепция образования Луны как следствие Гигантского столкновения принимается без оговорок. Источник: R.M.Canup, E.Asphaug Nature, 2004.

В нашей с Михаил Ивановичем работе есть:

строгие астрофизические утверждения,

соображения, которые возможно доказать или уточнить,

гипотезы, для доказательства которых нужны суперкомпьютеры,

гипотезы умозрительные,

научные фантазии.

В этом докладе утверждения разной степени надежности выделены цветом заглавий. Последнего, **фантазийного**, раздела в этом докладе не будет, он не соответствует научному духу и традициям этого зала, но в кулуарах после доклада допустимы.

Кулуары будут.

# Датировки событий Солнечной системы

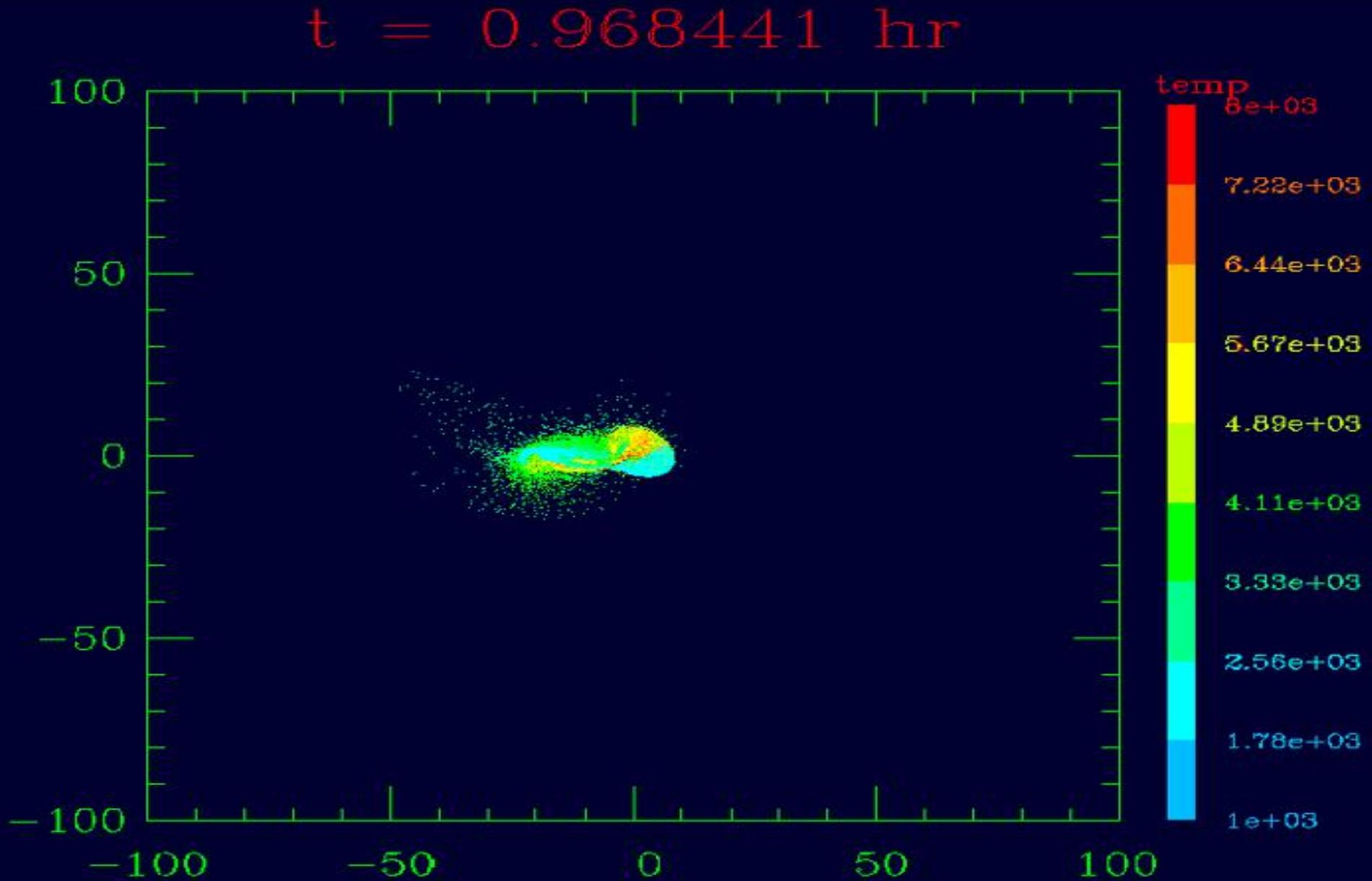
**4568** млн лет назад: взрыв Сверхновой, который задал изотопный состав Солнечной системы (СС).

Теории образования Солнца нет. Наблюдения молодых звезд есть: звездный ветер на порядки сильнее.

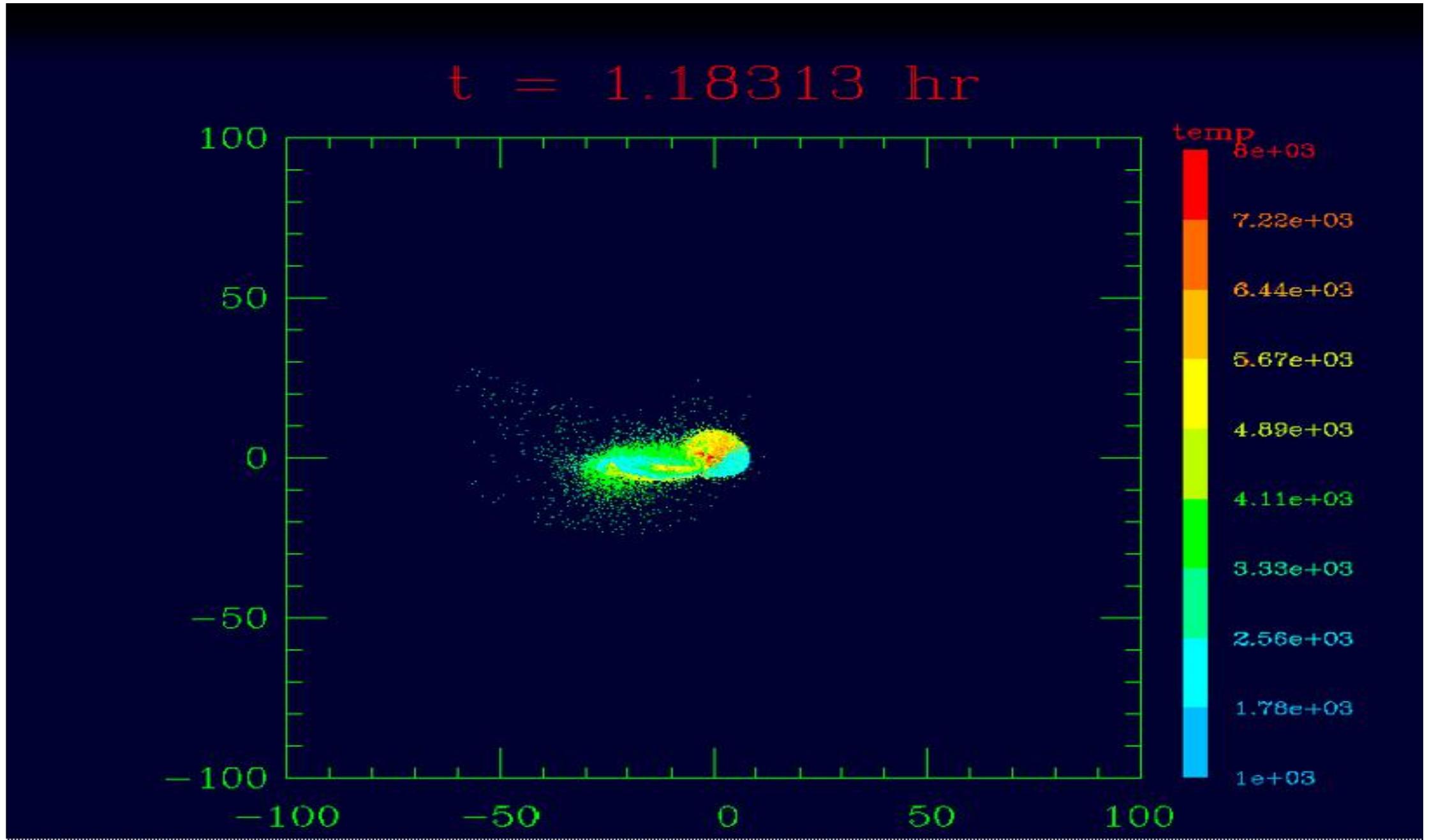
**4400--4500** млн лет назад, на 160—170 млн лет позже взрыва Сверхновой произошло Гигантское столкновение (ГС). Таков возраст **земных и лунных** цирконов. К моменту ГС большинство планет уже заняли свои позиции в СС, а планеты земной группы прошли гравитационную дифференциацию. Объяснение: распад распространенных первичных изотопов  $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$  (0.72 млн лет) и  $^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$  (2.6 млн лет). Еще свидетельство: распад  $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$  (8.9 млн лет) приводит к переходу гафния в вольфрам, который остается в железных ядрах. Вольфрама в метеоритах много больше, чем в земной и лунной коре.

Гигантское столкновение многократно рассчитывалось методом SPH (smooth particle hydrodynamics). Результаты лучших вариантов моделирования с 20-30 тыс. железных и силикатных частиц приводят к Луне с правильной массой (1/80 земной) и силикатному составу с 3—4% содержанием железа [4]. Земля приобретает быстрое вращение с периодом около 6 час. Ядра сталкивающихся тел сливаются в ядро Земли, Слияние железных ядер приводит к разогреву поверхности планеты до температур около 8000 К.

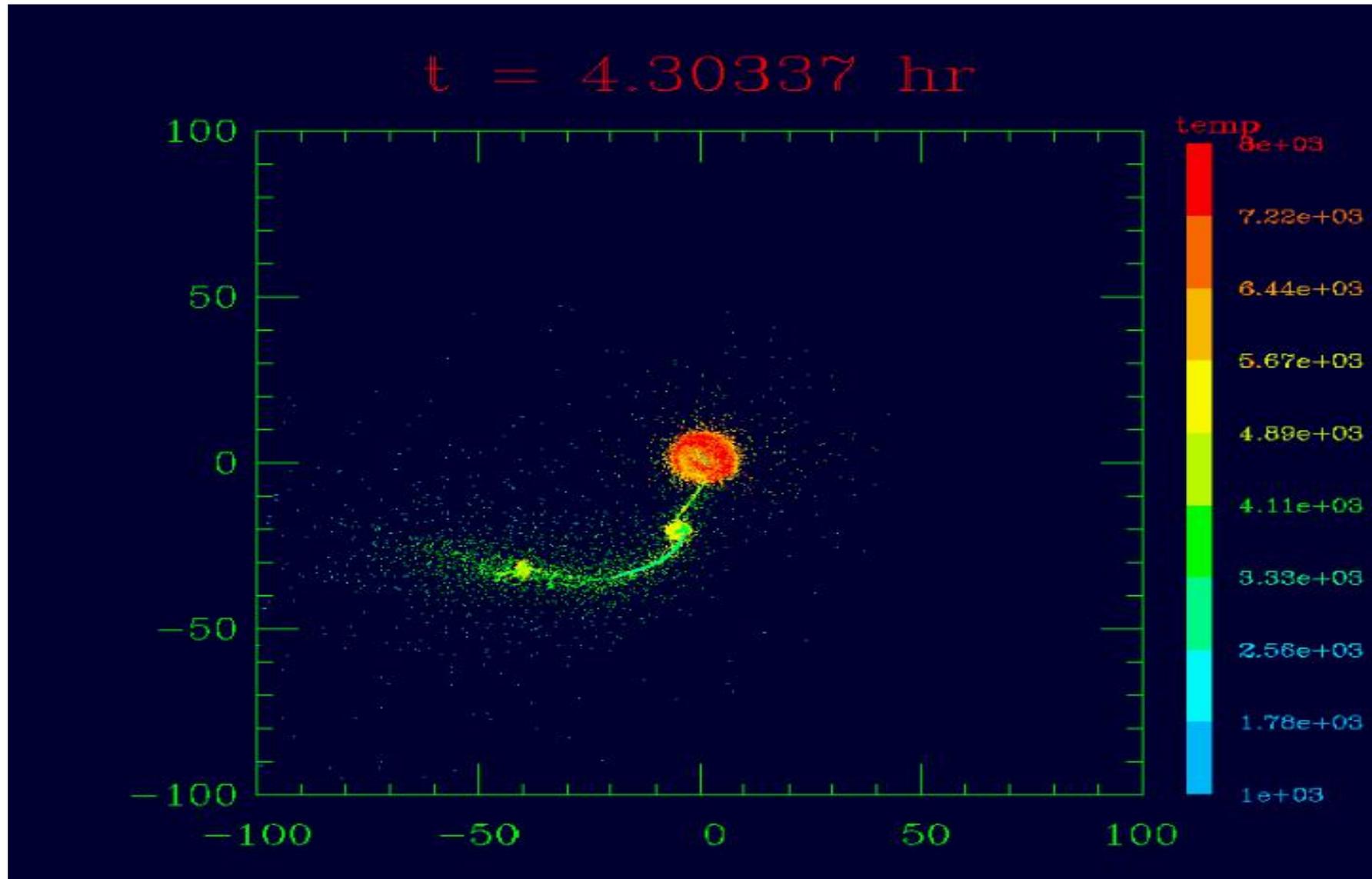
$t = 0.97$  час. Кадр фильма R.Canup



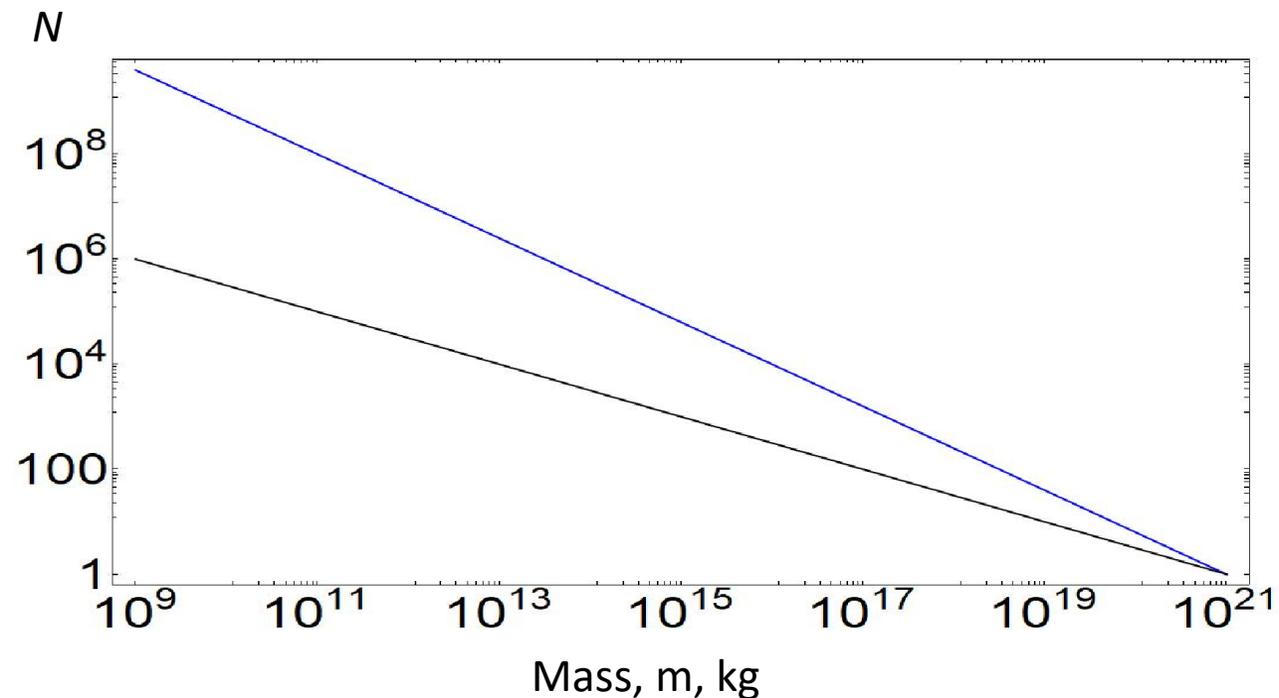
$t = 1.18$  час. Кадр фильма R.Canup



$t = 4.3$  hr. Период вращения Земли 6 час. Температура поверхности 8000 К.  
Силикатный шлейф формирует несколько протоЛун (klamps), которые сталкиваются с  
Землей со скоростью около 10 км/с. В результате на орбитах вокруг Земли образуется  
магматический материал, из которого впоследствии формируется Луна.



# Распределения ООЛ по массам и диаметрам близки к распределению астероидов.



Распределение астероидов по диаметрам (красная кривая) лежит между распределениями ООЛ по диаметрам с  $q = 1.8$  (синяя) и  $q = 1.5$  (черная кривая). Но с тем же наклоном они продолжают и в область малых масс и размеров

При ГС на бесконечность уходят массы порядка 56–71% массы Луны или  $(5-6) 10^{22}$  kg [1, 6].

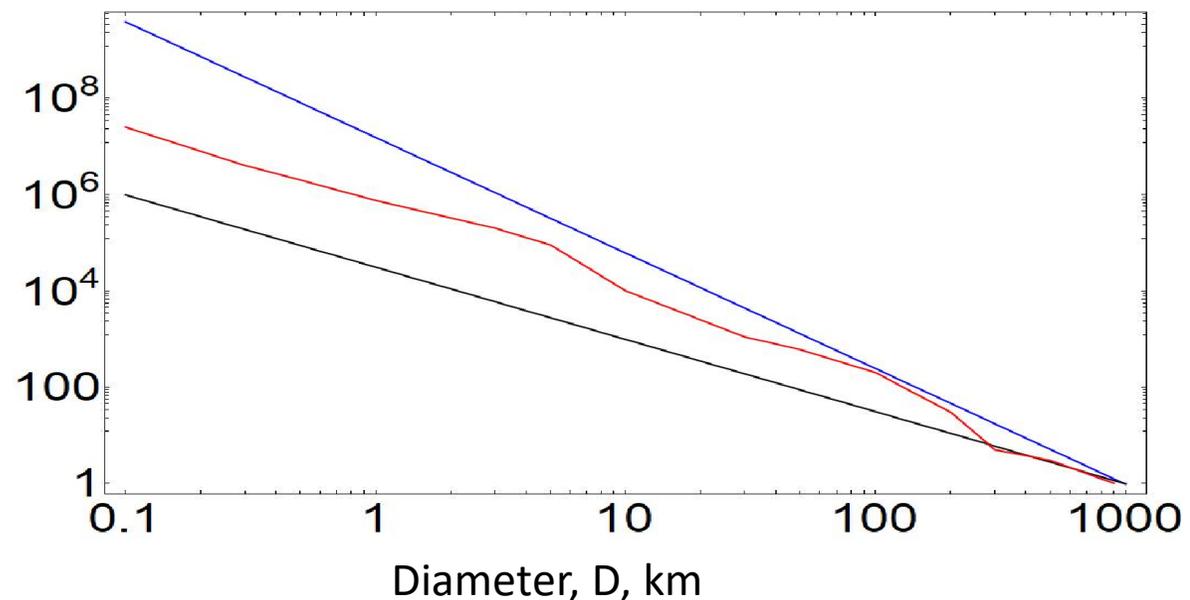
Масса всех современных астероидов примерно на порядок меньше.

R.M.Canup, E.Asphaug Nature 2002:

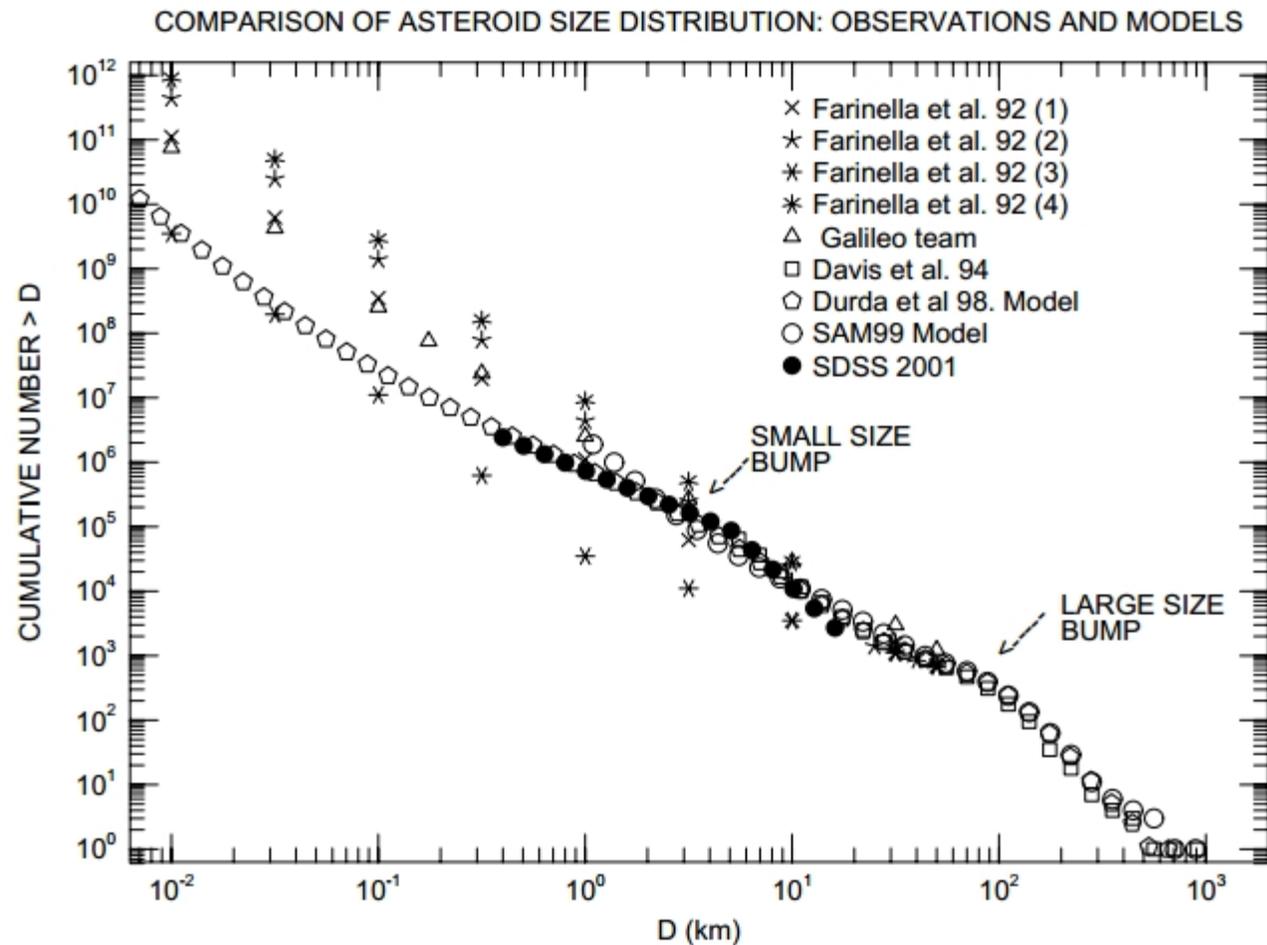
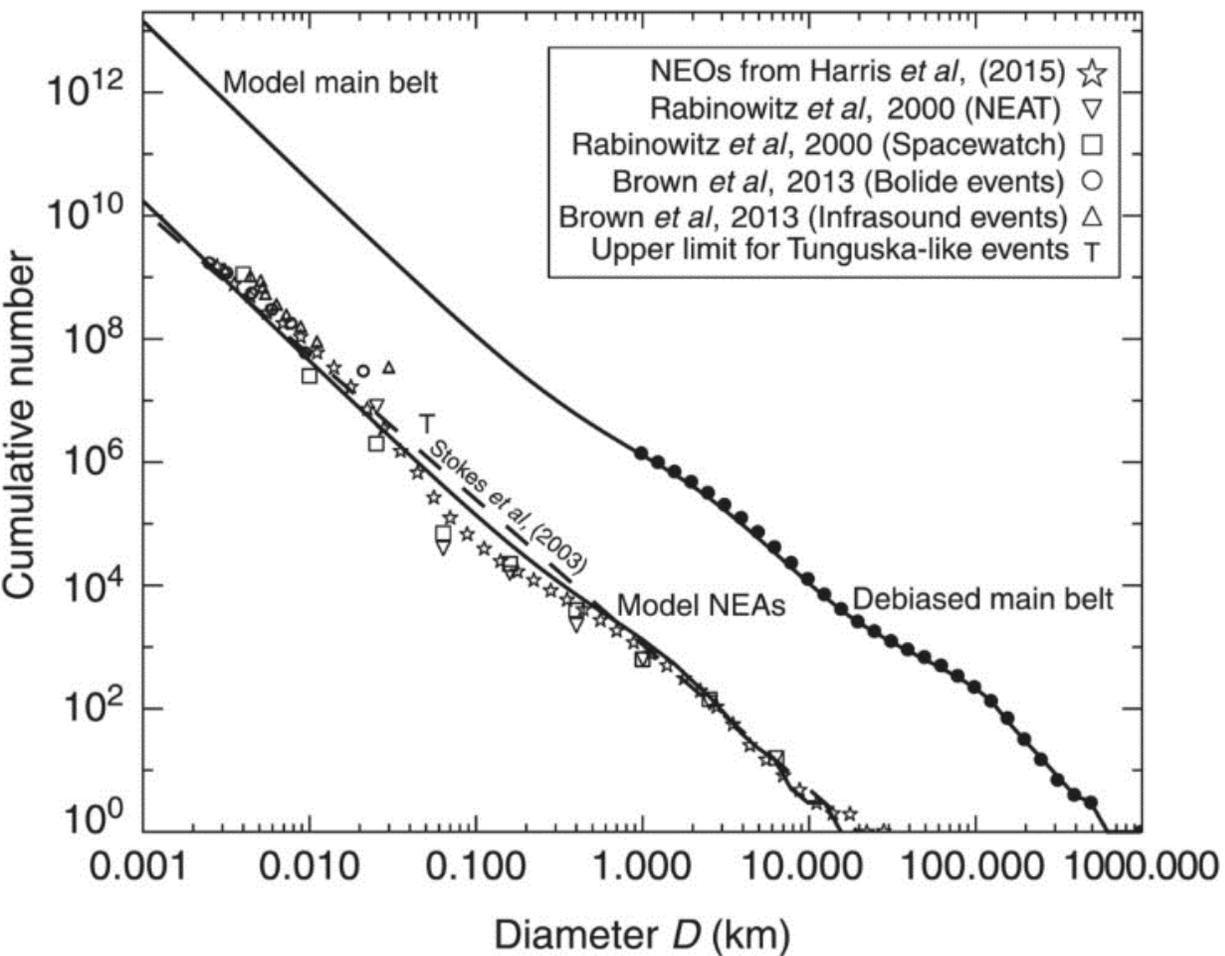
Дифференциальное распределение

осколков по массам:  $\frac{dN}{dm} = m^{-q}$ ;

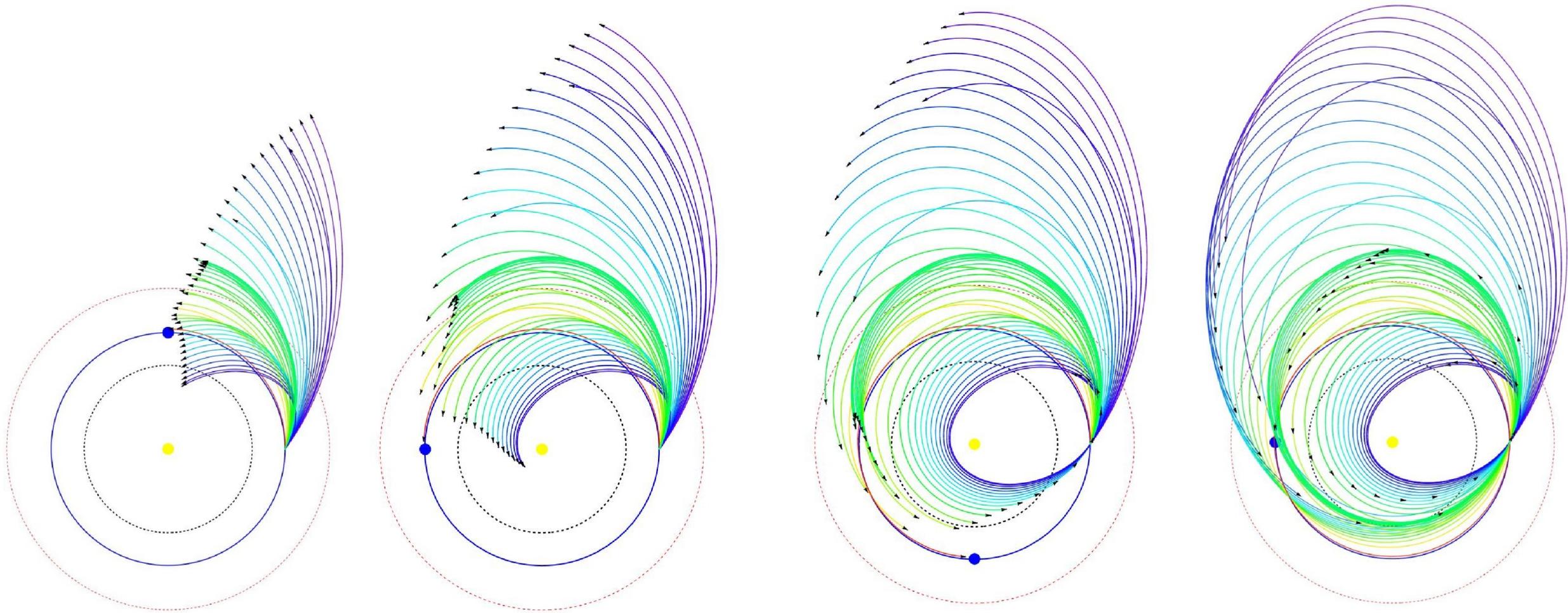
Интегральное распределение  $N(m) \sim m^{-q+1}$



# Интегральные распределения астероидов по диаметрам



Траектории 48 тел ведущей когорты, их начальные скорости вычислены из кадров фильма; точки их возврата с большой точностью ( $<0.005$  а.е.) совпадают с точкой вылета. Но при скоростях, немного больших критической, точка возврата совпадает не точно.



0.25 yr

0.5 yr

0.75 yr

1.5 yr

# Уравнения ограниченной задачи трех тел

Roy A.E. *Orbital Motion*, 4-th edition. IOP Publishing, 2005.

В уравнениях гравитации трех тел, одно из которых движется по круговой орбите с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{G(m_E + m_S)}{a^3}} \approx \sqrt{\frac{Gm_S}{a^3}} = 2\pi \text{ yr}^{-1},$$

переходим во вращающуюся систему координат.

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) - \omega^2 x - 2\omega \dot{y} &= -\frac{Gm_S(x - x_S)}{\left((x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + z^2\right)^{1.5}} - \frac{Gm_E(x - x_E)}{\left((x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 + z^2\right)^{1.5}}; \\ \ddot{y}(t) - \omega^2 y + 2\omega \dot{x} &= -\frac{Gm_S(y - y_S)}{\left((x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + z^2\right)^{1.5}} - \frac{Gm_E(y - y_E)}{\left((x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 + z^2\right)^{1.5}}; \\ \ddot{z} &= -\frac{Gm_S z}{\left((x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + z^2\right)^{1.5}} - \frac{Gm_E z}{\left((x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 + z^2\right)^{1.5}}. \end{aligned}$$

Поскольку  $\mu = (m_E + m_M)/m_S = 3.036 \cdot 10^{-6} \ll 1$ , координаты Солнца можно считать нулевыми. Переходим к безразмерным единицам, где а.е. = 1. Для неподвижной Земли положим:

$$x_E = 1; y_E = 0; z_E = 0;$$

Поскольку нас интересуют орбиты, выходящие из Земли, то можно считать координату  $z = 0$  везде. Остальные решения – наклонные к эклиптике орбиты получаются просто умножением на  $\cos(i)$ , где  $i$  угол наклона к эклиптике.

## Двумерные уравнения ограниченной задачи трех тел

$$\begin{aligned}\ddot{x} - 2\dot{y} &= x - \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1.5}} - \frac{\mu(x-1)}{((x-1)^2 + y^2)^{1.5}}; \\ \ddot{y} + 2\dot{x} &= y - \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1.5}} - \frac{\mu y}{((x-1)^2 + y^2)^{1.5}}.\end{aligned}$$

Возврат к неподвижным координатам таков:

$$\begin{aligned}\xi(t) &= x(t) \cos t - y(t) \sin t; \\ \eta(t) &= x(t) \sin t + y(t) \cos t.\end{aligned}$$

Как следует из численных вычислений, наиболее критичны для определения орбитального движения те траектории осколков, которые проходят вблизи неустойчивых точек Лагранжа L1 или L2 с координатами:

$$L1 = (1 - (\mu/3)^{1/3}, 0) = (0.99, 0); \quad L2 = (1 + (\mu/3)^{1/3}, 0) = (1.01, 0).$$

Точка Лагранжа L3:  $L3 = (-1 - 5\mu/12, 0) \approx (-1, 0)$ .

Устойчивы «треугольные» точки Лагранжа L4 и L5:

$$L4 = \left(\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \quad L5 = \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

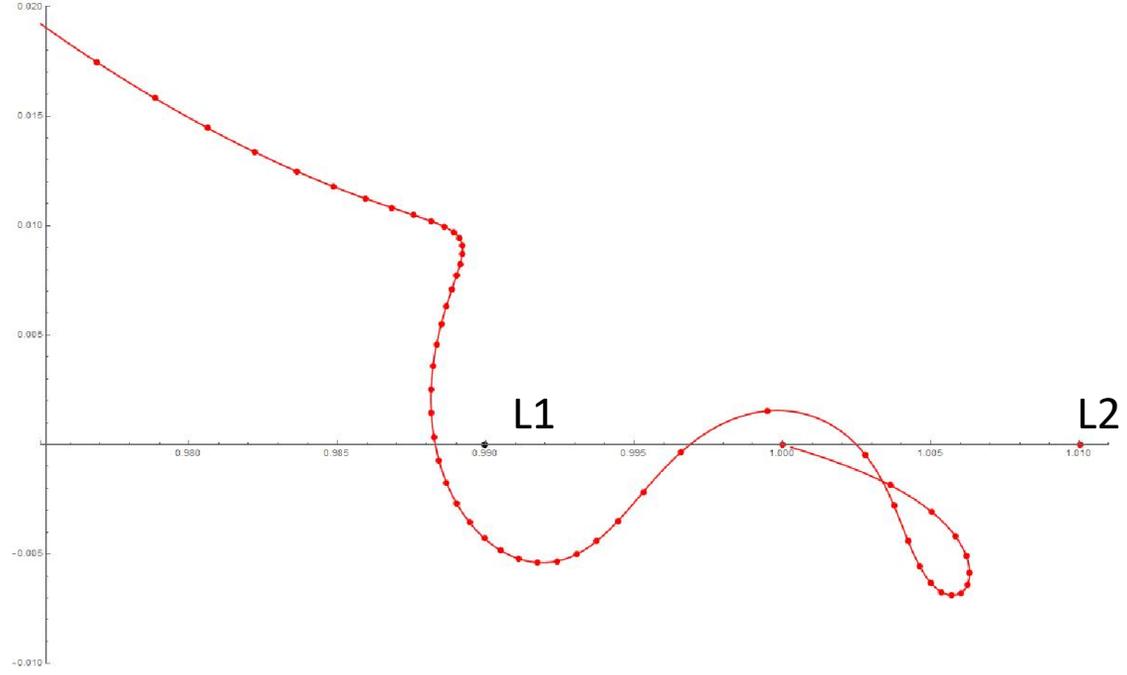
Решаем систему методом Р-Кутта с начальными условиями

$$\begin{aligned}x(0) &= r_0 \cos \vartheta; \quad y(0) = r_0 \sin \vartheta; \quad \dot{x}(0) = v_0 \cos \vartheta; \quad \dot{y}(0) = v_0 \sin \vartheta. \\ r_0 &= 0.0003 \cong 7R_E;\end{aligned}$$

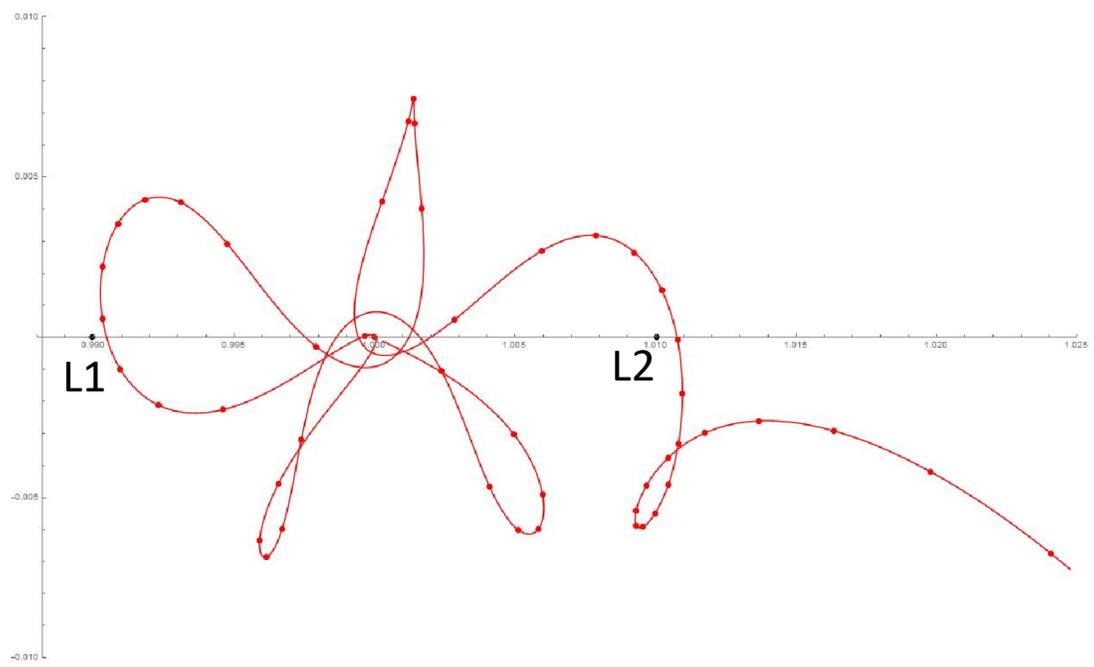
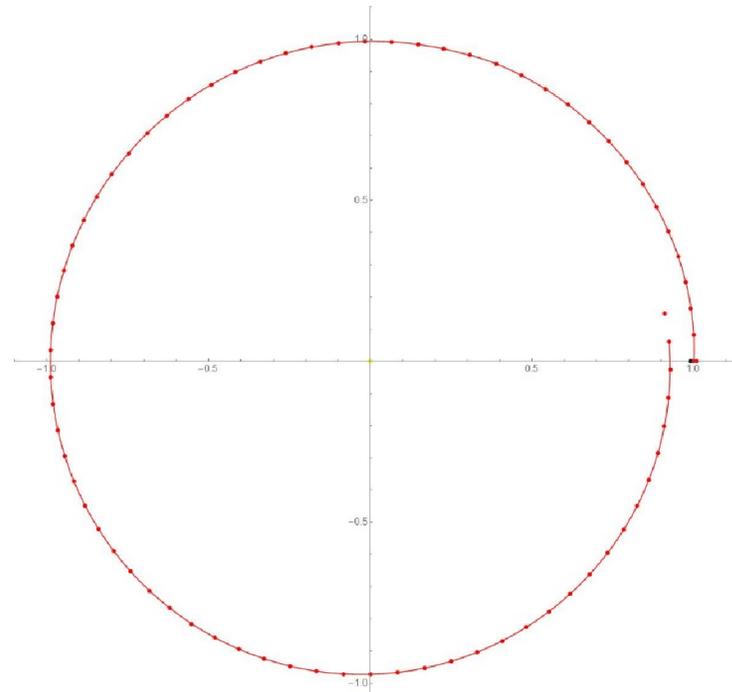
Варьируем 2 параметра: скорость  $v_0$  и угол  $\vartheta$ .

Точность расчетов (порядка  $10^{-9}$ ) контролировалась постоянством инварианта Якоби:

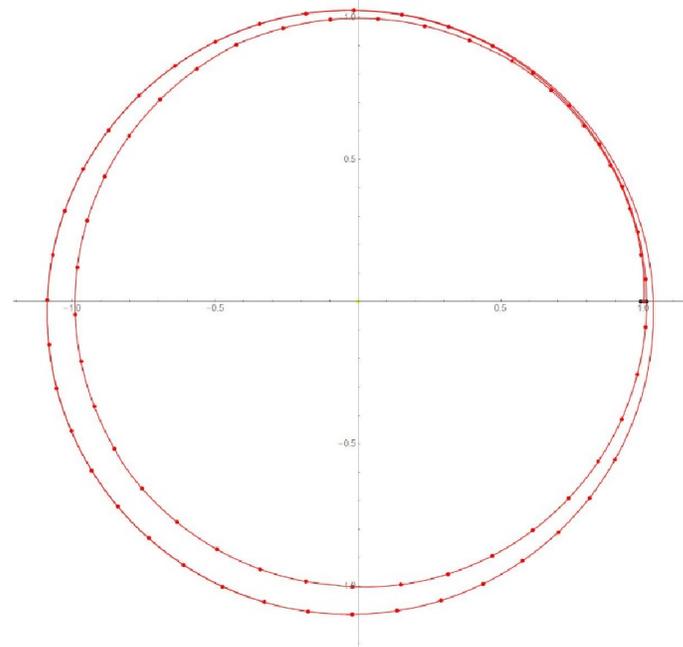
$$C_{Jac}(x, y) = -(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + (x^2 + y^2) + \frac{2}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{2\mu}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2}}.$$

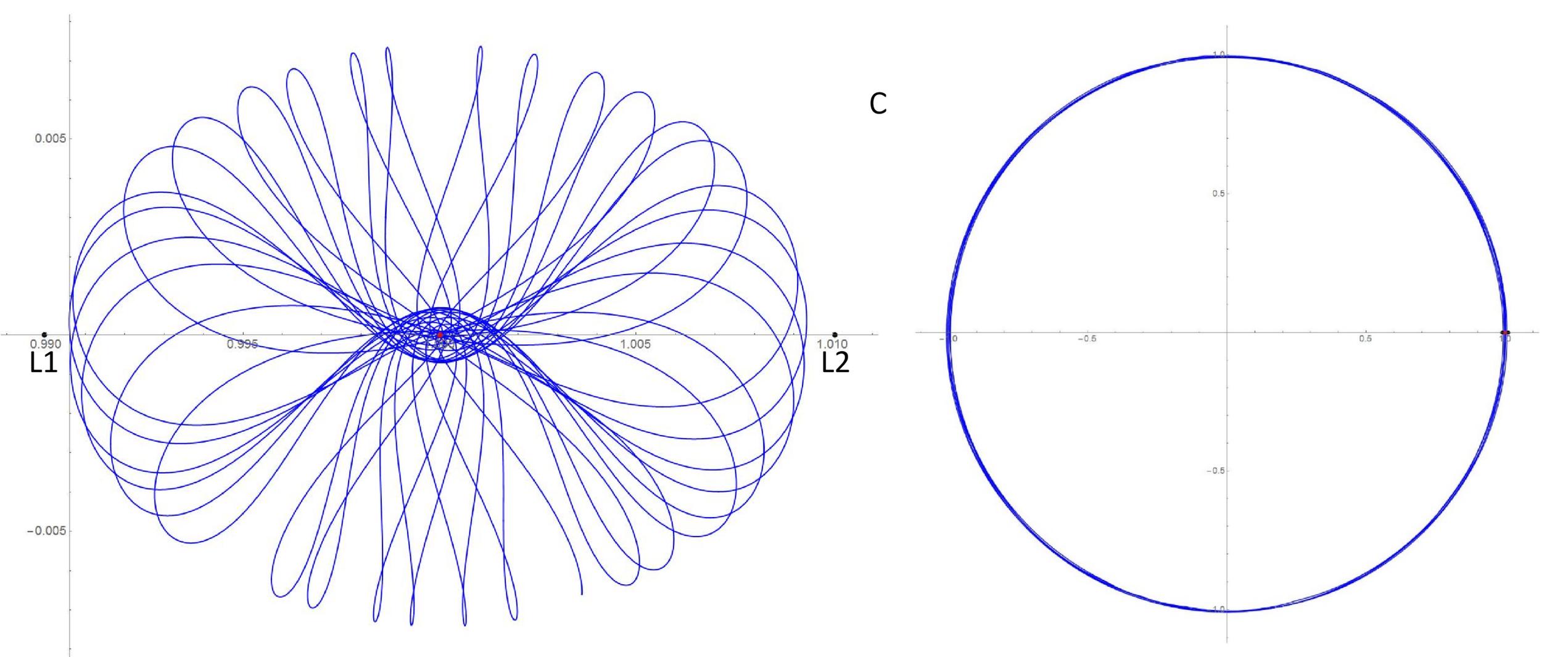


**a**

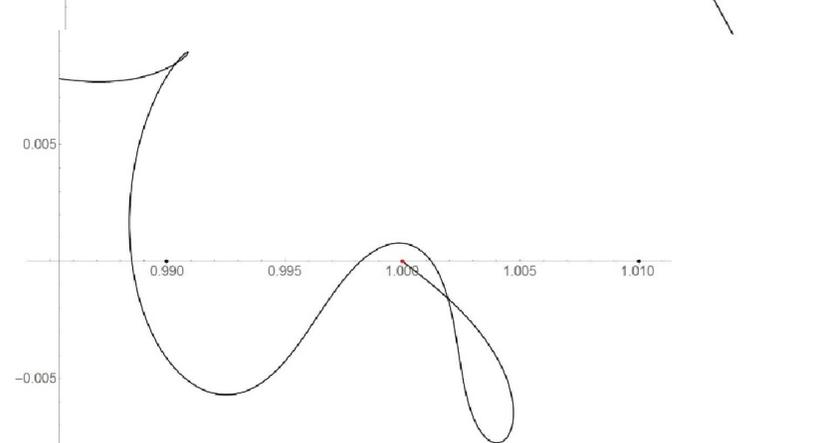
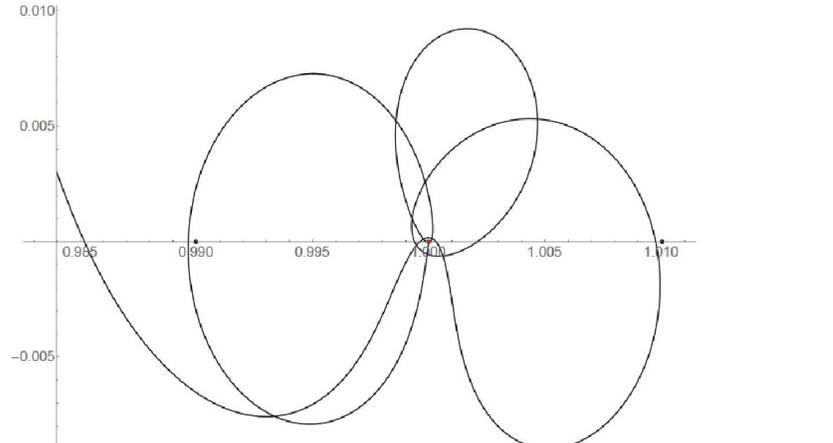
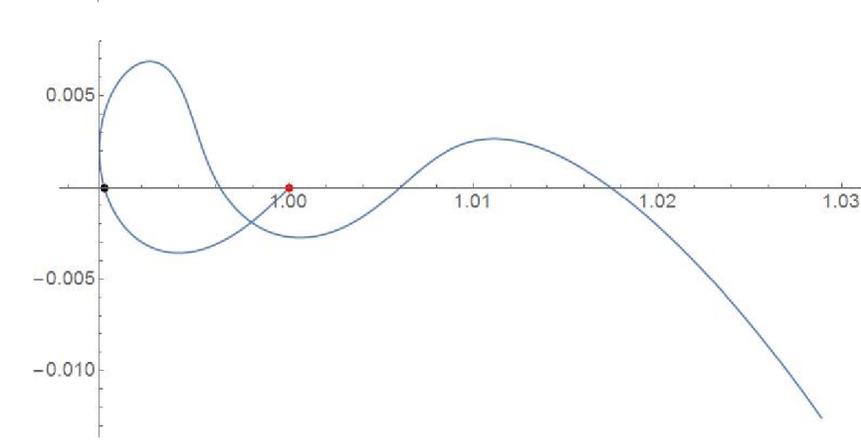
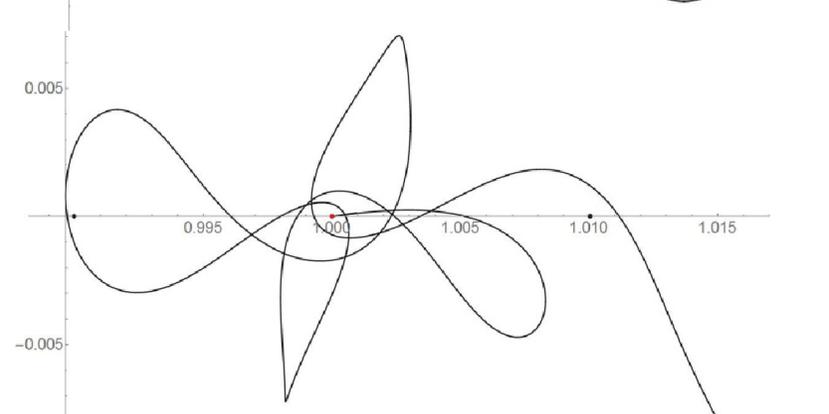
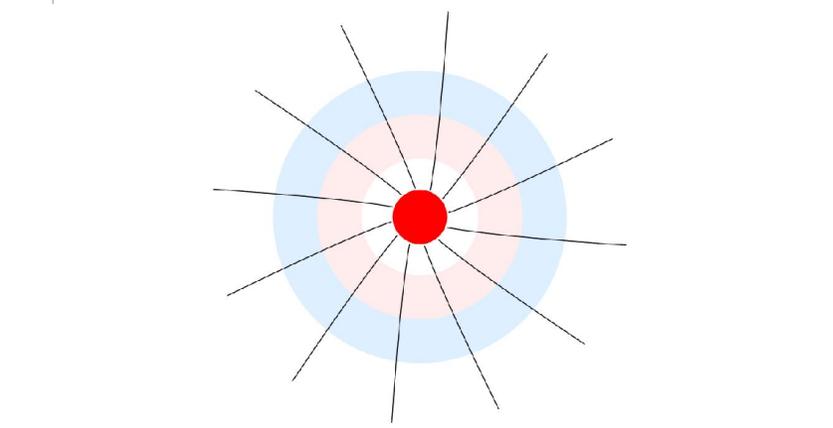
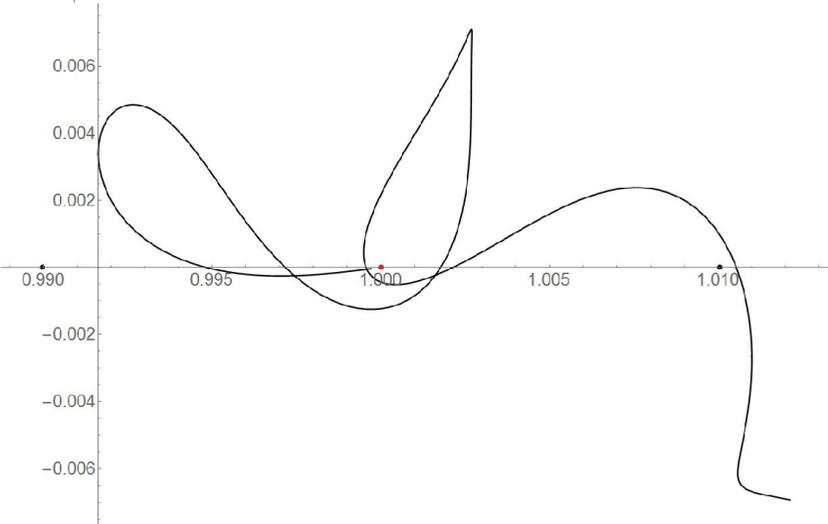
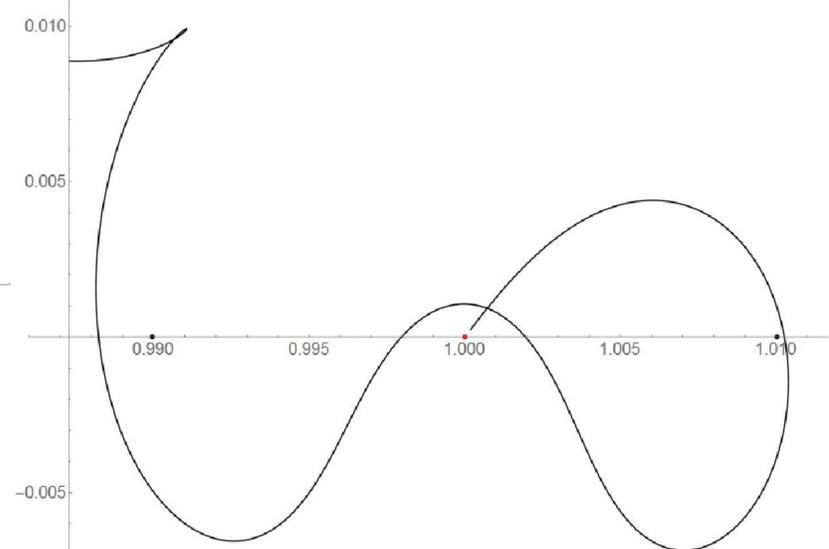
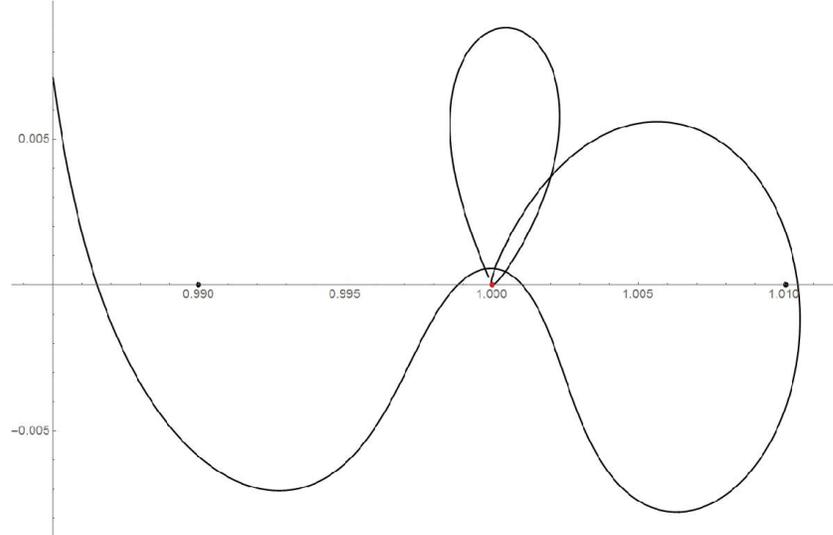
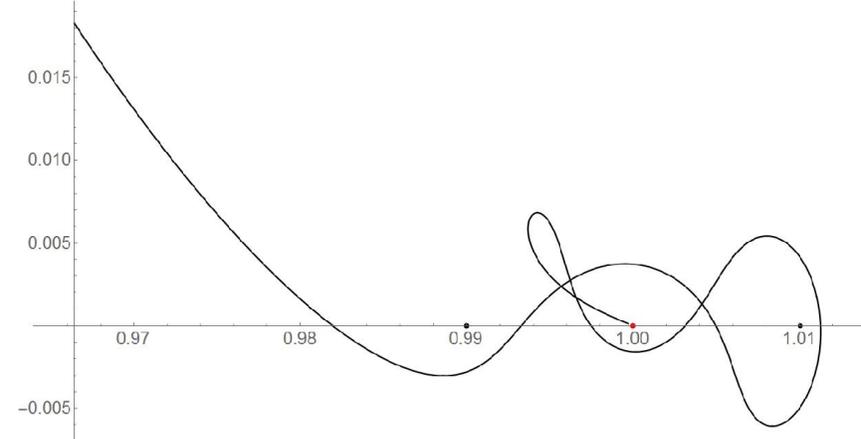


**b**

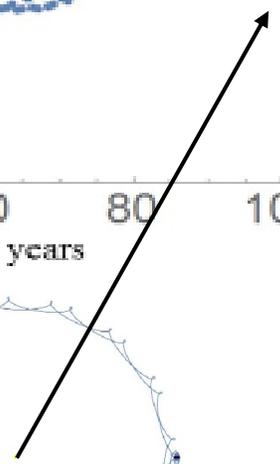
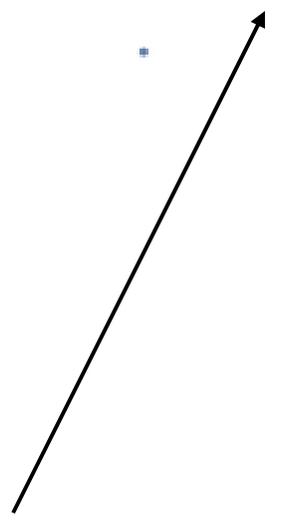
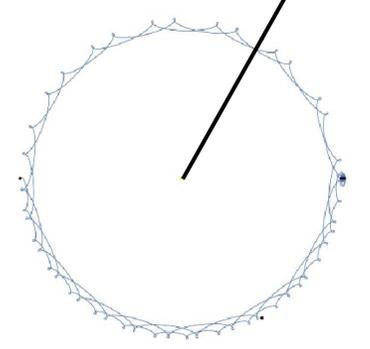
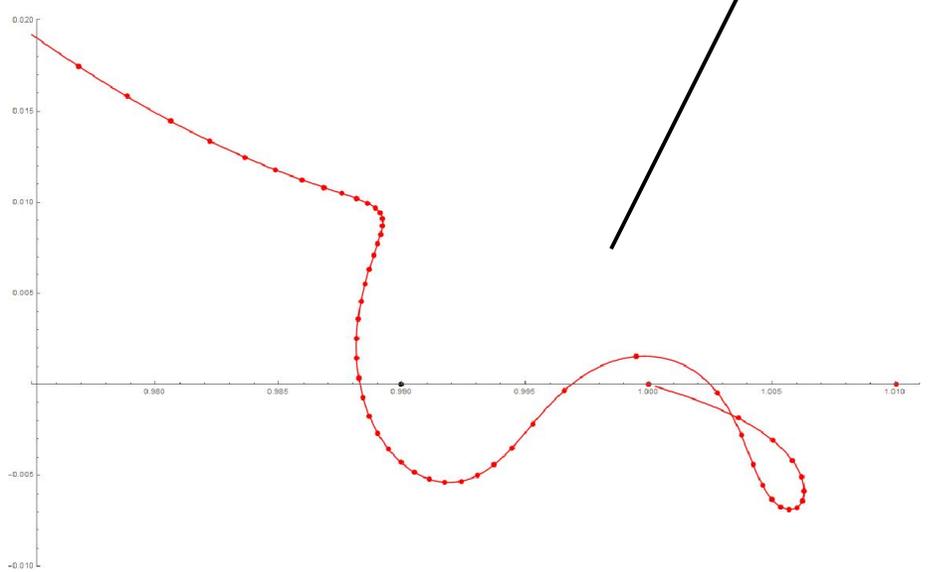
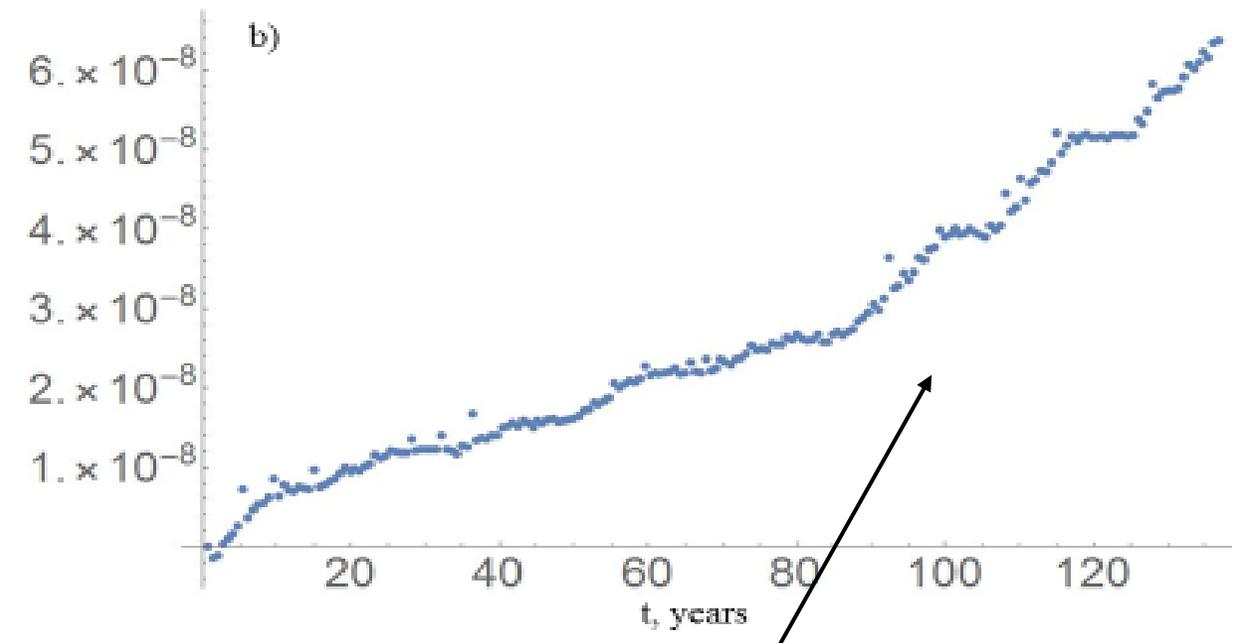
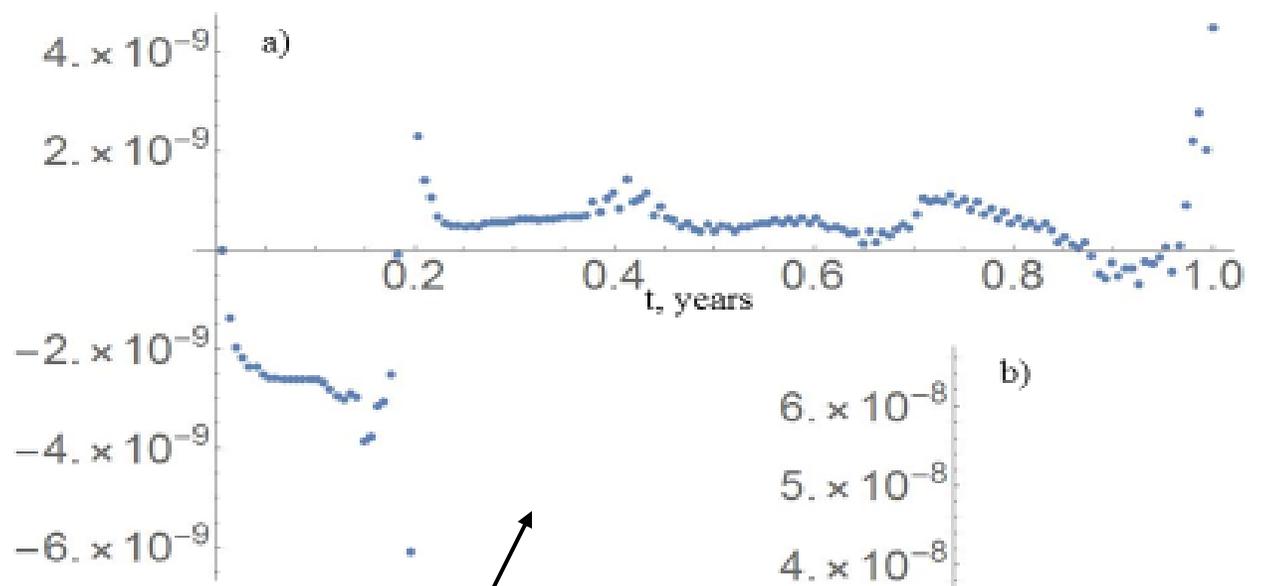


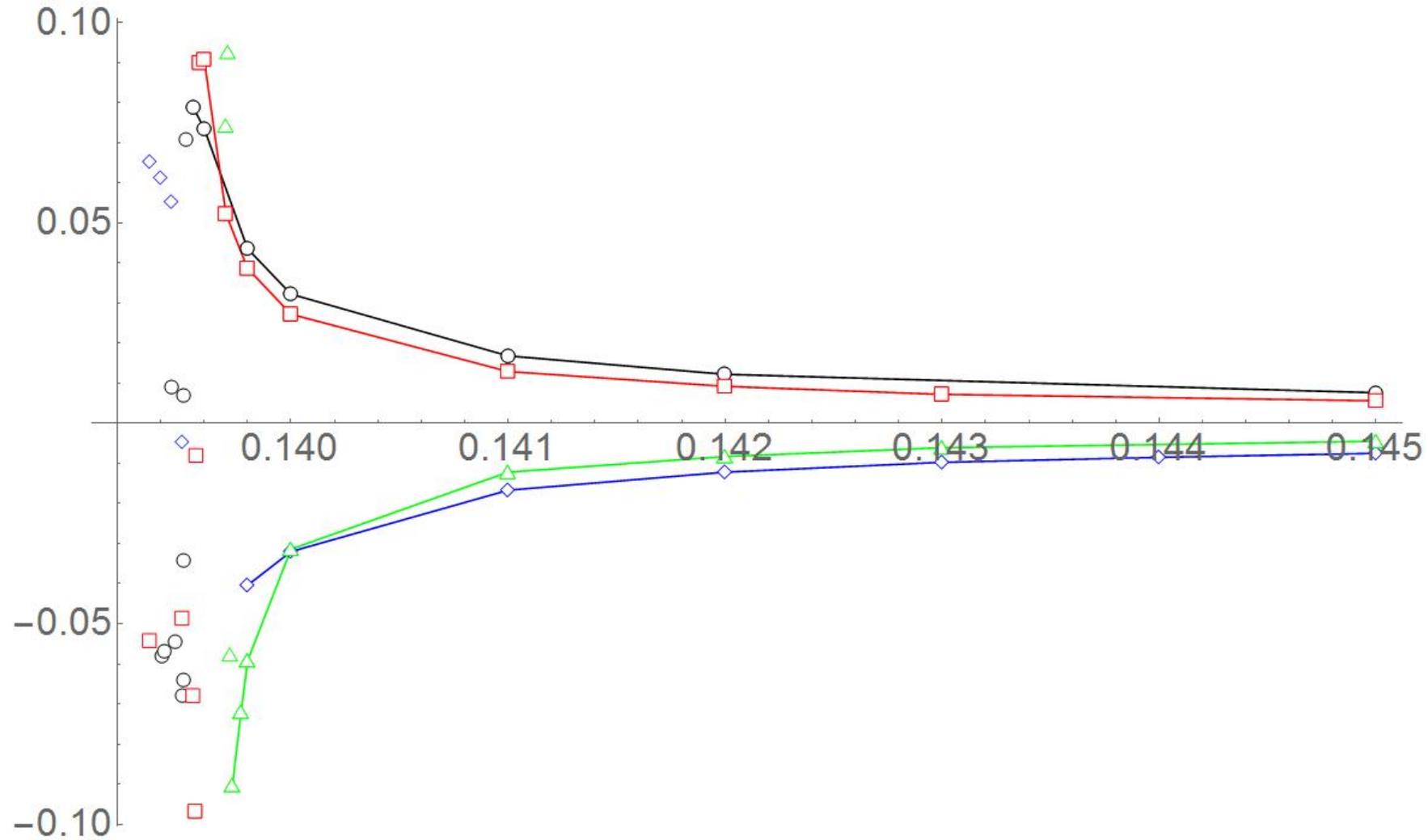


Левые рисунки во вращающейся системе отсчета, правые – в неподвижной.  
 Точки на рис. а и б показывают положения тел с интервалом 1 мес. =  $2\pi/12$ . Углы вылета  
 всех рисунков одинаковы. Скорости рис. а и б больше критической, рис. с – меньше всего на  
 $3 \cdot 10^{-4}$ :  $V_a = 0,139565$ ;  $V_b = 0,139400$ ;  $V_c = 0,139360$ .

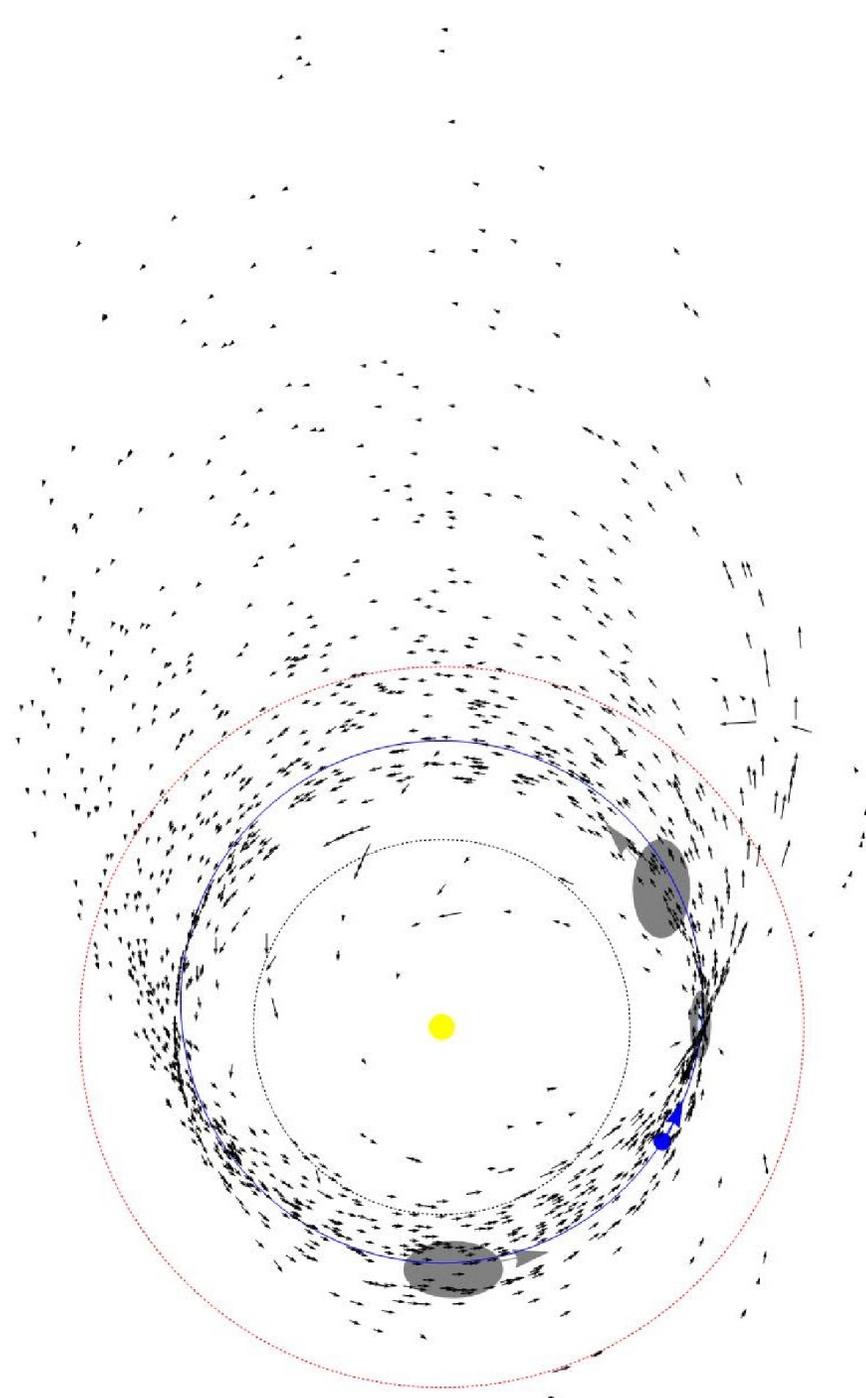


# Точность решений ограниченной задачи трех тел выше, чем $10^{-8}$ в год

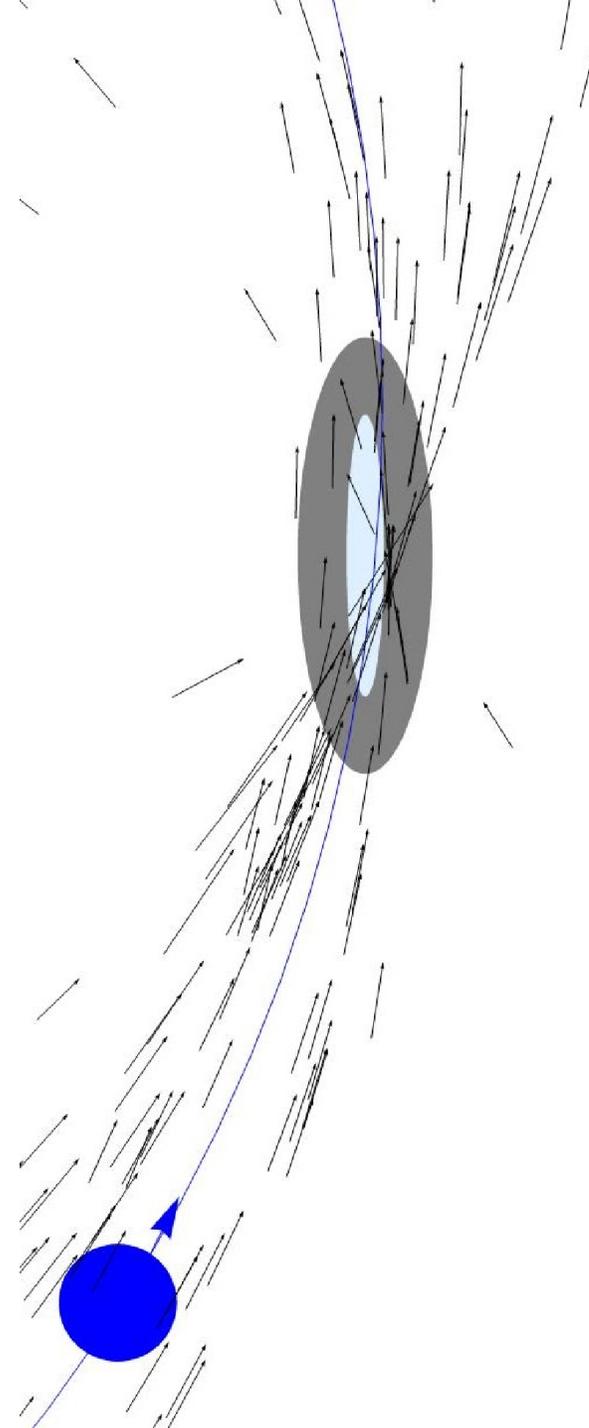




Отклонения точек возврата на орбите от точки убегания в зависимости от скоростей. При превышении критической скорости на 3—4% отклонения имеют хаотический характер со среднеквадратичным отклонением, равным 0.059. При дальнейшем росте скорости отклонения падают по величине, не меняя знака. Черные кружки и линия – при угле вылета  $\theta = 0$ ; красные квадраты и линия при  $\theta = \pi/4$ ; зеленые треугольники и линия при  $\theta = \pi$ ; синие ромбы и линия при  $\theta = 5\pi/4$ ;



а



б

Формирование газопылевого потока в области ГС. Земля синий диск, Солнце – желтый (вне масштаба), для масштаба даны орбиты Венеры и Марса. Почти все ООЛ пролетают через область ГС, в ней происходит релаксация. Часть тел попадает в области т.Л. L4 и L5 (серые овалы).

# Температурный режим осколков: охлаждение на орбите и нагрев в газопылевом потоке

$$\rho = (3.2 \div 3.9) 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; c_p = 680 \div 900 \frac{\text{J}}{\text{kg K}};$$

$$\kappa = (2.3 \div 3.9) \frac{\text{J}}{\text{m K}}.$$

$$\chi = \frac{\kappa}{c\rho} = (1.03 \div 1.20) 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 35 \pm 3 \frac{\text{m}^2}{\text{yr}};$$

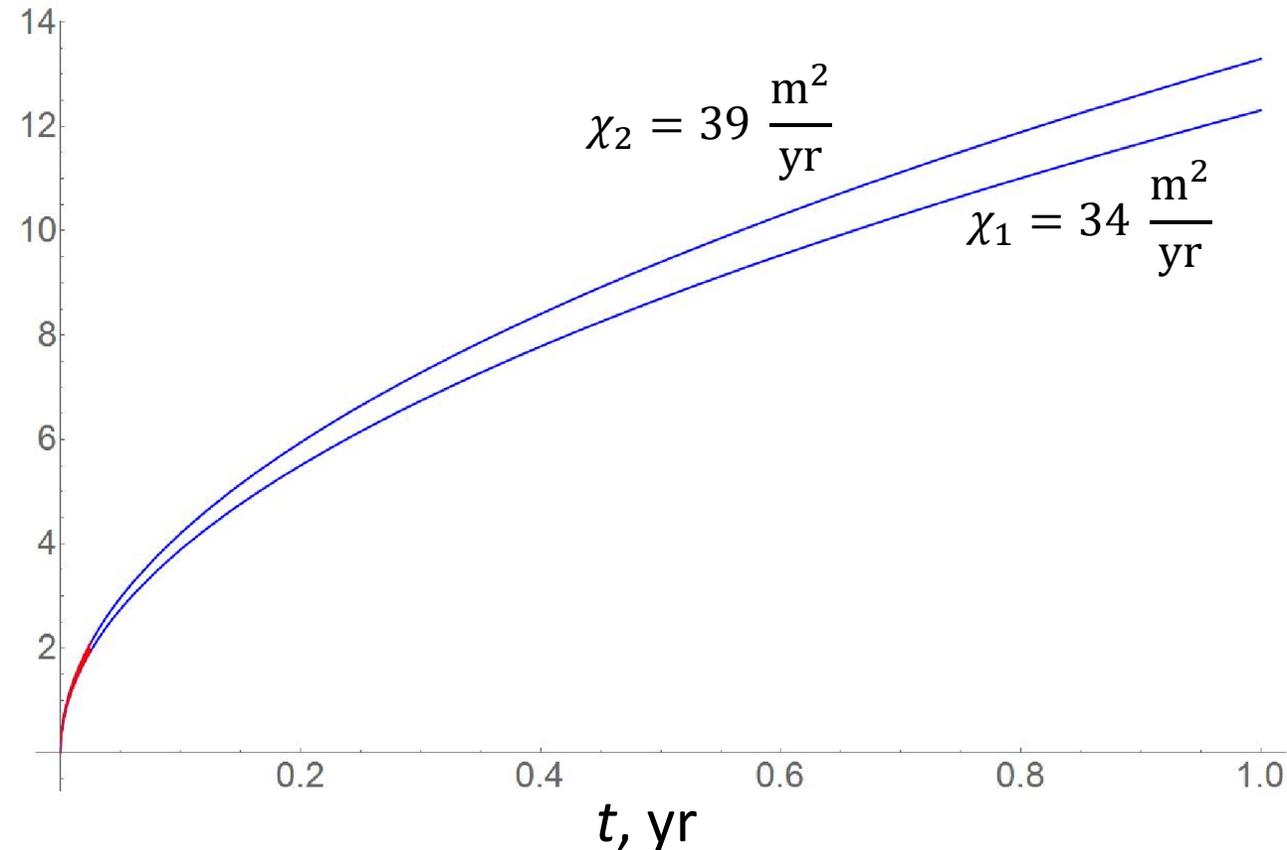
Данные по плотности, теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности из статьи: Слюта Е. Н. Физико-механические свойства каменных метеоритов. *Астрономический Вестник*, 51, № 1, 72–95 (2017).

$$D(t) \approx 2\sqrt{\chi t}; D(1 \text{ yr}) \approx 12 \text{ m}.$$

*Синие кривые – толщина охлаждения за год движения по орбите;*

*Красный – толщина нагрева оболочки при проходе через газо-пылевой поток.*

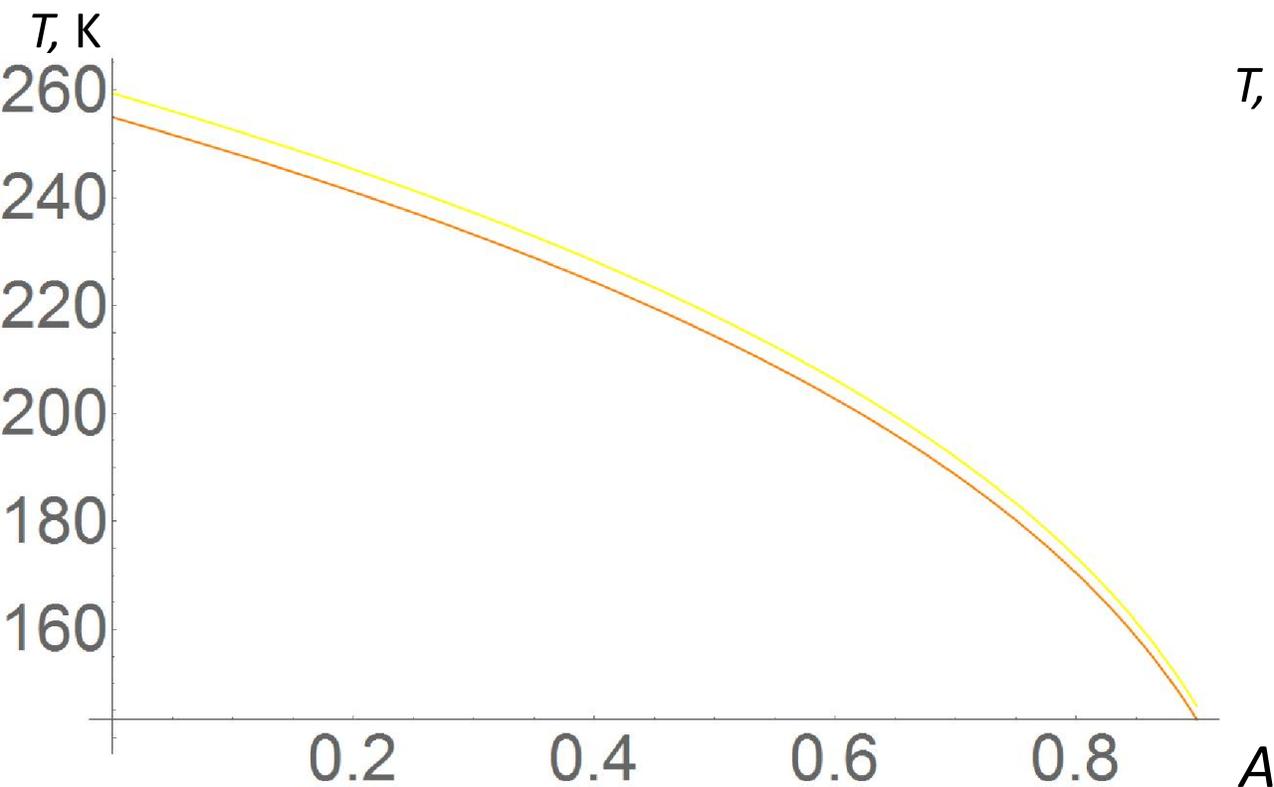
$D, \text{ m}$



# Охлаждение Шаровой ООЛ на орбите. Два режима охлаждения радиационное и излучательное

$$T_{rad} = T_S \sqrt{R_S / 2a} (1 - A)^{1/4}.$$

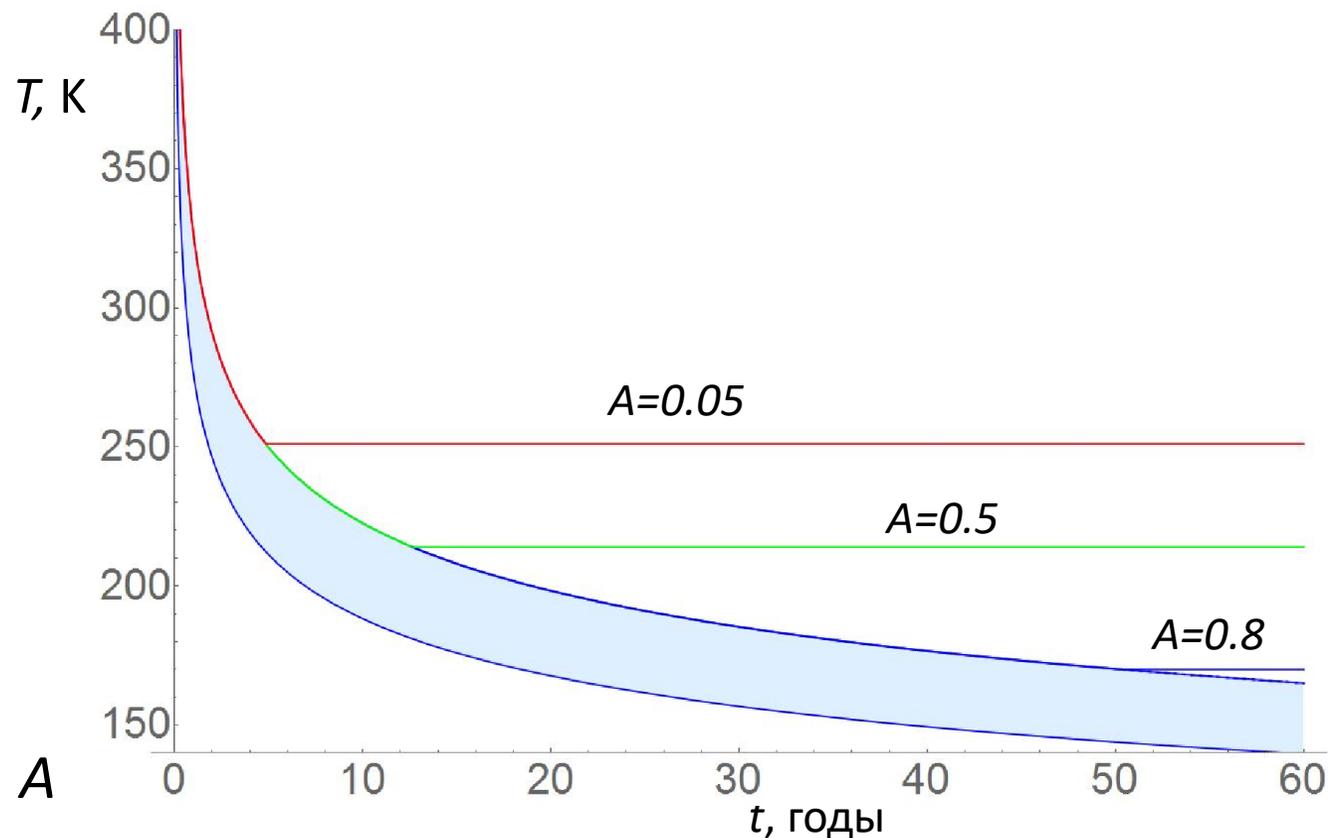
*a*



*a)* Радиационная температура Земли при слабом Солнце (Светимость 0.7 или 0.75).  
 $T_{s07} = 5285 \text{ K}$ ;  $T_{s075} = 5377 \text{ K}$ .

$$T(t) = \left( \frac{9\sigma^2}{\kappa\rho c_p} \frac{1}{t} \right)^{1/6} = (276 \div 326 \text{ K}) t^{-1/6}.$$

*b*



Общая кривая и заливка – зависимость температуры поверхности ООЛ от времени при отсутствии инсоляции; переход на красный уровень – для ООЛ с альбедо  $A = 0,05$ ; зеленый переход – при  $A = 0.5$ ; синий переход – при  $A = 0.8$ .

# Происхождение хондритов

Многократное чередование резкого нагрева в газопылевом потоке и длительного охлаждения при движении по остальной части орбиты открывает возможность объяснения появления **хондр** — капель расплавленных силикатов в наиболее распространенном типе астероидов, хондритов.

# Вероятности хаотического выпадения ООЛ на Землю и Луну

Сечение захвата  $\sigma = \pi R^2 (1 + Gm/Rv_\infty^2)$ .  $w_P \approx \frac{\pi R_P^2}{2\pi a_P R_P}$  – вероятность единичного столкновения с планетой.  $q_P \approx v_\infty w_P$  – вероятность столкновения в год.

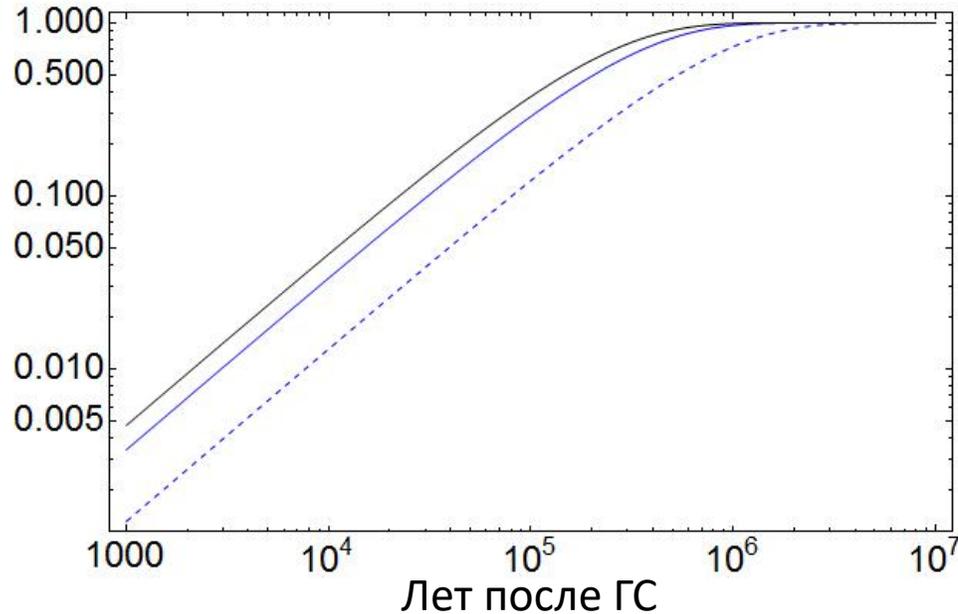
$N(t)$  – доля ООЛ в момент  $t$  после GI – убывает экспоненциально с показателем .

Планета	$w_P$	$q_P, \text{yr}^{-1}$	$N(10 \text{ Myr})$	$N(20 \text{ Myr})$
Earth	$21.3 \cdot 10^{-6}$	$\sim 3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-30}$
Moon	$5.8 \cdot 10^{-6}$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-12}$

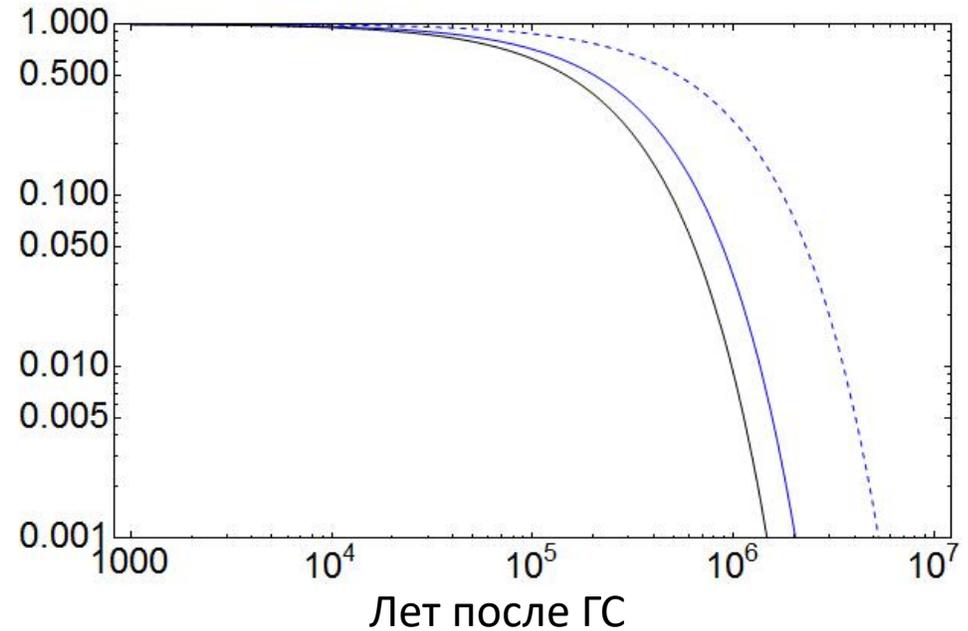
Вероятности столкновений с Марсом и Венерой оценить труднее, у них сильная зависимость от наклона плоскости ГС к эклиптике. Порядок величины тот же.

**Первичная бомбардировка закончилась через 10 млн лет после ГС. Всего! А датировка лунных кратеров говорит о вторичной поздней бомбардировке.**

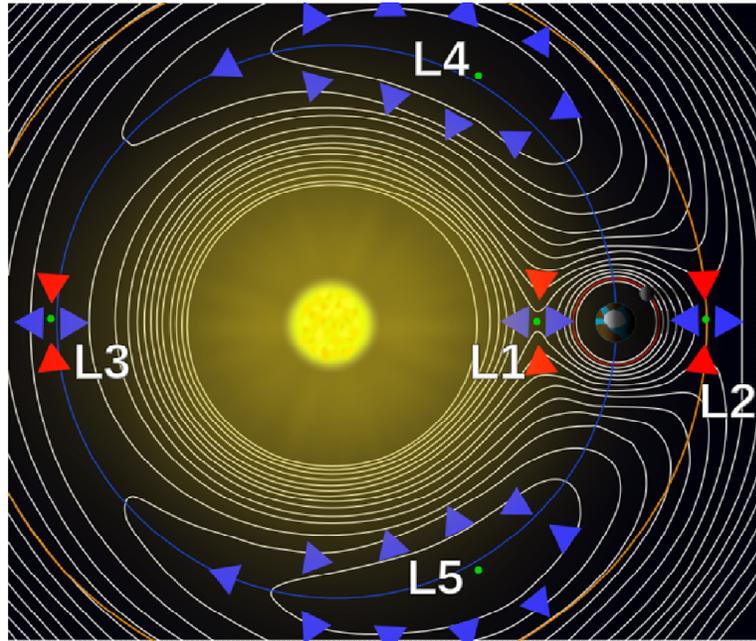
Зависимости вероятностей падения ООЛ от времени после ГС для Земли и Луны(пунктир)



Зависимости вероятностей незахвата ООЛ от времени после ГС для Земли и Луны (пунктир)



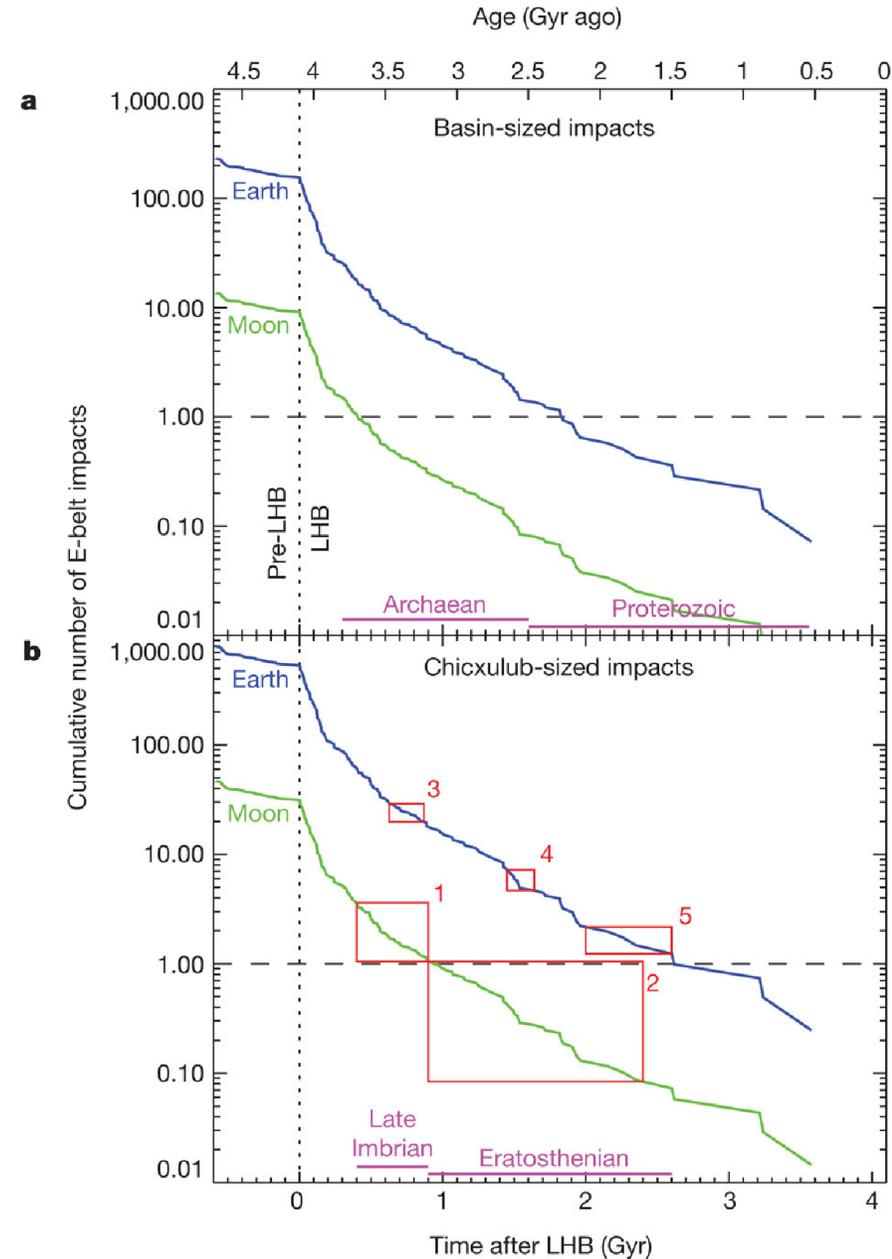
# Треугольные точки Лагранжа и поздняя бомбардировка?



«Треугольные» точки Лагранжа L4 и L5 устойчивы :

$$L4 = \left( \frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2} \right); L5 = \left( \frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Релаксация в газопылевой струе может приводить к попаданию осколков в области L4 и L5. Их выход из этих ловушек затруднен. Этим мы попробуем объяснить позднюю бомбардировку, о которой свидетельствуют старые лунные кратеры. L1 и L2 – седловые точки. Но точка L3 – особая, она неустойчива, но седла в ней нет!



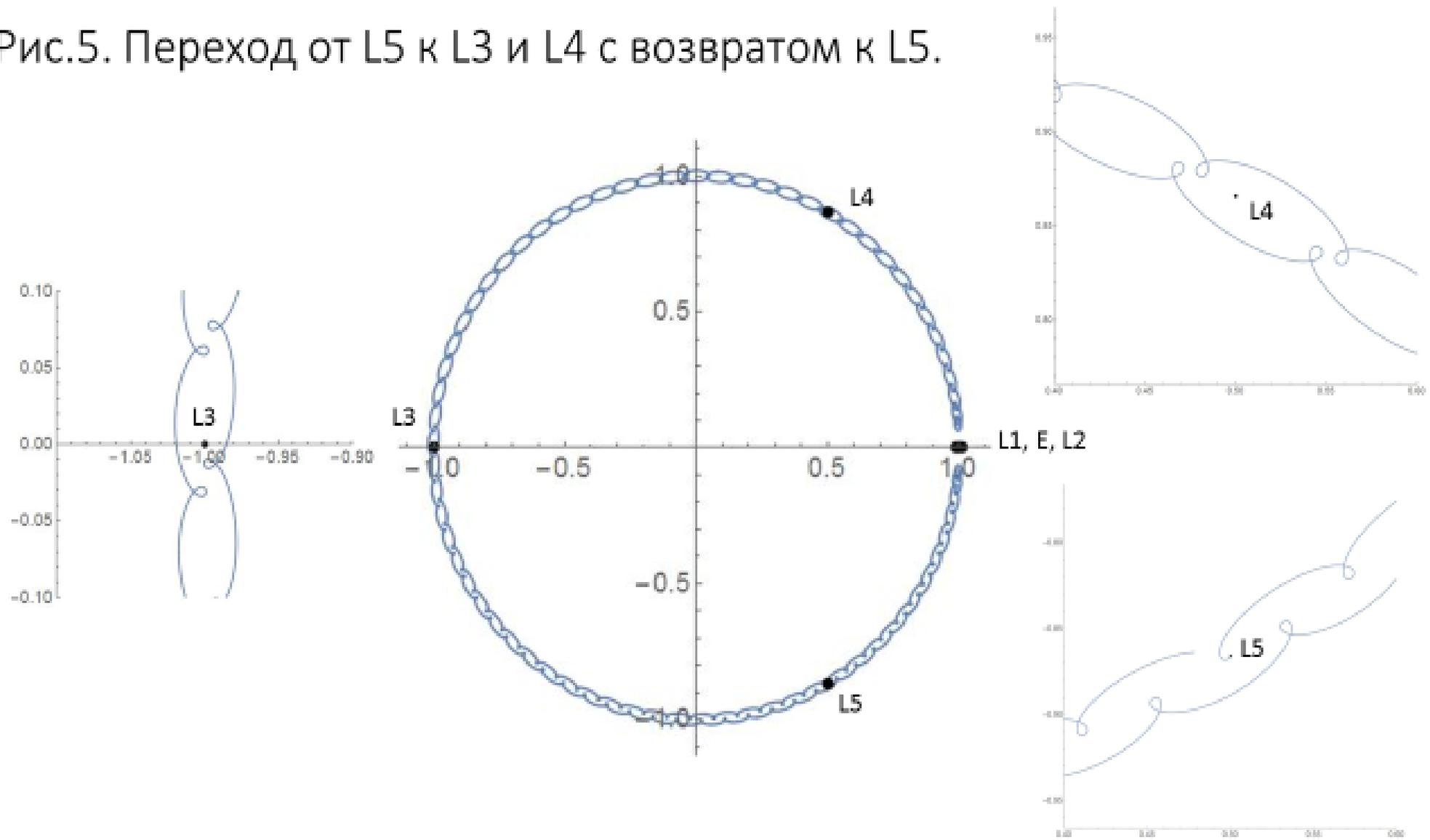
## Торможение осколков при пересечении газо-пылевого потока

Выравнивание скоростей осколков, торможение быстрых и ускорение медленных происходит при их столкновениях, а также вследствие гравитационного увлечения мелких тел крупным. Эта непростая, но решаемая задача. Необходимо знать распределение осколков по скоростям (это сложно, но реально), а также их распределение по массам (или размерам). Последнее можно моделировать по соответствующим распределениям астероидов. Но в любом случае это задача для большого компьютера.

Сегодня она не решена.

Ее решение было бы весьма полезно для следующей проблемы: оценки вероятности попадания осколков в область устойчивых точек Лагранжа. Мы полагаем это может быть решением загадки поздней тяжелой бомбардировки.

Рис.5. Переход от L5 к L3 и L4 с возвратом к L5.



Траектория перехода от точки Лагранжа L5 с возвратом в окрестность начальной точки через 142 года. Тело сначала приближается к Земле на расстояние 0.082 а.е., возвращается, затем проходит окрестности L3 и L4, опять близко подходит к Земле и подходит к исходной точке почти тем же путем. Начальная скорость 0.006, угол вылета из L5 равен  $33\pi/24$ . Во врезках показаны окрестности точек L3, L4 и L5.

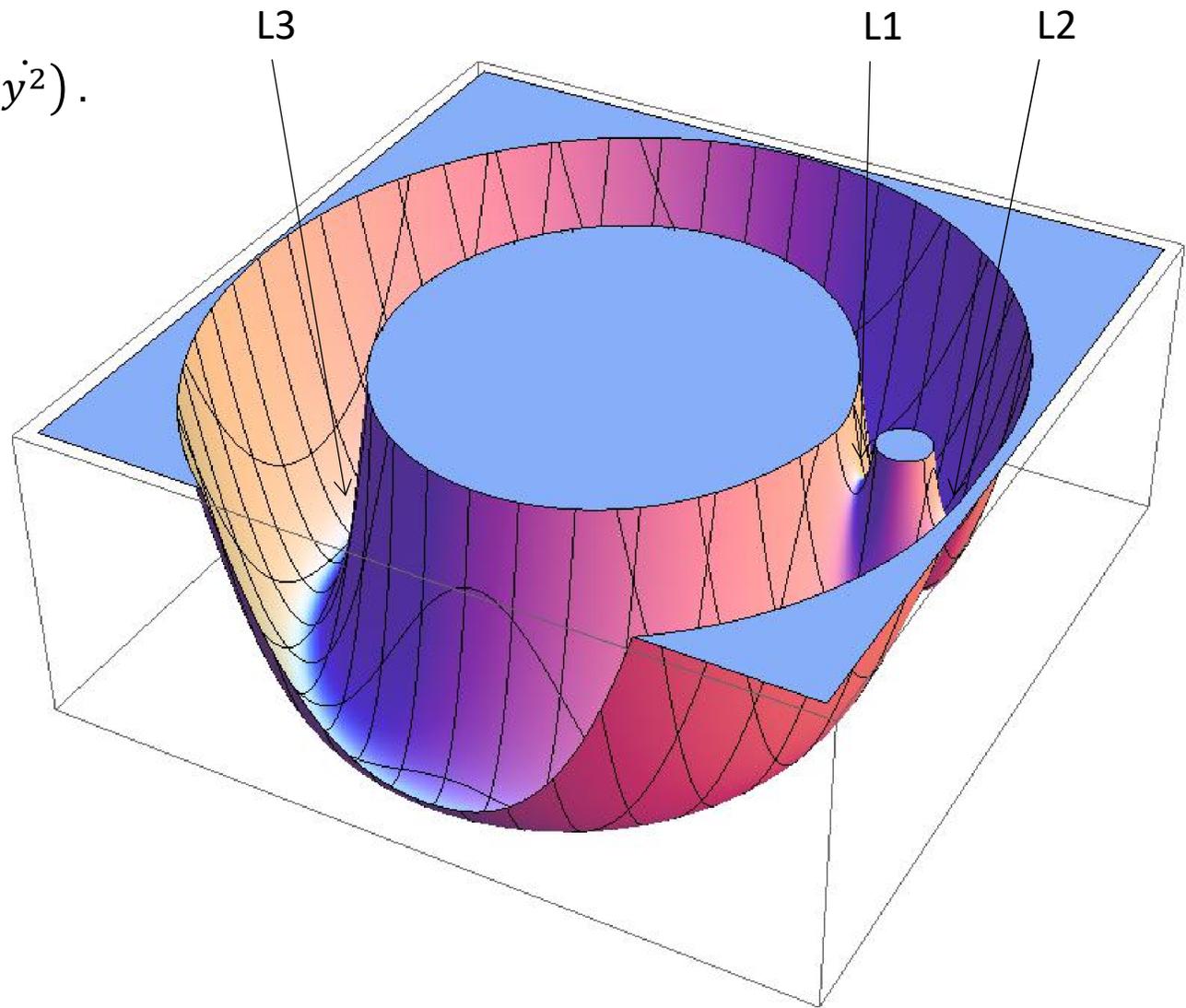
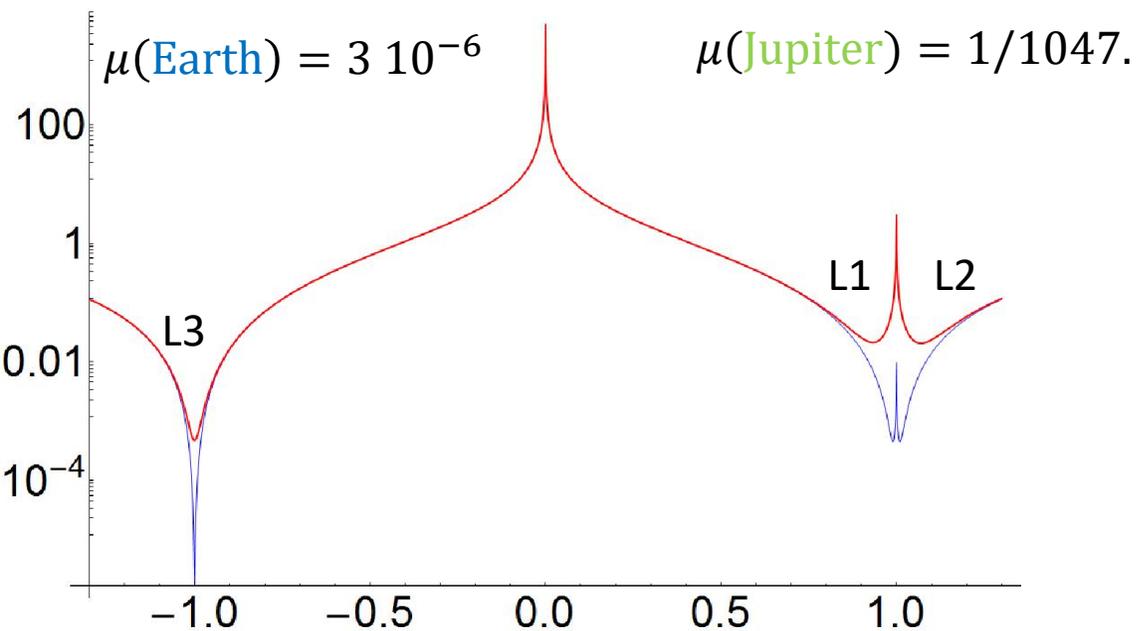
Профиль гравитационно–вращательного потенциала.

L1 и L2 – седловые точки, точка минимума около L3

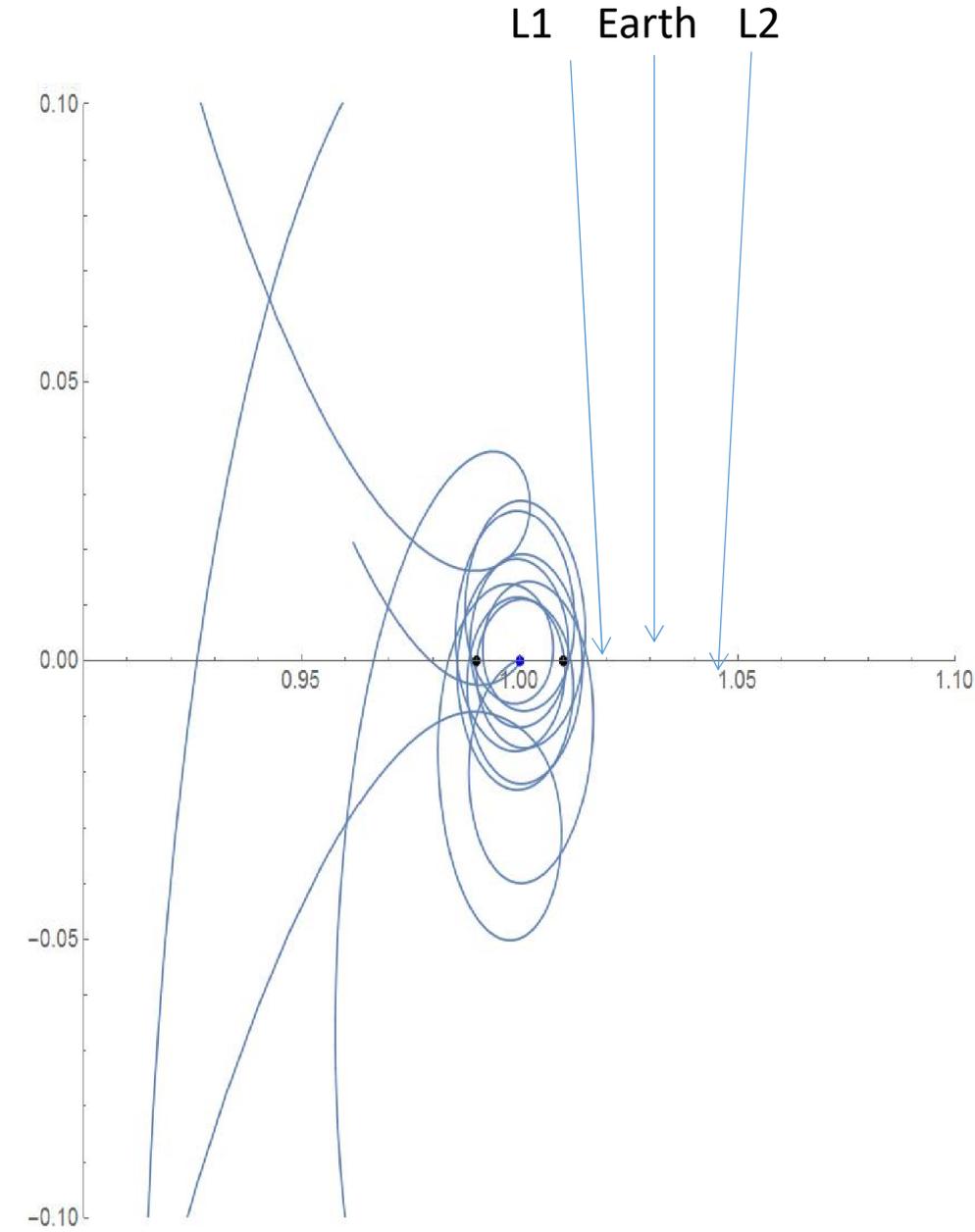
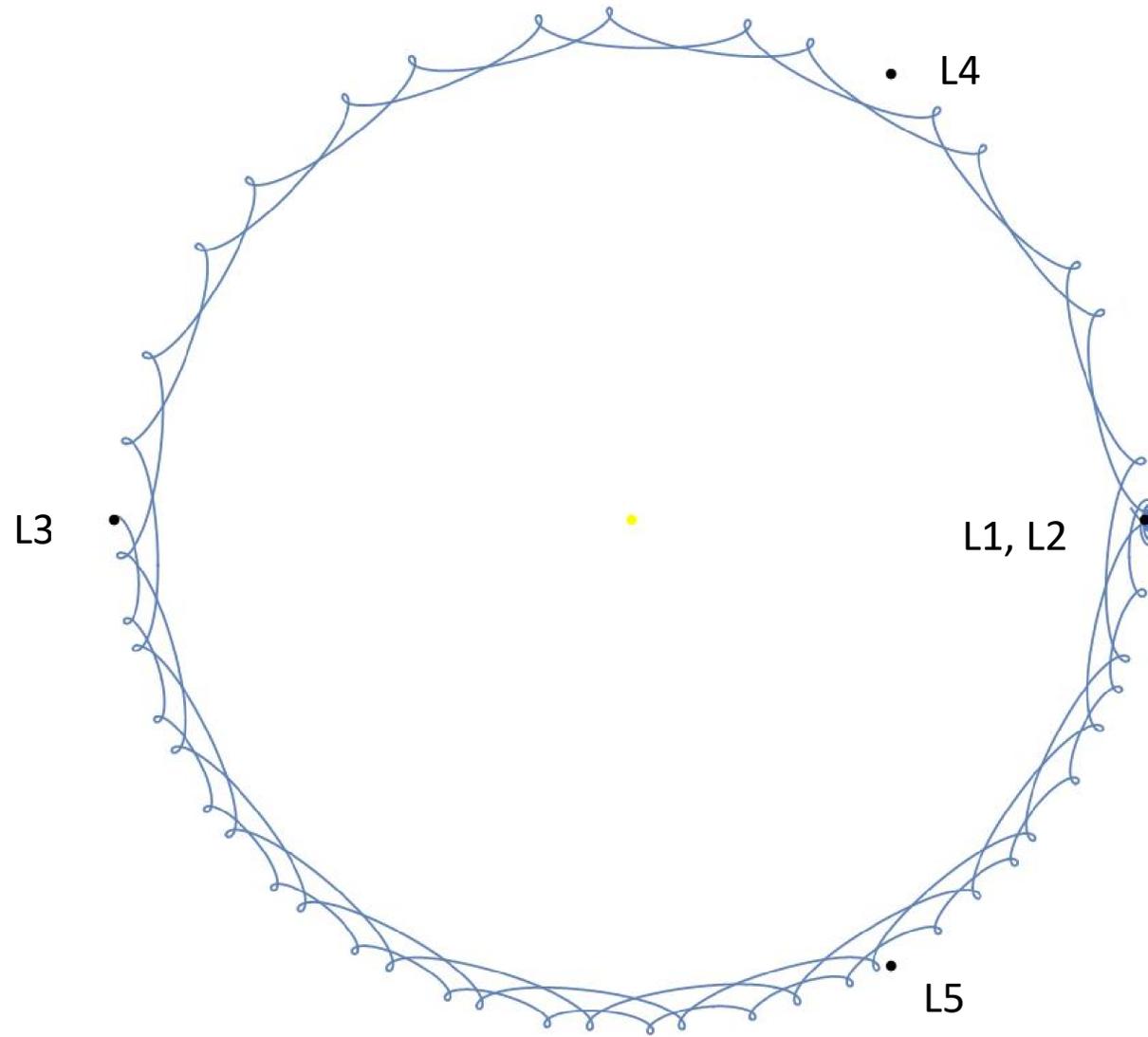
$$U(x, y) = x^2 + y^2 + \frac{2}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{2\mu}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2}}.$$

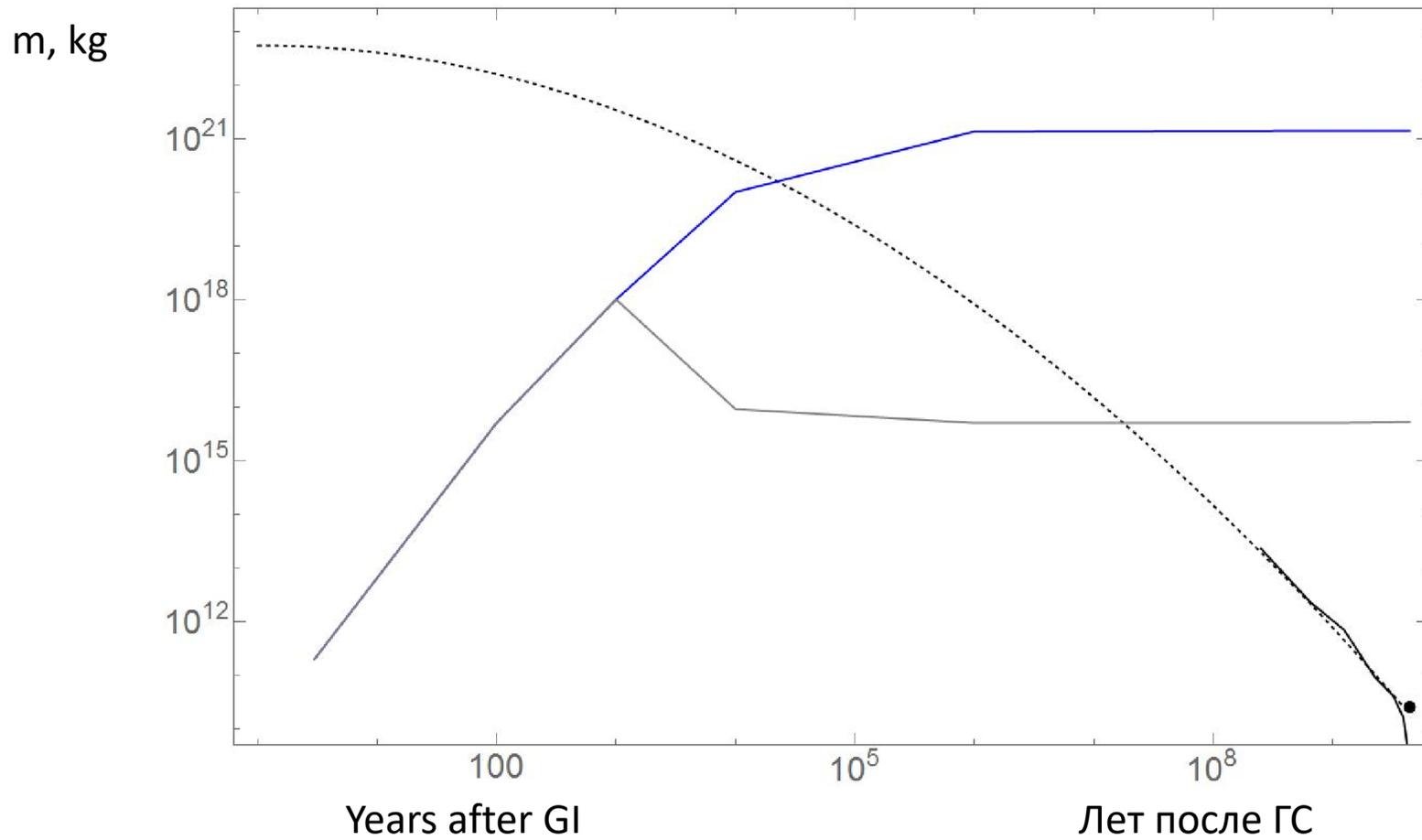
$$\mu = 0.01$$

$$C_{Jac}(x, y) = x^2 + y^2 + \frac{2}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{2\mu}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2}} - (x^2 + y^2).$$



# Траектория возможного перехода тела из точки L3 к Земле





Изменения суммарной массы ООЛ (черная штриховая кривая), а также масс земной атмосферы (синяя ломаная) и океана (серая ломаная) после ГС. На стадии ранней бомбардировки масса ООЛ убывает вследствие столкновений с Землей и Луной. Ранее  $10^3$  лет температура земной поверхности препятствует конденсации воды, атмосфера формируется из азота и льдов ООЛ в виде водяного пара. Затем начинается конденсация океана, который нарастает до современной массы через  $10^4$ — $10^5$  лет после ГС. Через  $10^6$  лет все ООЛ на обычных орбитах СС исчезают в столкновениях с Землей и Луной, осколки остаются только в окрестностях треугольных точек Лагранжа. Наступает стадия поздней бомбардировки. Ее динамика построена по данным [6, 8] о возрасте лунных кратеров

Спасибо за внимание.

Вопросы, замечания, выступления

\*\*\*

После окончания семинара прошу  
собравшихся выйти на крыльцо для  
фотографии

А затем - кулуары

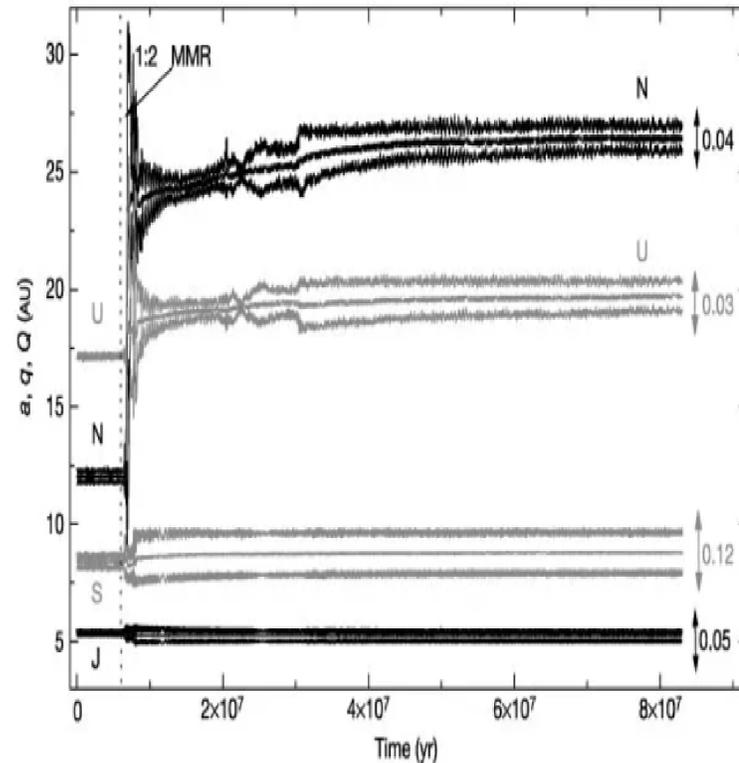


Sections

Figures

References

Figure 1: Orbital evolution of the giant planets.



**КП "Сосновый Бор"**

Участки от 3 млн р. Готовые дома от 10,9 млн р. ПМЖ. 35 км от МКАД, вокруг лес. Скидки!

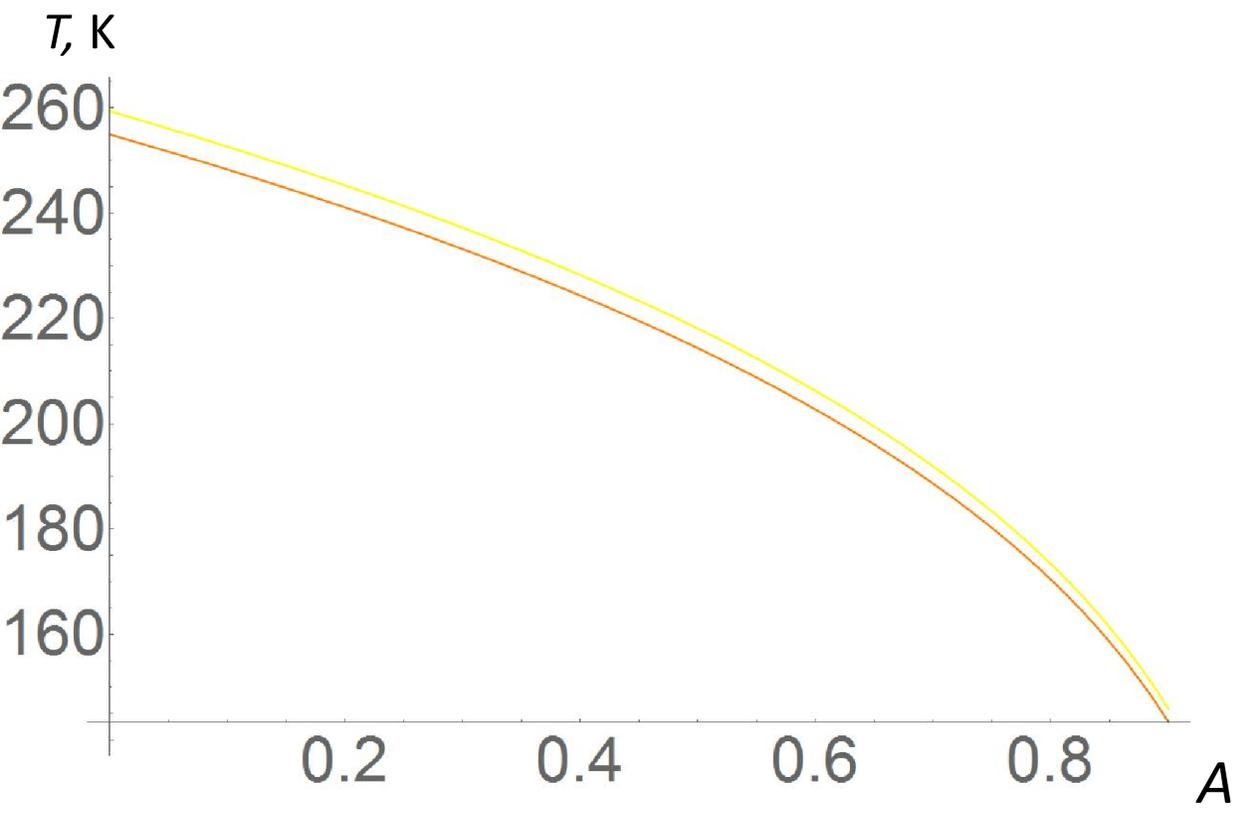
**СИТ**

Это красивое решение. И возможно, Нептун и Уран менялись местами примерно через 6 млн лет после образования СС. Но сама начальная расстановка планет-гигантов ни откуда не следует. Так что это искусственное решение, относиться к нему серьезно нельзя.

Оно дает объяснение тяжелой бомбардировки на очень ранней стадии СС. И наша гипотеза по меньшей мере имеет право место под Солнцем.

# Ранняя эволюция СС (Morbidelli, 2005)

*a*



*b*

