

# Судьба осколков образования Луны

FofMOF (Fate of the Moon Origin Fragments)

Бялко Алексей Владимирович,

д.ф.-м.н.,

зам. главного редактора ж. «Природа»,

ассоциированный сотрудник ИТФ им.Ландау

[alexey@byalko.ru](mailto:alexey@byalko.ru)

Цель этого доклада – не рассказ о решенной проблеме, но постановка новой физической задачи и призыв к сотрудничеству.

В 1986 году я был в Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре и присутствовал на докладе об образовании Луны, который делал A.G.W.Cameron. Он показал фильм, прообраз того, который вы только что видели. Этот доклад настолько убедил меня в единственности ударной гипотезы образования Луны, что я успел внести его во второе издание книги «Наша планета – Земля». Это было более 30 лет назад...

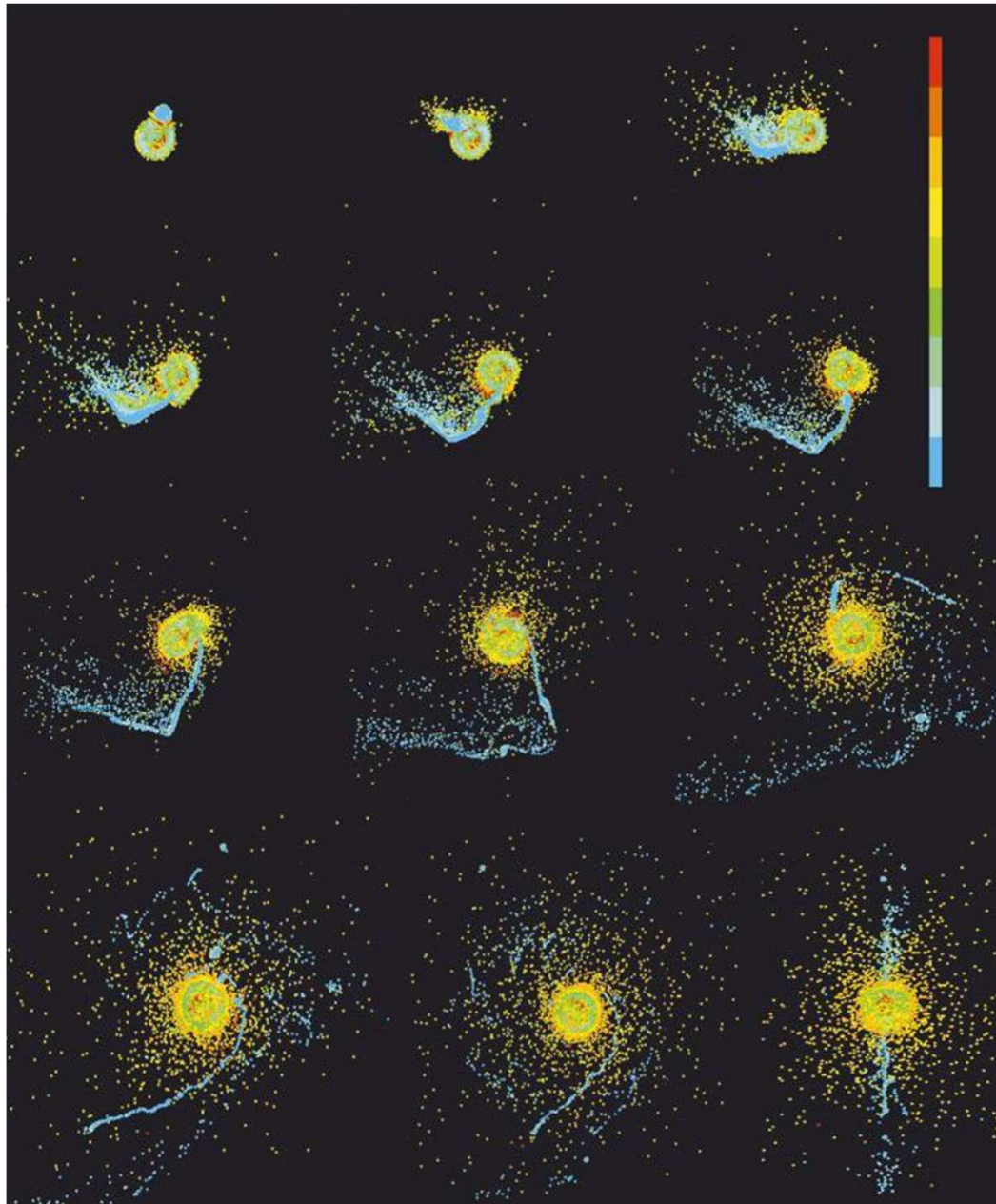
## Осколки образования Луны

Луна родилась во время Гигантского Столкновения (ГС) ПротоЗемли с планетой с массой порядка Марса. Это столкновение было рассчитано теоретически. Его результаты дают правильную массу Луны (1/80 земной) и правильный состав Луны (3-4% Fe). Однако в процессе столкновения значительная часть массы (56-71% массы Луны) уходит на бесконечность. Будем называть эти массы ООЛ – осколки образования Луны.

Воздействие этих убегающих масс на Солнечную систему (СС) привлекало внимание исследователей (*Bottke W.F et al. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. Nature, 485, 78 –81 (2012)*), но с иной концепцией: авторы этой статьи пытались найти влияние ООЛ на пояс астероидов ,чтобы объяснить позднюю тяжелую бомбардировку (LHB).

Датировка начала LHB практически совпадает с датировкой Гигантского Столкновения: 4.1 млрд лет назад. Но доказательства связи LHB с ГС нет. Поясним причины и предложим новый сценарий.

Canup R. M. & Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation, *Nature*, 412, 208—212, (2001).

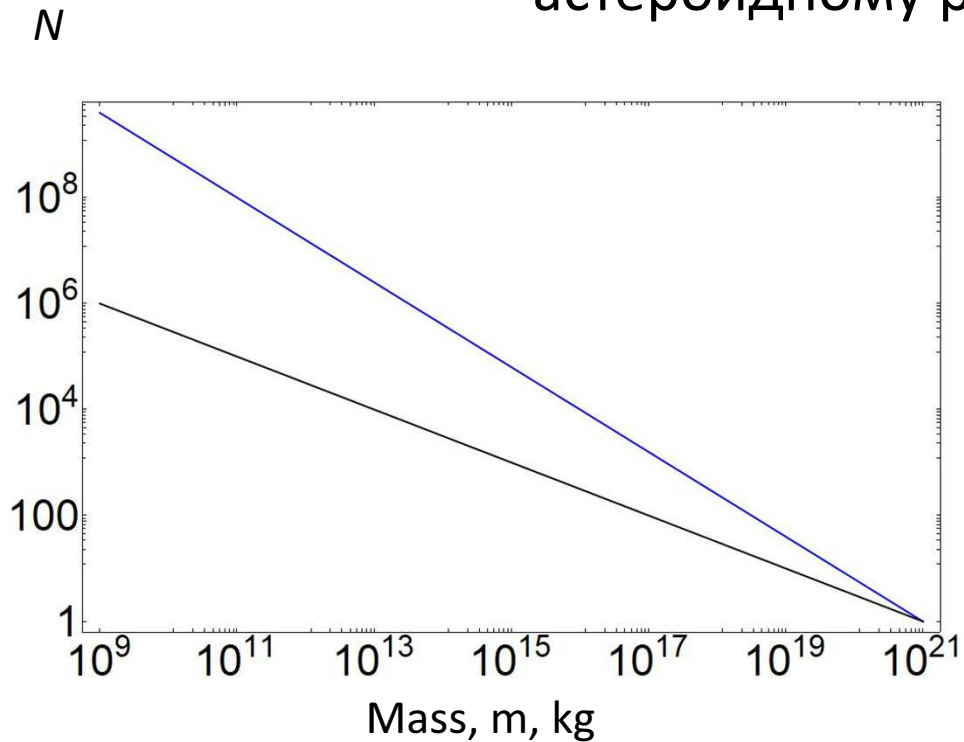


Стадии столкновения: несколько часов после удара в проекции на плоскость удара. Последний кадр – вид на плоскость удара. Справа – шкала температур, ее желтая часть 6000 К.

Железные ядра тел сливаются в ядро Земли, Луна формируется из силикатных оболочек протопланет. На бесконечность уходят ООЛ с общей массой порядка  $5 \cdot 10^{22}$  kg или 56-71% массы Луны. Их состав в основном силикатный; их скорости относительно Земли от 10 до 50 км/с.

Земля вращается с периодом  $\sim 6$  ч.; Луна формируется на расстоянии, большем предела Роша  $3 R_E$

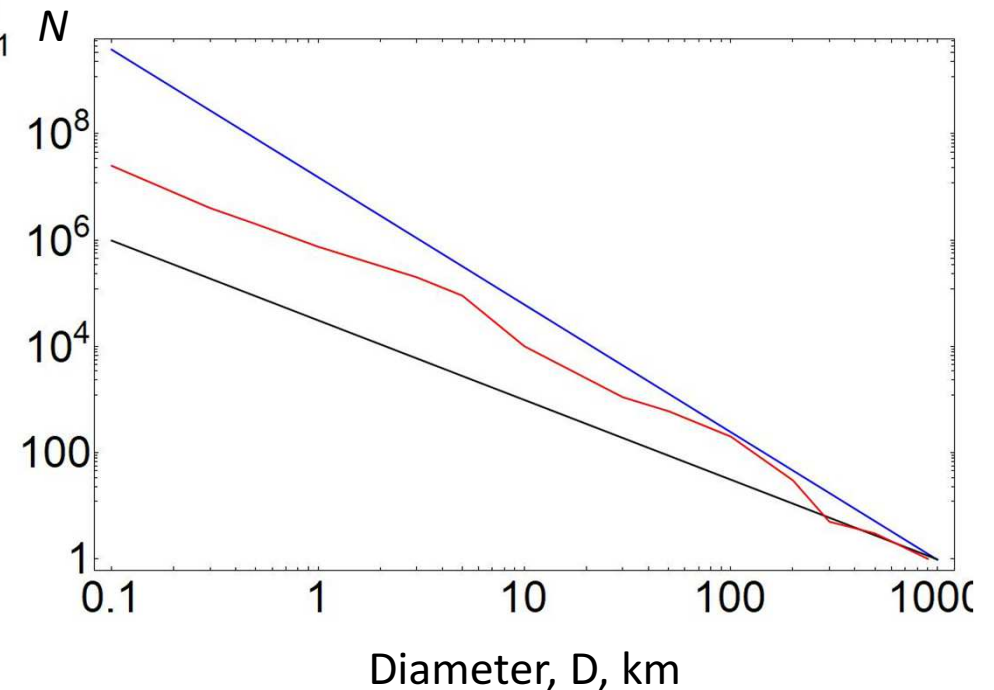
Интегральные распределения ООЛ по массам и диаметрам близки к астероидному распределению.



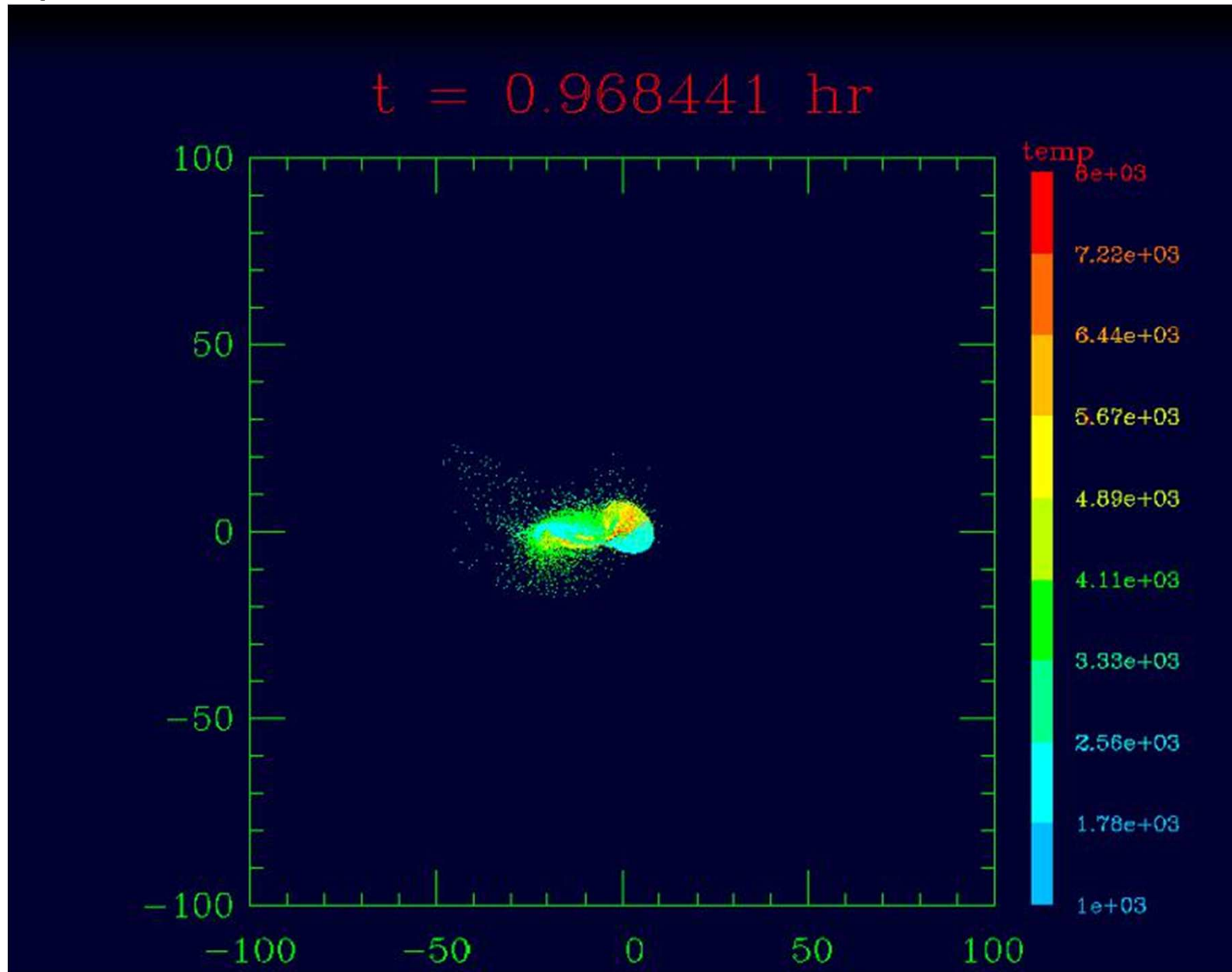
Распределение астероидов по диаметрам (красная кривая) лежит между распределениями ООЛ по диаметрам с  $q = 1.8$  (синяя) и  $q = 1.5$  (черная кривая).

Сатур R. M. & Asphaug E. :  
Дифференциальное распределение FOM по массам:  
 $\frac{dN}{dm} \sim m^{-q}; 1.5 < q < 1.8.$

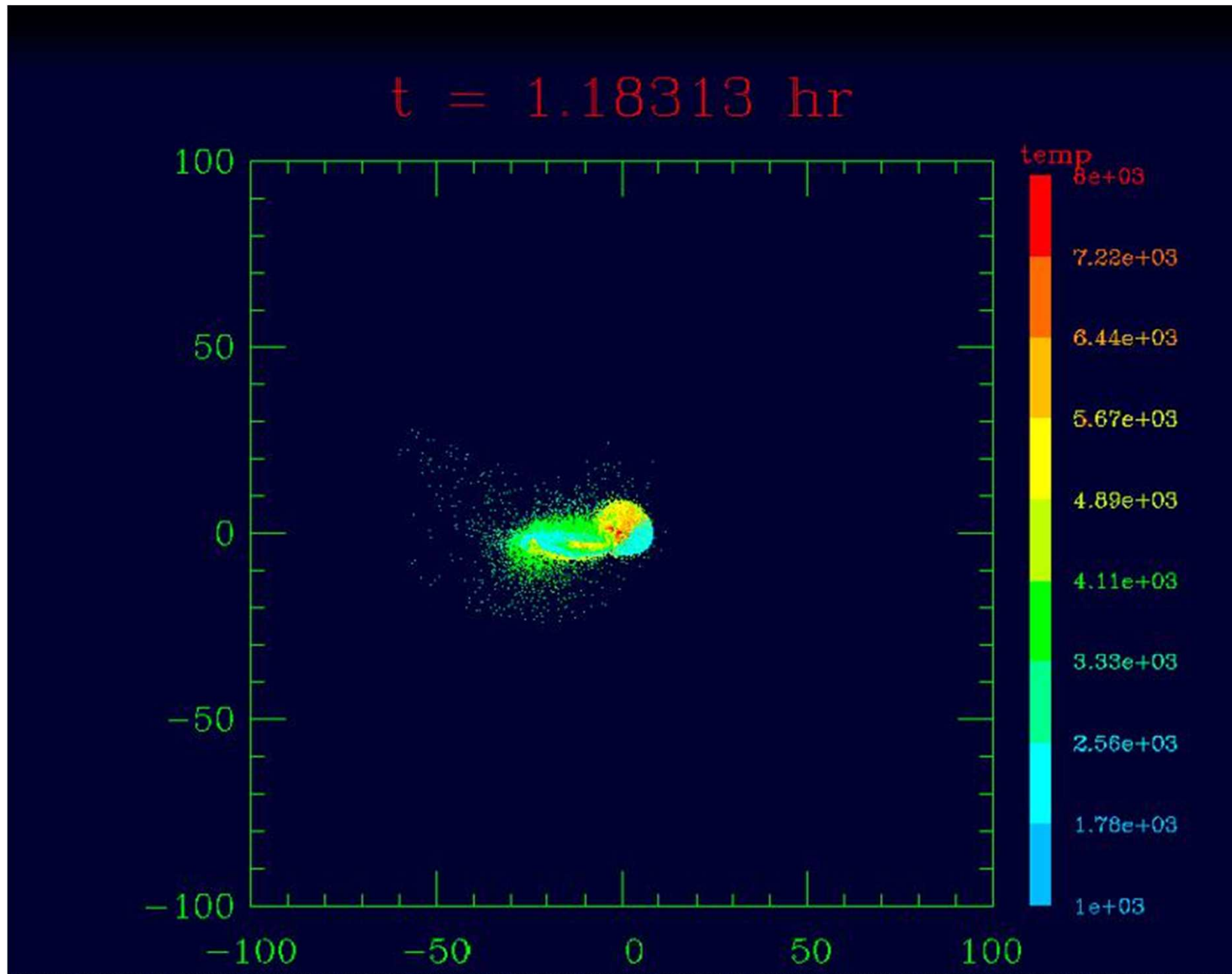
Интегральное распределение  
 $N(m) \sim m^{-q+1}.$



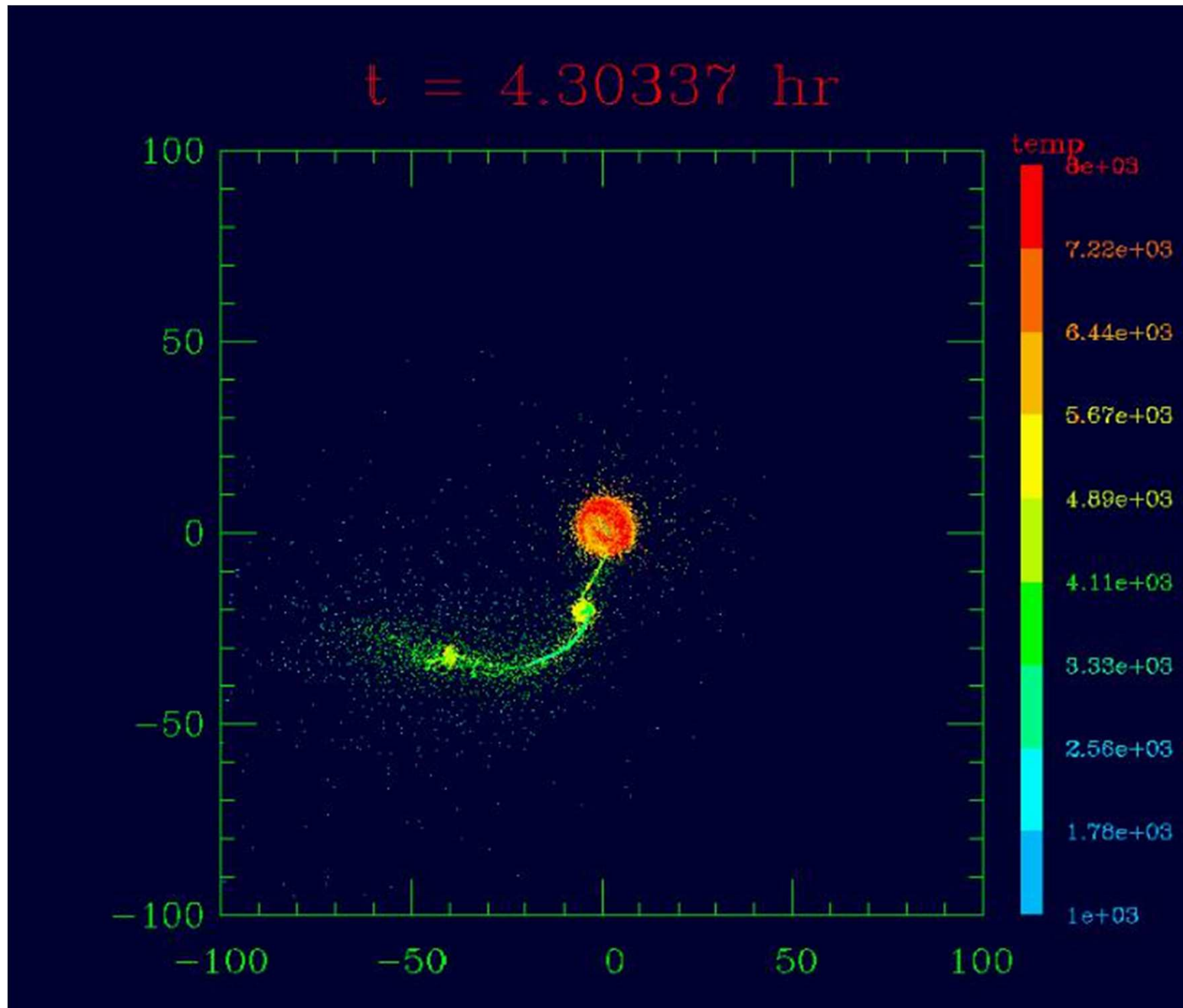
(Canup R.M. Simulations of a late lunar-forming impact, Icarus 168, 433–456 (2004).  $t = 0.97$  hr



$t = 1.18$  hr



$t = 4.3$  hr. Период вращения Земли 6—7 hr. Ее температура 8000 К.



# Что есть бесконечность?

## **Мы попытаемся объяснить позднюю тяжелую бомбардировку падением на Землю и Луну самих МОФ.**

В процессе Гигантского столкновения, (Great Impact, ГС) на бесконечность уходят массы порядка  $5 \cdot 10^{22}$  kg или 56-71% массы Луны. Заметим, что масса всех астероидов только  $3.0—3.6 \cdot 10^{21}$  кг, на порядок меньше. Не станем утверждать, что пояс астероидов возник в результате ГС, но мысль эта интересна.

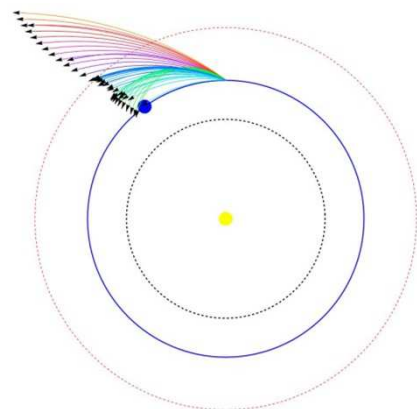
Но бесконечность убегающих частиц есть бесконечность в земной системе отсчета, а в Солнечной системе почти все частицы ООЛ выходят на конечные орбиты с периодами как меньше, так и больше года. Возможно, малая часть ООЛ улетает к области притяжения Юпитера (их дальнейшая судьба нас не будет интересовать), но наибольшая доля ООЛ имеет полуоси, близкие 1, и периоды, близкие году.

**Важнейшая особенность ООЛ состоит в том, что ВСЕ ОНИ в течение первых сотен своих периодов проходят через ту точку, где произошло ГС. Это утверждение справедливо как для орбит в плоскости эклиптики, так и для наклоненных к ней.**

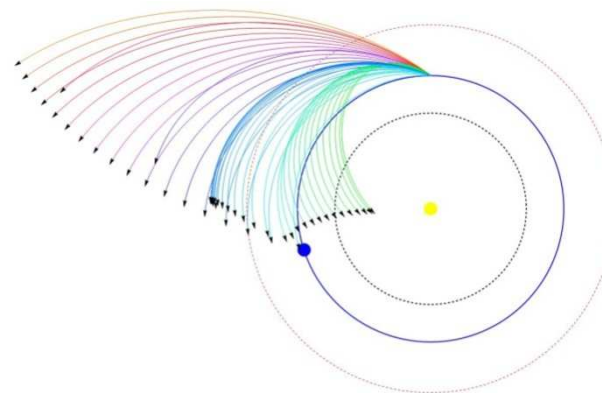
Демонстрируем плоский случай.



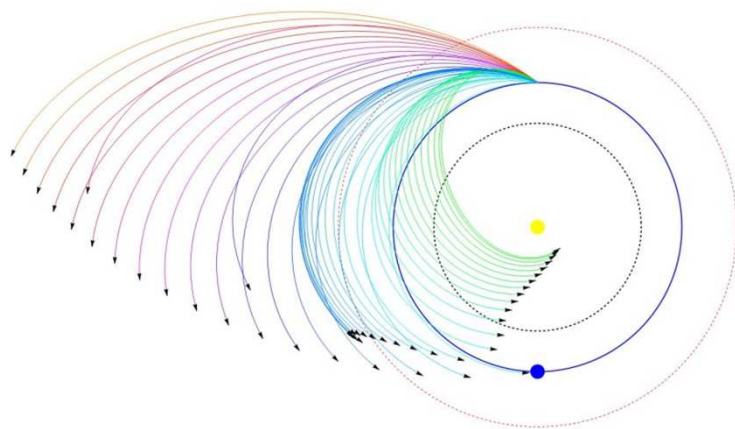
# Максимальные орбиты 48 ООЛ в Солнечной системе



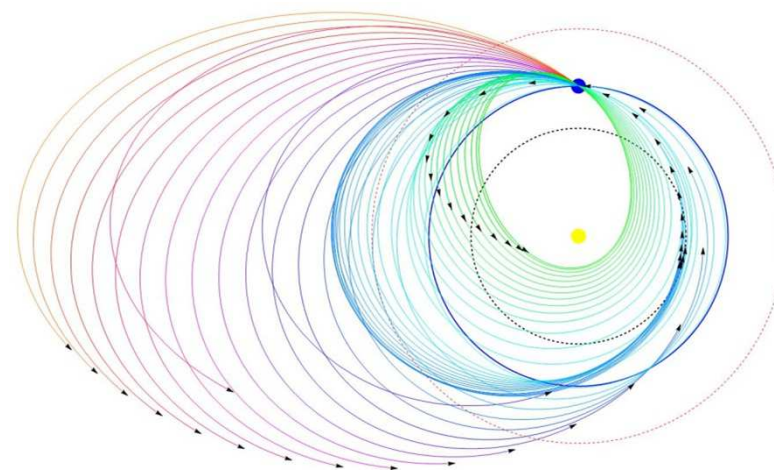
$t = 0.2$  yr



$t = 0.3$  yr

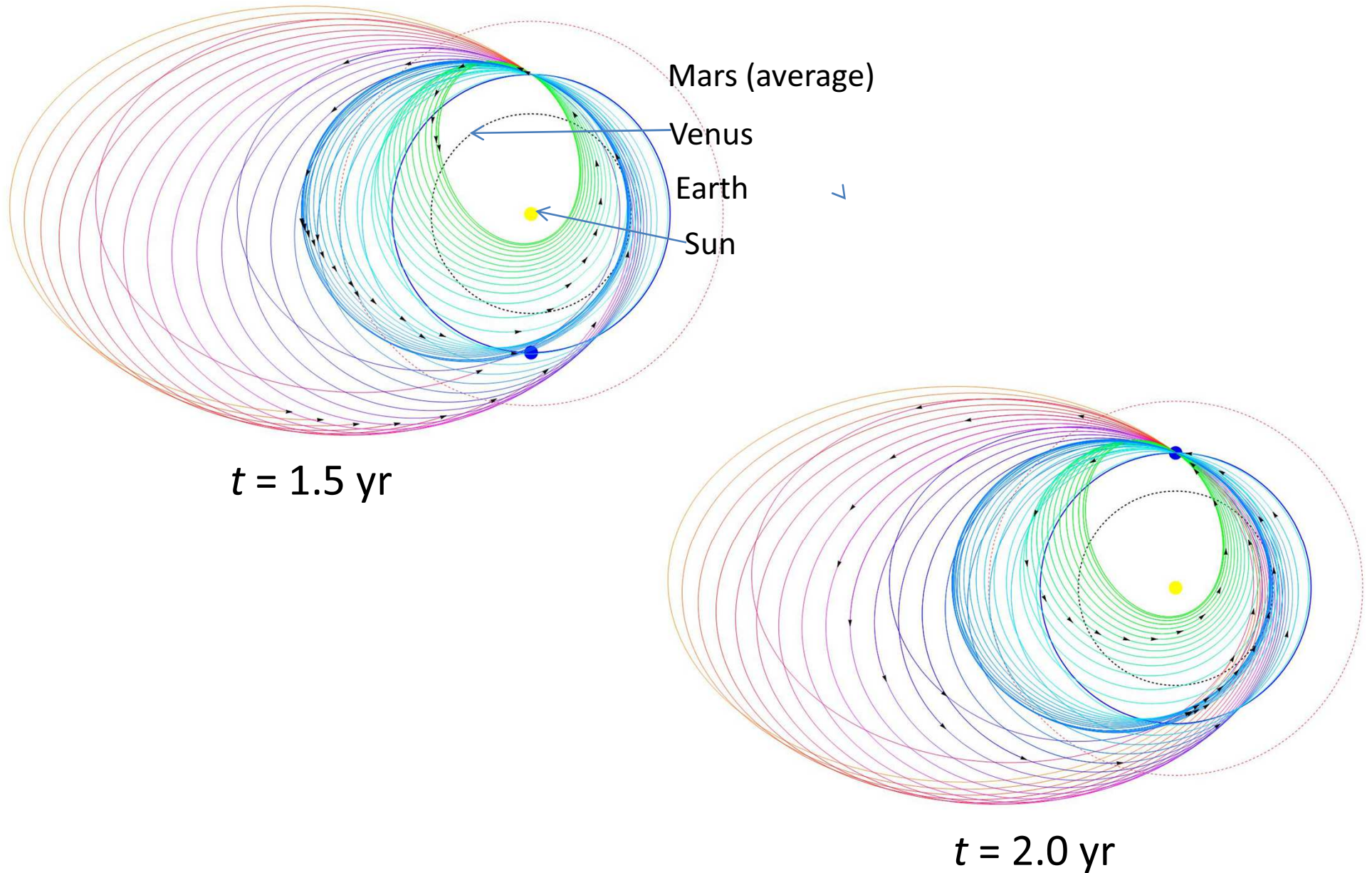


$t = 0.5$  yr

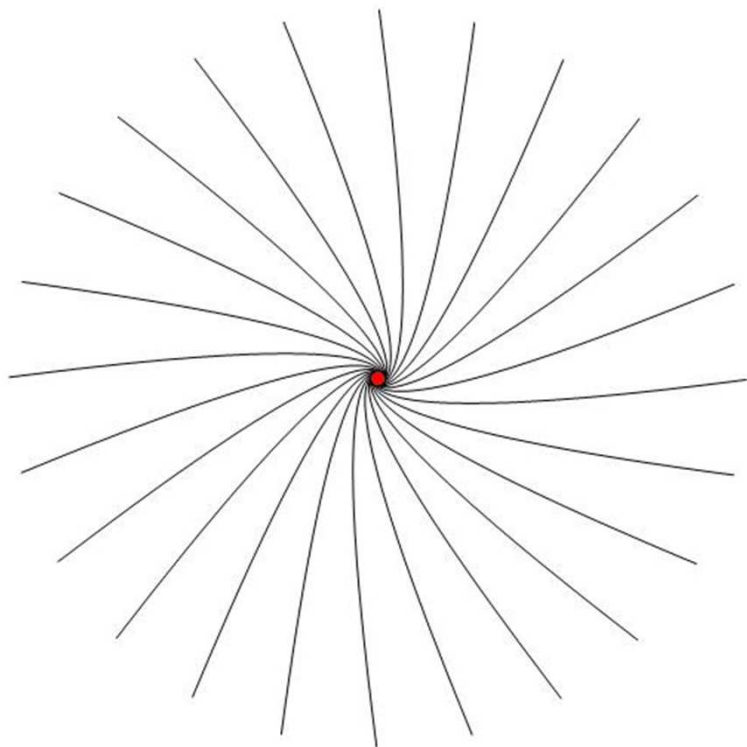


$t = 1.0$  yr

# Орбиты ООЛ и их позиции через 1.5 и 2 года

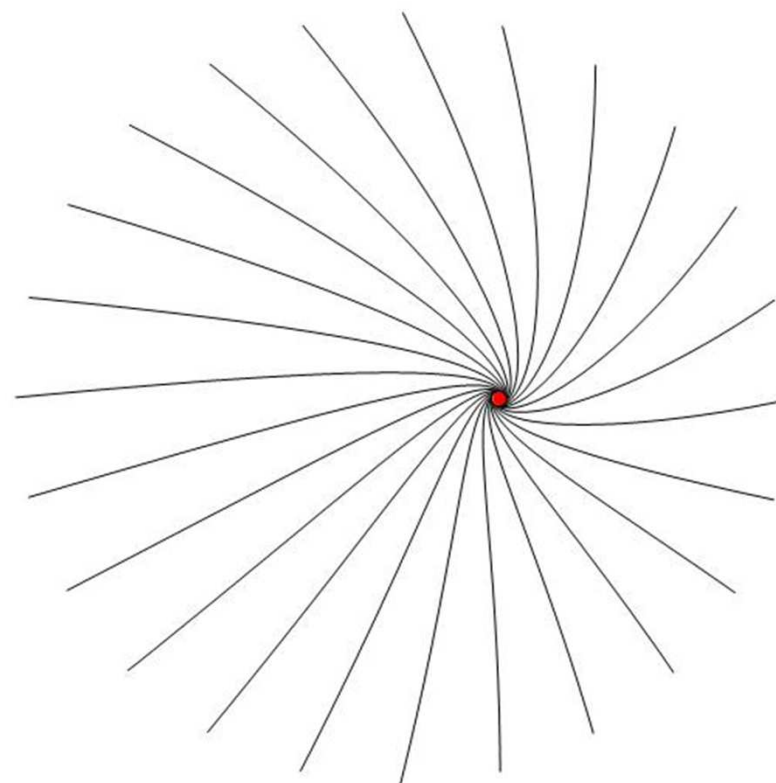


## Наибольшая доля ООЛ удаляется с минимальными скоростями



Параболические (минимальные) орбиты ООЛ в системе отсчета Земли. Убегание этих осколков происходит с экватора при падении на Землю массивных тел с эллиптических орбит. Земля вращается с периодом 6 час; скорость вращения экватора 1.9 км/с.

**С какой скоростью ООЛ или газ вылетел из точки ГС, с той и вернется в нее через период.**



Те же орбиты в системе отсчета Солнца. Большая часть этих орбит (кроме той, которая направлена вертикально вниз) оказывается достаточно близкой к орбите Земли, лишь немного ее опережая или отставая.

# Что происходило с газами, испарившимися при ГС и улетевшими на бесконечность?

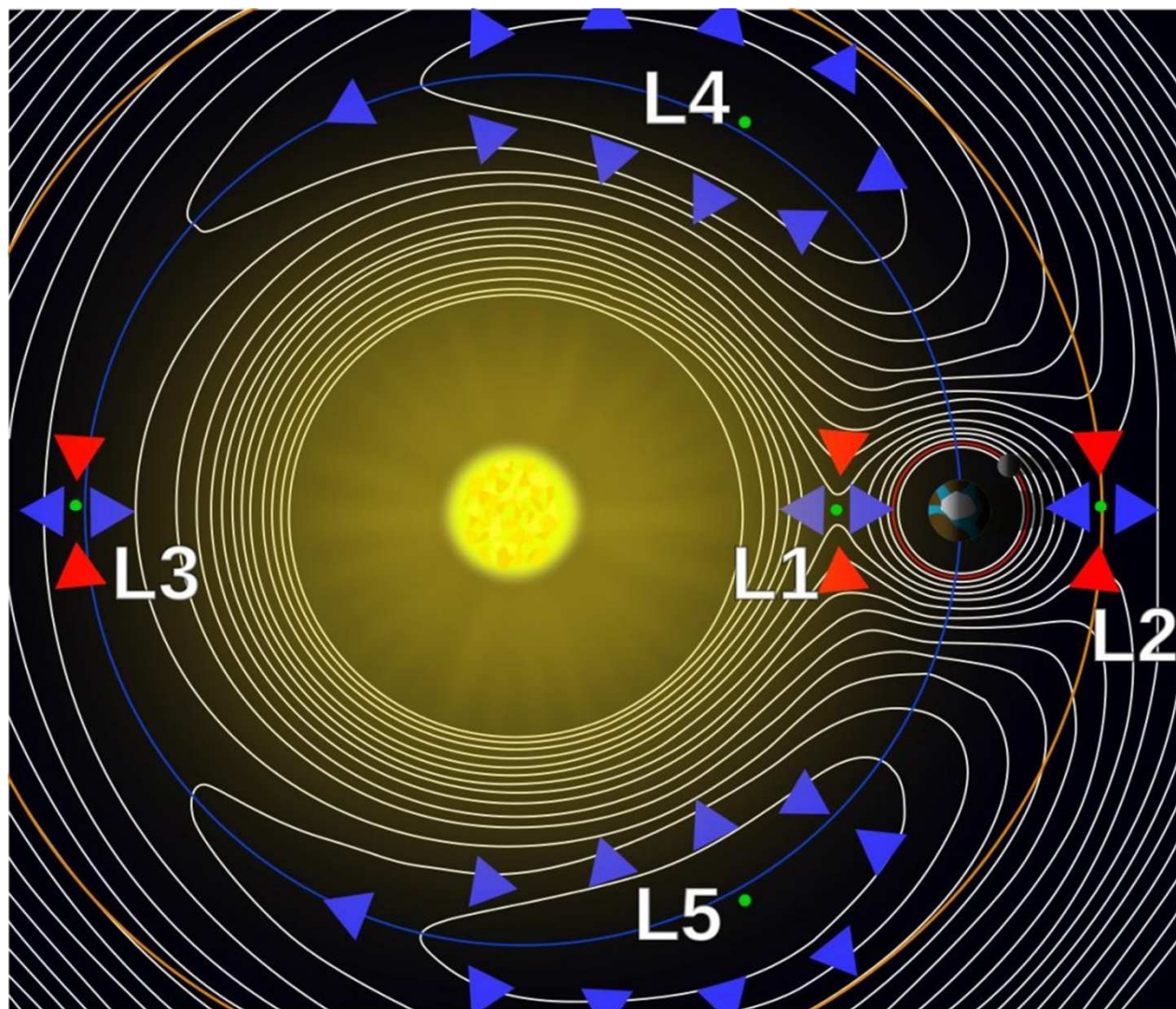
Кроме железных ядер и силикатных оболочек на обоих столкнувшихся Протопланетах были свои атмосферы и ледяные оболочки. Их влияние на расчет Гигантского столкновения (ГС) пренебрежимо мало. Но при разогреве новой Земли до 8000 К почти все летучие (вода, метан, азот и др.) также улетят в космос в газообразном виде. Их начальные траектории совпадают с траекториям ООЛ.

Испарившиеся газы быстро охлаждаются за счет адиабатического расширения и начинают конденсироваться в основном на поверхности твердых зародышей и более крупных ООЛ. В результате уже через несколько периодов обращения весь материал, испаренный при ударе, будет пролетать через точку ГС в виде газа и множества мелких тел, покрытых грязным льдом. Скорость пролета всех тел через точку ГС в среднем близка к орбитальной скорости Земли.

Влияние **струйного потока газов и грязного льда** на движение крупных ООЛ очень существенно. Оно проявляется не только при конденсации и в прямых столкновениях, но и в гравитационном увлечении мелких тел более быстрыми телами. Поэтому происходит выравнивание скоростей за счет торможения быстрых крупных и увлечения малых тел до средней скорости Земли.

В частности, в те моменты, когда угол между Землей и точкой ГС близок к  $\pm 60^\circ$ , т.е. вблизи точек Лагранжа L4 и L5 выравнивание скоростей приводит к обогащению групп земных Греков и Троянцев.

# Точки Лагранжа и астероид 2010 ТК



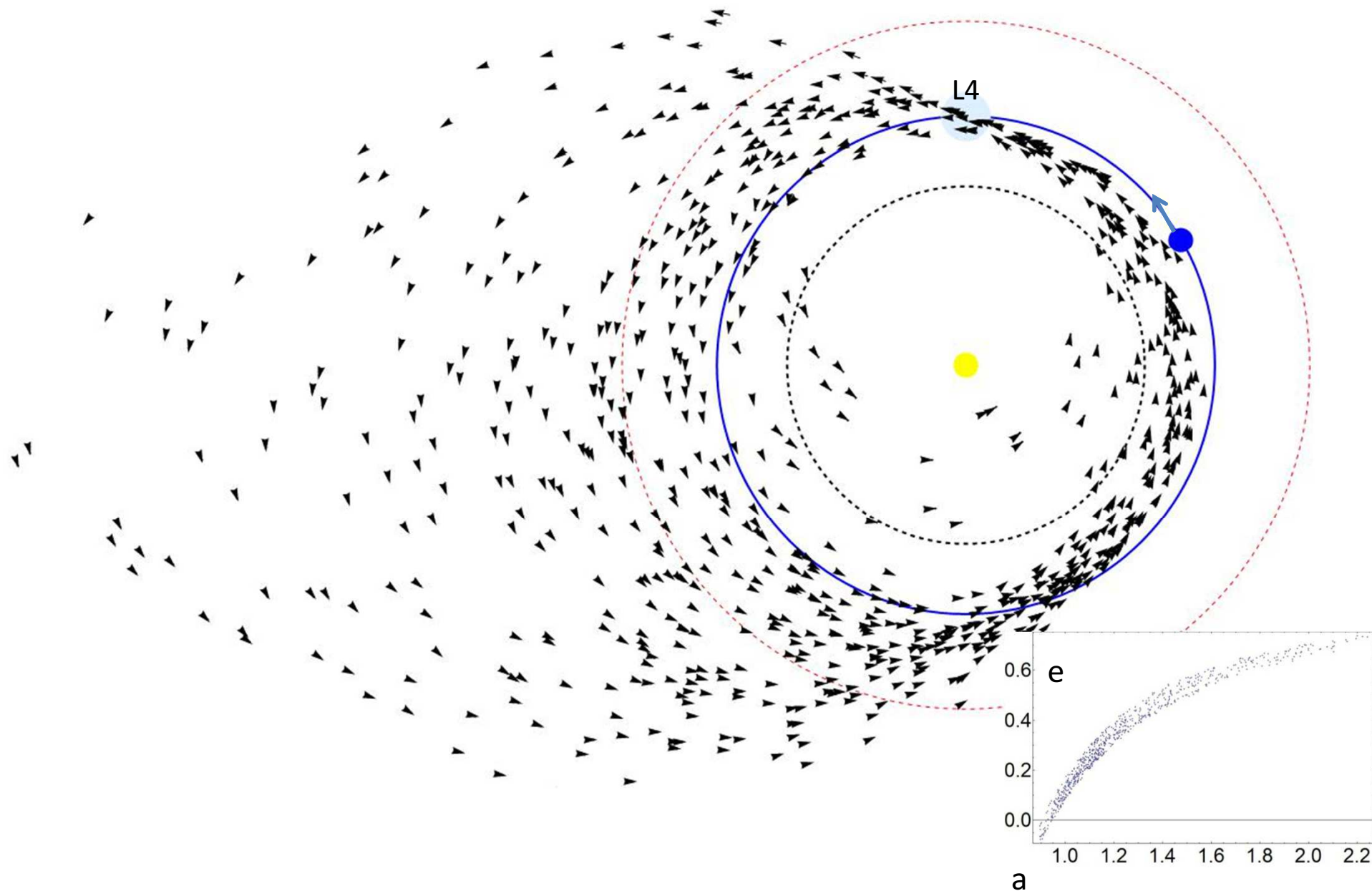
Астероид 2010 ТК открыт инфракрасным космическим телескопом WISE вблизи точки Лагранжа L4.

$T = 365.389 \text{ d} = 1003.46 \text{ yr}$ ;  
 $a = 1.00041$ ;  $e = 0.19084$  ;  
 $i = 20.882^\circ$ ;  $D = 300 \text{ m}$ .

Наблюдения тел в L4 и L5 затруднены, считается, что в L4 и L5 есть «пыль».

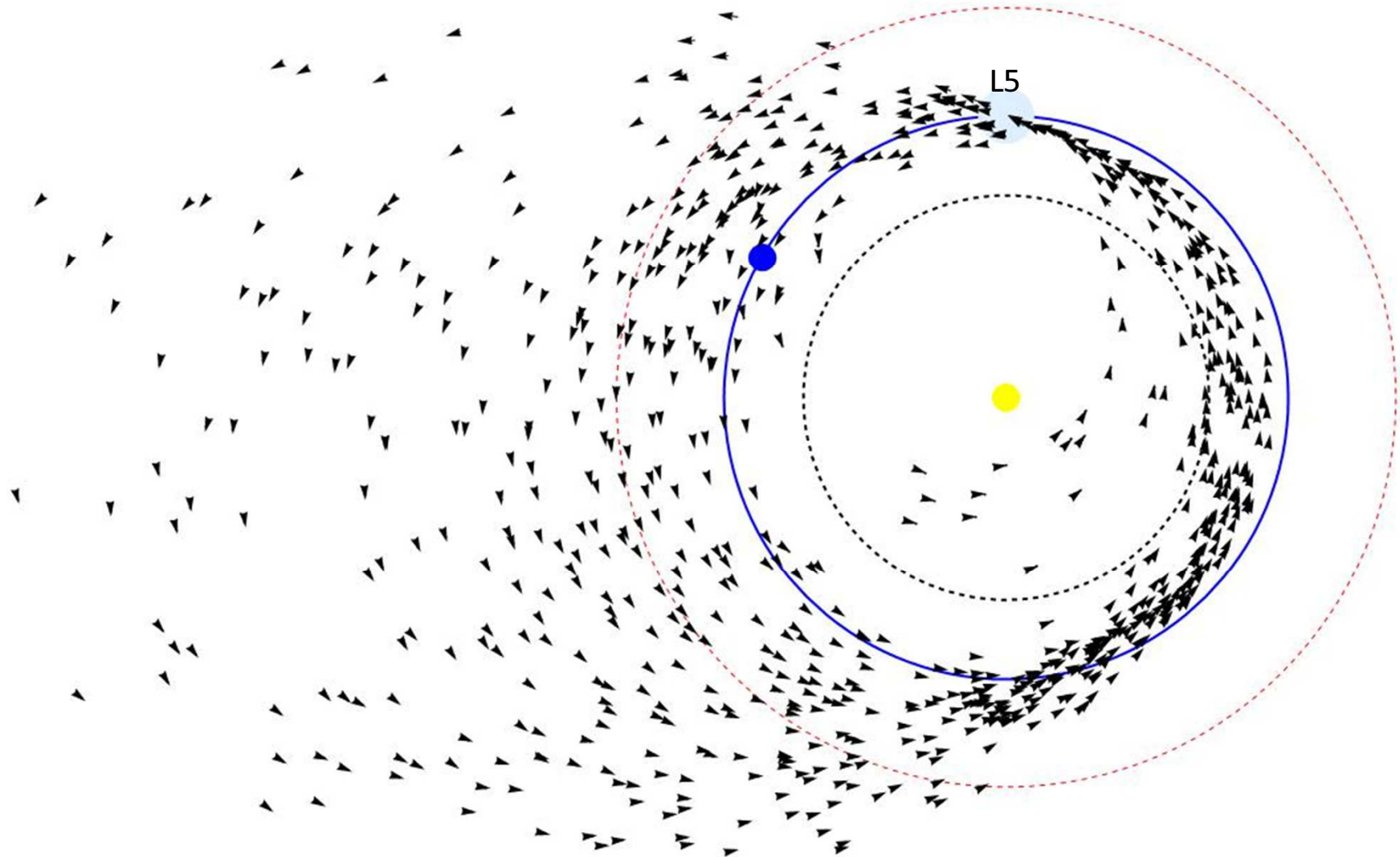
# 800 ООЛ в Солнечной системе через 300-1/6 лет после ГС

Солнце, Земля и струйный газовой-пылевой поток в точке ГС не в масштабе



# 800 ООЛ в Солнечной системе через 300+1/6 лет после ГС

Солнце, Земля и струйный газопопылевой поток в точке ГС не в масштабе



## Эволюция ООЛ и Земли в первую тысячу лет после ГС

В первые десятки лет после ГС Земля в своем движении, так же, как газы и ООЛ, раз в год еще проходит через точку ГС, но затем захваты ООЛ Землей и Луной можно оценивать только вероятностно. Температура поверхности Земли вследствие излучения резко падает с 8000 К до 500—1000 К и ниже. При этом Земля, проходя через струйный поток газов и грязного льда, становится способной удерживать пары тяжелых элементов, таких, например, как свинец Pb, а затем и менее тяжелые молекулы. Возможно, уже лет через 50-100 начинает формироваться первая атмосфера из азота, аммиака, метана и паров воды. Моделирование этих процессов сложно, но возможно.

В первые тысячи лет расплывшийся в размерах пыльно-газовый струйный поток еще тормозит крупные ООЛ, конденсируя на них лед и силикатную пыль. Часть из них попадает в Землю и Луну, другая остается в точках Лагранжа L4 и L5. Струйный поток постепенно истощается.



# Вероятности падения 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.

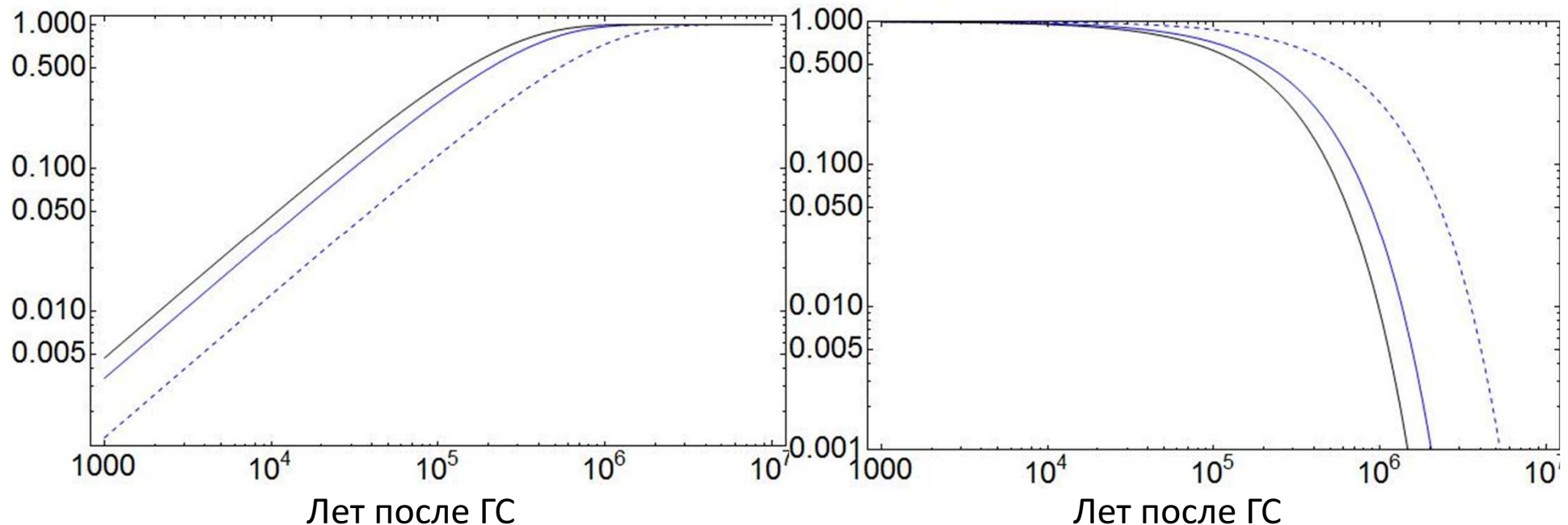
$N(t)$  – доля ООЛ в момент  $t$  после GI – убывает экспоненциально с показателем .

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	$5.8 \cdot 10^{-6}$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-12}$

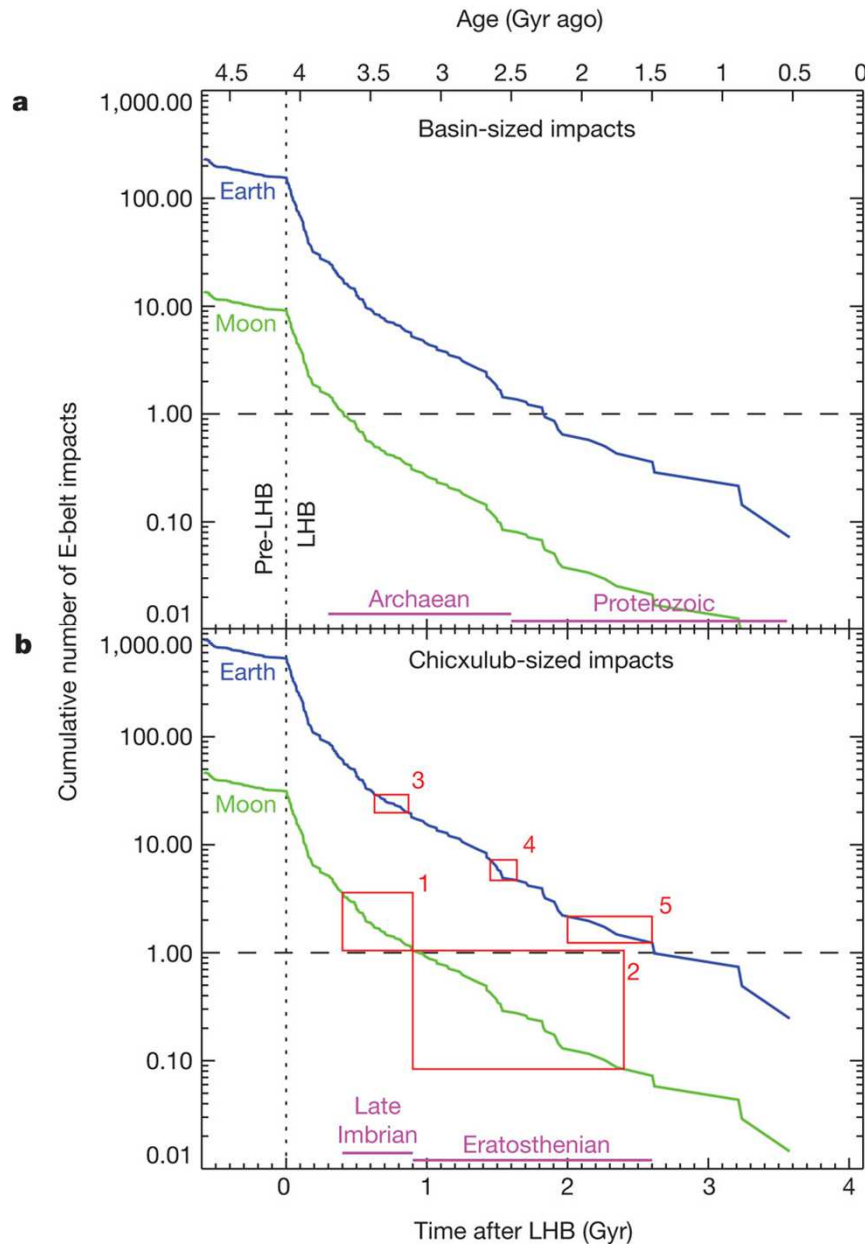
Вероятности столкновений с Марсом и Венерой оценить труднее, у них сильная зависимость от наклона плоскости ГС к эклиптике, она нам неизвестна. Но их порядок величины тот же.

## Первичная бомбардировка закончилась через 10 млн лет после ГС.

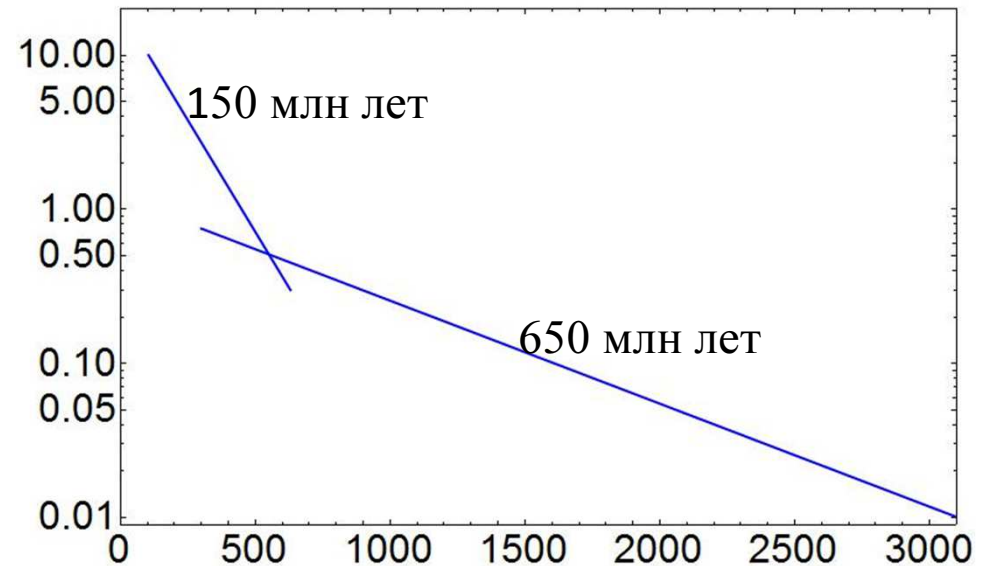
Зависимости вероятностей падения ООЛ от времени после ГС для Земли и Луны(пунктир)      Зависимости вероятностей незахвата ООЛ от времени после ГС для Земли и Луны(пунктир)



# Поздняя бомбардировка планет



Bottke W.F et al. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt: Nature, 485, 78–81 (2012)



Временные зависимости выпадения астероидов на Луну в течении 3000 млн лет после ГС (или 4.1–1.0 млрд лет до настоящего времени) пропорциональна экспонентам с характерными временами 150 и 650 млн лет. А судя по вероятности столкновения с Луной показатель экспоненты должен быть всего 3 млн лет!

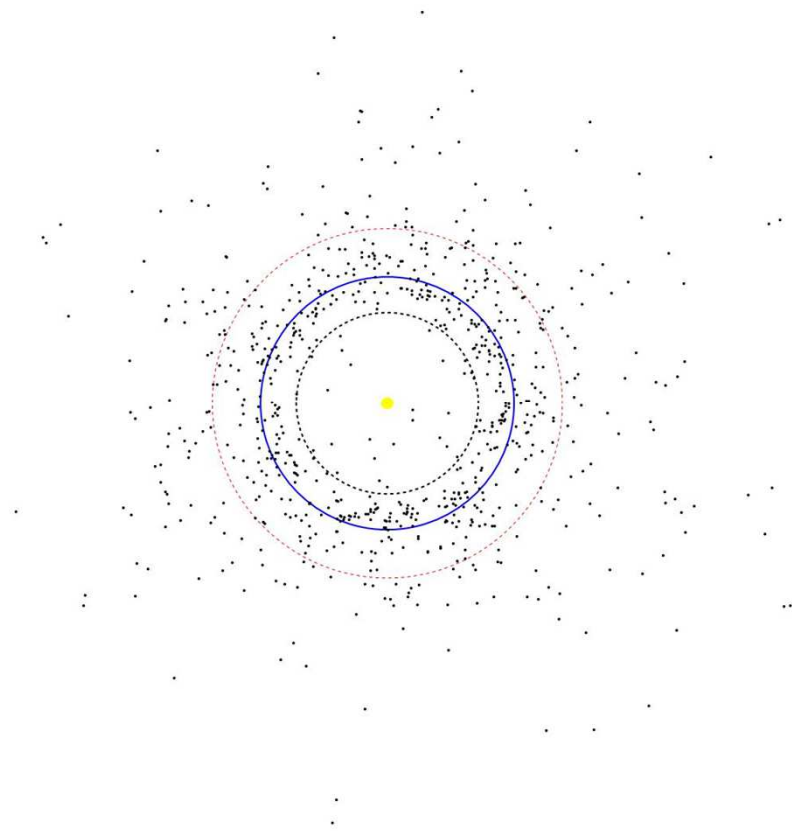
# Эволюция ООЛ после ГС

В течение  $10^3$ – $10^5$  лет все ООЛ изменяют плоскости орбит, смещают точку перигелия и точку пересечения земной орбиты, однако сохраняют свои большие оси, эксцентриситеты и наклоны орбит. Образуется почти равномерное распределение ООЛ относительно орбиты Земли с небольшими углами наклона.

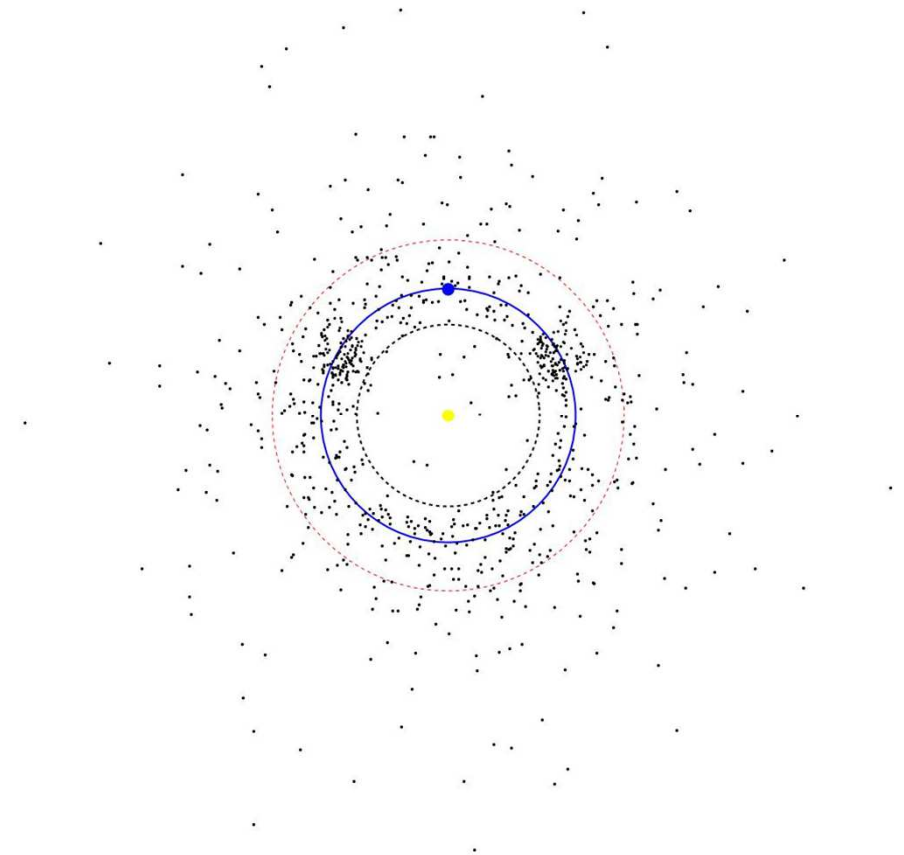
В этот отрезок времени ( $10^3$ – $10^5$  лет) вероятности столкновения ООЛ с Землей, Луной, Венерой, Марсом еще мала. Характерные времена столкновения имеют порядок величины  $10^6$  лет. Отсюда следует, что через 20 млн лет – ничтожно малом времени в геологическом масштабе – все ООЛ должны были бы исчезнуть. Но датировка лунных кратеров показывает, что процесс поздней тяжелой бомбардировки затухал с характерным временем порядка 600 млн лет. На мой взгляд решение проблемы в анализе устойчивости частиц в точках Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$ .

Эта задача не решена теоретически, но может быть исследована численно.

Эволюция орбит в Солнечной системе через  $10^4$  лет после ГС ( $a, e, i = \text{const}$ ; плоскости орбит и их перигелии смещаются. )

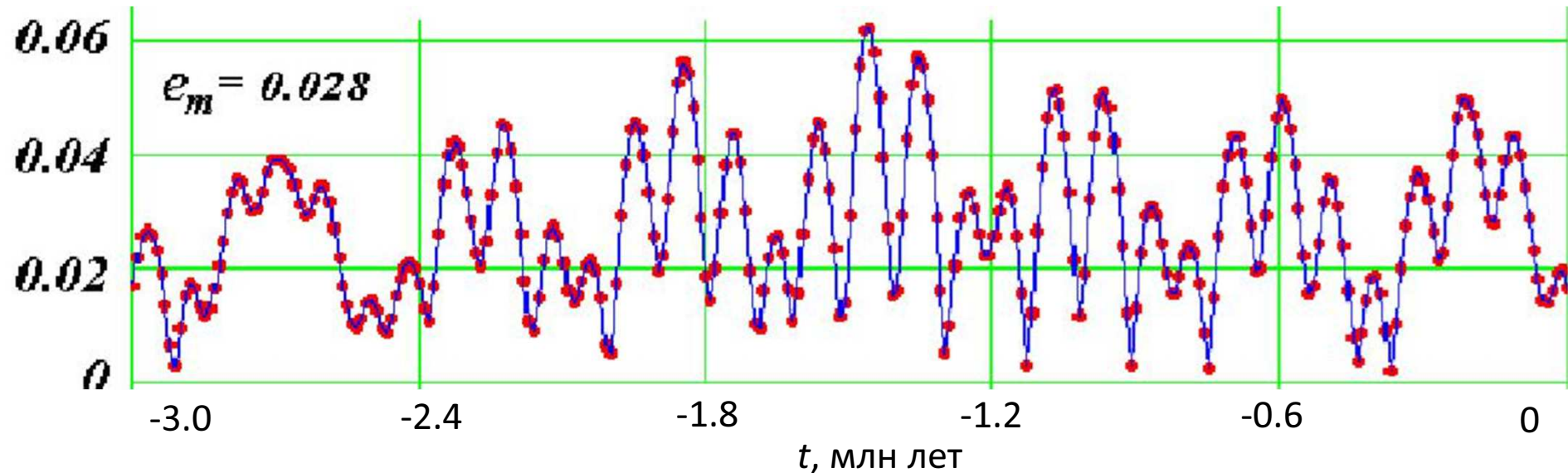


ООЛ через  $10^4$  лет после ГС в Системе отсчета Солнце-Земля: происходит накопление ООЛ в точках Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$



# Вариации эксцентриситета земной орбиты

Шараф, Будникова (1969), Мельников, Смутьский И.И. (2005).



Эксцентриситет земной орбиты  $e$  варьируется в пределах от 0 до 0.062 с основным периодом около 100 тыс. лет. При экстремальных значениях  $e$  устойчивость траекторий ООЛ около точек Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$  должна существенно нарушаться. Это может приводить к частичному выбросу ООЛ из устойчивых орбит вблизи  $L_4$  и  $L_5$  и последующему попаданию их в Землю и Луну. *Утверждение требует численного подтверждения и исследования теорией возмущений.*

Возможно, этот процесс и приводит к постепенному опустошению устойчивых областей около точек Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$  с характерным временем порядка 700 млн лет. Что и объяснит ЛНВ – позднюю бомбардировку.

# Осколки образования Луны (задачи проекта)

1. Задачи орбит осколков. Их точность невелика (угол между плоскостью удара и эклиптической неизвестен, считаем его достаточно малым).
  - 1a. По кадрам разлета первых осколков находим зависимость их максимальных скоростей на бесконечности в системе отсчета Земли от угла вылета (максимальную «розу» разлета).
  - 1b. Находим зависимость минимальных скоростей на бесконечности в системе отсчета Земли от угла вылета (минимальную «розу» разлета).
  - 1c. Моделируем распределение скоростей в системе Земли между минимальными и максимальными.
  - 1d. Переходим в систему отсчета Солнца, рассчитываем орбиты совокупности осколков.
  - 1e. Рассчитываем эволюцию орбит:  $a, e, i = \text{const}$ ; плоскости орбит и перигелии смещаются.
  - 1f. Уточняем вероятности падения на Землю, Луну, а также на Венеру и Марс.
  
2. Задачи 3 тел: Солнце, Земля на эллиптической орбите с небольшим эксцентриситетом  $e$  и малое тело вблизи точек Лагранжа L4 и L5. Развиваем теорию (разложение высоты потенциального барьера устойчивости по степеням  $e$ , *(не исключая, что задача уже была кем-то решена)* и сравниваем с численными расчетами.
  - 2a. Расчет торможения и выравнивания скоростей в струйном газовой-пылевом потоке, приводящем к захвату ООЛ в L4 и L5 для тел, движущихся по орбитам с  $a = 1 \pm 0.1$ .
  - 2b. Расчет вероятностей выброса тел из L4 и L5 при вариациях эксцентриситета Земли  $e < 0.07$  и их дальнейшего столкновения с Землей и Луной.

# Геологические следствия: 1. Океан

Расчеты гигантского воздействия были сделаны для двухкомпонентных планет Fe и SiO<sub>2</sub>. Однако обе планеты были покрыты водным льдом, ее масса была незначительной для этого моделирования. Во время гигантского удара температура Земли возросла до 8000 K; таким образом, не только весь лед испарился, но и вся кристаллическая вода и другие летучие вещества ушли в космос. Скорости молекул газов при 8000K больше 12 км/с. Основная часть воды, метана и иных летучих вышла из системы Земля-Луна и стала двигаться по тем же орбитам СС, что и силикатные фрагменты; газ адиабатически охлаждается; вода и летучие конденсируется на быстро остывающих астероидах.

Когда эти фрагменты, покрытые льдом, сталкиваются с Луной, эта вода испаряется. Однако, когда они сталкиваются с Землей, их ледяной покров испаряется и становится земной атмосферой и океаном. Традиционный геологический взгляд на океанское происхождение иной: геологи связывают его с ювенильными водами, поднимающимися к поверхности вследствие гравитационной дифференциации. Однако после гигантского удара Земля была абсолютно сухой.

Имеются также обширные геологические свидетельства того, что в течение периода поздней бомбардировки Земля была обогащена редкими металлами.

## Геологические следствия: 2. Избыток кислорода на Земле

Считается, что весь кислород атмосферы возник в результате фотосинтеза, следовательно, количество восстановленного углерода должно быть равно:

$$M_{\text{atm}} = 5.148 \cdot 10^{18} \text{ kg} = 5 \cdot 10^{18} \text{ kg}; \quad M_{\text{O}_2} = 1.0 \cdot 10^{18} \text{ kg}.$$

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ ;  $12 \text{ C} \rightarrow 32 \text{ O}_2$ .  $10^{18} \text{ kg O}_2 \rightarrow 3 \cdot 10^{17} \text{ kg C}$ . Запасы восстановленного С:

Уголь:  $1.4810 \cdot 10^{16} \text{ кг} \Rightarrow 1.5 \cdot 10^{16} \text{ kg C}$

Биомасса:  $2.423 \cdot 10^{15} \text{ kg} \Rightarrow 2.4 \cdot 10^{15} \text{ kg C}$

Метан:  $400 \cdot 10^{12} \text{ м}^3 \Rightarrow 10^{14} \text{ kg C}$

Всего С в восстановленном виде:  **$2 \cdot 10^{16} \text{ kg C}$** .

**Расхождением на порядок можно было бы пренебречь:** данные не точны.

Но! Геологи твердо утверждают, что первичная атмосфера Земли была **восстановительной**, она состояла из метана, аммиака и азота,

А карбонаты?:  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ;  $100 \rightarrow 44 (32)$ ;  $1.8 \cdot 10^{20} \text{ kg CO}_2 \rightarrow 1.3 \cdot 10^{20} \text{ kg O}_2$

**Расхождение на 3 порядка величины!**

Возможный источник  $\text{O}_2$ :  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0.5 \text{ O}_2$ ; эта реакция происходит при входе в атмосферу крупных тел с размером  $D > 100 \text{ м}$ . При этом легкий водород уходит в космос, а атмосфера обогащается кислородом.



## Реакции окисления при входе крупных астероидов в атмосферу

Рассмотрим вход в первичную восстановительную атмосферу Земли тела с размером  $D > 100$  м, покрытого льдом, со скоростью около 12 км/с, т.е. с числом Маха  $M=20-30$ . Давление на фронте ударной волны пропорционально  $M^2$ ; температура  $T \sim T_0 M^{2(\gamma-1)/\gamma} = T_0 M^{4/5}$ . По адиабате Гюгонио оценки давления и температуры еще выше. Эти условия достаточны для диссоциации воды. Атомарный кислород вступает реакцию с метаном и аммиаком.

**Двукратное увеличение объема газов** почти во всех реакциях способствует их ускоренному движению в область низкого давления в задней части следа астероида. Легкий водород  $H_2$  лидирует в этом процессе, развивает существенную вертикальную скорость и в конечном счете улетает в космос.

Поздняя бомбардировка существенно обогащает планету кислородом, окисляя первичную атмосферу Земли. В азотно-кислородной атмосфере процесс ее обогащения кислородом при падении астероида продолжается:



# Literature

Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Minton D. , Nesvorny D. , Morbidelli A., Brassier R., Simonson B. & Levison H.F. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt NATURE 485 78 –81 (2012)

Schlichting H.E., Warren P.H., & Yin Q.-Z. The last stages of terrestrial planet formation: dynamical friction and the late veneer. The Astrophysical Journal, 752:8 (2012).

Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Barnes J.J. , Kring D.A., Tarte`selan R., Franchi A., Anand M.& Russell S.S. An asteroidal origin for water in the Moon. Nature Communications, 7:11684, DOI: 10.1038.

Raluca Rufu, Oded Aharonson & Hagai B. Perets A multiple-impact origin for the Moon Nature Geoscience 10, 89–94 (2017) doi:10.1038/ngeo2866.

Greenwood, J. P. et al. Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon. Nat. Geosci. 4, 79–82 (2011).

Hallis, L. J. et al. Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. Science 350, 6262 (2015).

Morbidelli, A., Marchi, S., Bottke, W. F. & Kring, D. A. A sawtooth-like timeline for the first billion years of lunar bombardment. Earth Planet. Sci. Lett. 355-356, 144–151 (2012).

Hauri, E. H., Saal, A. E., Rutherford, M. J. & Van Orman, J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences. Earth Planet. Sci. Lett. 409, 252–264 (2015).

V, Cr, and Mn in the Earth, Moon, EPB, and SPB and the origin of the Moon: Experimental studies Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 53, Issue 8, August 1989, Pages 2101-2111

Спасибо за внимание