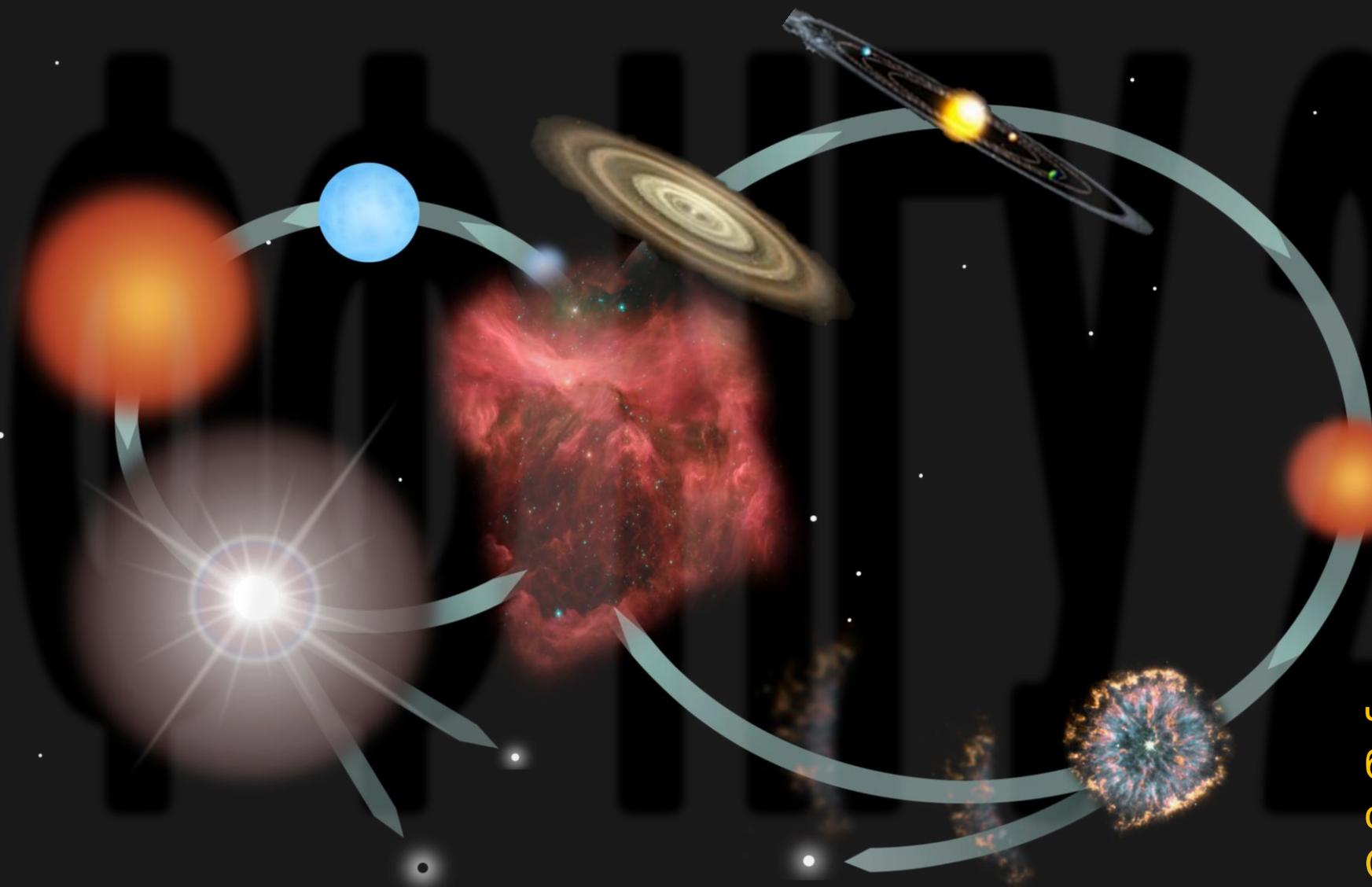


# Лекция 11

## Солнечная система

ФФ НГУ, 2024

# Рождение планетной системы



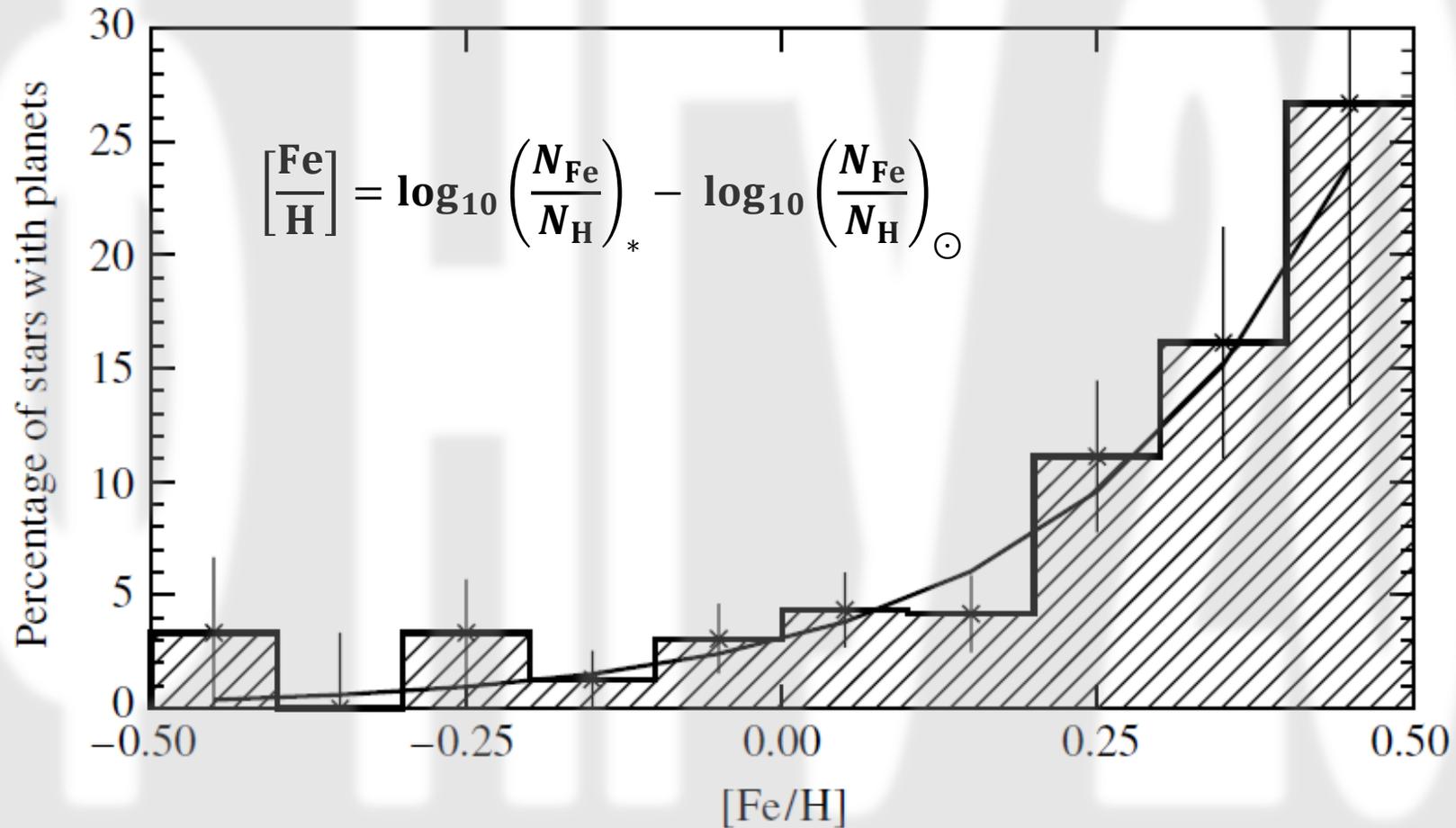
Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

После обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами, стало возможным образование твердых планет.

Есть основания полагать, что ударная волна от взрыва близкой сверхновой могла стать триггером образования Солнечной системы.

# Рождение планетной системы

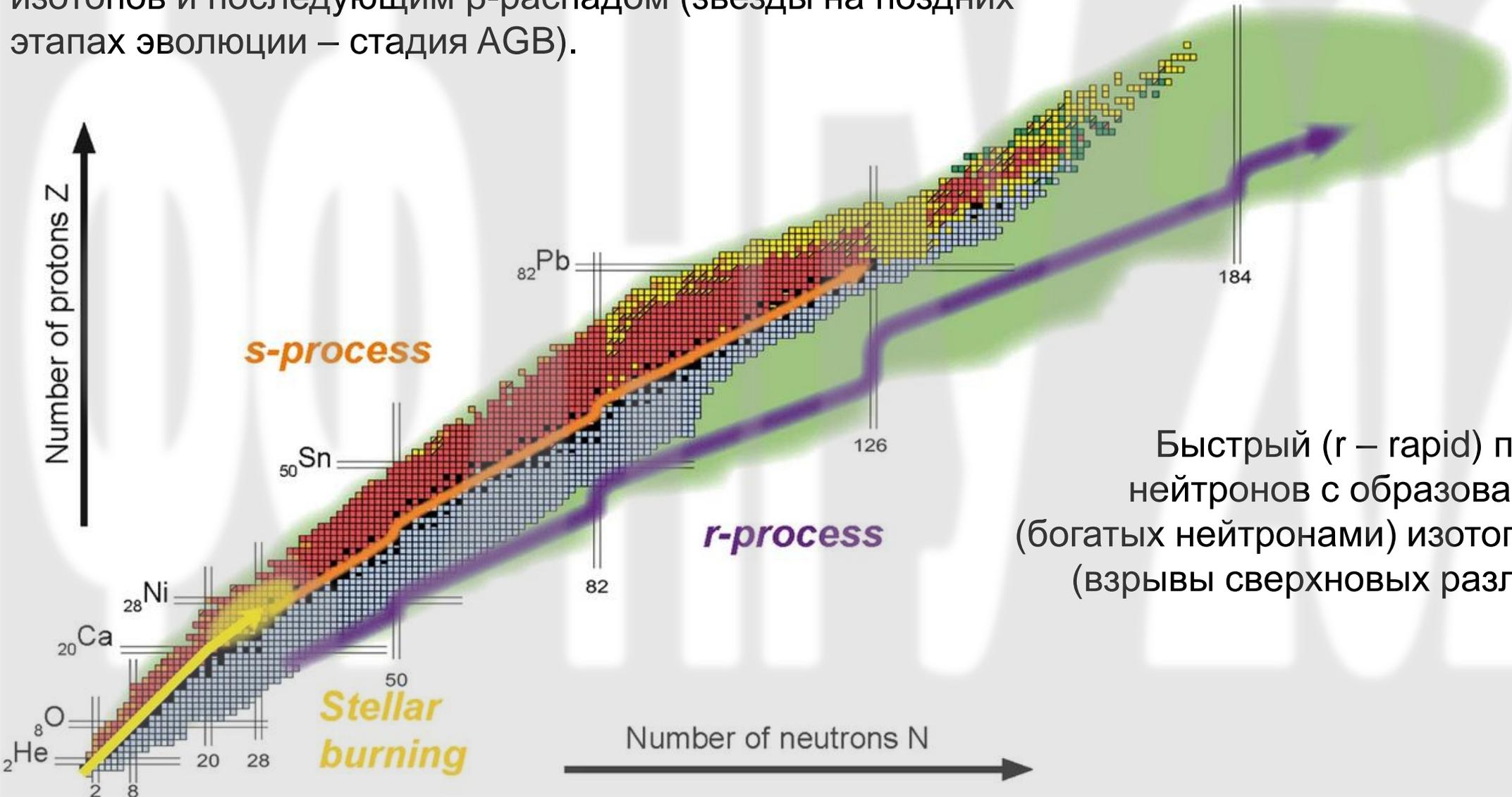
Наличие тяжелых элементов в протозвездном облаке является критическим условием образования планетной системы.



Доля звезд, обладающих планетной системой, быстро растет с увеличением металличности звезды.

# Синтез тяжелых элементов

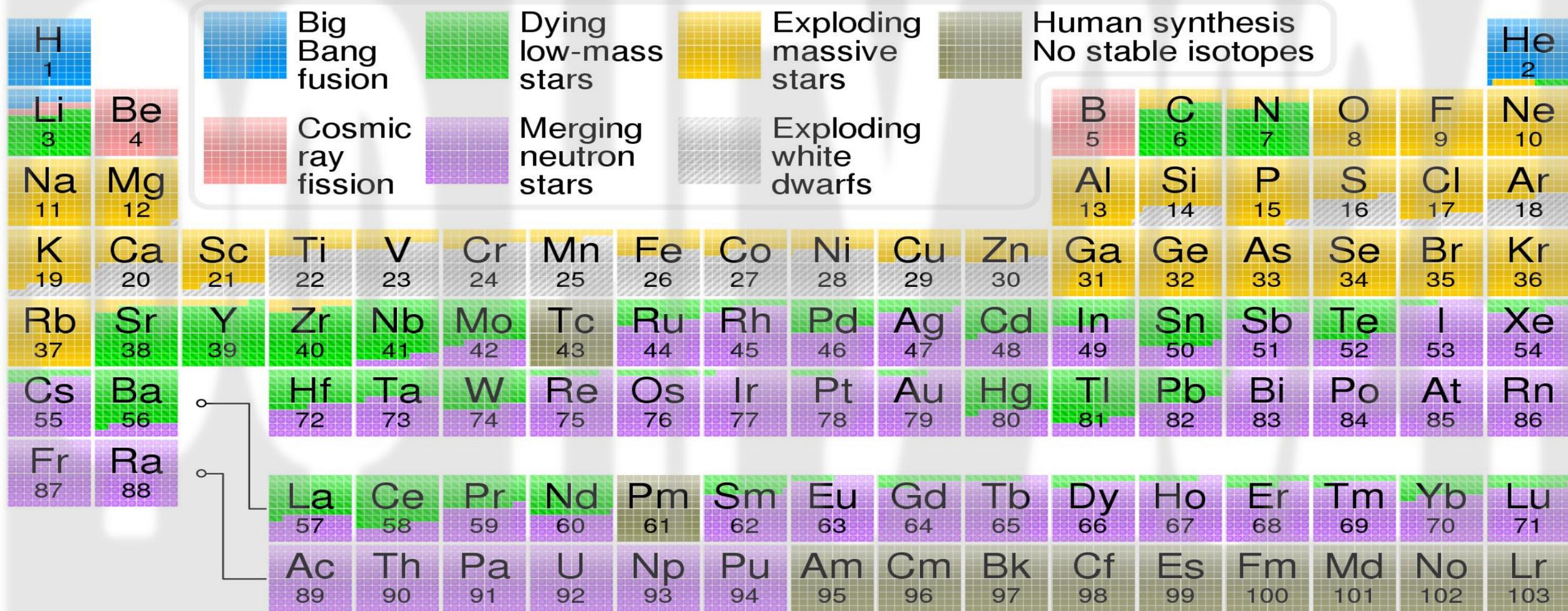
Медленный (s – slow) захват нейтронов с образованием тяжелых изотопов и последующим  $\beta$ -распадом (звезды на поздних этапах эволюции – стадия AGB).



Быстрый (r – rapid) процесс захват нейтронов с образованием тяжелых (богатых нейтронами) изотопов элементов (взрывы сверхновых различных типов).

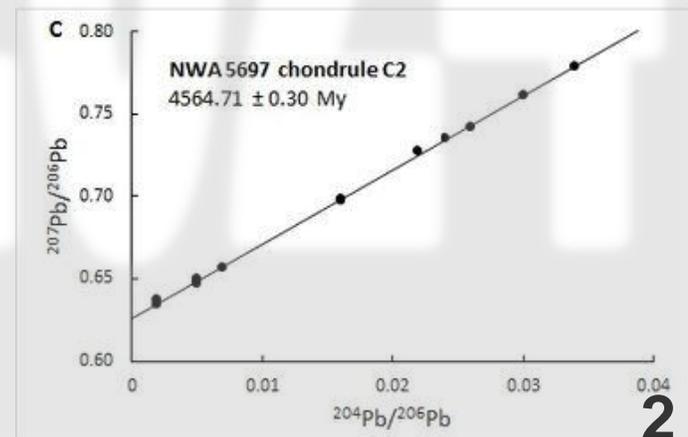
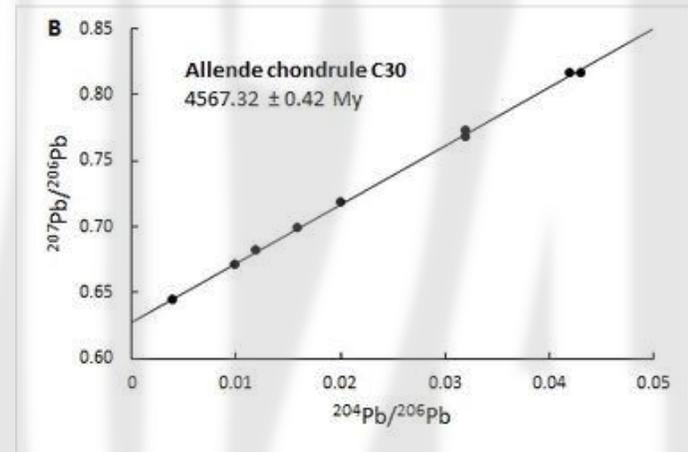
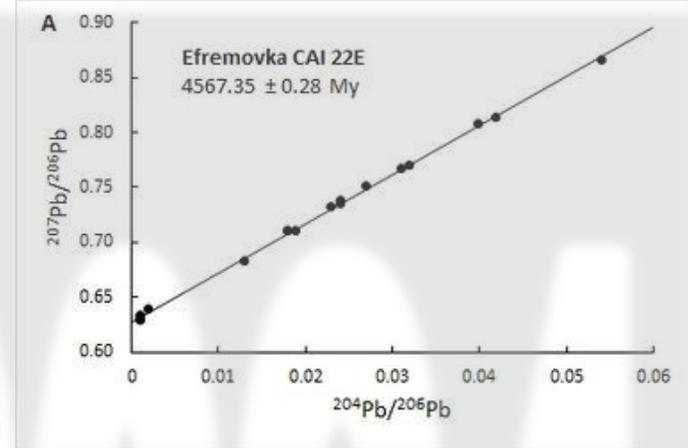
# Синтез элементов

В катастрофических процессах финальной стадии «жизни» тяжелых звезд образуется вещество для нового этапа эволюции Вселенной – образование планетных систем (следующая лекция) и жизни.



# Возраст Солнечной системы

Наиболее точное определение возраста Солнечной системы производится по кальциево-алюминиевым включениям в метеоритах и с помощью изотопного Pb-Pb метода.



Pb 204, 206, 207 – стабильные изотопы, при этом:

$^{204}\text{Pb}$  – только первичный;

$^{206}\text{Pb}$  – конечный продукт цепочки распада  $^{238}\text{U}$ ,  $\tau_{238} \approx 0.70$  Глет;

$^{207}\text{Pb}$  – конечный продукт цепочки распада  $^{235}\text{U}$ ,  $\tau_{235} \approx 4.67$  Глет;

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}\right)_t = b + a \left(\frac{^{204}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}\right)_t; \quad b = \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{235}\text{U}}\right)_t \times \left(\frac{e^{t/\tau_{235}} - 1}{e^{t/\tau_{238}} - 1}\right)$$

То есть отношения изотопов Pb 207/206 и 204/206 линейно связаны.

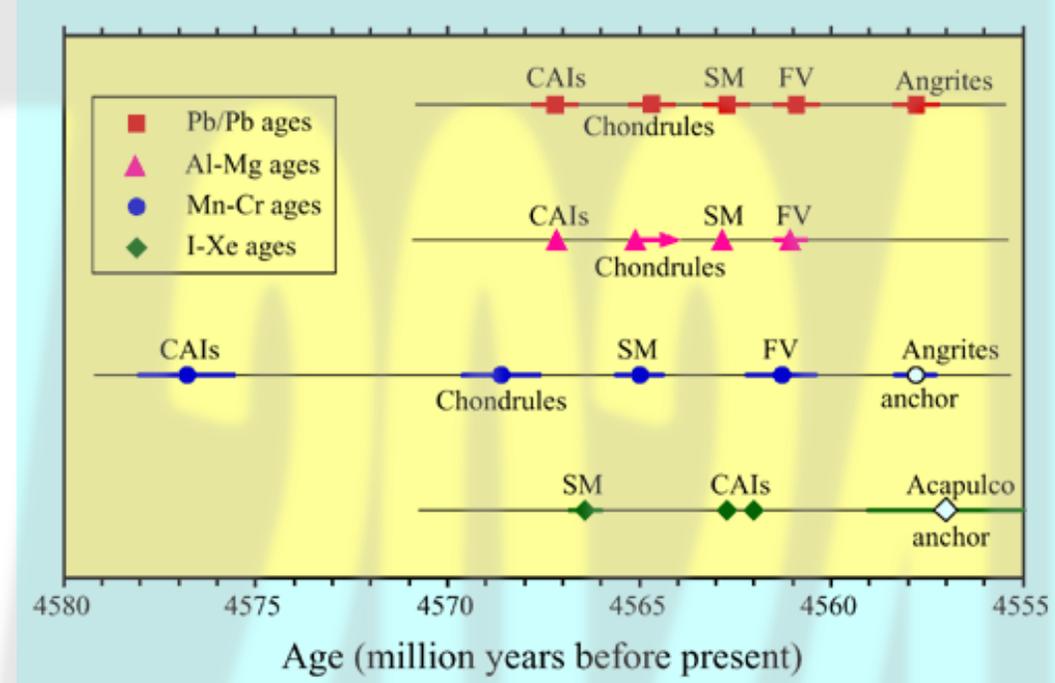
# Возраст Солнечной системы

Существует множество вариаций изотопного метода, использующие разные элементы.

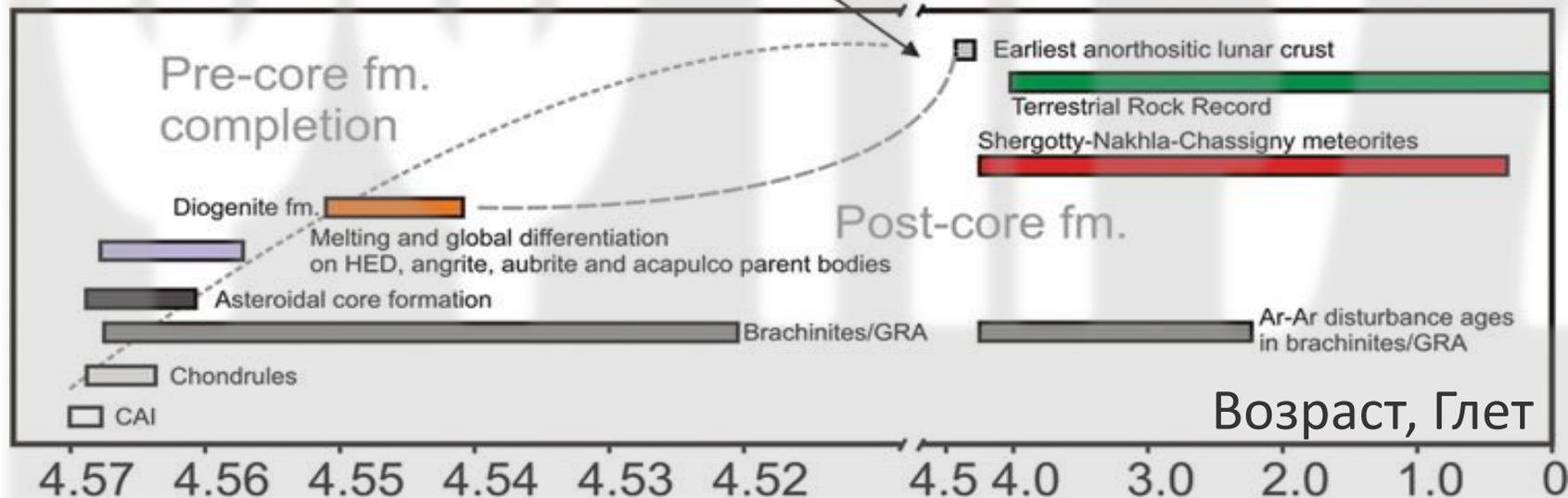
Среднее значение возраста Солнечной системы:

**4.567 Глет**

с точностью масштаба несколько миллионов лет.



Earth-Moon system fm.



Наличие изотопа  $^{26}\text{Al}$  в кальций-алюминиевых включениях указывает на взрыв близкой сверхновой на этапе формирования Солнечной системы.

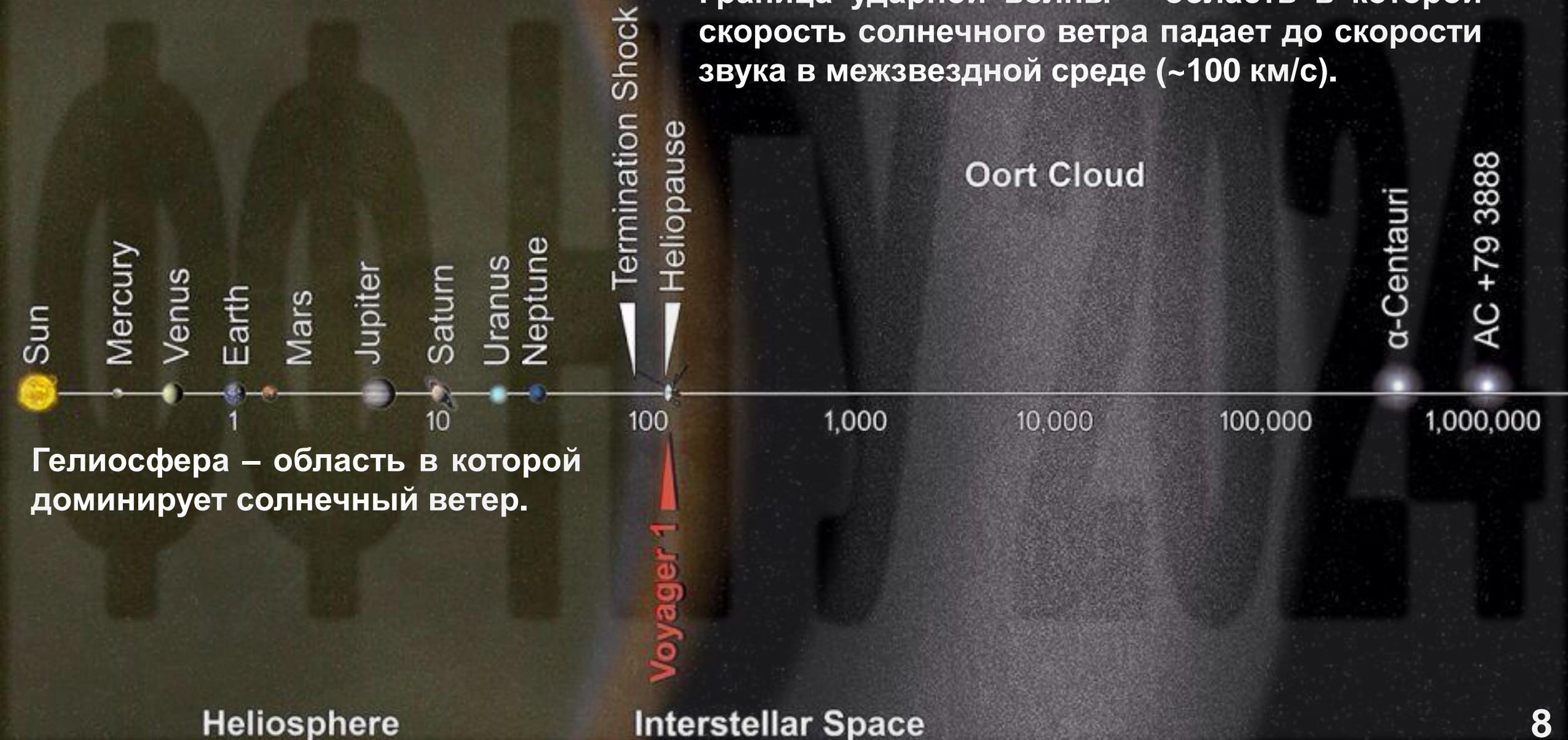


Период полураспада:

$$T_{1/2}(^{26}\text{Al}) = 717 \text{ тыс. лет.}$$

# Размеры и структура Солнечной системы

Граница ударной волны – область в которой скорость солнечного ветра падает до скорости звука в межзвездной среде (~100 км/с).

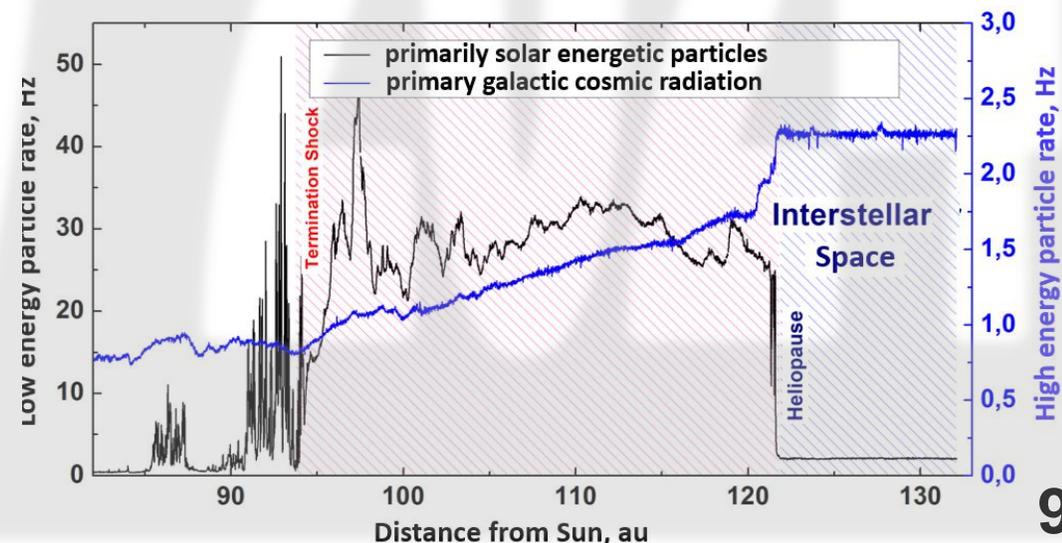
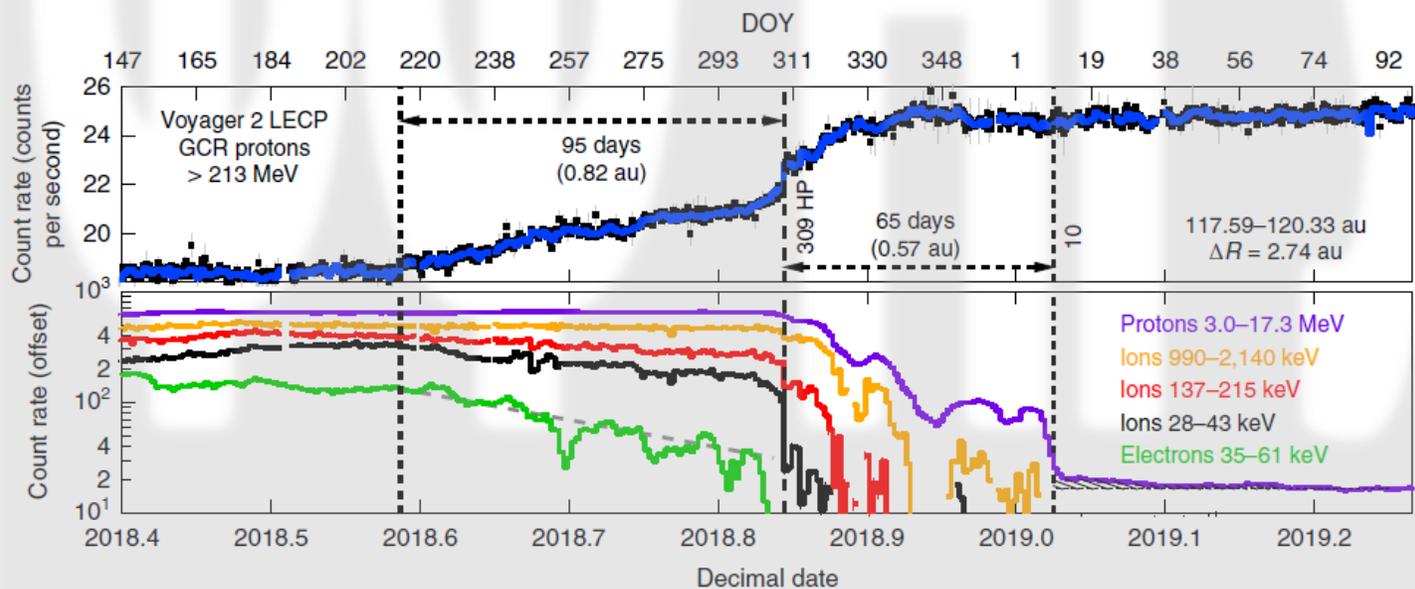
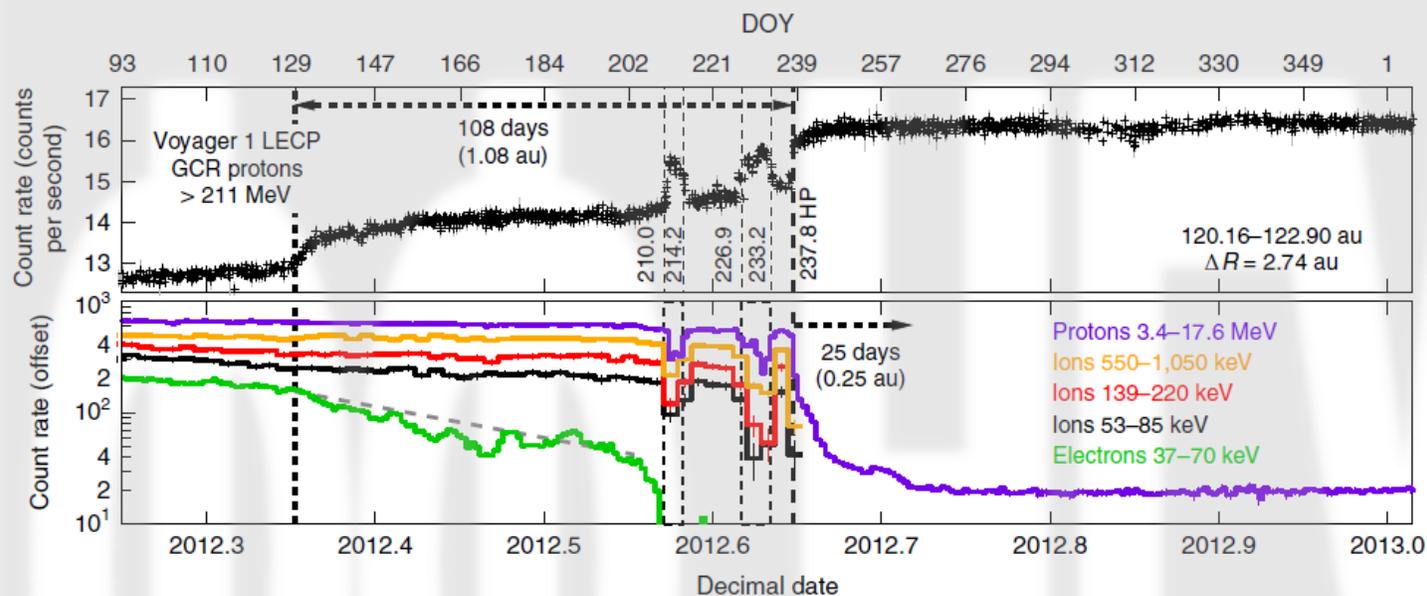


Гелиосфера – область в которой доминирует солнечный ветер.

# Гелиопауза «глазами» Вояджеров

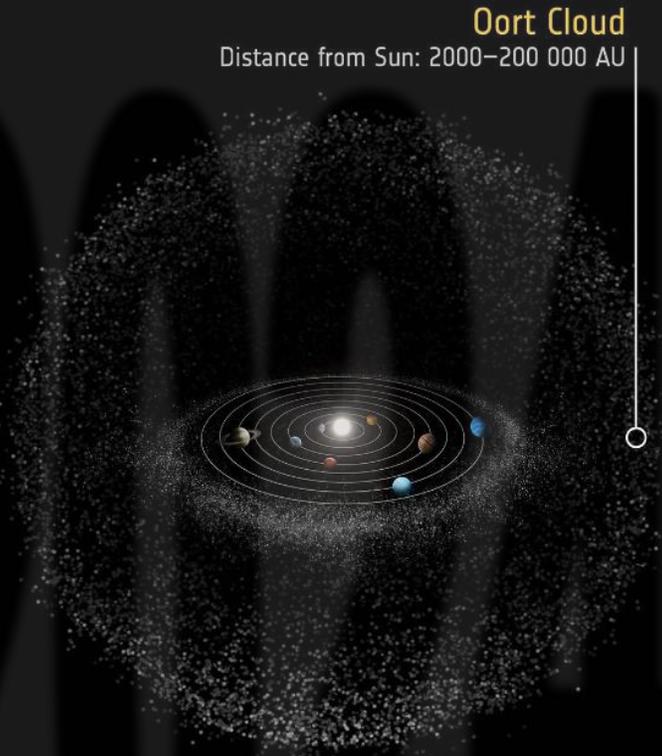
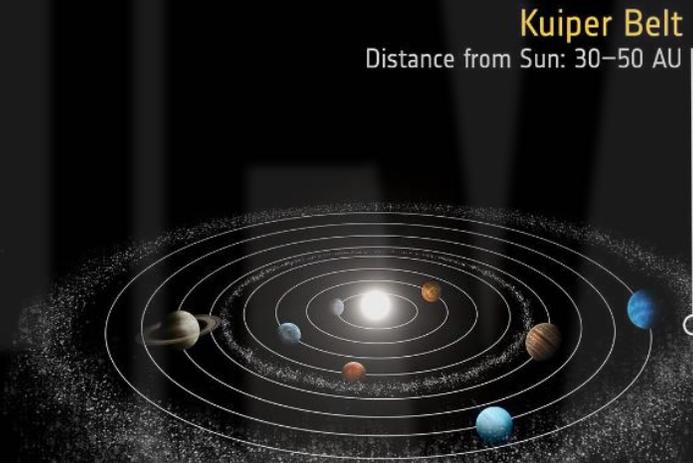
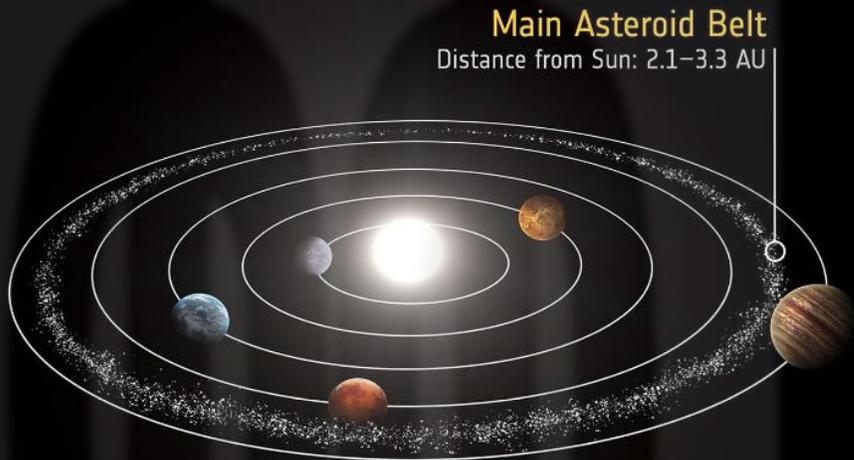
## Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space

На расстоянии около ~120 а.е. оба аппарата Вояджер зарегистрировали резкое снижение интенсивности солнечного ветра ( $E < 20$  МэВ) и увеличение интенсивности галактических частиц высокой энергии ( $> 200$  МэВ).



# Размеры и структура Солнечной системы

Планеты располагаются на расстояниях <30 а.е. от Солнца.



1 AU = Earth–Sun distance ~150 million km  
*This infographic is representative and not to scale.*

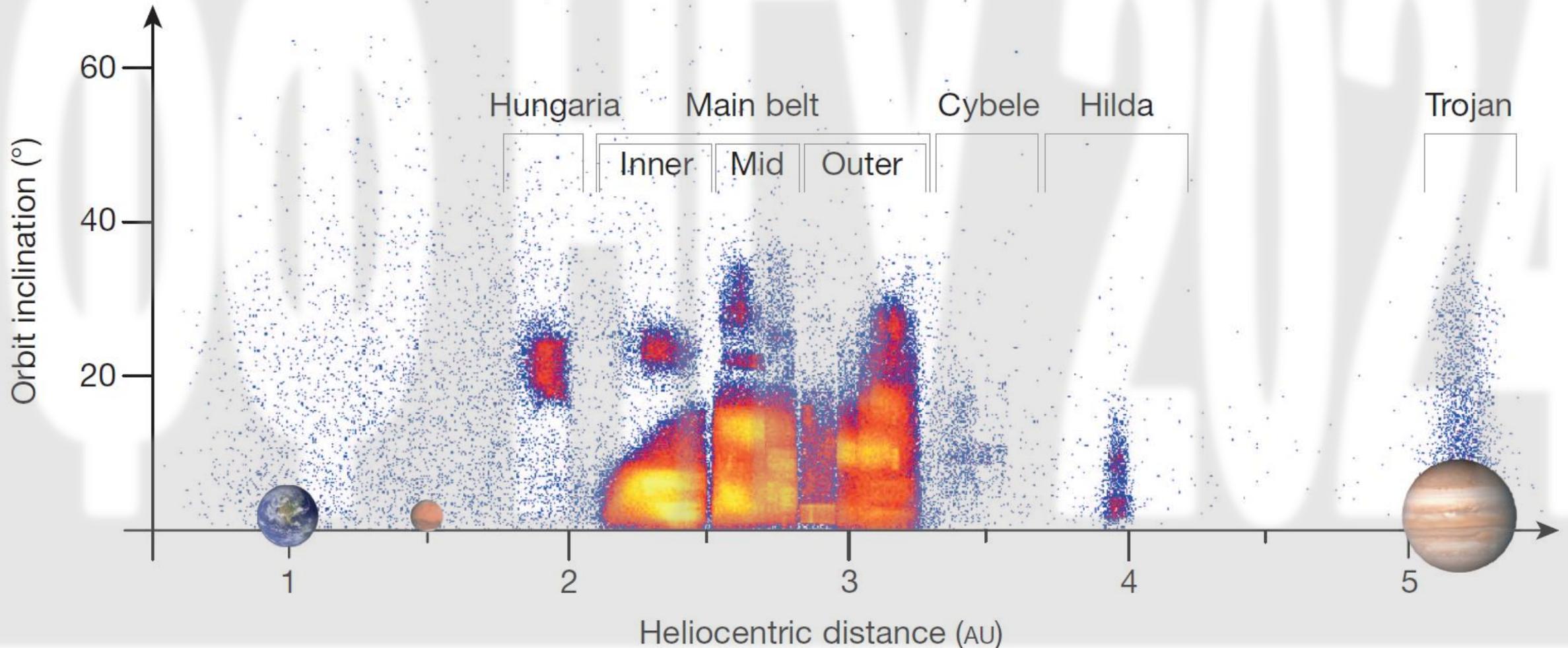
На расстояниях ~30 – 50 а.е., примерно в плоскости СС, расположены объекты пояса Койпера.

Предположительно, на расстояниях до ~100,000 а.е. расположено сферическое облако Оорта.

Формально, границей СС можно считать расстояние, равное половине среднего межзвездного расстояния в окрестности Солнца – примерно 0.5 пк.

# Астероиды главного пояса

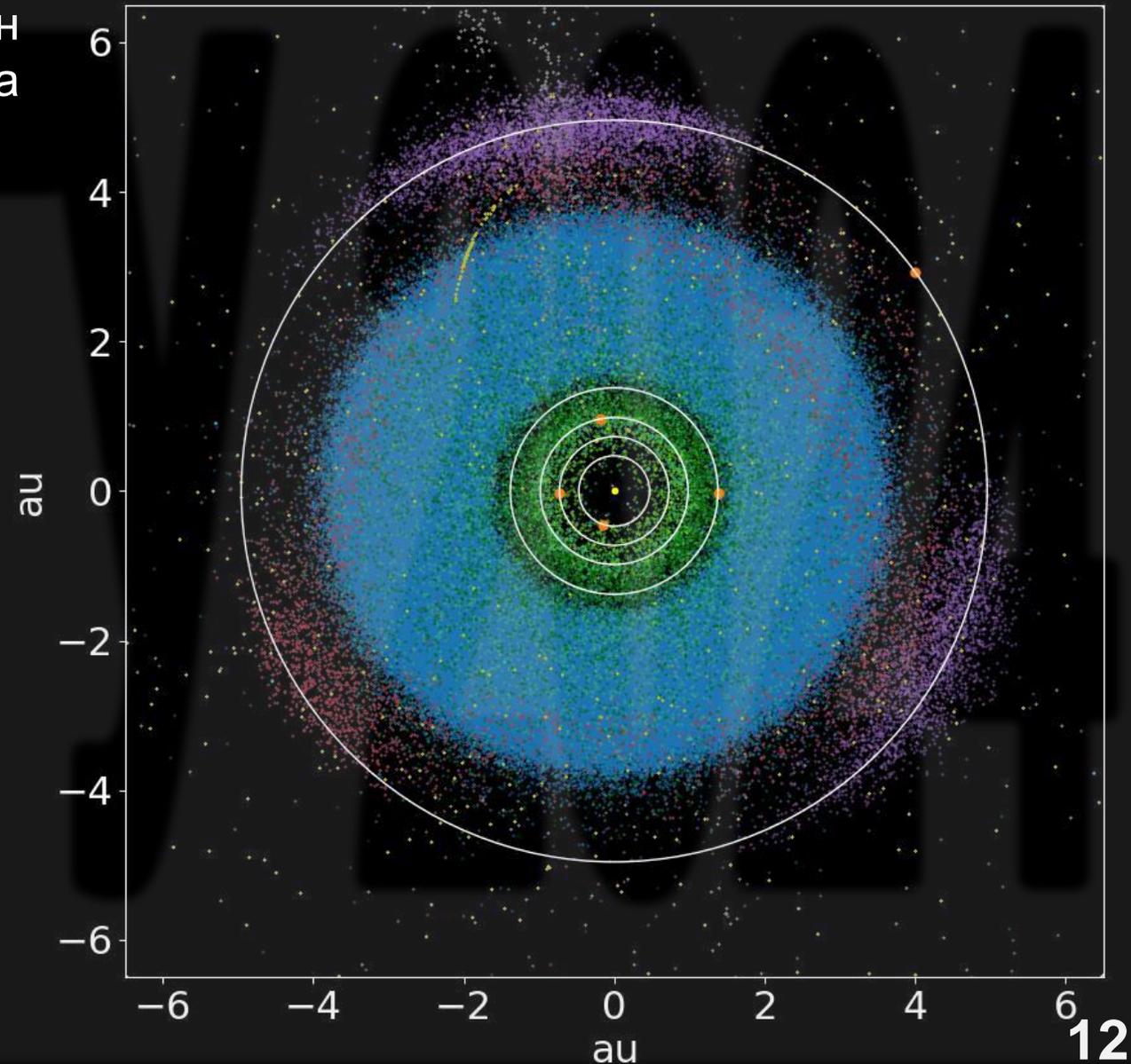
Распределение астероидов главного пояса (между орбитами Марса и Юпитера) неравномерно и определяется условиями устойчивости по отношению к периодическим возмущениями (резонансами) со стороны Юпитера.



# Солнечная система: главный пояс астероидов

По оценкам, в главном поясе содержится ~2 млн объектов с размерами >1 км. Суммарная масса всего 3 – 4% процента от массы Луны.

На сегодня обнаружено ~1.3 млн.



# Астероиды



Крупнейшие астероиды главного пояса:

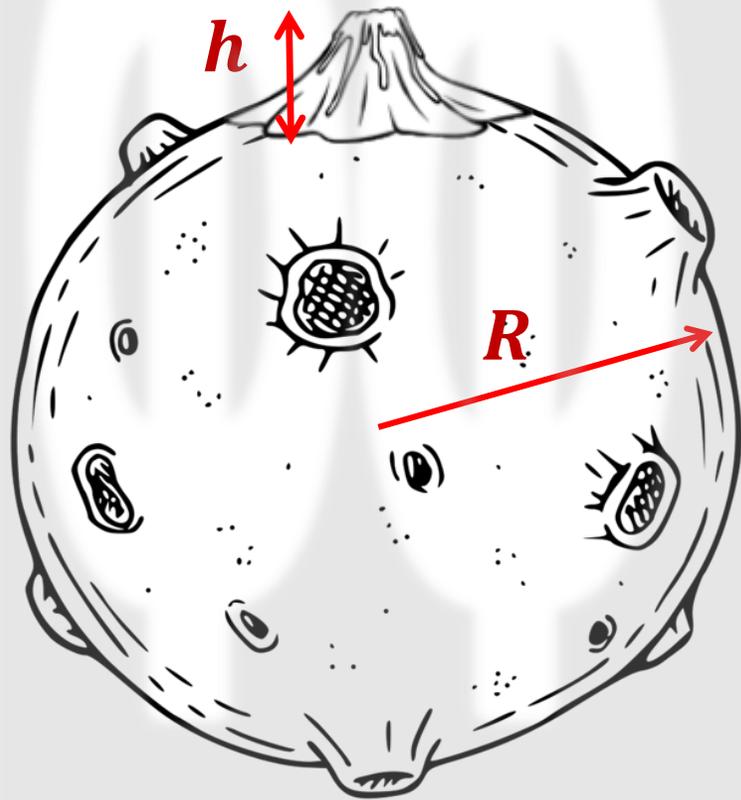
1 Ceres: открыта в 1801 году,  $D \sim 930$  км;

2 Pallas: открыта в 1801 году,  $D \sim 500$  км;

4 Vesta: открыта в 1807 году,  $D \sim 550$  км.

# Вычислительный пример

Оценить минимальный размер объекта, форма которого может стать сферической под действием собственной гравитации.



Предположим, что максимальное давление, оказываемое горой на ее основание, примерно одинаково для всех тел земного состава.

$$P = \frac{F}{S} \simeq G \frac{mM}{SR^2} \quad M \sim \rho R^3 \quad m \sim \rho Sh$$

Предполагая, что плотность тел земного состава примерно одинакова, получаем соотношение:

$$h_1 R_1 = h_2 R_2$$

# Вычислительный пример

Оценить минимальный размер объекта, форма которого может стать сферической под действием собственной гравитации.

Максимальная высота гор на Земле ~10 км (Эверест, Гавайский архипелаг). Тогда для Марса получаем оценку:

$$h_2 \simeq h_3 \frac{R_3}{R_M} \simeq 10 \text{ км} \frac{6400}{3400} \simeq 20 \text{ км}$$

что неплохо согласуется с наблюдением: гора Олимп 25 км.

Объект будет «неправильной» формы, если максимальная высота гор будет сравнима с радиусом самого объекта, то есть:

$$R_2 \simeq \sqrt{h_3 R_3} \simeq \sqrt{10 \cdot 6400} \simeq 250 \text{ км}$$

# Астероиды: размеры и форма

4 Vesta



21 Lutetia - 130 km  
Rosetta, 2010



253 Mathilde - 66 × 48 × 44 km  
NEAR, 1997

243 Ida - 58.8 × 25.4 × 18.6 km  
Galileo, 1993



433 Eros - 33 × 13 km  
NEAR, 2000

5535 Annefrank  
6.6 × 5.0 × 3.4 km  
Stardust, 2002

2867 Steins  
5.9 × 4.0 km  
Rosetta, 2008

951 Gaspra  
18.2 × 10.5 × 8.9 km  
Galileo, 1991

25143 Itokawa  
0.5 × 0.3 × 0.2 km  
Hayabusa, 2005

9969 Braille  
2.1 × 1 × 1 km  
Deep Space 1, 1999

Dactyl  
[(243) Ida II]  
1.6 × 1.2 km  
Galileo, 1993

1P/Halley - 16 × 8 × 8 km  
Vega 2, 1986

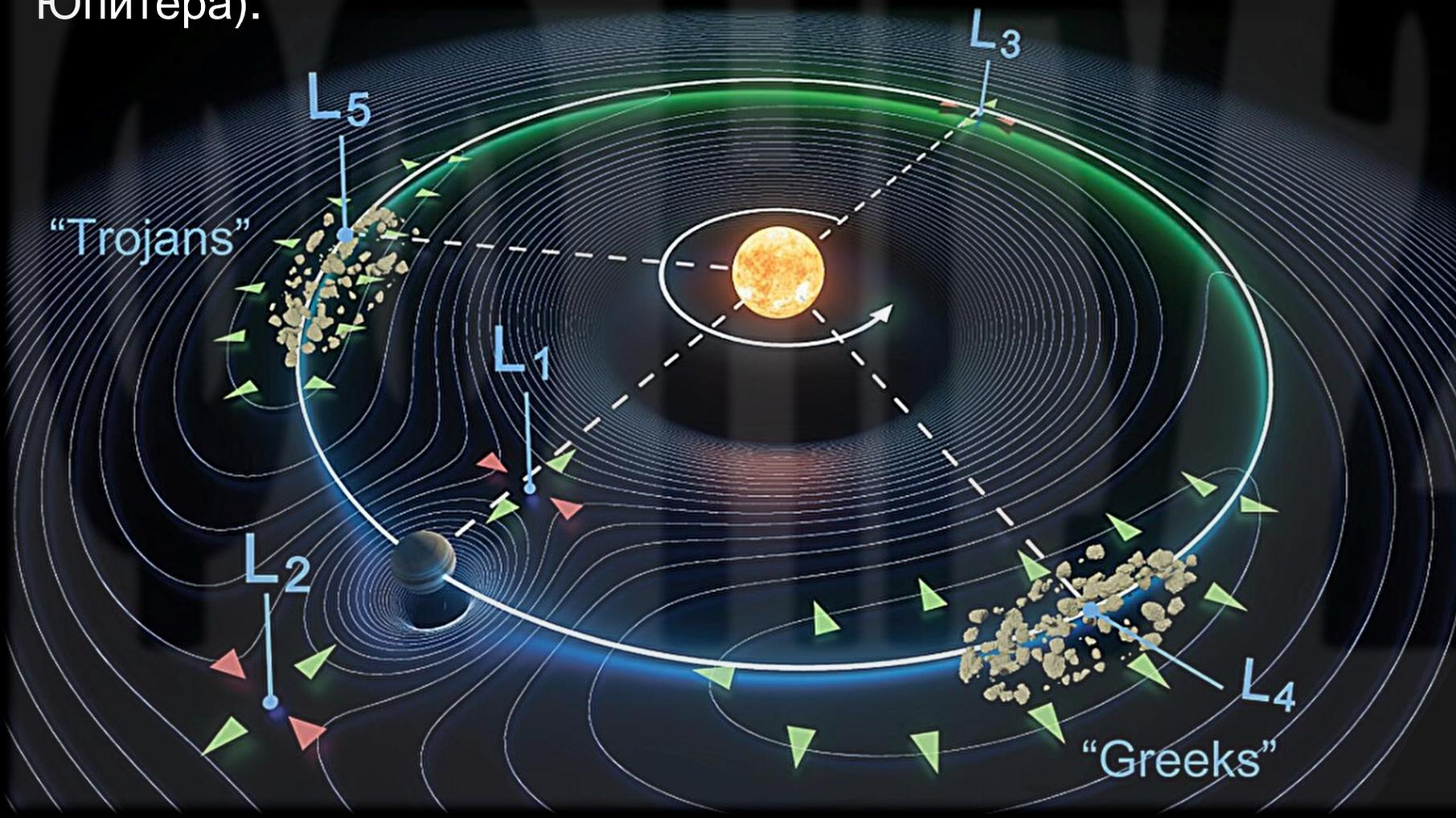
9P/Tempel 1  
7.6 × 4.9 km  
Deep Impact, 2005

19P/Borrelly  
8 × 4 km  
Deep Space 1, 2001

81P/Wild 2  
5.5 × 4.0 × 3.3 km  
Stardust, 2004

# Астероиды: греки и троянцы

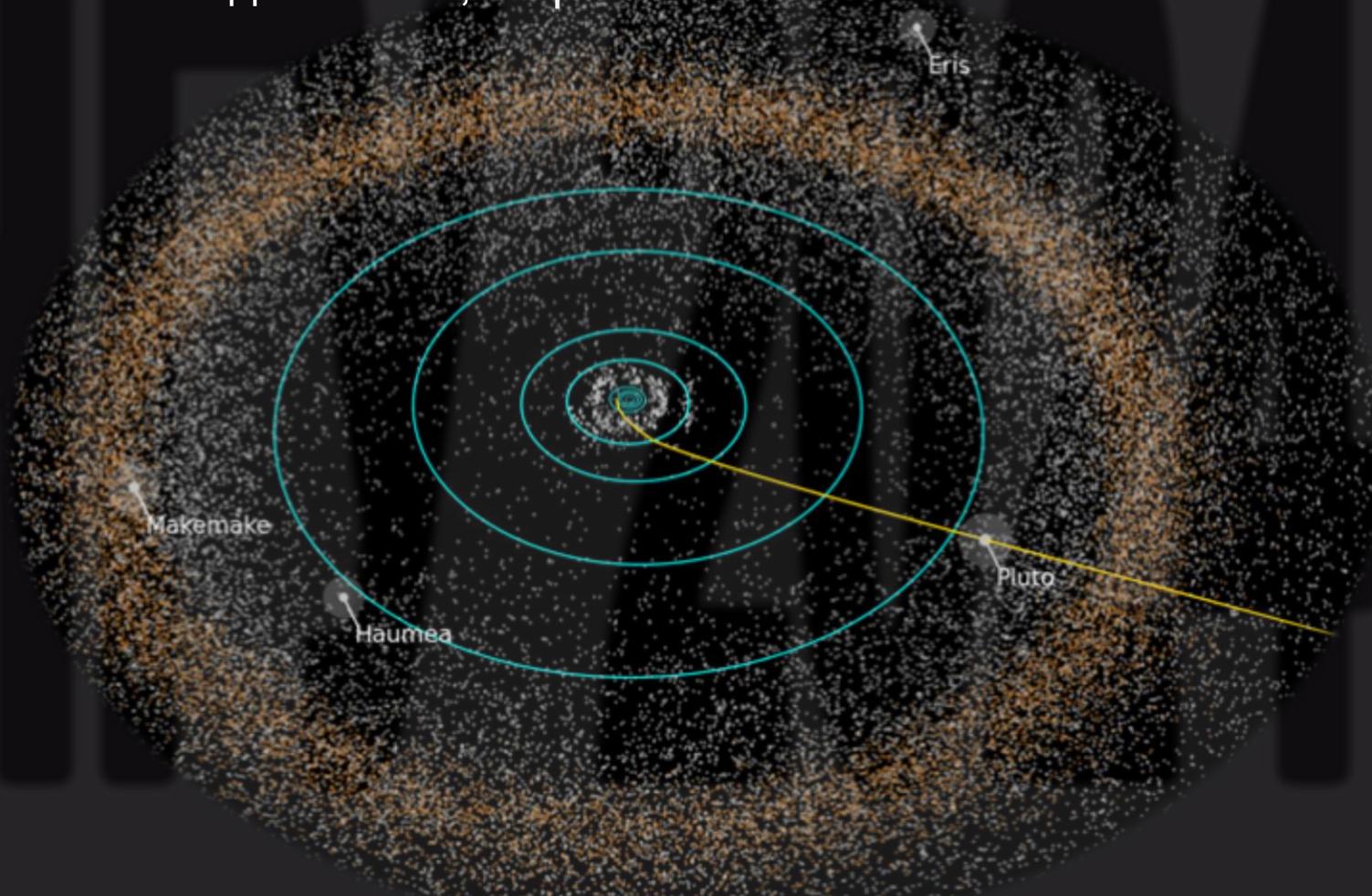
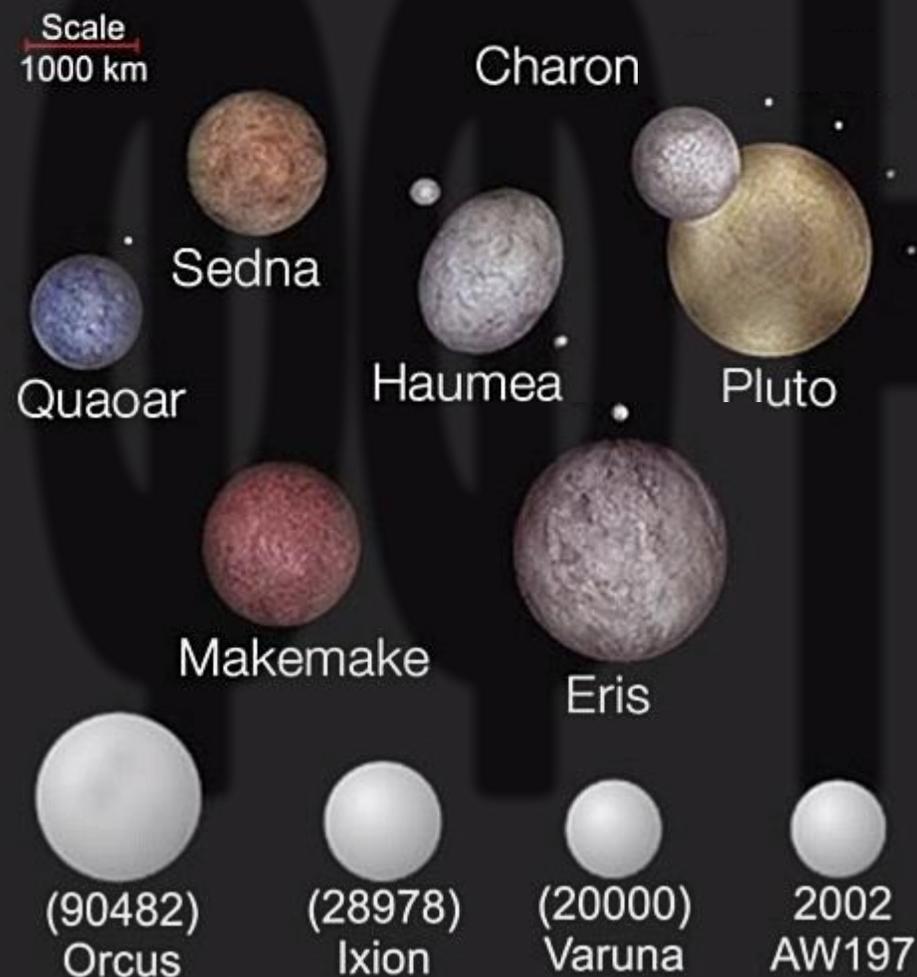
Для всех планет Солнечной системы выполнено условие устойчивости точек Лагранжа L4 и L5:  $M_*/M_{\text{П}} > 25$ . В точках L4 и L5 системы Солнце – Юпитер находятся группы (семейства) астероидов «Греки» (на  $60^\circ$  впереди Юпитера) и «Троянцы» (на  $60^\circ$  позади Юпитера).



Для других планет Солнечной системы точки L4 и L5 тоже населены астероидами, но существенно менее плотно.

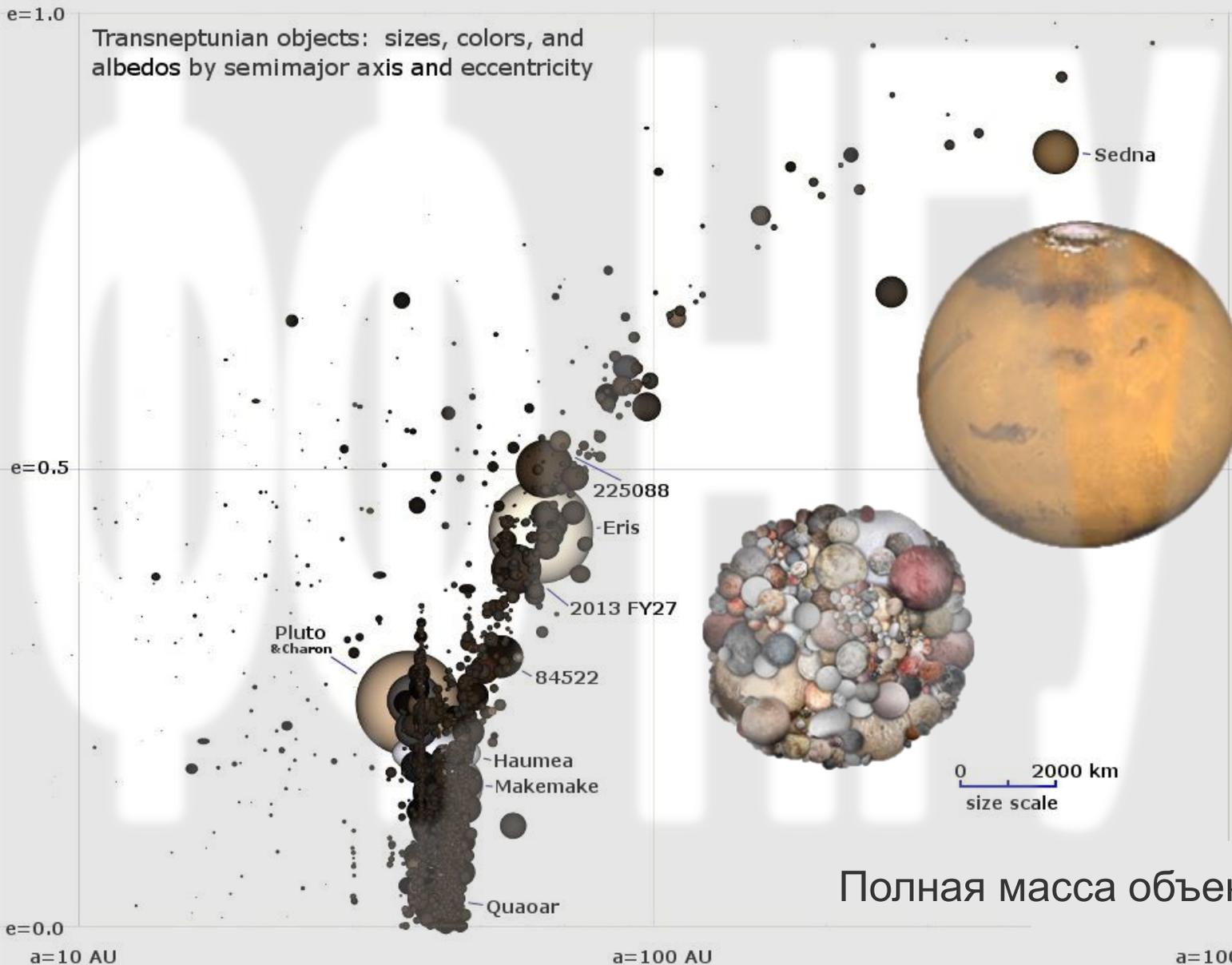
# Структура Солнечной системы: пояс Койпера

Kenneth Edgeworth (1949) и Gerard Kuiper (1951) независимо предположили, что источником коротко-периодических комет с вытянутыми орбитами, группирующимися к плоскости СС является область с повышенной концентрацией малых ледяных тел, на расстояниях 30 – 50 а.е.



И 2020 год открыто более 2000 объектов пояса Койпера. 18

# Структура Солнечной системы: пояс Койпера



Стало понятно, что Плутон – лишь один из огромного числа объектов за орбитой Нептуна. В 2000 году по решению IAU Плутон сменил свой статус с планеты на карликовую планету (dwarf planet).

Не выполнено формальное требование единственности объекта на своей орбите.

Общепринятые названия объектов этого типа:

Kuiper belt objects (KBO)

Trans-Neptunian objects (TNO)

Полная масса объектов оценивается менее массы Марса.

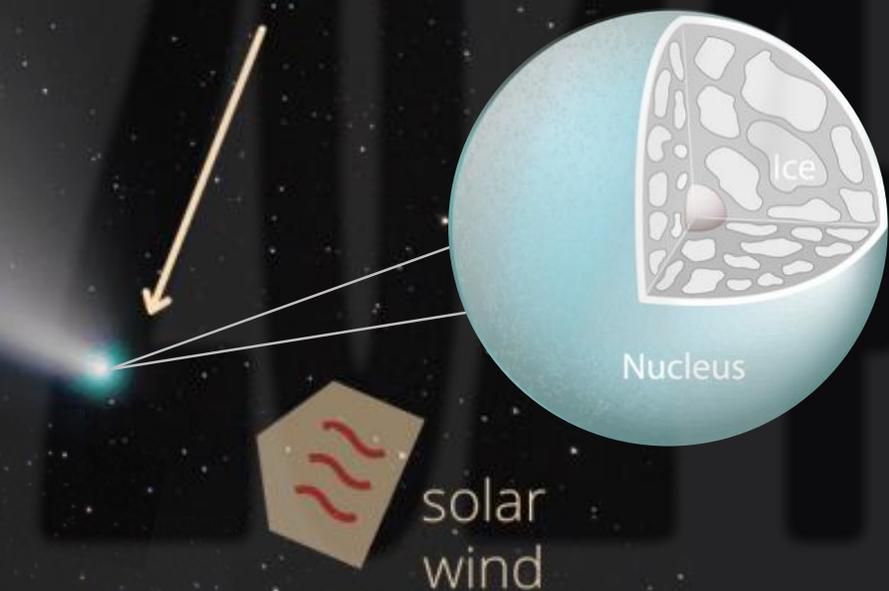
# Кометы

**Dust tail:** prominent trail of dust and gases generally in direction of solar wind but curves toward comet path

**Hydrogen envelope:** Invisible, irregular cloud surrounding the coma

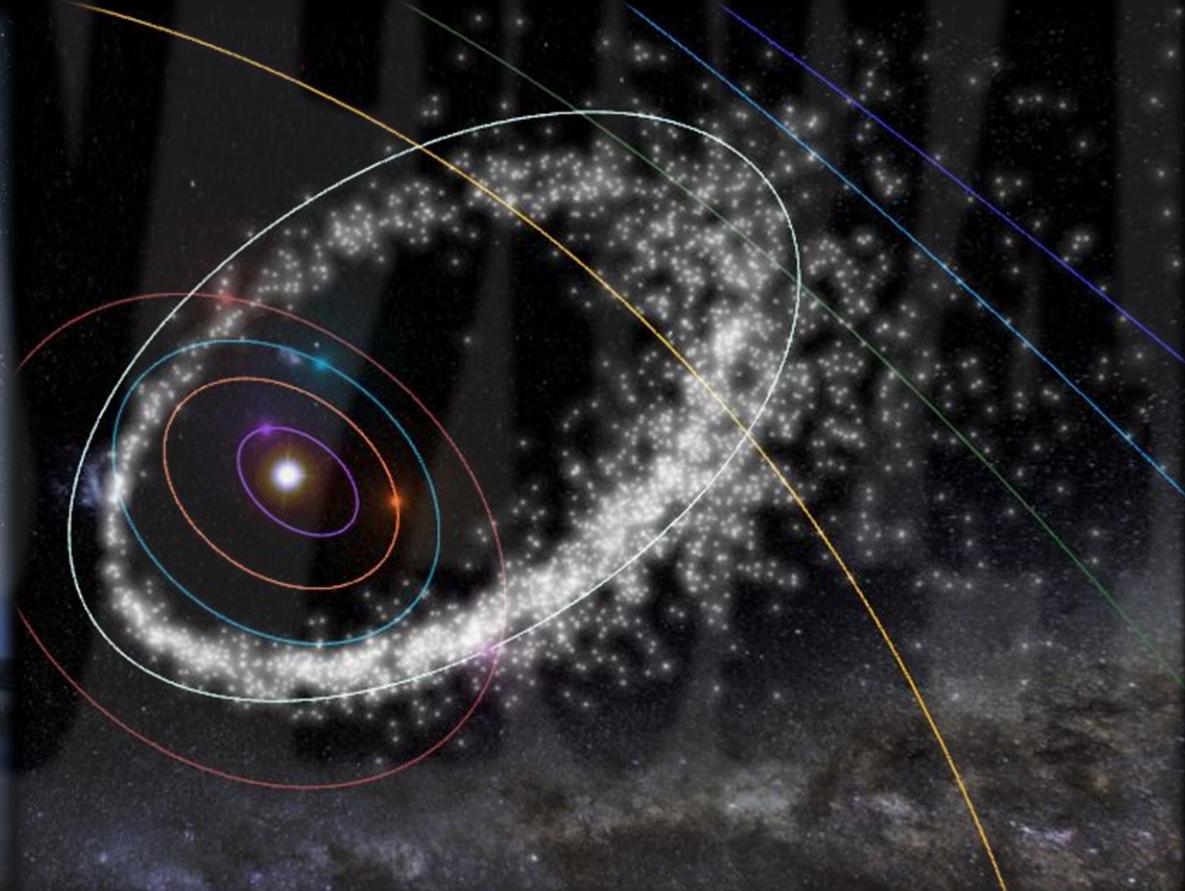
Типичные массы  $10^{16} - 10^{18}$  г,  
Диаметр: единицы – десятки км.  
В составе много летучих  
веществ в виде льдов.

В год наблюдается несколько десятков новых долгопериодических комет. За время существования Солнечной системы таких комет было (десятки) миллиарды...



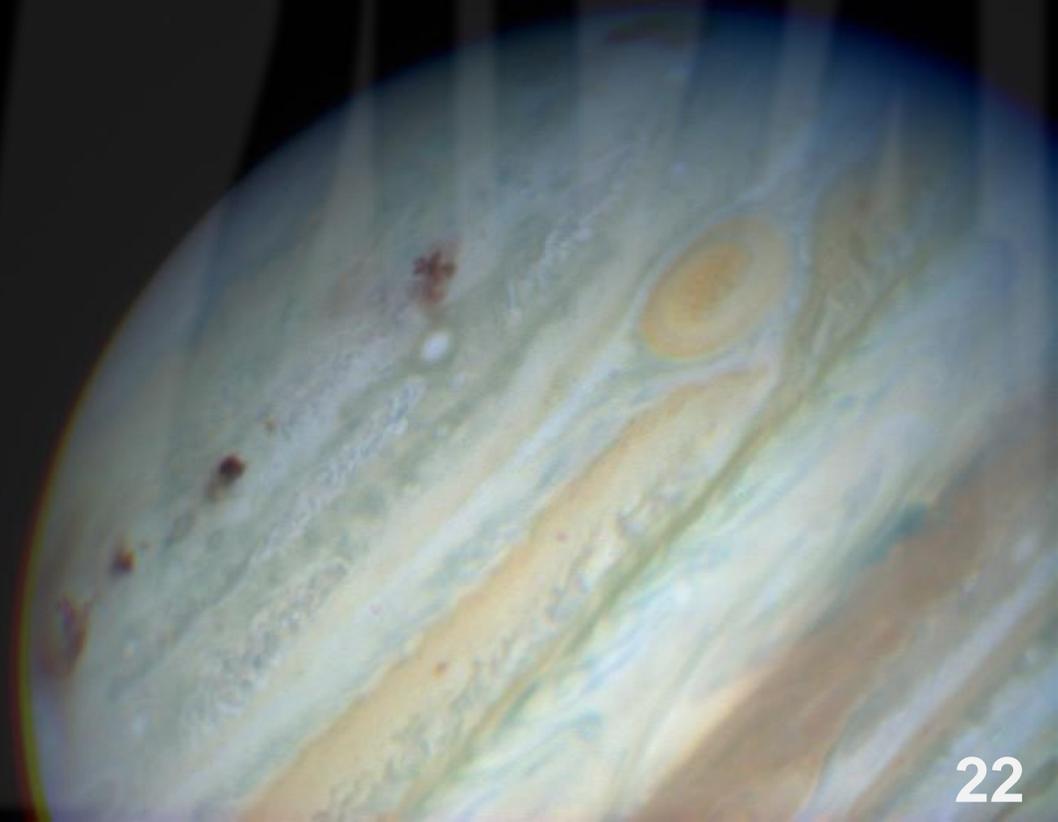
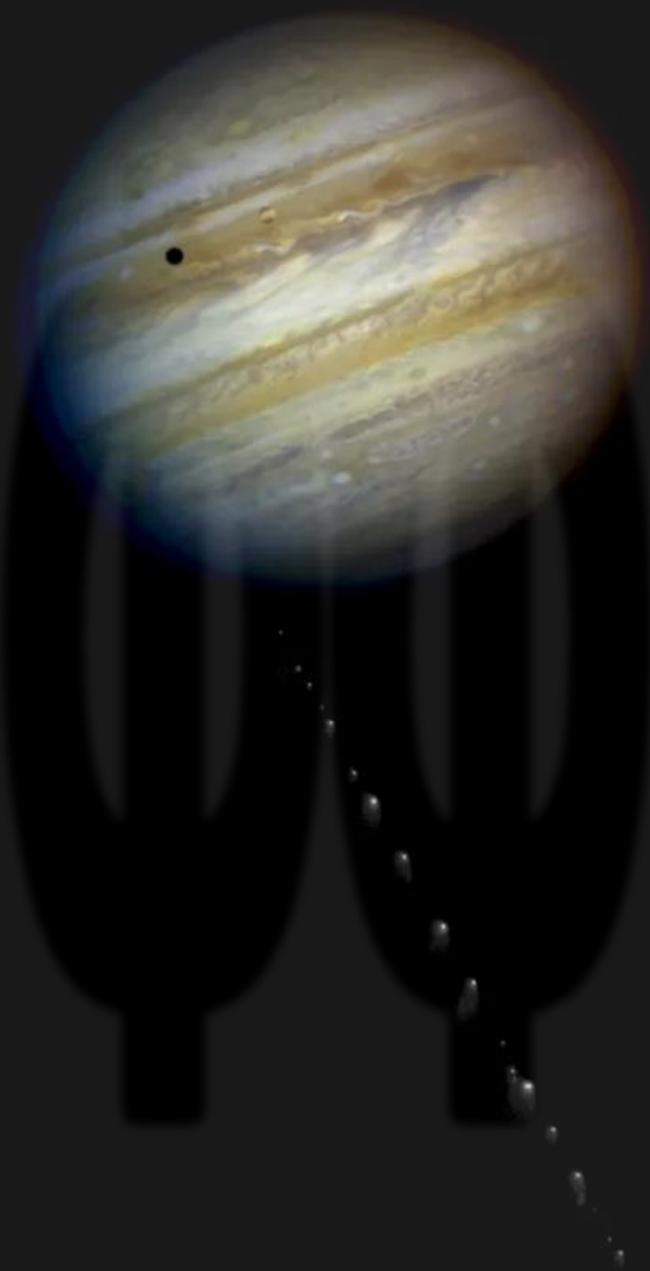
# Кометы

Более крупные твердые частицы, освобождаемые при нагреве ядра кометы, заселяют ее орбиту. При прохождении Земли вблизи орбиты кометы наблюдаются метеорные потоки.



# Кометы

Из-за своей рыхлой структуры, при нагреве Солнцем и под действием приливных сил планет-гигантов, ядра комет могут разваливаться на более мелкие части. В 1994 году наблюдался распад ядра кометы Шумейкера-Леви 9. Осколки ядра кометы столкнулись с Юпитером.

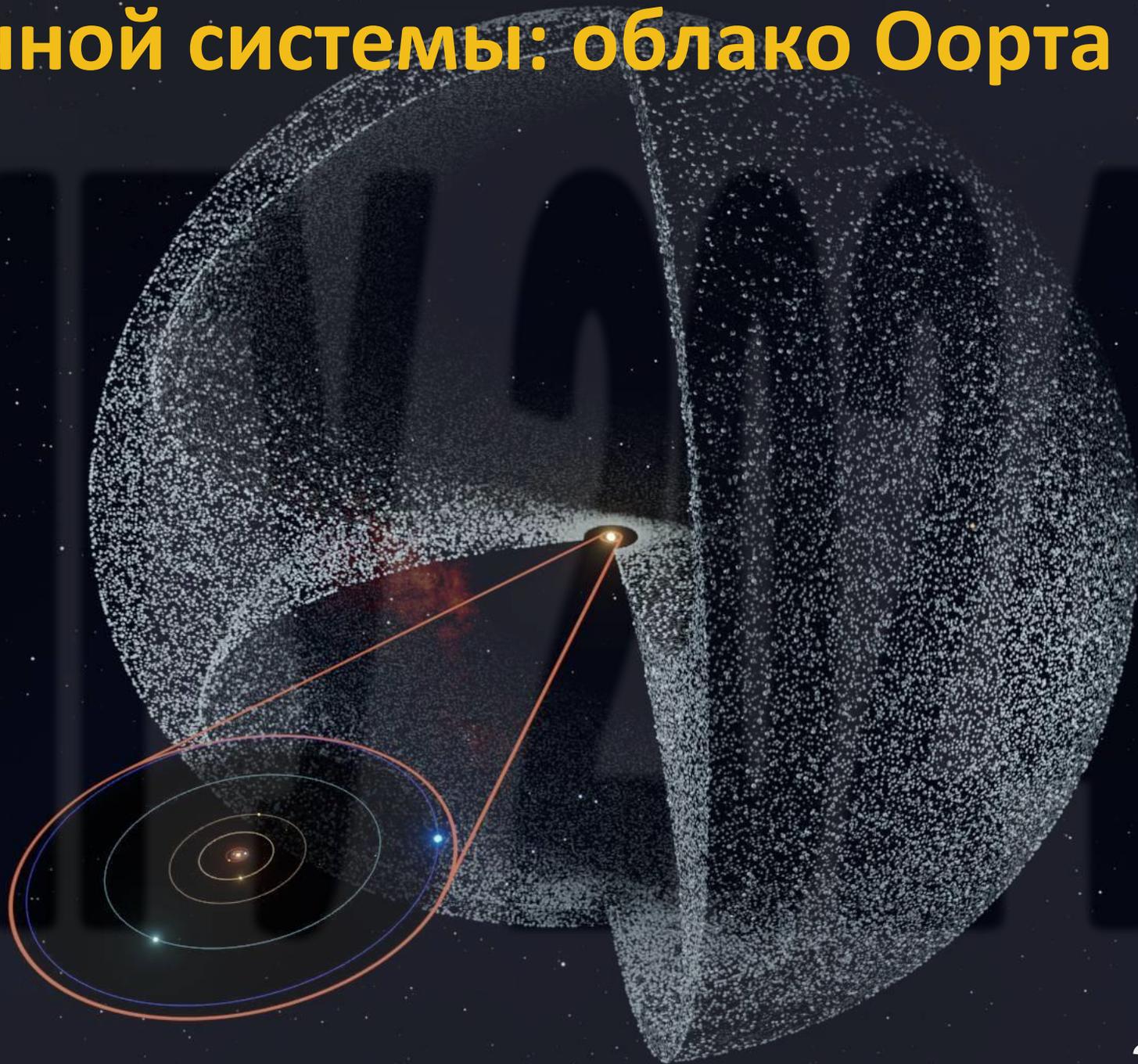


# Структура Солнечной системы: облако Оорта

В 1950 году Ян Оорт (Jan Oort) предположил существование (более-менее) сферического облака малых объектов, являющегося источником долгопериодических комет с очень вытянутыми орбитами и практически равномерно распределенным углом наклонения орбиты.

Масса облака Оорта оценивается в 1 – 10 масс Земли.

Облако Оорта предположительно сформировано объектами, выброшенными из внутренней части СС в результате взаимодействия с планетами-гигантами на поздней стадии образования СС.

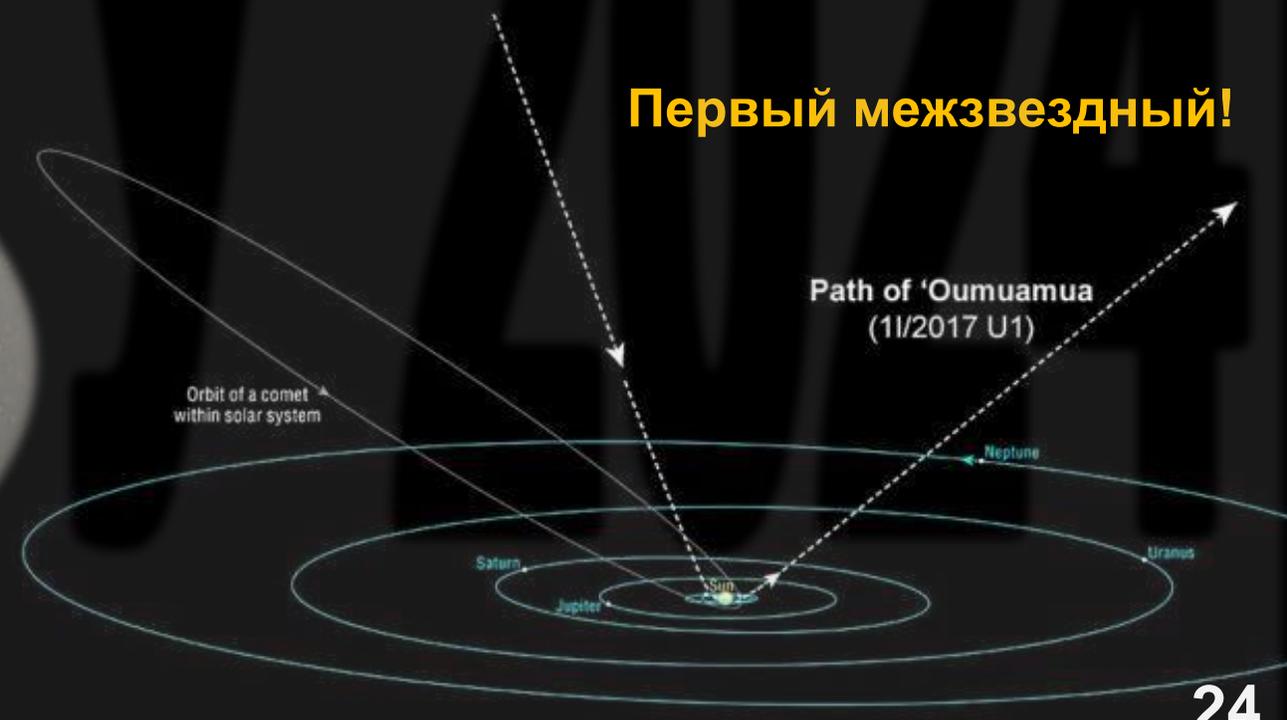
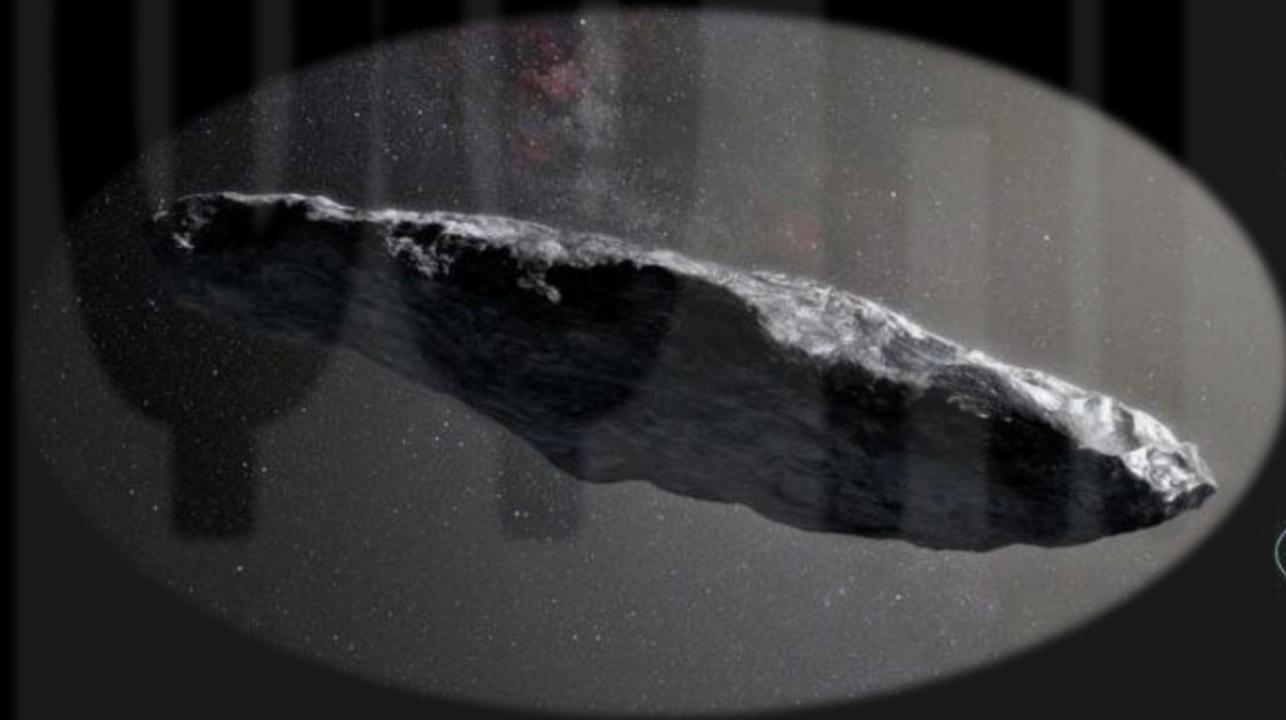


# Межзвездные объекты

Если объекты пояса Койпера и облака Оорта образованы телами, выброшенными из внутренней области, можно предположить, что часть объектов при этом покинула Солнечную систему. А значит подобные объекты из других систем могут попасть к нам.

Первый такой объект Оумуамуа был открыт в 19 октября 2017 года.

Эксцентриситет орбиты  $e \approx 1.2$  (гипербола). Оценочные размеры 100 x 20 км.



# Межзвездные объекты

Комета C/2019 Q4 (2I/Borisov) была открыта Геннадием Борисовым 29 августа 2019 года.

Большой эксцентриситет орбиты кометы Борисова не оставляет сомнения в ее происхождении вне Солнечной системы. Кроме того комета обладает высокой избыточной скоростью, около 32 км/с, то есть не является гравитационно связанной с Солнцем.

$T$	2019 Dec. $8.42 \pm 0.11$ TT
$e$	$3.3790 \pm 0.020$
$q$	$2.0119 \pm 0.0044$ au
$\omega$	$209.001 \pm 0.100^\circ$ (J2000.0)
$\Omega$	$308.195 \pm 0.040^\circ$ (J2000.0)
$i$	$44.004 \pm 0.041^\circ$ (J2000.0)

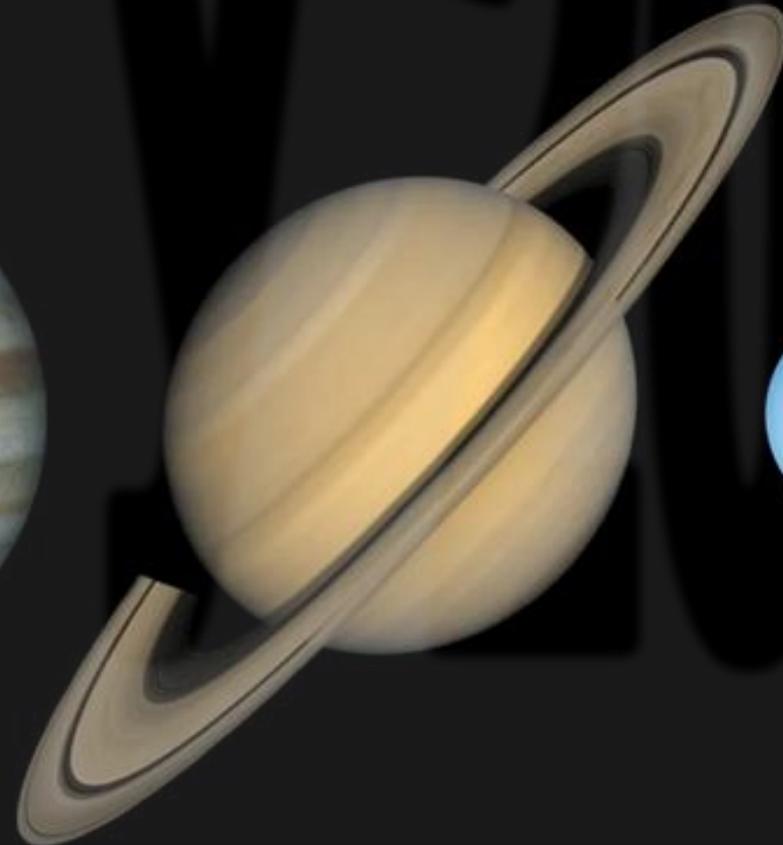
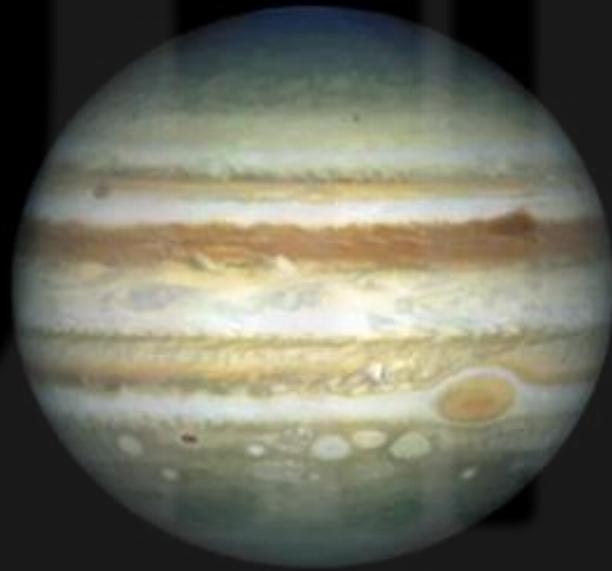
Изучение межзвездных комет особенно интересно, поскольку кометная активность (испарение легких фракций) позволяет изучить и сравнить хим. состав других протопланетных систем.

# Классификация планет

Планеты  
земной  
группы

Газовые гиганты

Ледяные  
гиганты



# Параметры планет Солнечной системы

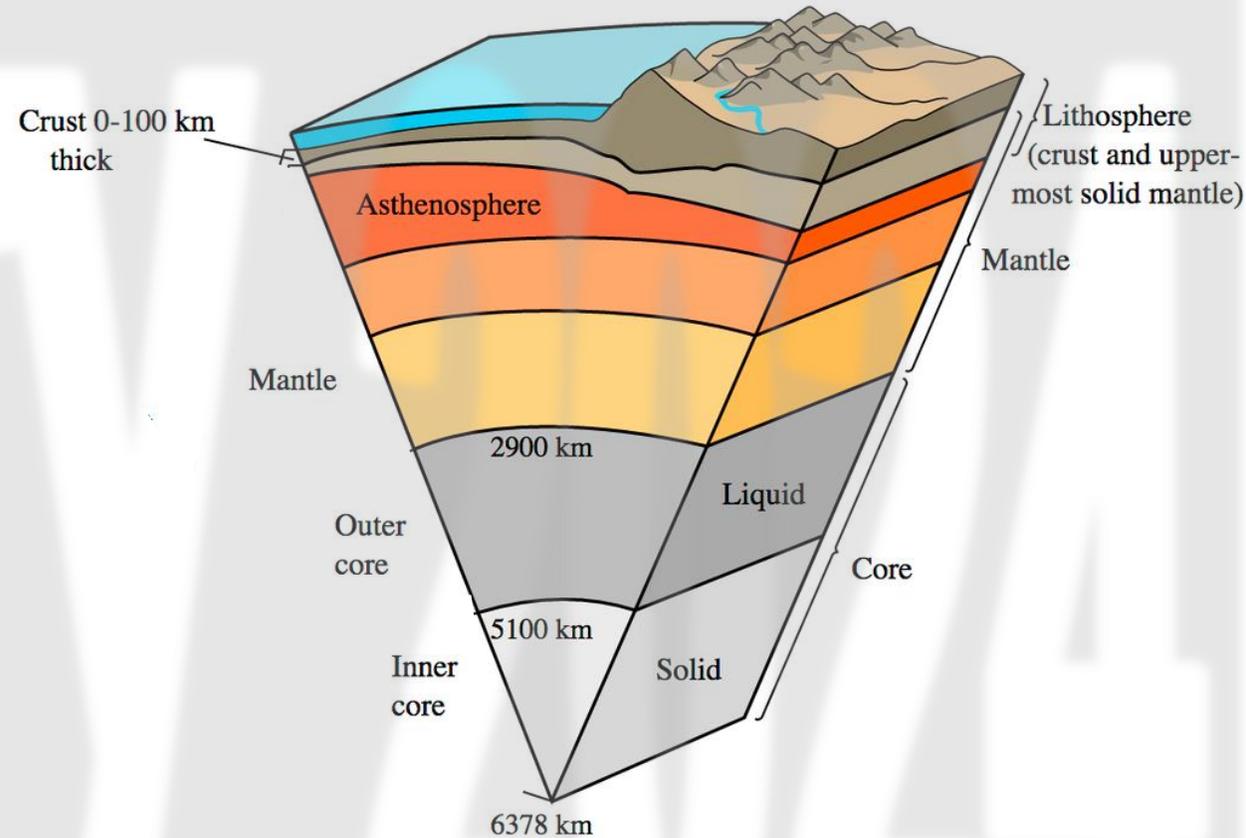
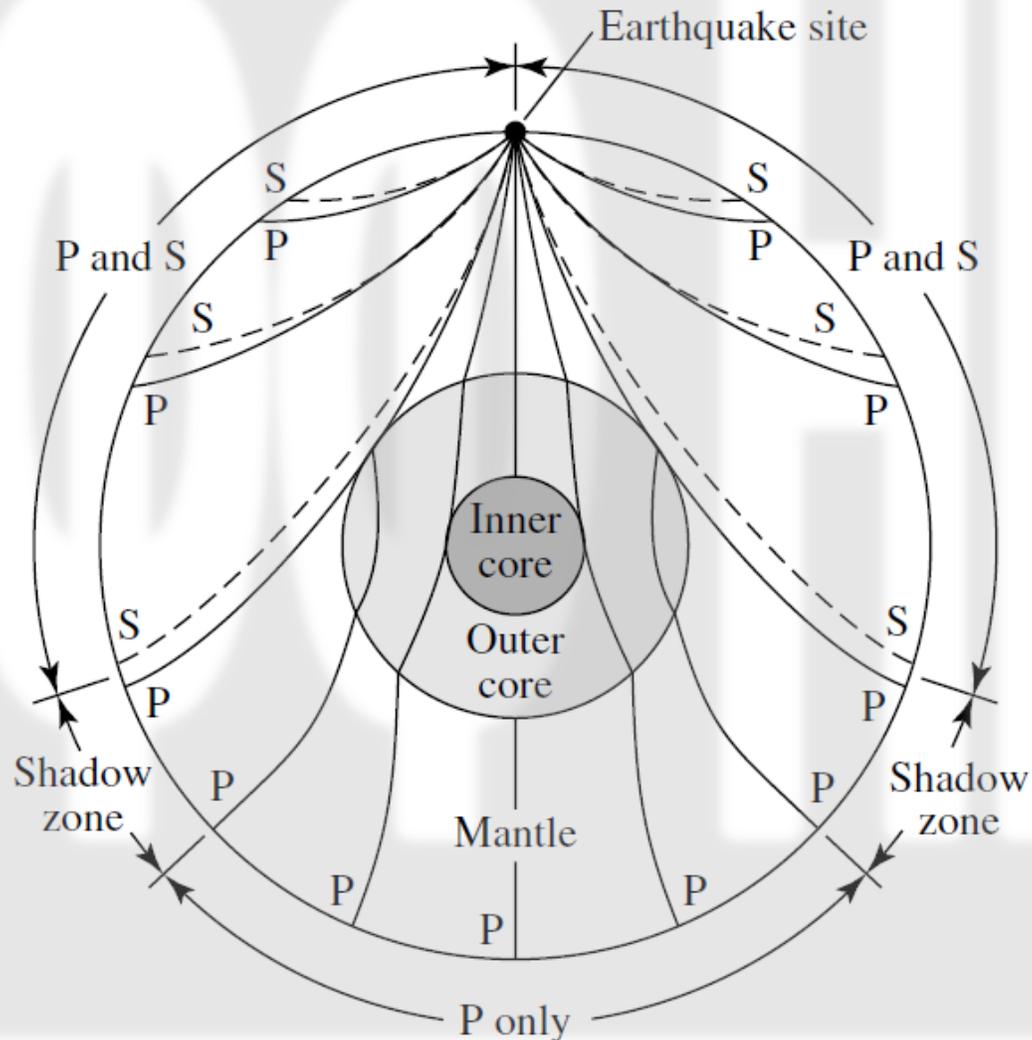
Планеты земной группы, газовые гиганты, ледяные гиганты.

Планета (карликовая планета)	Диаметр, относительно	Масса, относительно	Орбитальный радиус, а. е.	Период обращения, земных лет	Сутки, относительно	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Меркурий	0,382	0,055	0,38	0,241	58,6	5427
Венера	0,949	0,815	0,72	0,615	243 <sup>[130]</sup>	5243
Земля <sup>[131]</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5515
Марс	0,53	0,107	1,52	1,88	1,03	3933
Юпитер	11,2	318	5,20	11,86	0,414	1326
Сатурн	9,41	95	9,54	29,46	0,426	687
Уран	3,98	14,6	19,22	84,01	0,718 <sup>[130]</sup>	1270
Нептун	3,81	17,2	30,06	164,79	0,671	1638

Несмотря на то, что Юпитер и Сатурн существенно массивнее, чем Уран и Нептун, а значит давление в их центре много больше, средняя плотность Юпитера и Сатурна сравнима или даже меньше, чем у Урана и Нептуна. Это может означать существенно различный химический состав – в состав Урана и Нептуна входит больше тяжелых (тяжелее гелия) элементов.

# Структура планет: Земля

Основным источником информации о внутреннем строении Земли является сейсмология.

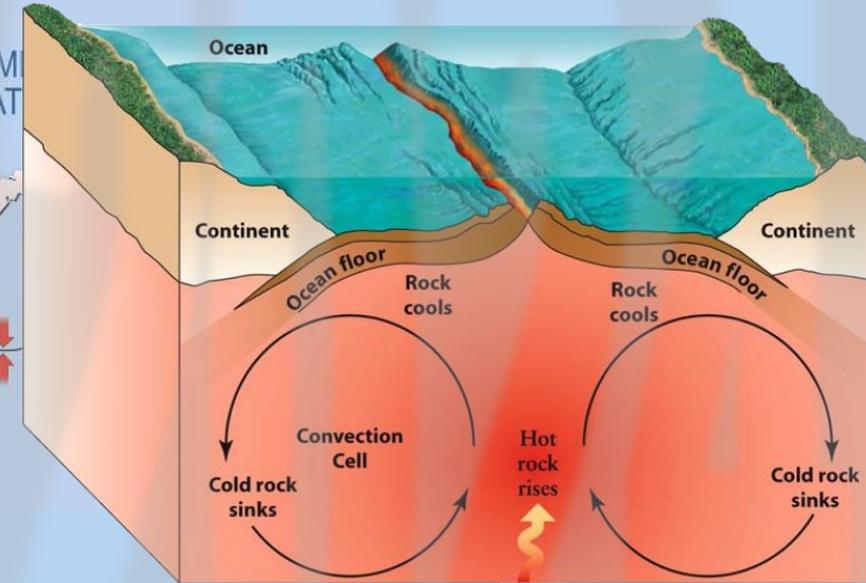
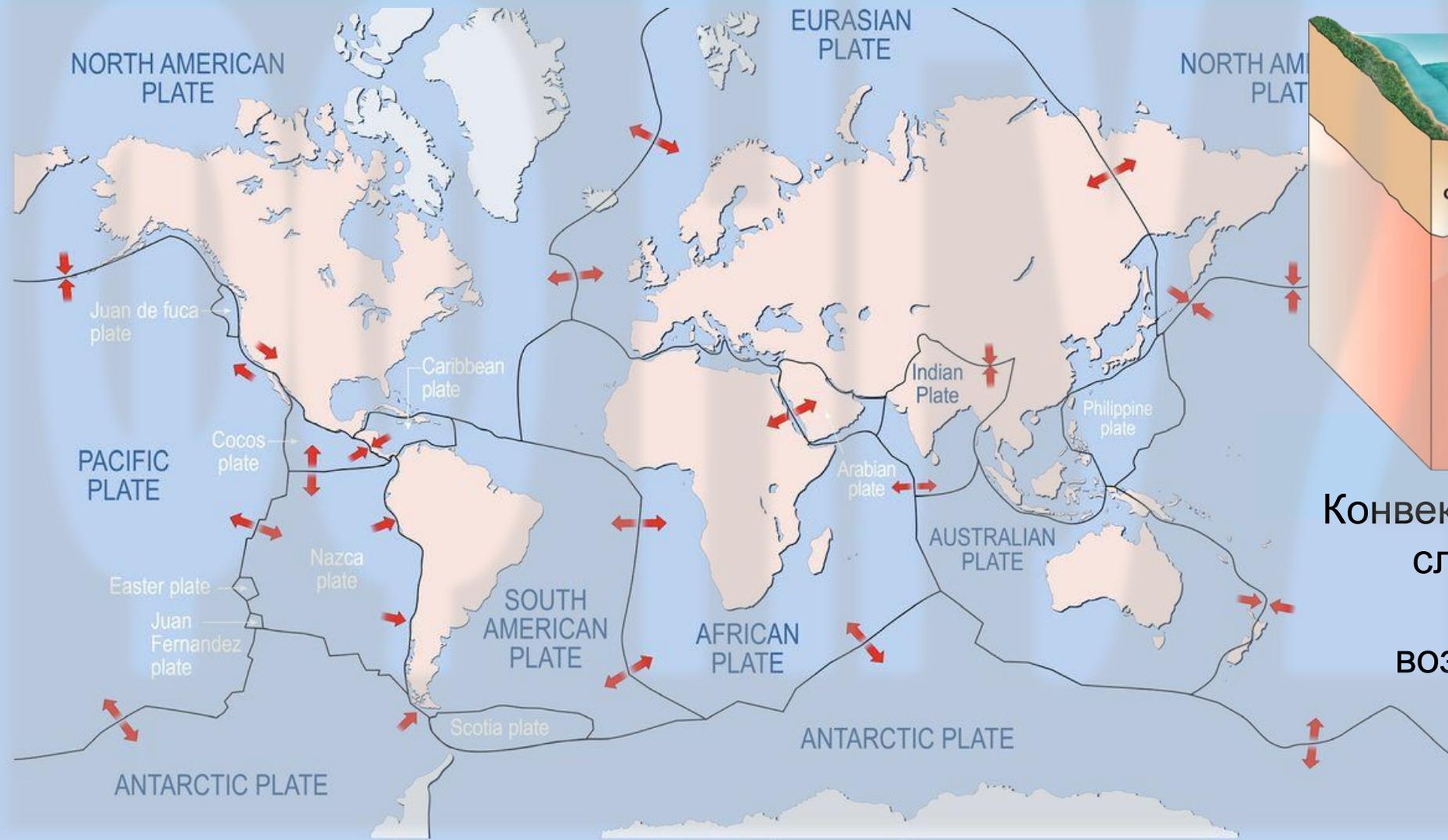


Отслеживая распространение звуковых волн от землетрясений в объеме планеты, можно получить достаточно много информации о градиенте плотности и агрегатном состоянии (жидкость или твердое тело) вещества.

# Структура планет: Земля

Лучше всего (не значит, что очень хорошо) мы знаем строение Земли.

Вулканическая активность и тектоника литосферных плит.



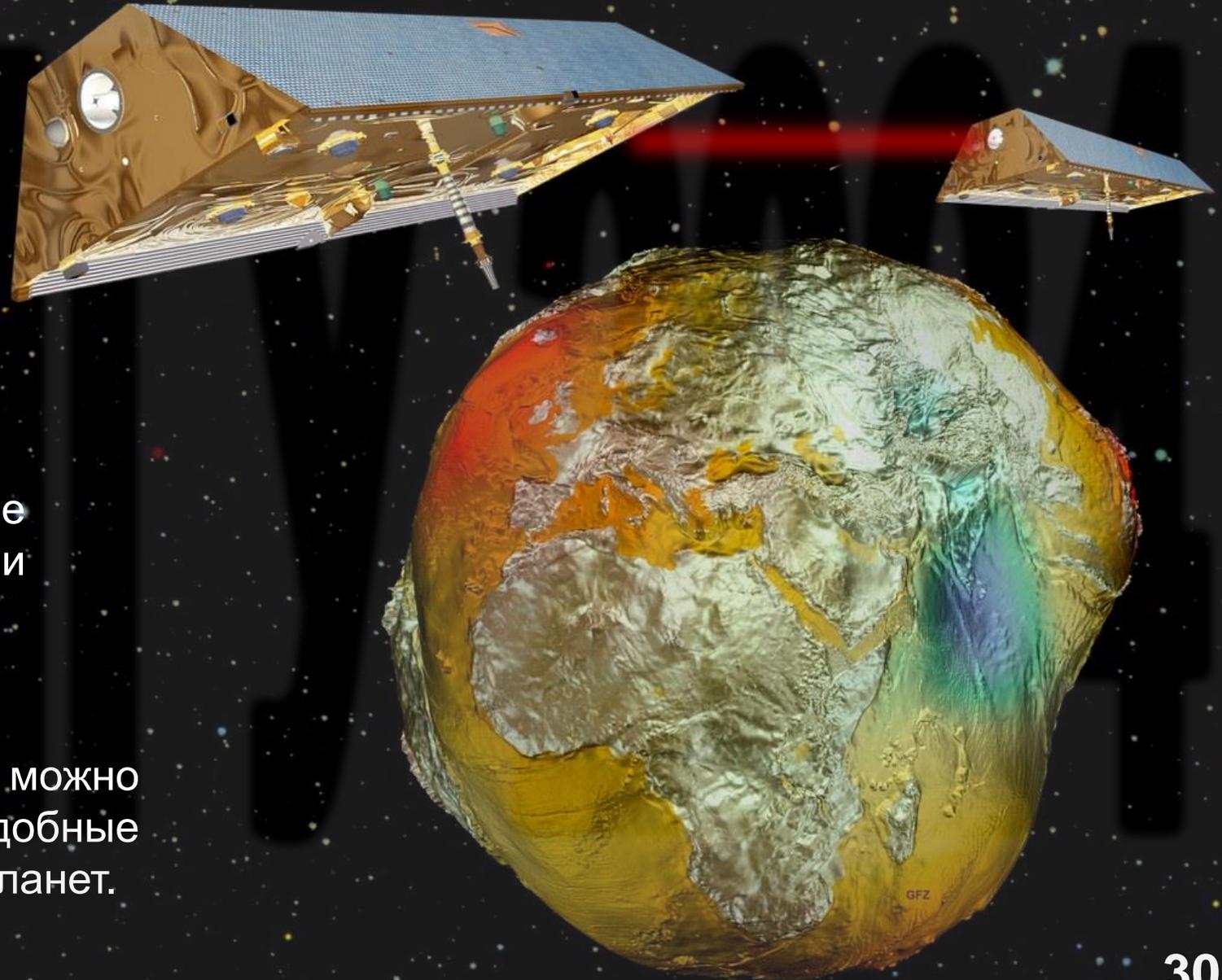
Конвективные потоки во внешних слоях мантии (астеносфере) оказывают касательное воздействие на литосферные плиты, что приводит к их перемещению.

# Структура планет: Земля

Спутниковая карта гравитационных аномалий, составленная спутниками GRACE.

Методики, отработанные на примере Земли, могут применяться при изучении других объектов Солнечной системы.

На основании полученных результатов можно строить (более-менее) правдоподобные модели внутреннего строения других планет.

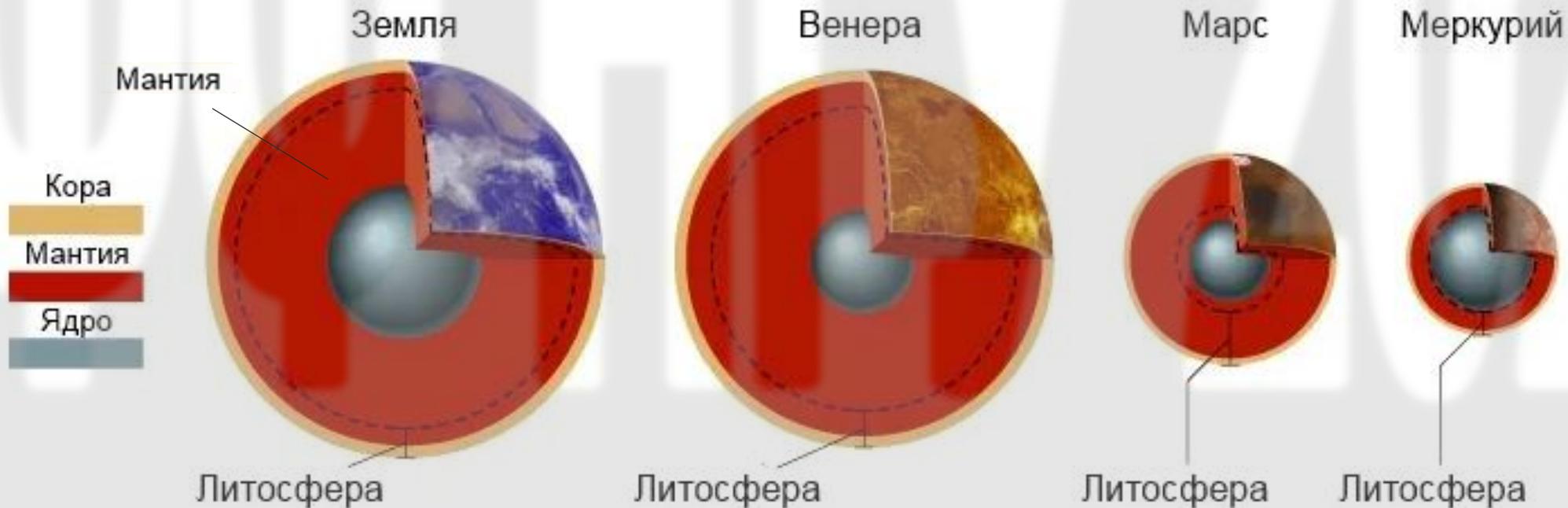


# Структура планет земной группы

Внутренняя структура планет земной группы более-менее одинакова:

- железное ядро;
- силикатная мантия;
- литосфера;
- кора.

Малое содержание легких элементов, высокое содержание «железа» и «кремния».



# Вычислительный пример

Оценить равновесную эффективную температуру поверхности планеты предполагая, что единственным источником энергии является Солнце.

---

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

– светимость Солнца. Тогда планета радиуса  $R_{\Pi}$ , находящаяся на расстоянии  $a$  от Солнца, получает количество энергии в секунду:

$$W = L_{\odot} \pi R_{\Pi}^2 / 4\pi a^2$$

Доля энергии  $\varepsilon$  отражается (**альбедо**), а  $(1 - \varepsilon)$  поглощается и излучается как АЧТ. Тогда из условия  $W = L_{\Pi}$ , получаем:

$$L_{\odot} \frac{\pi R_{\Pi}^2}{4\pi a^2} = 4\pi R_{\Pi}^2 \sigma T_{\Pi}^4$$

проведя все преобразования получим:

$$T_{\Pi} = T_{\odot} (1 - \varepsilon)^{1/4} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a}}$$

# Вычислительный пример

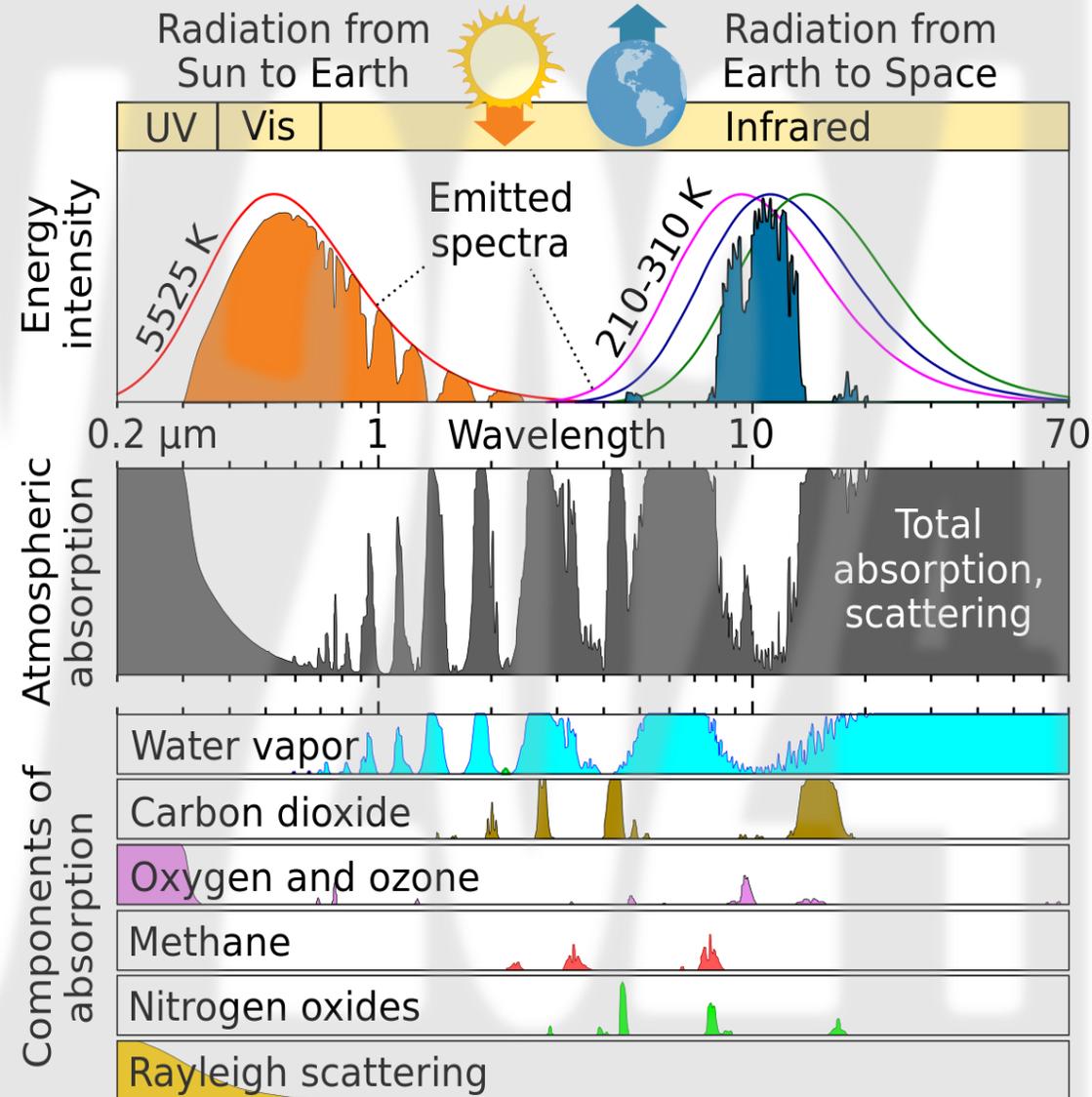
$$T_{\Pi} = T_{\odot} (1 - \varepsilon)^{1/4} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a}}$$

Типичные значения альбедо для планет  $\varepsilon \approx 0.3$ .  
Тогда для Земли получаем:

$$T_{З} = 5770 (1 - 0.3)^{1/4} \sqrt{\frac{0.7}{300}} \approx 255 \text{ }^{\circ}\text{K} = -18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

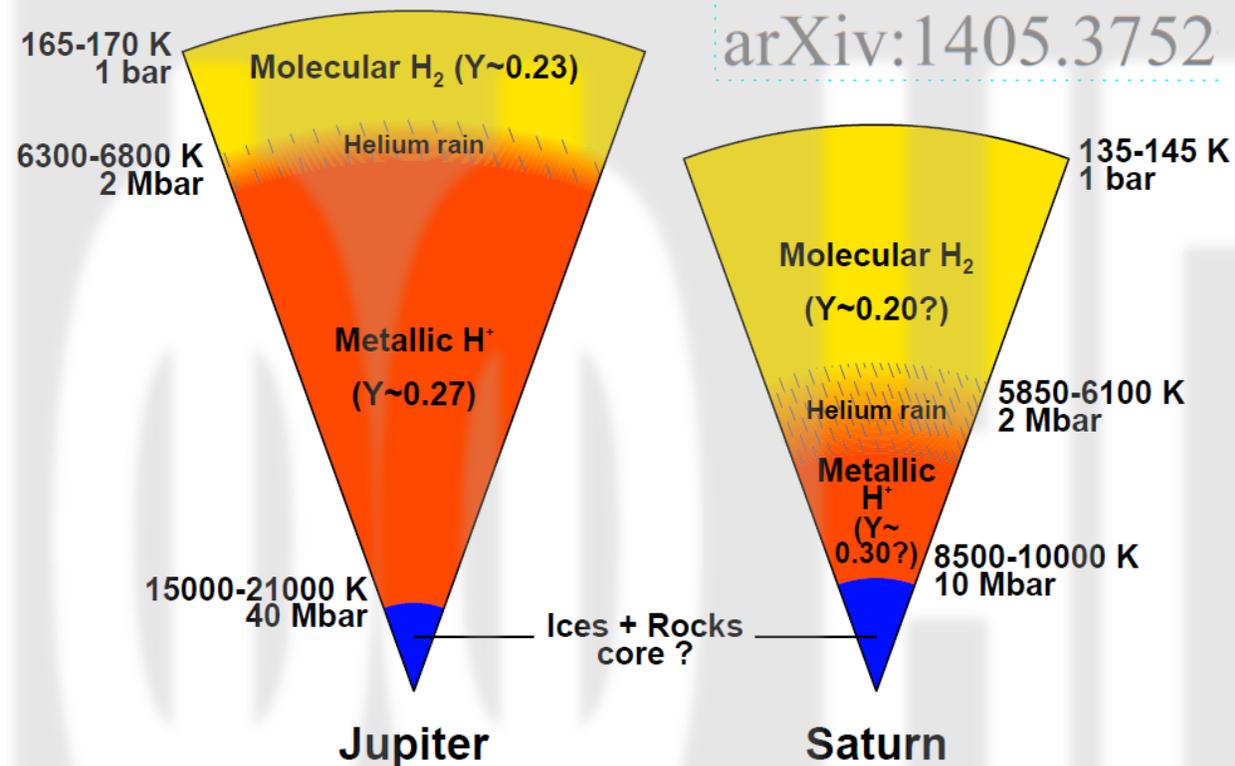
Наличие у Земли атмосферы (и внутренних источников энергии) приводит к тому, что излучение не является АЧТ и его мощность меньше. Средняя температура Земли около **+15 °C**.

Средняя температура на экваторе Луны – около 250 °K.



# Структура планет-гигантов

arXiv:1405.3752



Юпитер и Сатурн излучают заметно больше энергии, чем получают от Солнца => внутренний источник.

А значит температура (и давление) в центре достигают больших значений.

Возможным источником (одним из) энергии может служить постепенное погружение более тяжелых элементов к центру и высвобождение потенциальной энергии («гелиевый дождь»).

Внешняя атмосфера – в основном водород и гелий с массовыми долями очень близкими к солнечным.

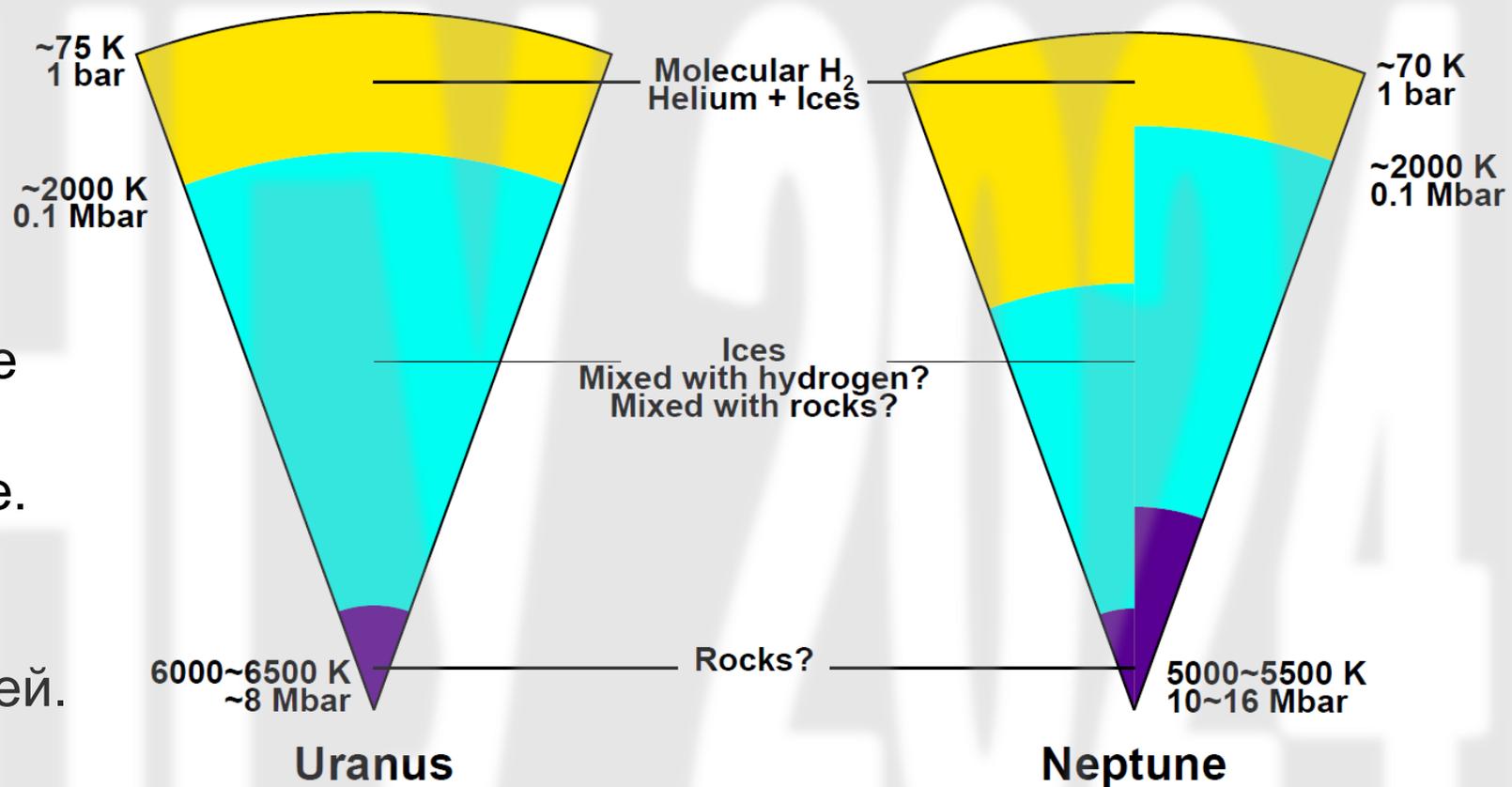
	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Absorbed power [ $10^{16} \text{ J s}^{-1}$ ]	50.14±2.48	11.14±0.50	0.526±0.037	0.204±0.019
Emitted power [ $10^{16} \text{ J s}^{-1}$ ]	83.65±0.84	19.77±0.32	0.560±0.011	0.534±0.029
Intrinsic power [ $10^{16} \text{ J s}^{-1}$ ]	33.5±2.6	8.63±0.60	0.034 <sup>+0.038</sup> <sub>-0.034</sub>	0.330±0.035
Intrinsic flux [ $\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ]	5.44±0.43	2.01±0.14	0.042 <sup>+0.047</sup> <sub>-0.042</sub>	0.433±0.046
Bond albedo []	0.343±0.032	0.342±0.030	0.300±0.049	0.290±0.067
Effective temperature [K]	124.4±0.3	95.0±0.4	59.1±0.3	59.3±0.8
1-bar temperature <sup>b</sup> [K]	165±5	135±5	76±2	72±2

# Структура планет-гигантов

[arXiv:1405.3752](https://arxiv.org/abs/1405.3752)

Мы не только плохо знаем внутренний химический состав планет гигантов, но и физические свойства вещества при таких высоких давлении и температуре.

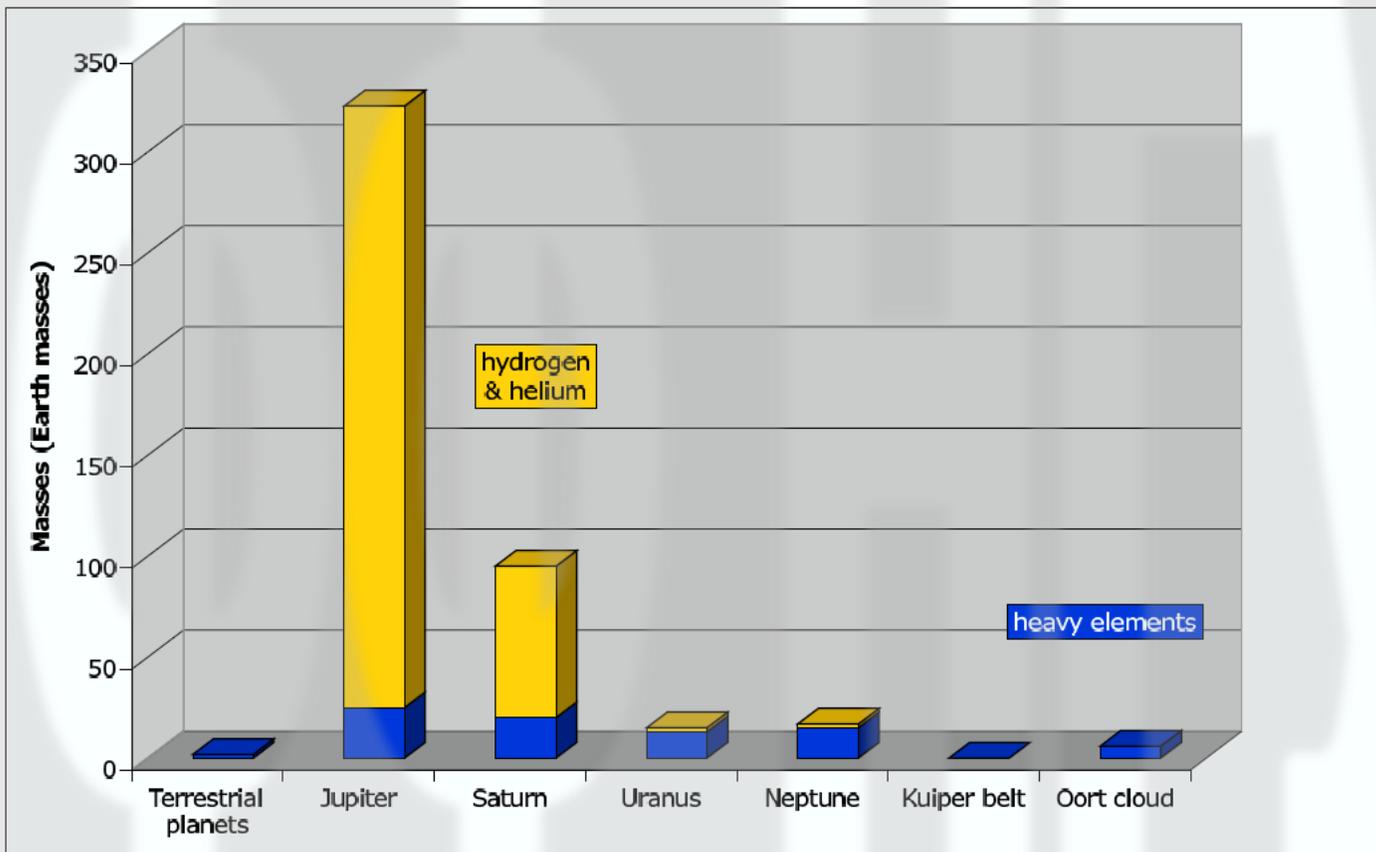
Это существенно усложняет построение более точных моделей.



В составе Урана и Нептуна, по всей видимости, существенную долю составляют льды, в состав которых входят более тяжелые элементы – углерод, азот, кислород. Возможно с заметной примесью силикатов.

# Структура планет-гигантов

arXiv:1405.3752



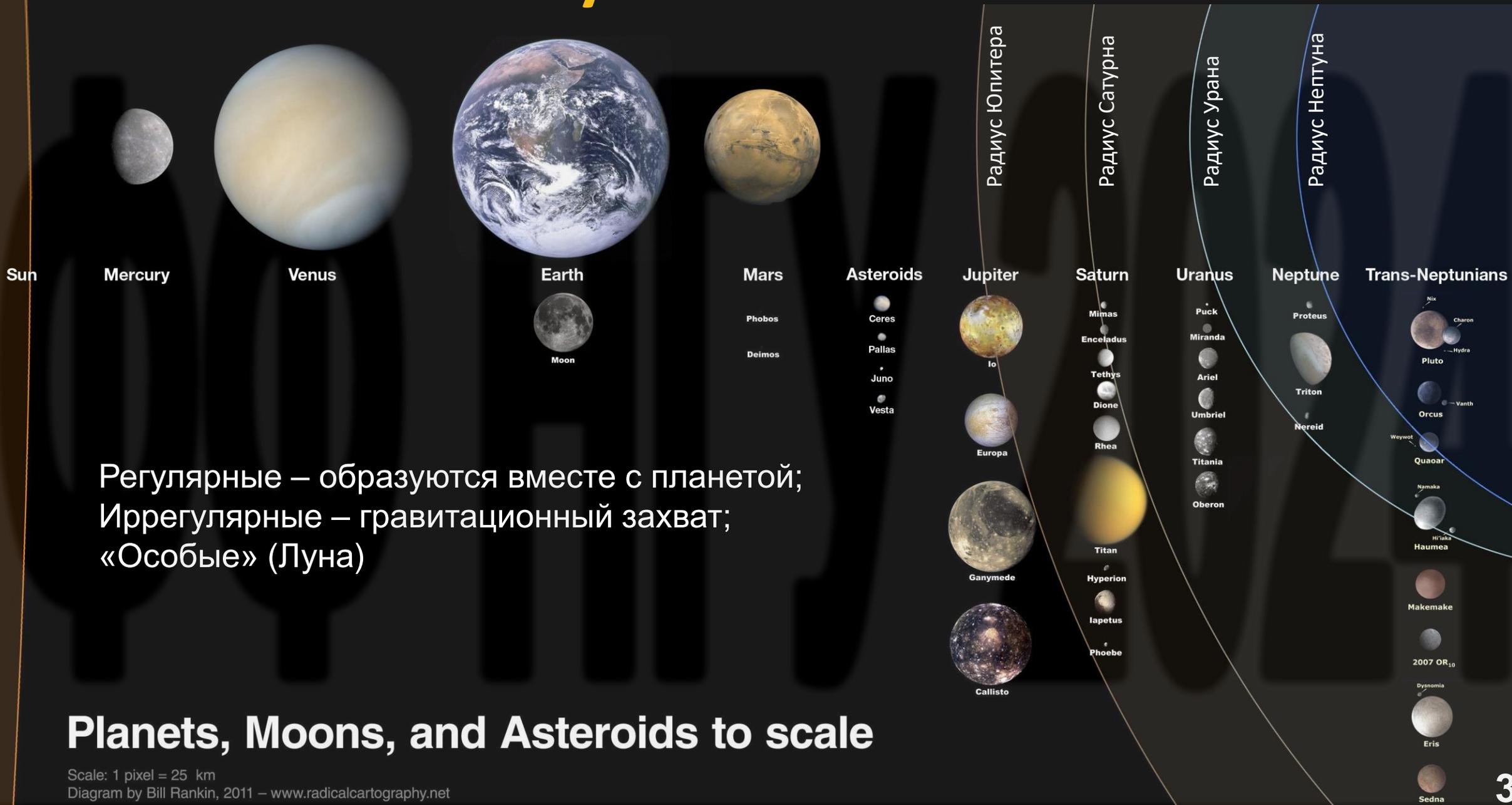
В планетах земного типа, астероидах и кометах относительно мало водорода и почти нет гелия.

В газовых гигантах они доминируют.

В составе Урана и Нептуна (ледяных гигантов) доминируют элементы тяжелее гелия.

В планетах земного типа легкие элементы (водород и гелий) составляют пренебрежимо малую долю массы.

# Спутники планет



Регулярные – образуются вместе с планетой;  
 Нерегулярные – гравитационный захват;  
 «Особые» (Луна)

## Planets, Moons, and Asteroids to scale

Scale: 1 pixel = 25 km  
 Diagram by Bill Rankin, 2011 – www.radicalcartography.net

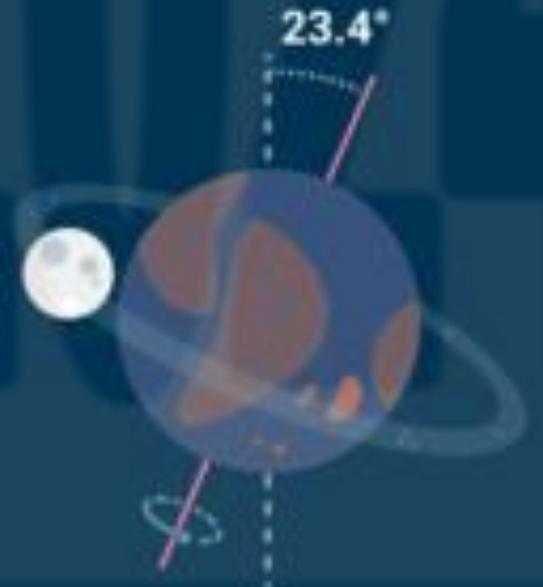
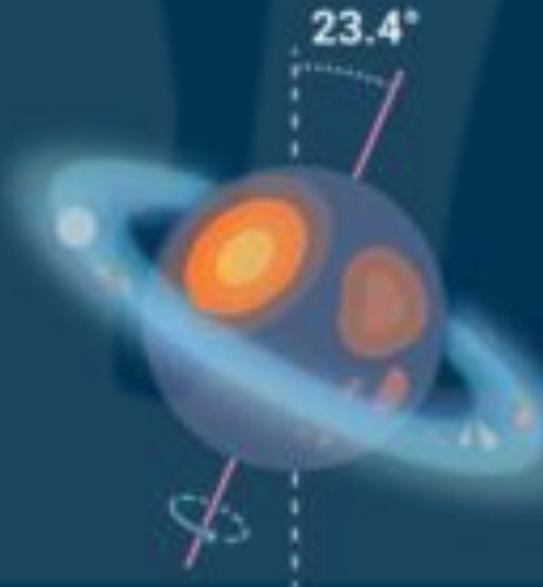
# Формирование Луны

Основной моделью образования Луны считается столкновения протоземли с объектом массой примерно равной массе Марса. Изотопный состав Луны практически идентичен земному.

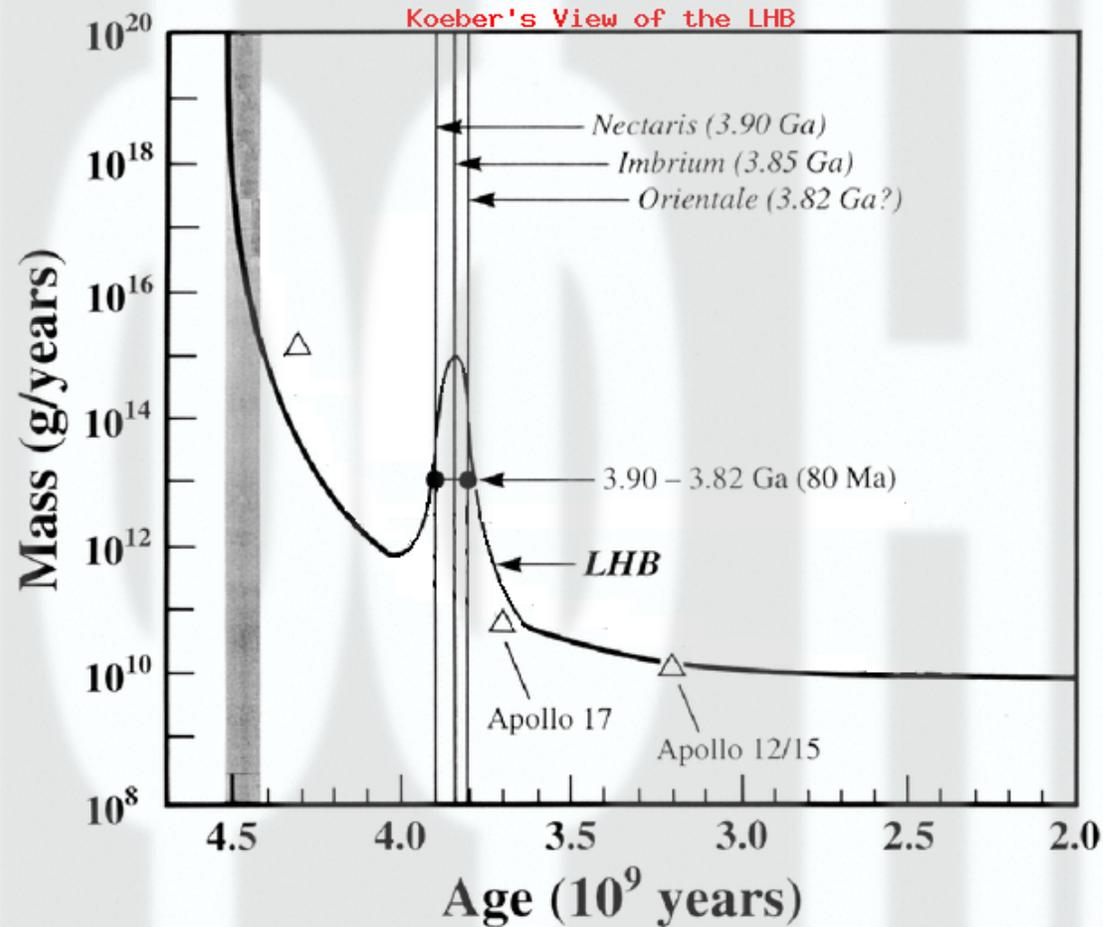
Ударная модель, хоть и не лишена своих трудностей, способна объяснить многие наблюдаемые характеристики системы Земля-Луна:

- наклон оси Земли;
- большой момент импульса системы Земля-Луна;
- малый размер ядра Луны;
- практически идентичный изотопный состав Земли и Луны.

THEIA



# Поздняя тяжелая бомбардировка

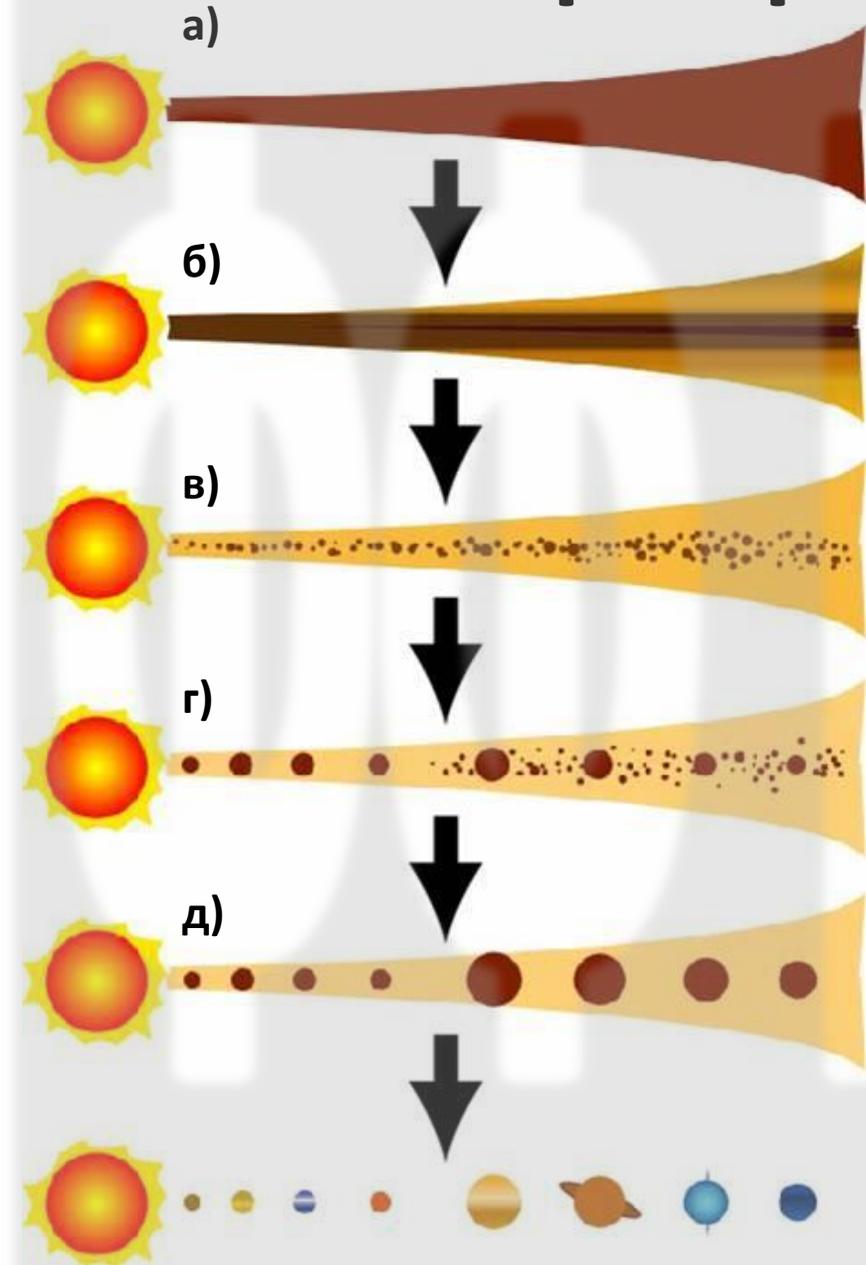


Результаты детальных исследований возраста кратеров и различных участков поверхности Луны (и других планет земной группы и спутников) **указывают** на существенное увеличение интенсивности бомбардировки ее поверхности в период 600 – 700 Млет после образования Солнечной системы.

Для объяснение этого наблюдения была высказана **гипотеза** поздней тяжелой бомбардировки.

Более поздний анализ возрастов кратеров Луны поставил под сомнение сам факт поздней тяжелой бомбардировки.

# Формирование планетных систем



Долгое время мы представляли себе образование планетных систем в рамках достаточно упрощенной картины:

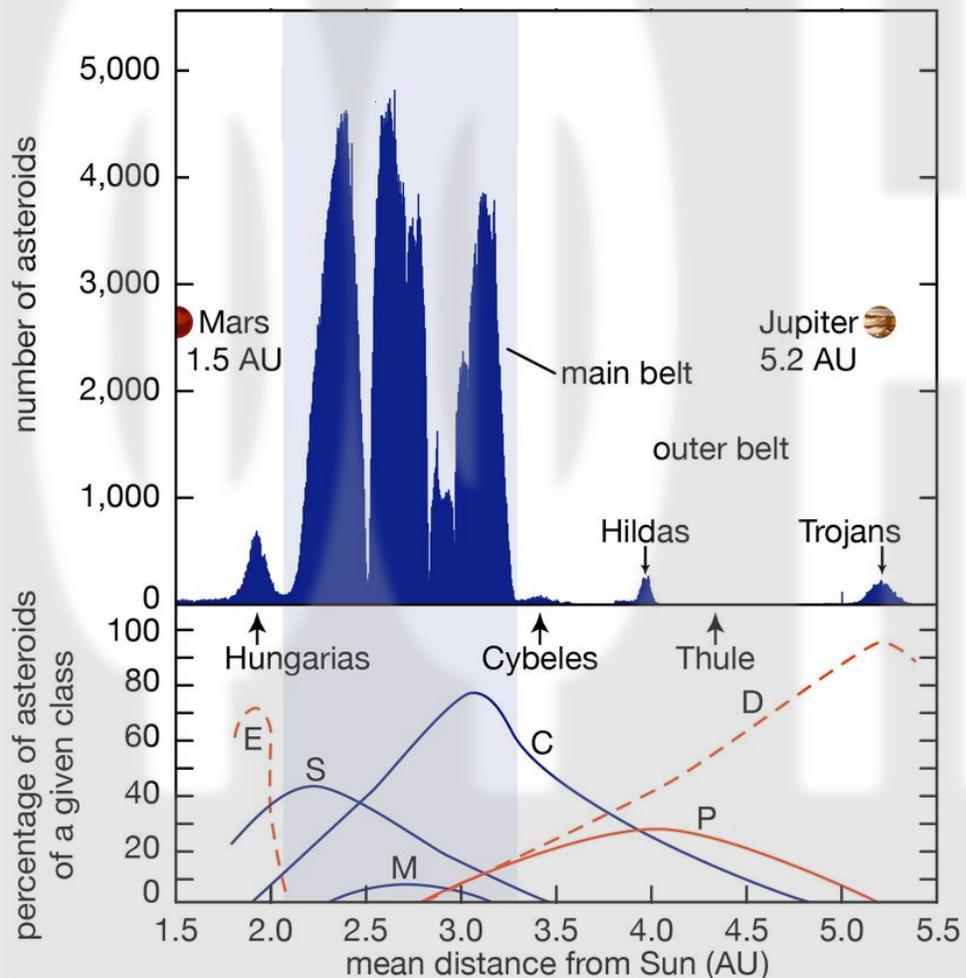
- а) возникает звезда и диск вокруг нее
- б) в диске начинается слипание пылевых частиц
- в) постепенно из них образуются планетезимали
- г) крупные планетезимали растут, поглощая мелкие
- д) наконец, остаются крупные планеты.

Все планеты стоят примерно на своих местах: вблизи звезды – маленькие железно-каменные, далее – газовые гиганты, еще дальше – газово-ледяные гиганты.

С открытием экзопланет стало понятно, что эта картина слишком упрощенная.

# Снеговая линия

Вблизи звезды жарко, поэтому лед не может существовать. Легкие элементы в газообразном состоянии быстро «сдуваются» солнечным ветром и УФ светом в область низких температур, где они могут сконденсироваться в лед. Там образуются каменные и железно-каменные тела. Характерная температура устойчивости льда  $\sim 150$  °K (конечно зависит от вещества).



$$T_{\Pi} = T_{\odot} (1 - \varepsilon)^{1/4} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a}}$$



$$a \approx 3 \text{ a. e.}$$

что примерно соответствует главному поясу астероидов. Действительно, состав астероидов главного пояса заметно меняется с увеличением большой полуоси.

S – повышенное содержание силикатов;

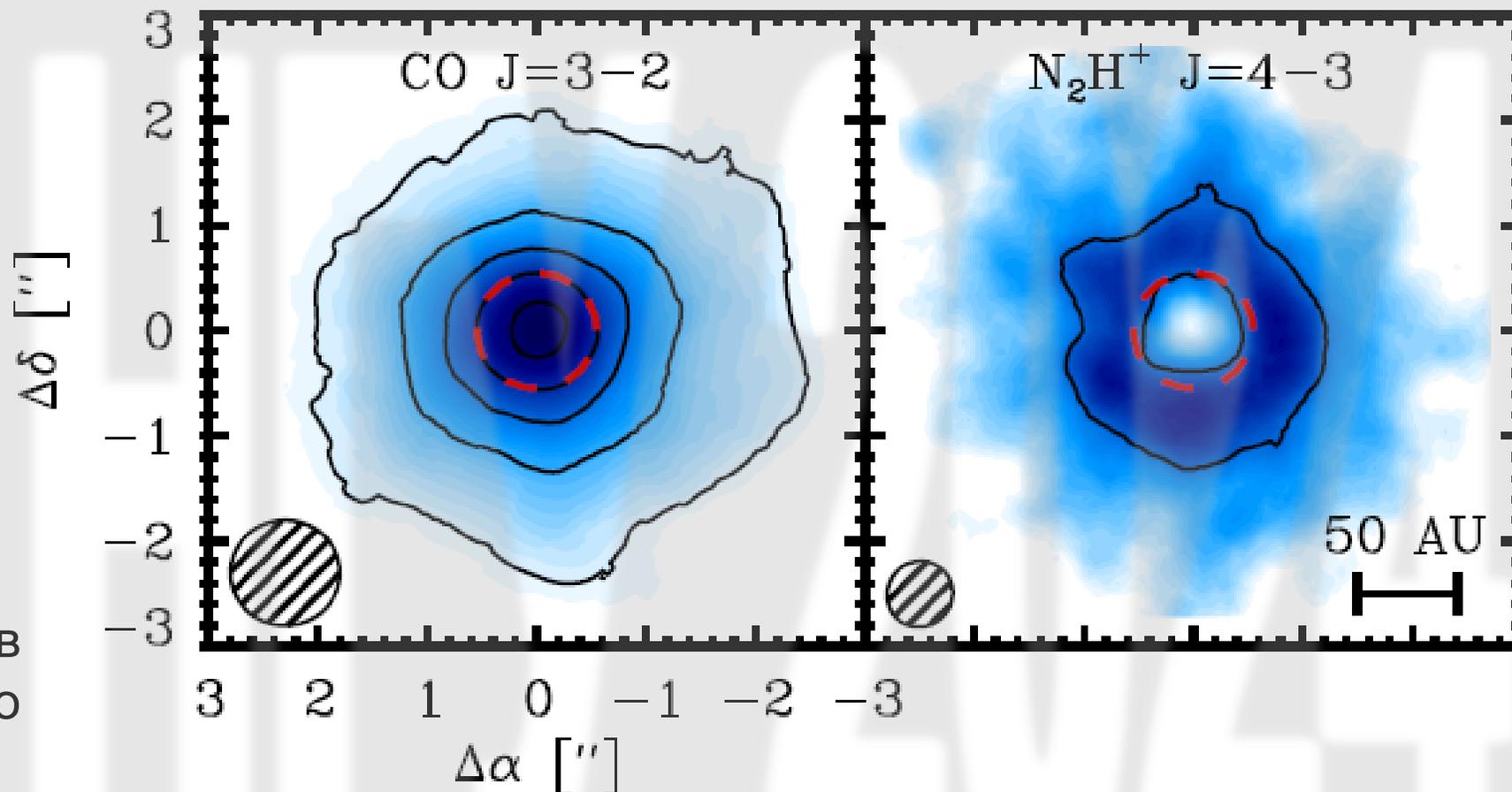
C – повышенное содержание углерода;

D – повышенное содержание «льдов»;

# Снеговая линия

arXiv:1307.7439

Система TW Гидры по  
наблюдениям ALMA



Ионы  $N_2H^+$  существуют в свободном состоянии только при отсутствии молекул CO.

При наблюдении в линии излучения CO, видим его повышенное содержание вблизи звезды и отсутствие излучения  $N_2H^+$ . На расстоянии примерно 25 а.е. CO «вымерзает», и наблюдаются линии излучения ионов  $N_2H^+$ .

# Формирование планетных систем

**Основы количественной** теории всех ключевых этапов эволюции протопланетного диска были заложены в трудах советского астрофизика Виктора Сергеевича Сафронова в 1950-60 годах.

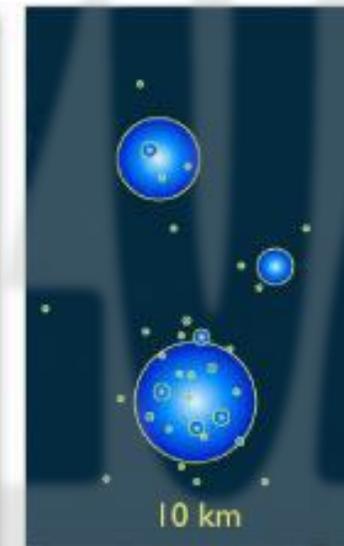
- а) образование протопланетного диска;
- б) седиментация микро-пылинок с образованием объектов ~см размера (pebbles=галька);
- в) образование планетезималей ~10 – 100 км из-за гравитационной неустойчивости в пылевом слое;
- г) аккреция планетезималей с образованием планетных объектов.

Множество современных наблюдений подтверждают основные идеи этой модели.

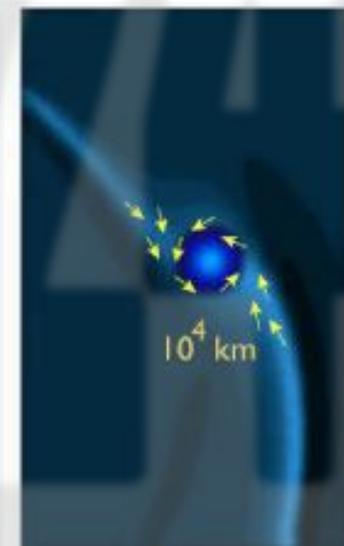
Формирование фракций мм–см диапазона происходит в окрестности практически всех молодых звезд. Интенсивность этого процесса сильно коррелирует с металличностью звезды.



Early growth:  
Sticking and Coagulation



Mid-life growth:  
Gravitational Attraction

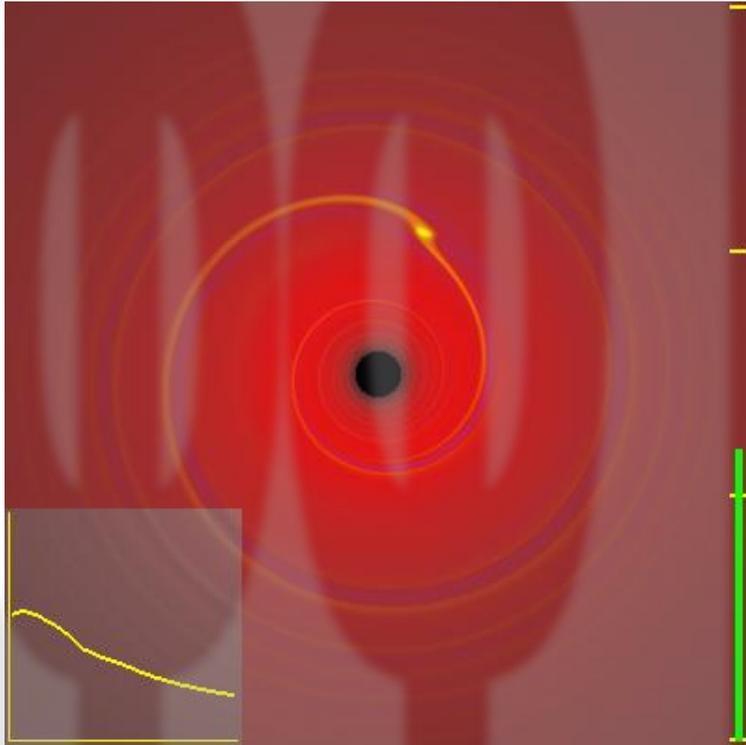


Late growth:  
Gas Sweeping

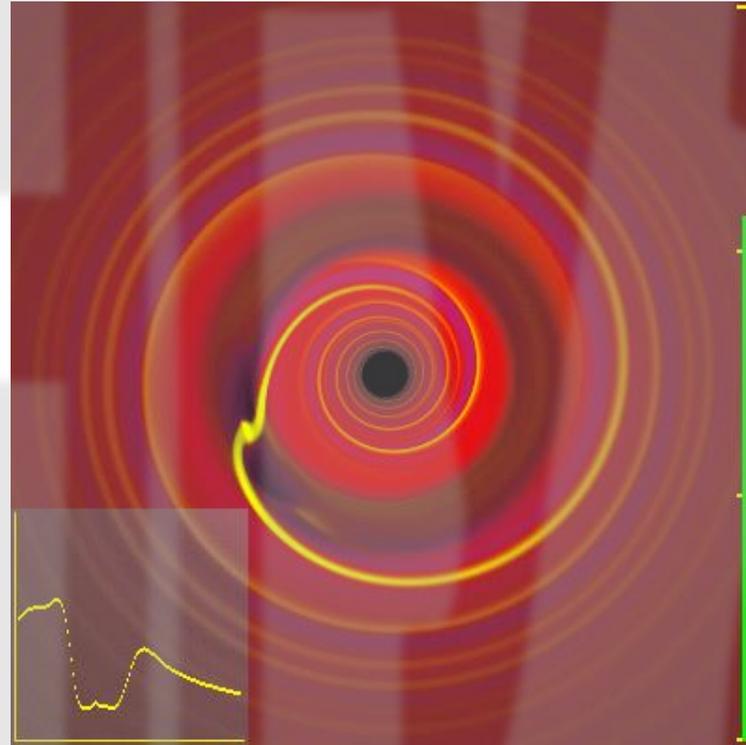
# Формирование планетных систем

Массивные ( $\sim 10 M_{\oplus}$ ) протопланеты могут сформироваться только за снеговой линией, где есть достаточное количество тяжелых элементов с высокой плотностью. Массивный объект взаимодействует с окружающим веществом диска. Характер и результат взаимодействия зависит от массы протопланеты и локальных параметров диска.

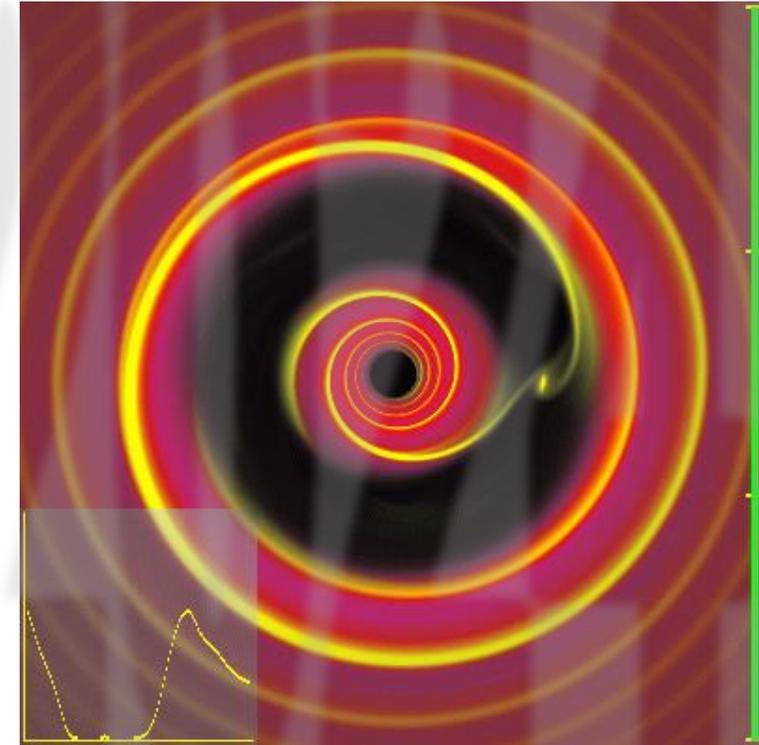
arXiv:astro-ph/0507492



**(1) Протопланета малой массы** создает спиралевидное возмущение в газовом диске, с которым взаимодействует. Миграция типа I.

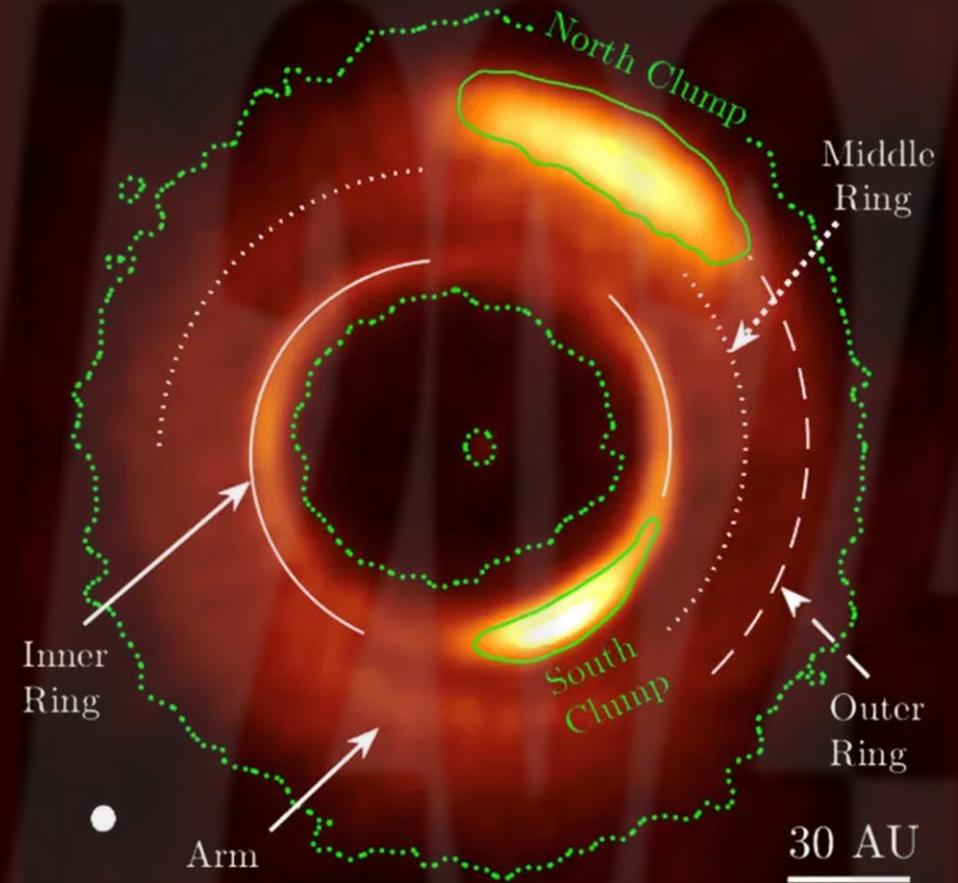
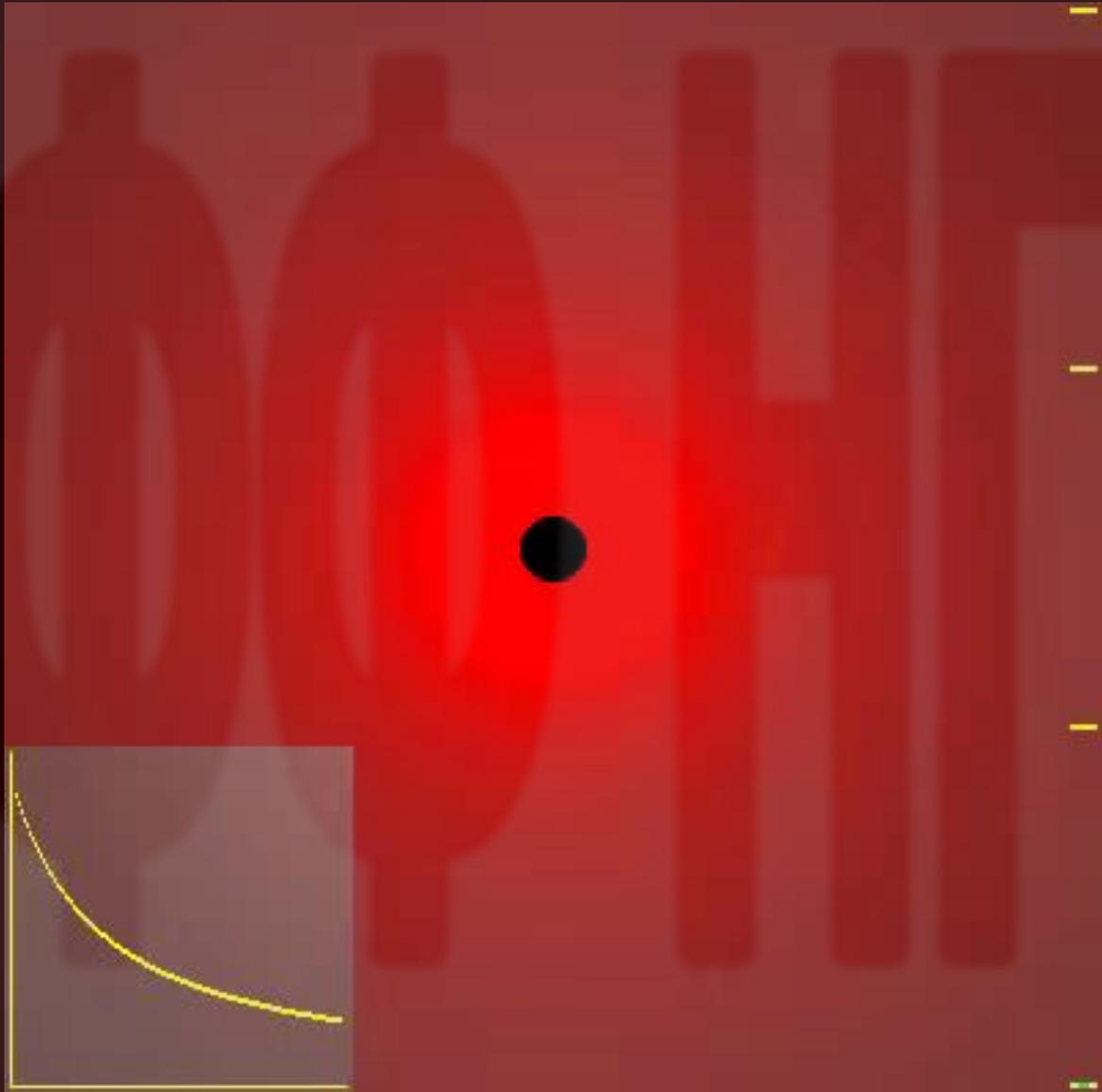


**(2) Образование щели:** По мере роста массы, растет влияние на диск. Область взаимодействия увеличивается, начало образования щели.



**(3) Миграция типа II:** гравитационного влияния достаточно, чтобы расчистить орбиту по всей толщине диска.

# Формирование планетных систем

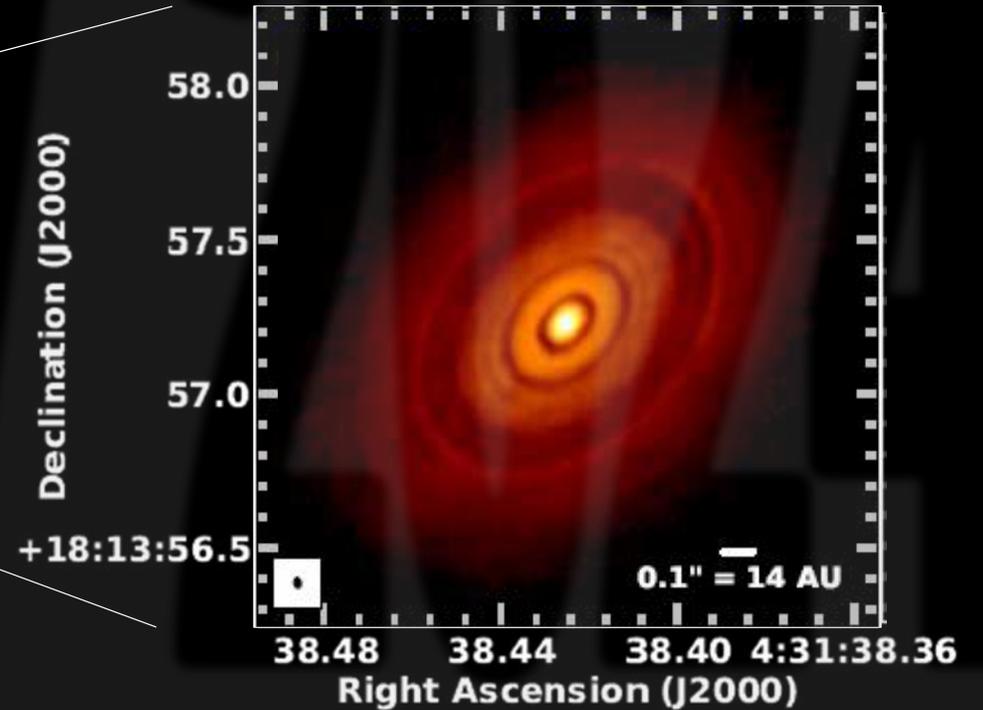
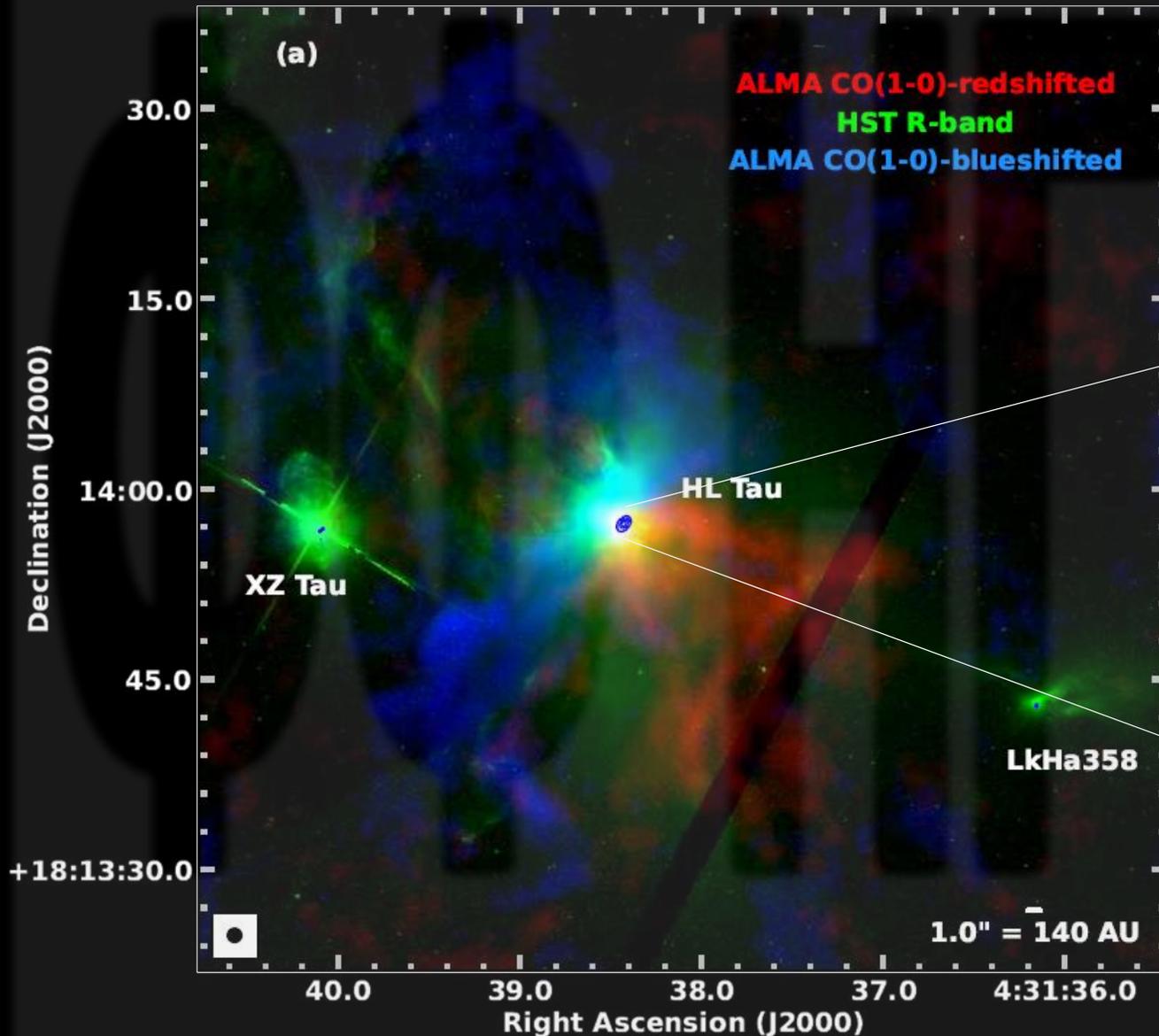


Протопланетный диск MWC 758 в Тельце по наблюдениям ALMA.

# Формирование планетных систем – HL Tau

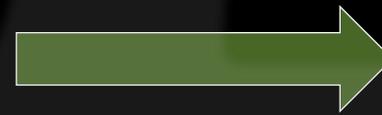
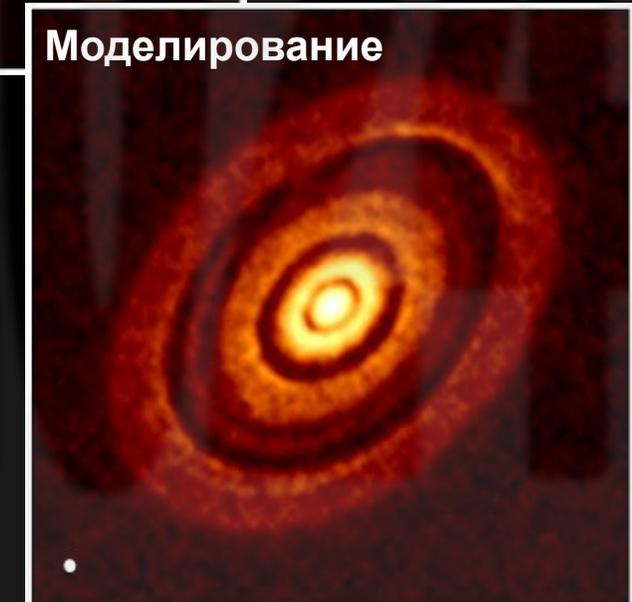
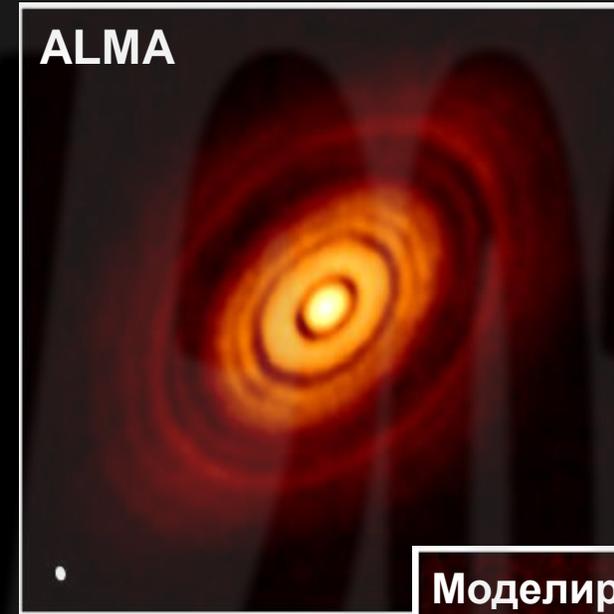
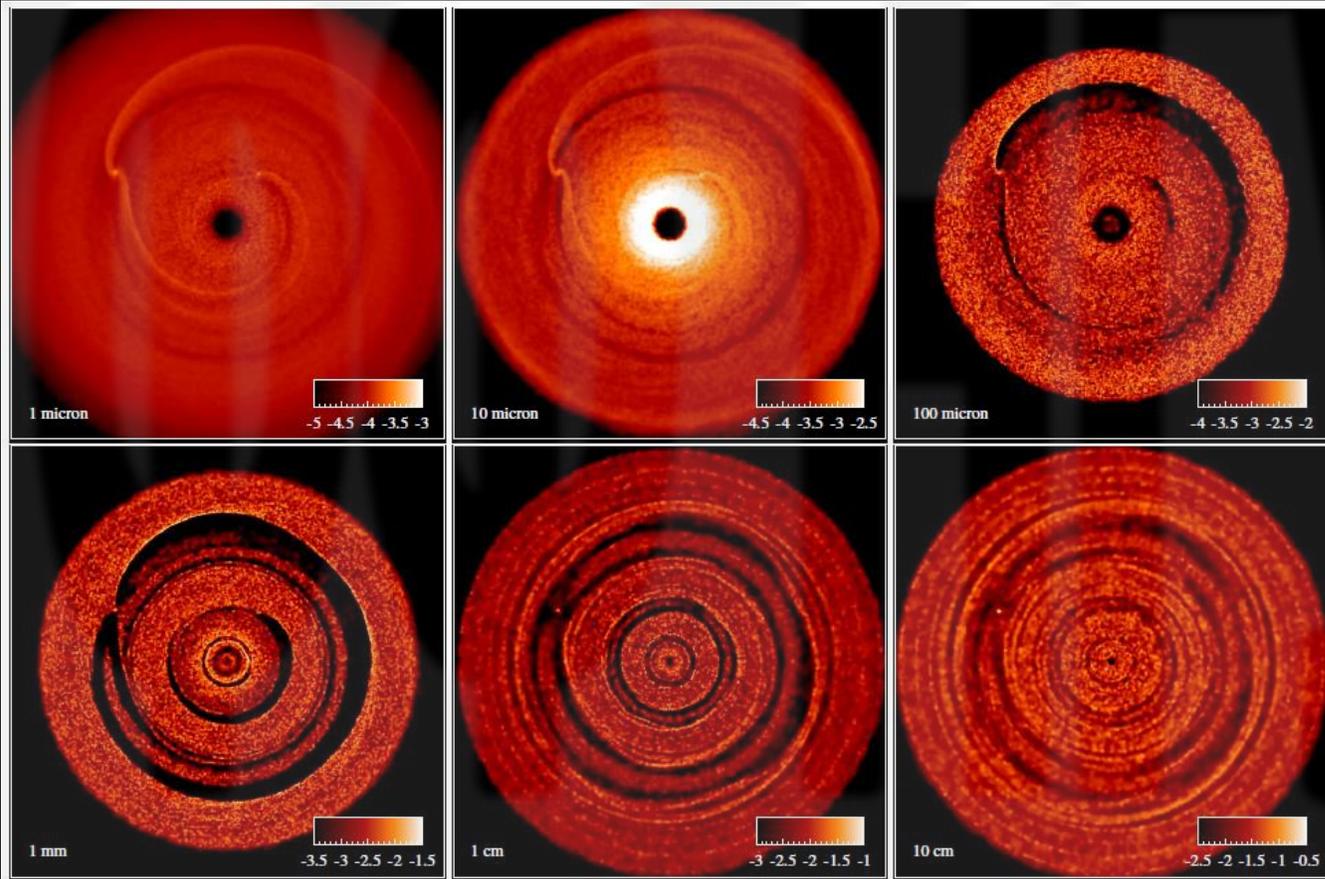
Одна из ближайших (~140 пк) к нам областей формирования звезд находится в созвездии Тельца.

arXiv:1503.02649



# Формирование планетных систем – HL Tau

Моделирование газо-пылевого облака HL Tau с включением трех протопланет 0.20, 0.27 и 0.55 от массы Юпитера.



Вид диска с учетом частиц разных размеров.

arXiv:1507.06719

# Эволюция планетных систем: Миграция

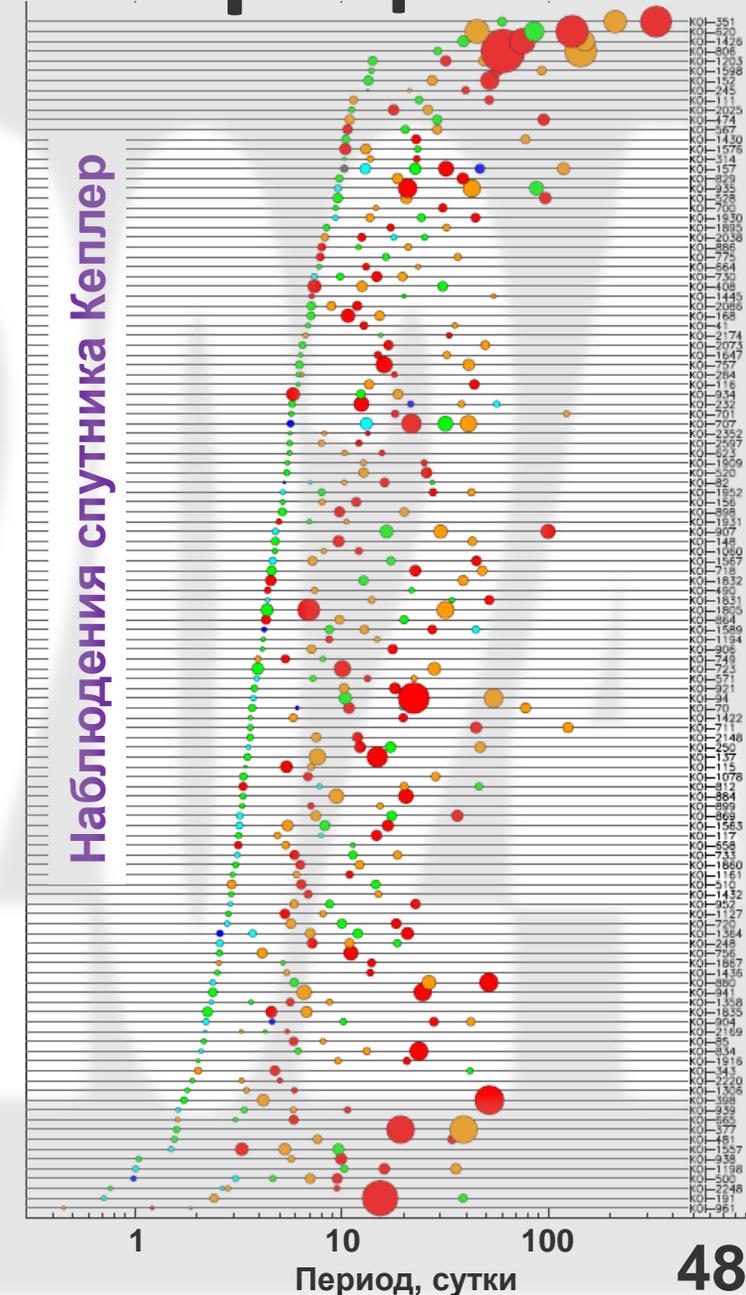
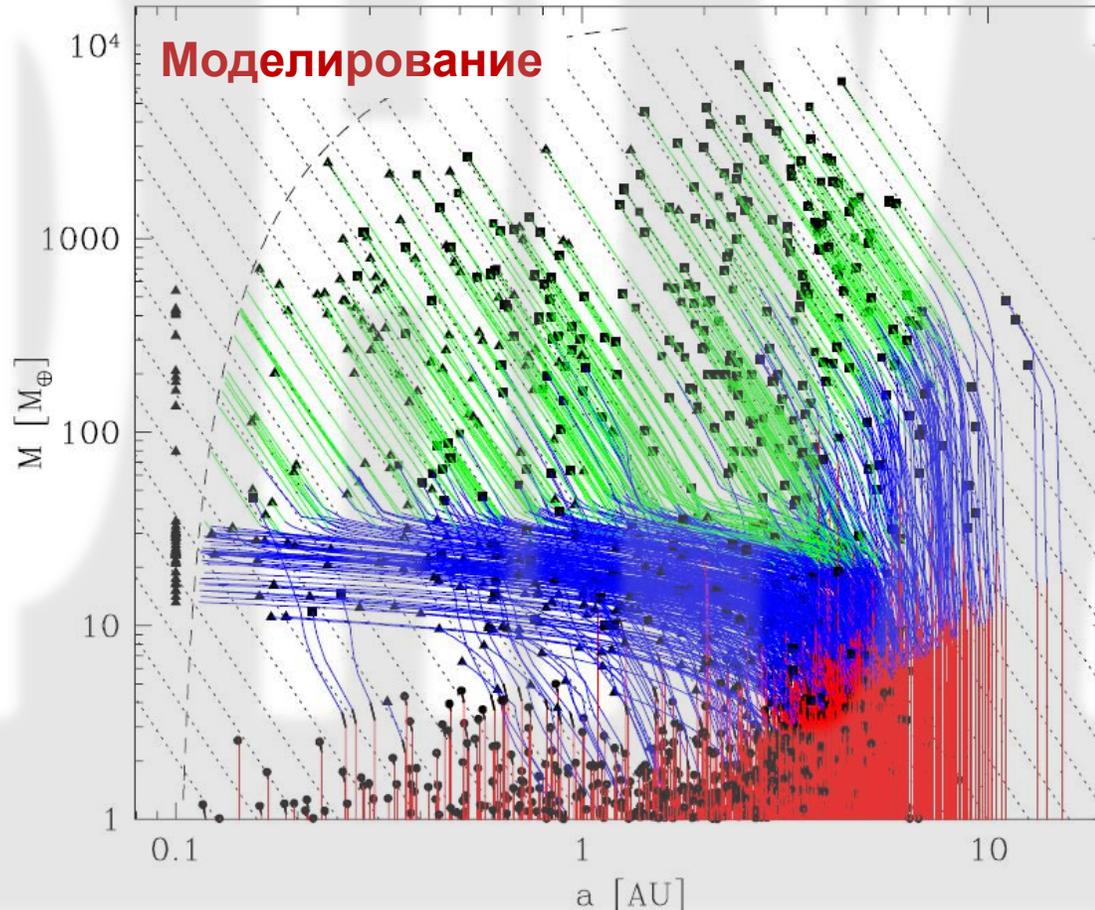
Взаимодействие с газопылевым диском и другими планетезималями приводит к миграции протопланеты. На начальной стадии миграция, как правило, идет в сторону звезды.

Простейший случай одной протопланеты в диске:

1) Более массивные планеты мигрируют быстрее.

2) Одновременно с миграцией идет набор массы

3) Слишком быстрый набор массы ведет к падению на звезду.

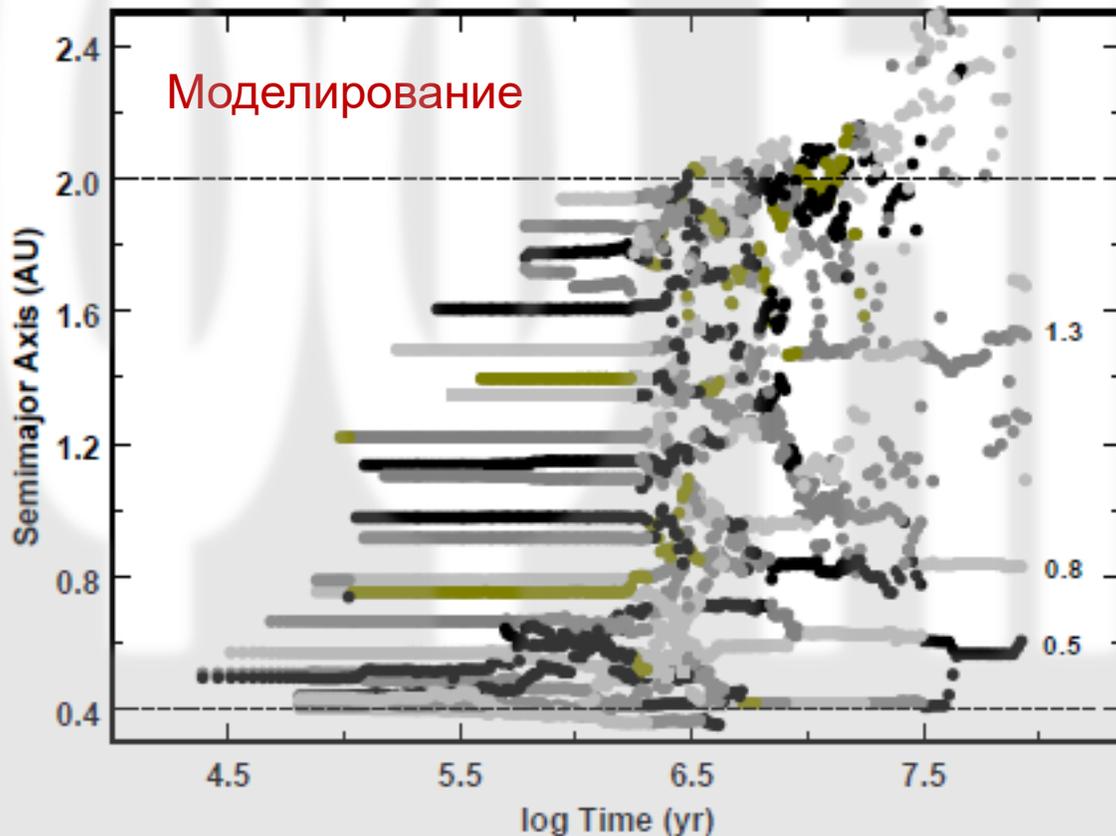


# Эволюция планетных систем: Миграция

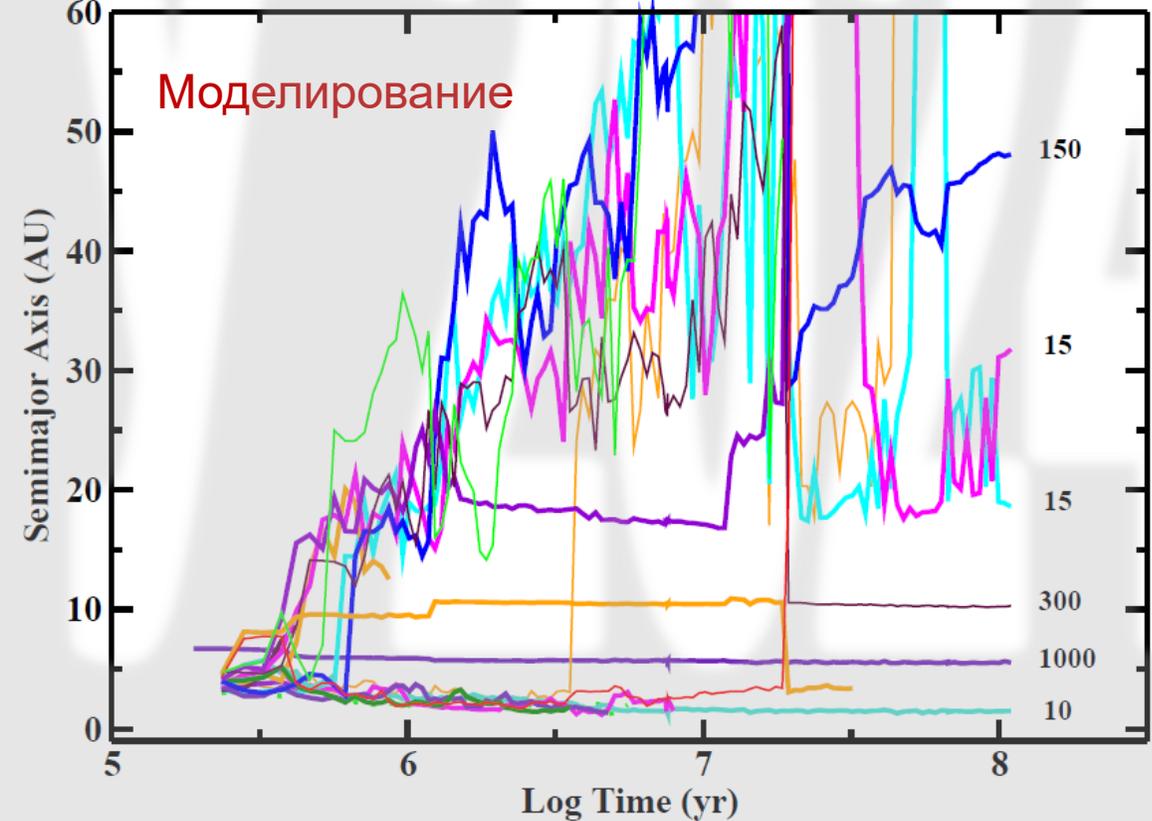
Крупные планетезимали активно поглощают более мелкие. Эта стадия эволюции называется «олигархическим ростом», т.к. чем крупнее объект, тем быстрее он растет. Наконец, остается лишь несколько крупных тел, которые занимают устойчивое относительное положение, и уже почти не мешают друг другу.

1206.0738

Область до снеговой линии.



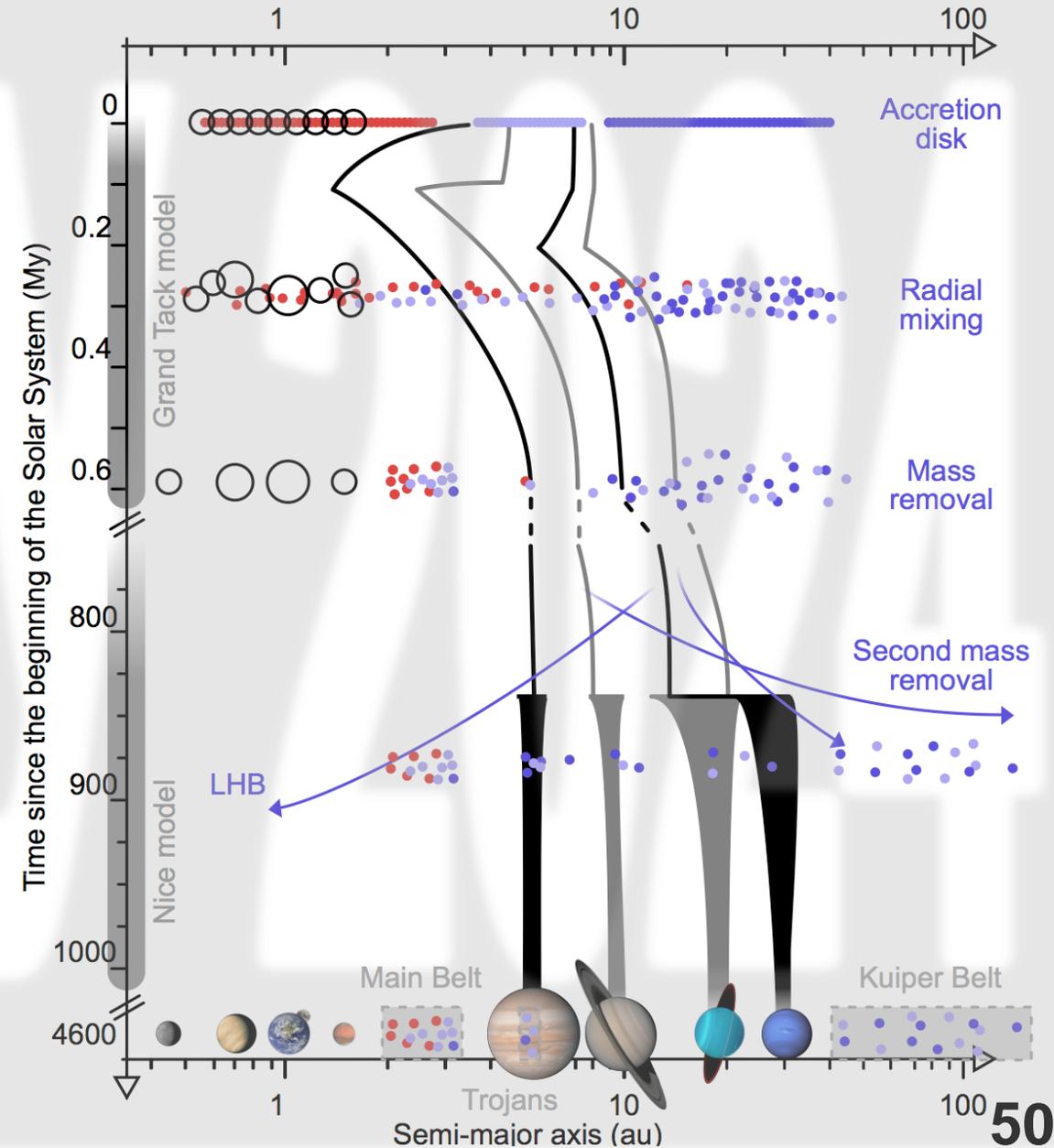
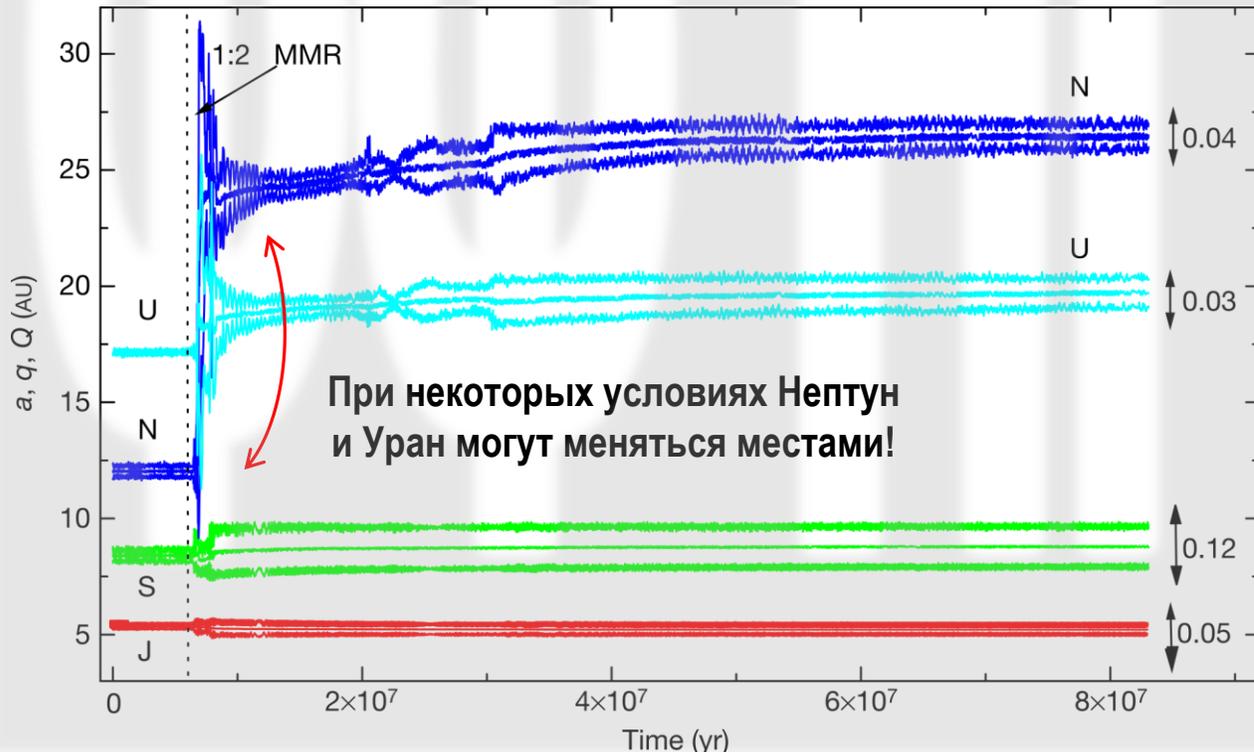
Область за снеговой линией.



# Эволюция Солнечной системы

1408.2787

Распределение астероидов в Солнечной системе как по параметрам их орбит, так и по химическому составу отражает процесс миграции планет-гигантов на ранней стадии эволюции.



# Эволюция Солнечной системы

Наиболее проработанными и взаимодополняющими являются модель группы из Ниццы (Nice Model ) и модель «Большого галса» (Grand Tack Model).

- 1) Существование горячих юпитеров – миграция;
- 2) Малая масса Марса – Юпитер выкинул большую часть вещества из его окрестностей в процессе миграции;
- 3) Масса Нептуна больше массы Урана – при некоторых условиях в процессе миграции возможна смена последовательности положения планет;
- 4) Большое количество воды на Земле – Юпитер перемешивает железно-каменные и ледяные планетезимали;
- 5) Поздняя тяжелая бомбардировка (если она была) – миграция планет-гигантов приводит к неустойчивости орбит малых тел на периферии СС.

# Эволюция планетных систем

На текущий момент можно уверенно утверждать, что миграция протопланет играет важнейшую роль в процессе образования планетной системы.

Процесс миграции зависит от множества факторов: состав, масса и распределение вещества в протопланетном облаке, параметры формирующейся звезды, магнитное поле и т.д., что крайне усложняет моделирование этих процессов.

Тем не менее, главные факторы уже достаточно хорошо поняты, и, по крайней мере на качественном уровне описывают наблюдения.

Изучение Солнечной системы экзопланетных систем и протопланетных дисков дает уникальную возможность проверить и доработать модели эволюции.