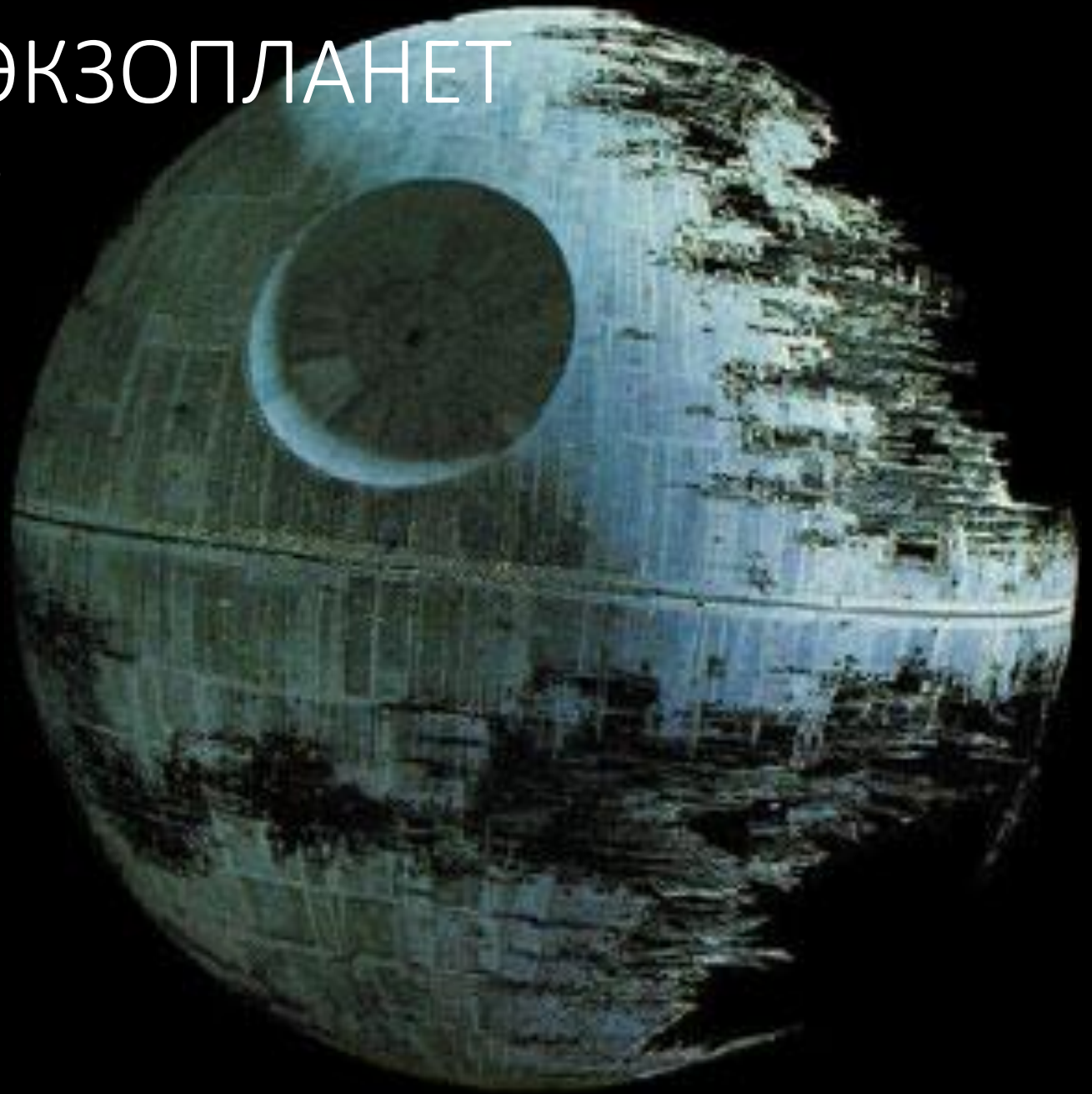
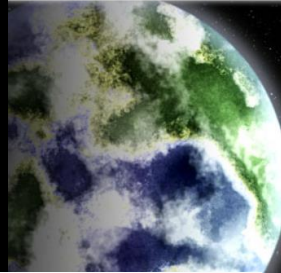


# СУДЬБЫ ЭКЗОПЛАНЕТ

Сергей Попов





Table

2926

EOD Planets  
Planets with good orbits listed  
in the Exoplanet Orbit  
Database



Plots

25

Other Planets  
Including microlensing and  
imaged planets



Search

BETA

2951

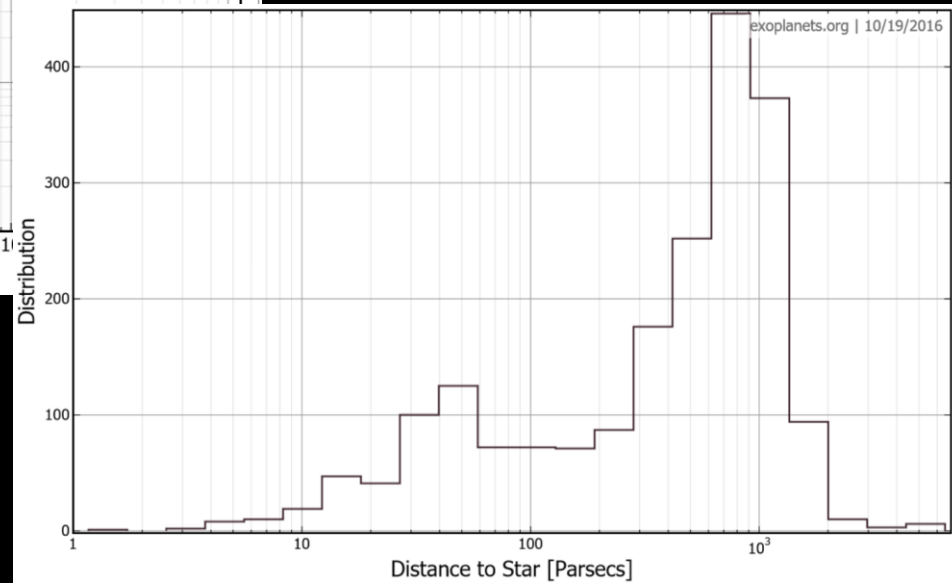
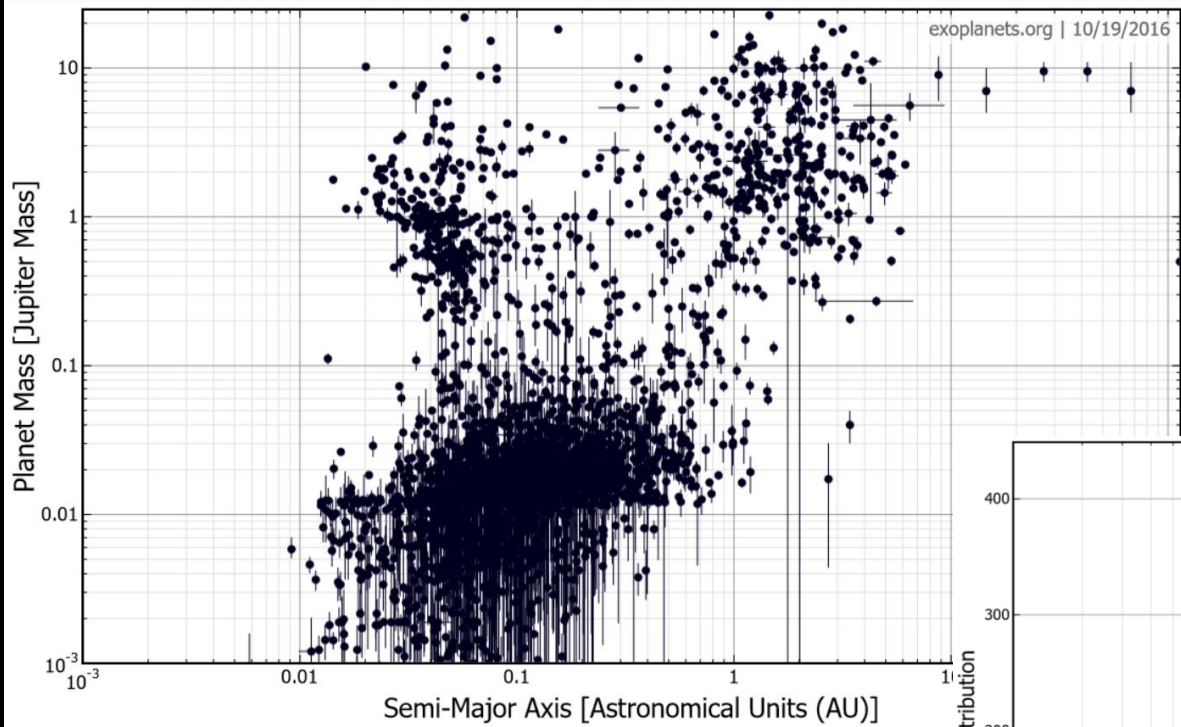
Total Confirmed  
Planets

2503

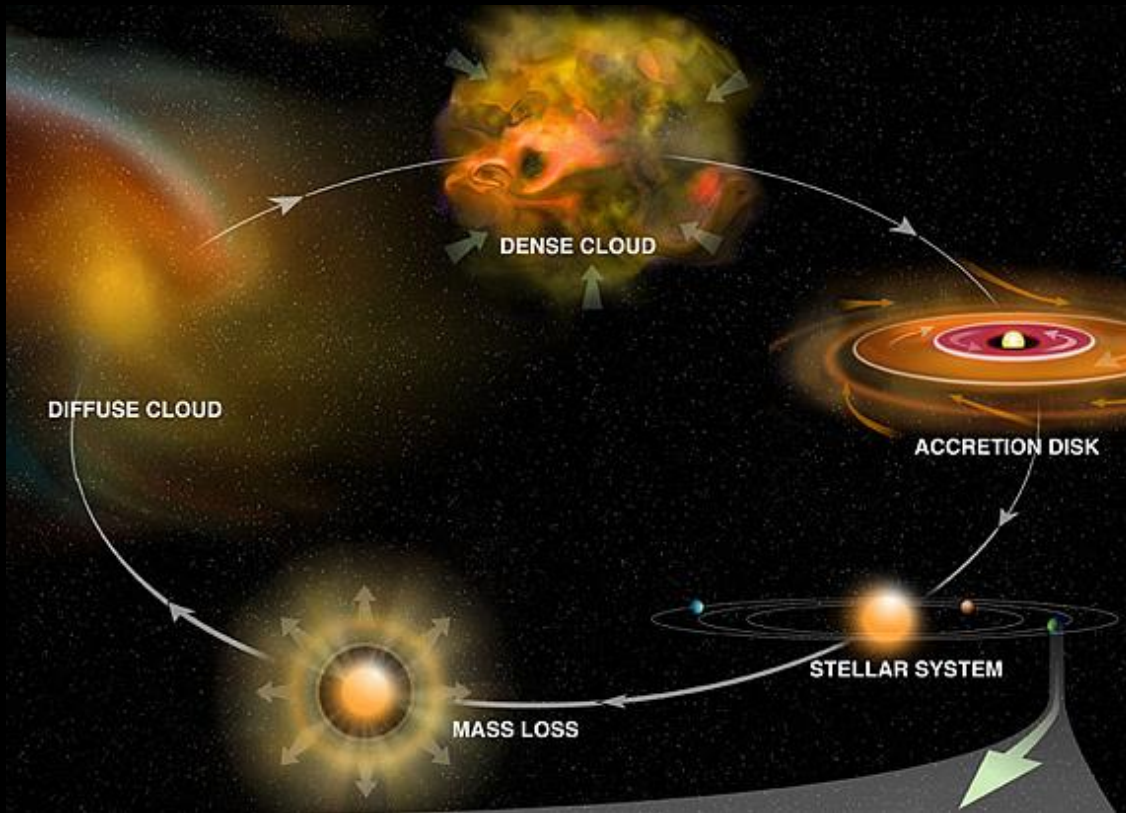
Unconfirmed Kepler  
Candidates

5454

Total Planets  
Confirmed planets + Kepler



# Галактический спиралеворот



Непрерывно идет процесс образования новых звезд и планетных систем, а также выброса вещества в межзвездную среду.

Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

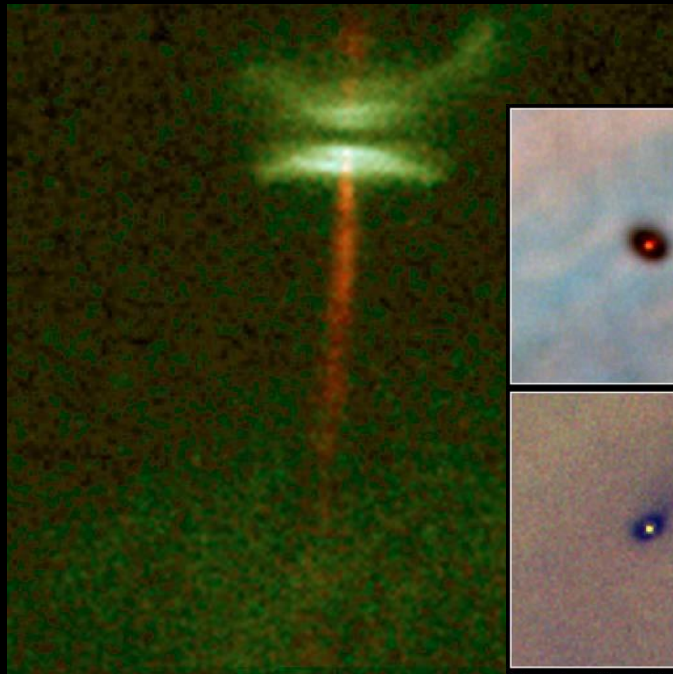
Со временем появились тяжелые элементы, и стало возможным создавать твердые планеты.

Наконец, появилась жизнь.



# Протопланетные диски

Мы видим, как образуются планеты и звезды.  
В некоторых случаях удастся даже рассмотреть структуру протопланетных дисков.

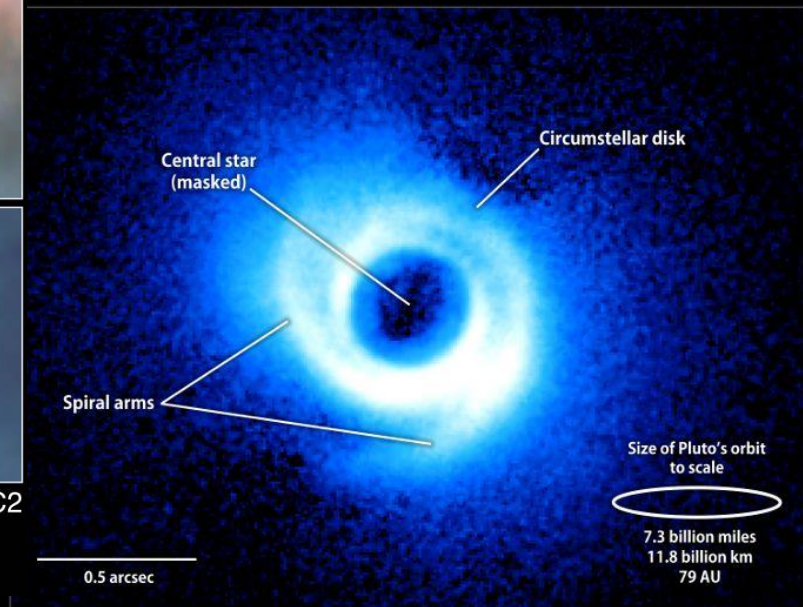


Protoplanetary Disks  
Orion Nebula

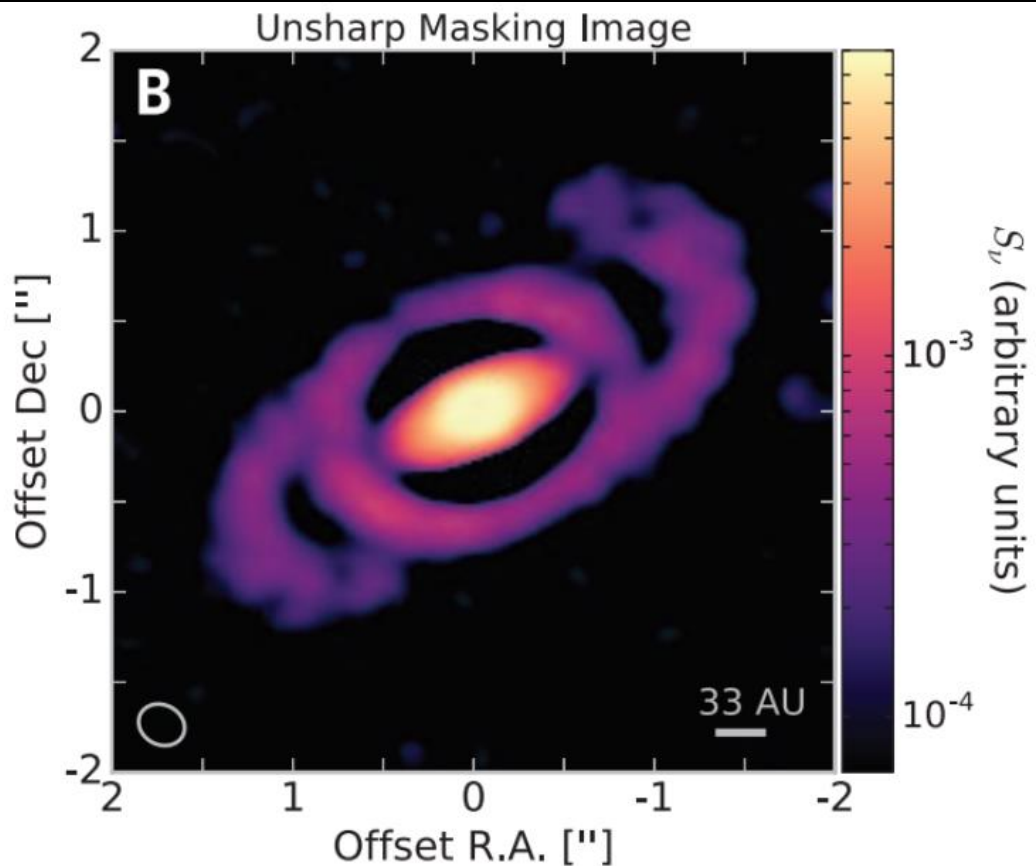
PRC95-45b - ST ScI OPO - November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

HST · WFPC2

Spiral features revealed in SAO 206462's dust disk



# Диск вокруг Elias 2-27



Спиральная структура вокруг Elias 2-27  
Наблюдения проводились на ALMA

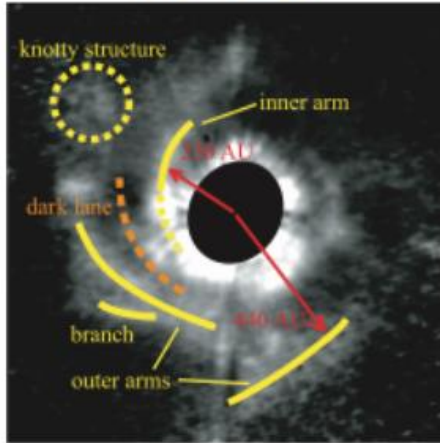
Масса звезды  $\sim 0.5 M_{\text{solar}}$   
Однако вокруг существует очень  
массивный диск ( $>0.1 M_{\text{solar}}$ ).

Важно, что на расстояниях  $>10$  а.е.  
диск прозрачен для излучения на  
волне 1.3 мм.

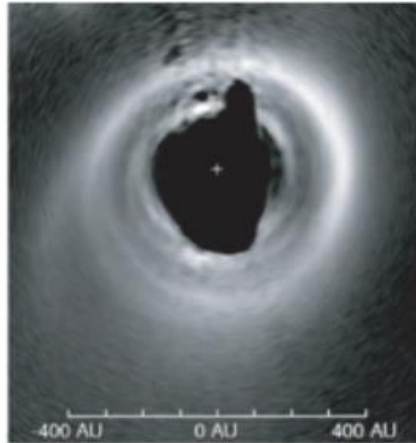
Т.о., спиральный узор относится и к  
веществу в плоскости диска, а не  
только на его поверхности.

# Галерея спиралей

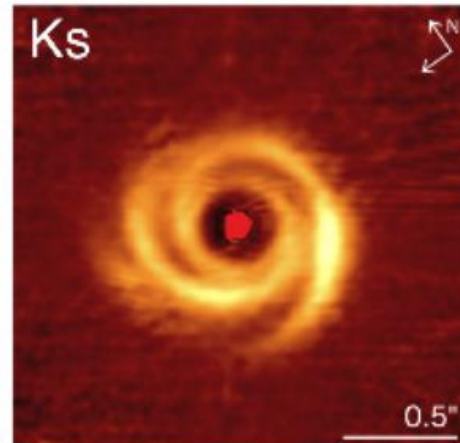
**AB Aur**



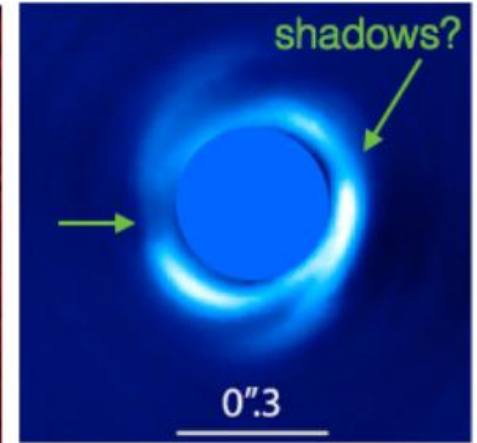
**HD 141569A**



**HD 135344B**



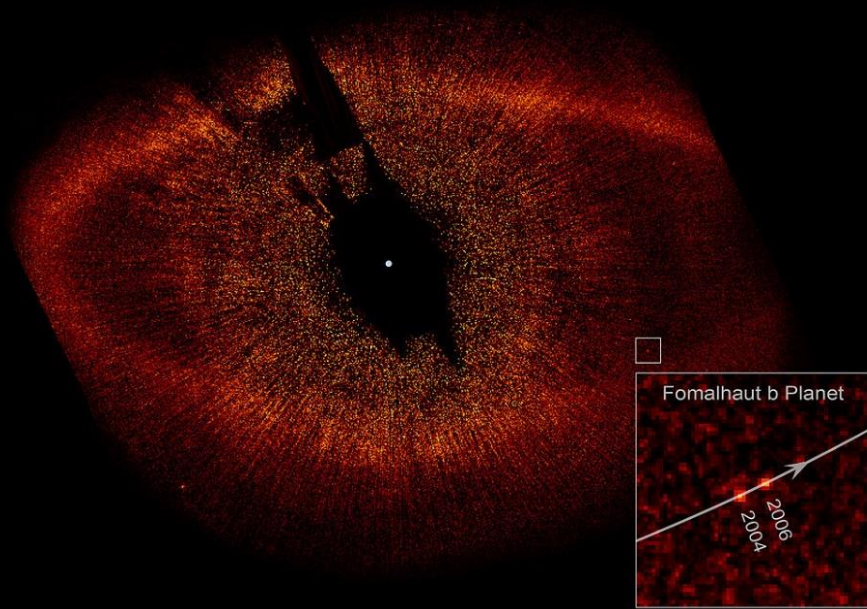
**HD 100453**



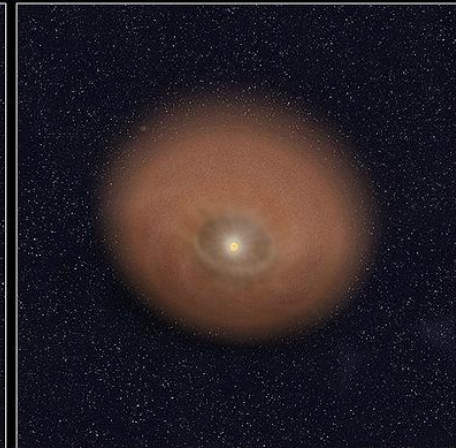
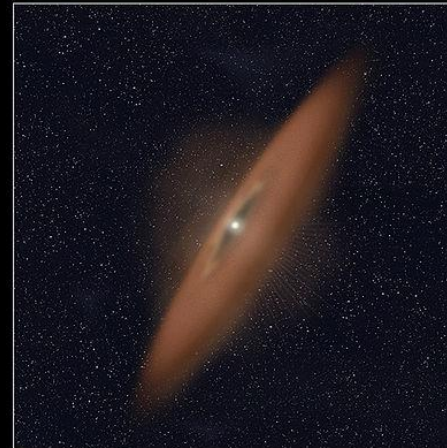
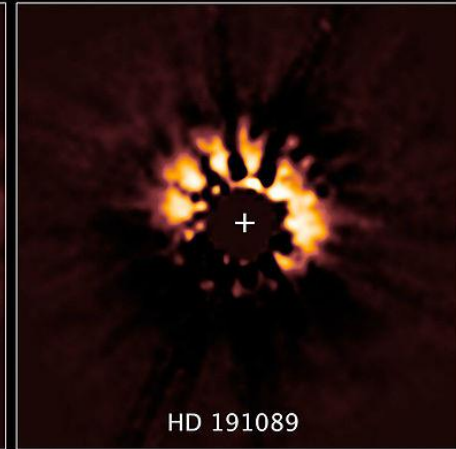
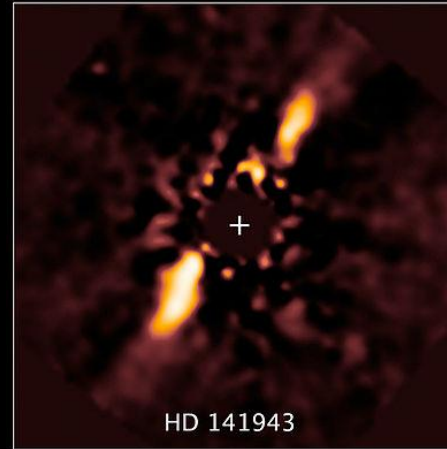
1602.06523



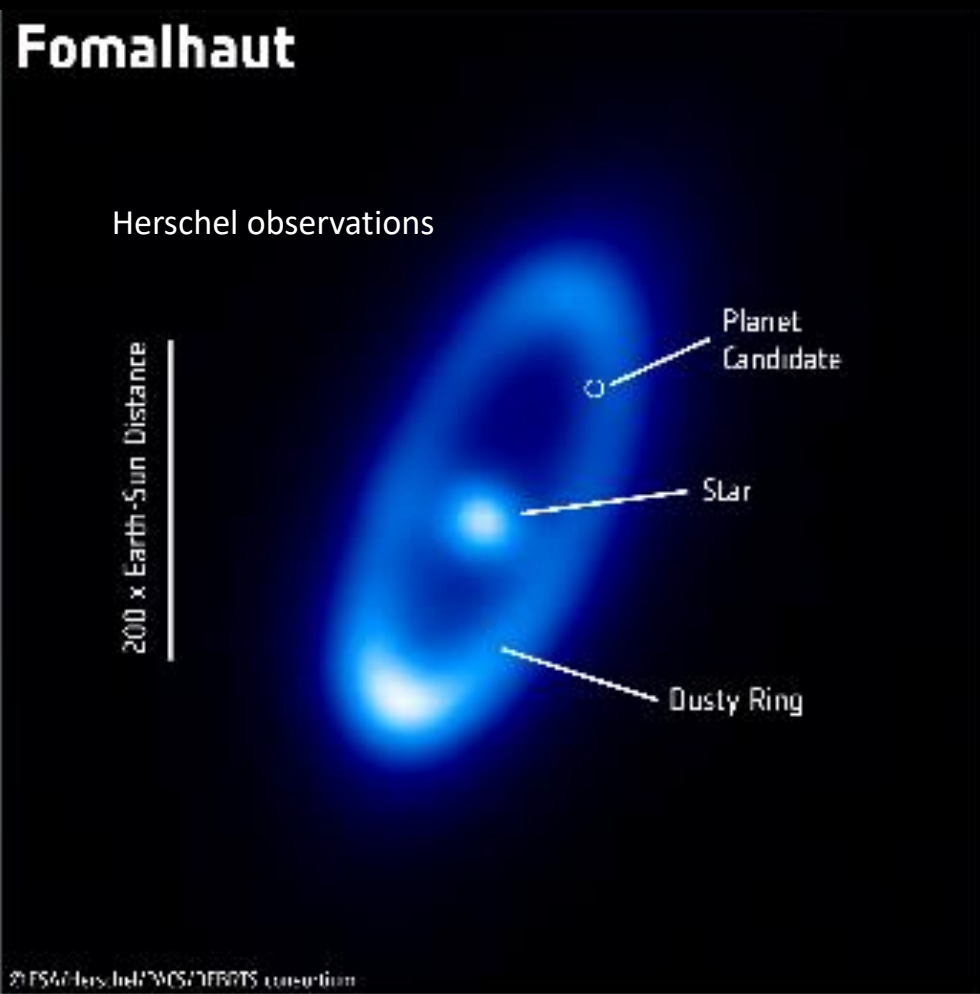
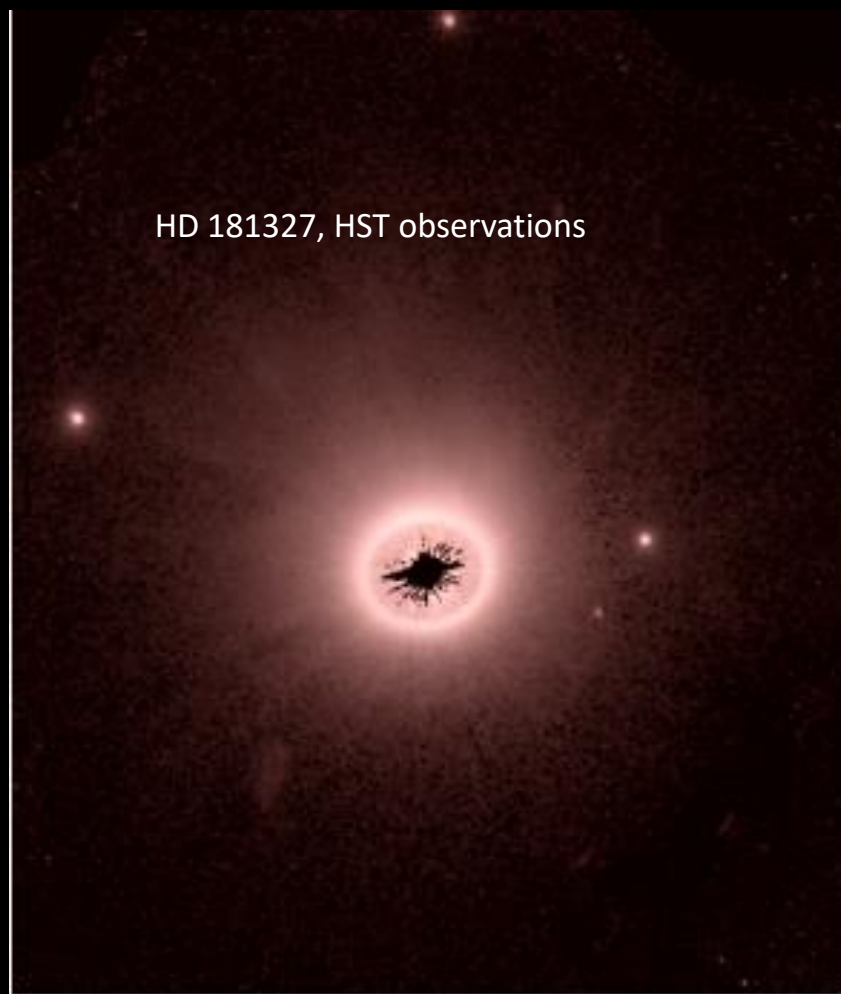
# Остаточные диски



Остаточные диски возникают уже после того, как протопланетный диск иссяк. Остаточные диски пополняются веществом благодаря столкновению небольших тел.



# Два примера остаточных дисков

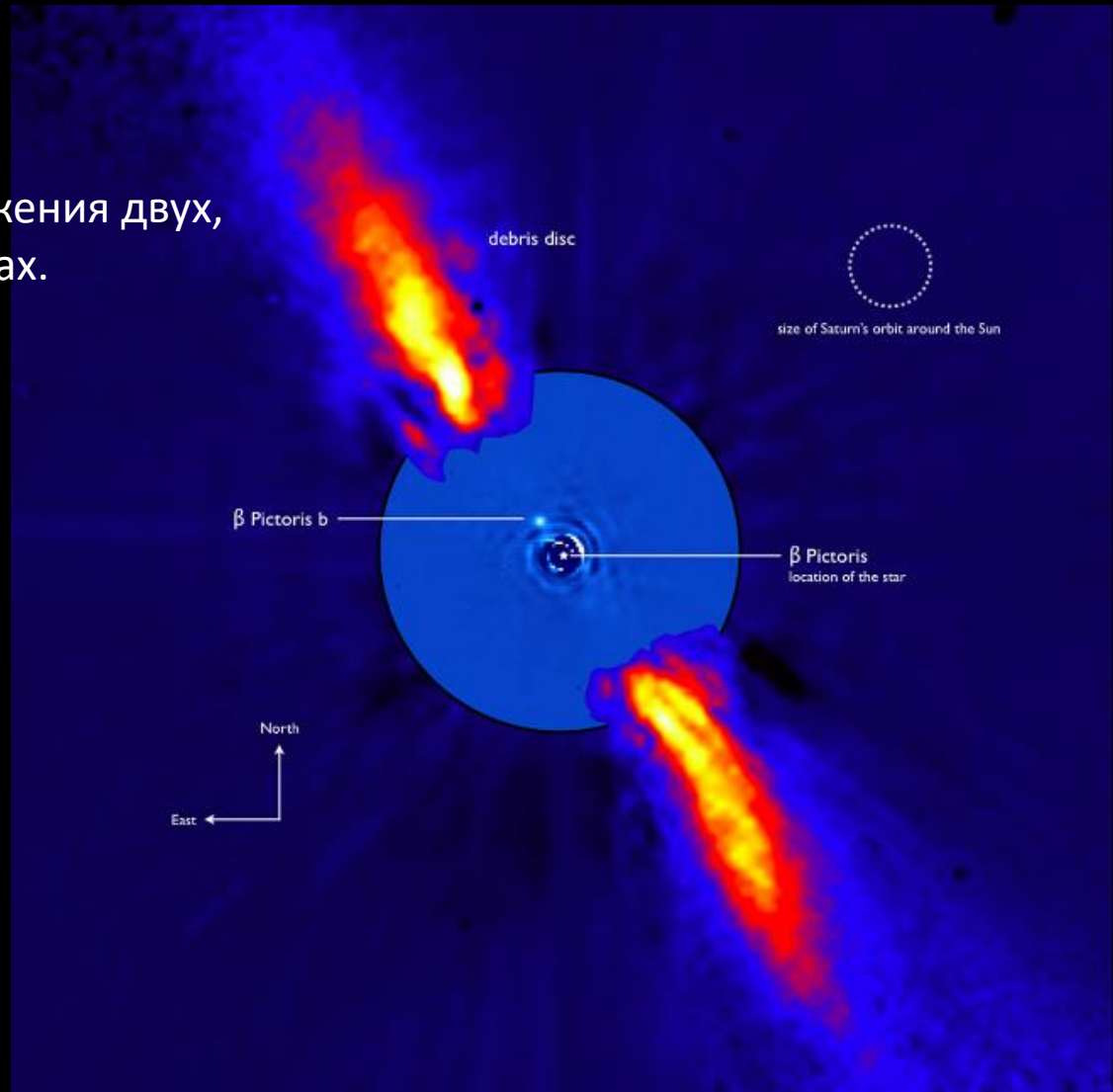


(взято из обзора 1703.08560)



# Бета Живописца

Изображение получено путем сложения двух, полученных на разных инструментах.



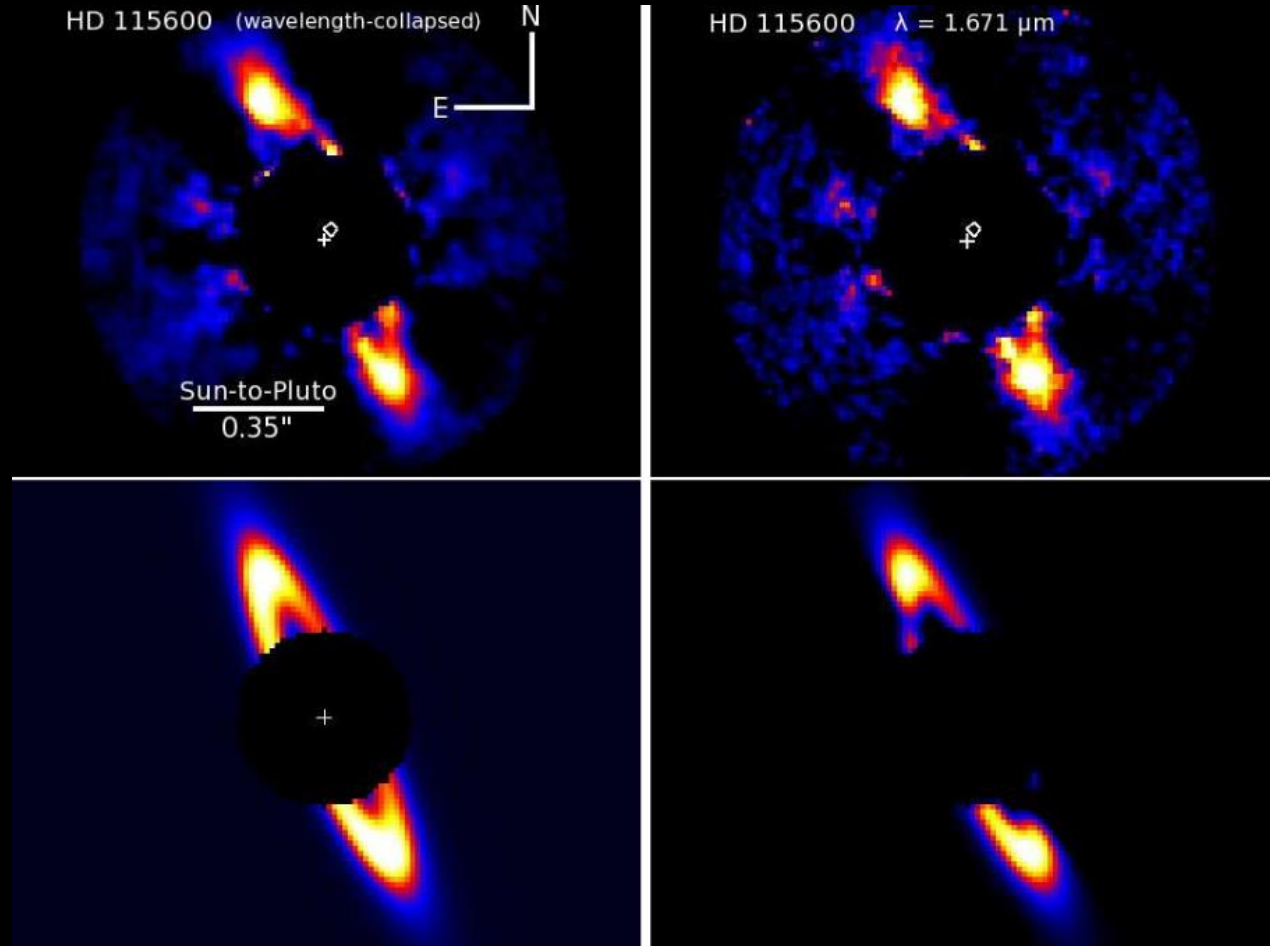
(взято из обзора 1703.08560)

# Молодой остаточный диск, похожий на пояс Койпера

HD 115600  
110 пк  
15 миллионов лет  
Масса звезды 1.4 солнечных

Gemini planet imager

Размер диска 48 а.е.



# Диск вокруг объекта планетной массы

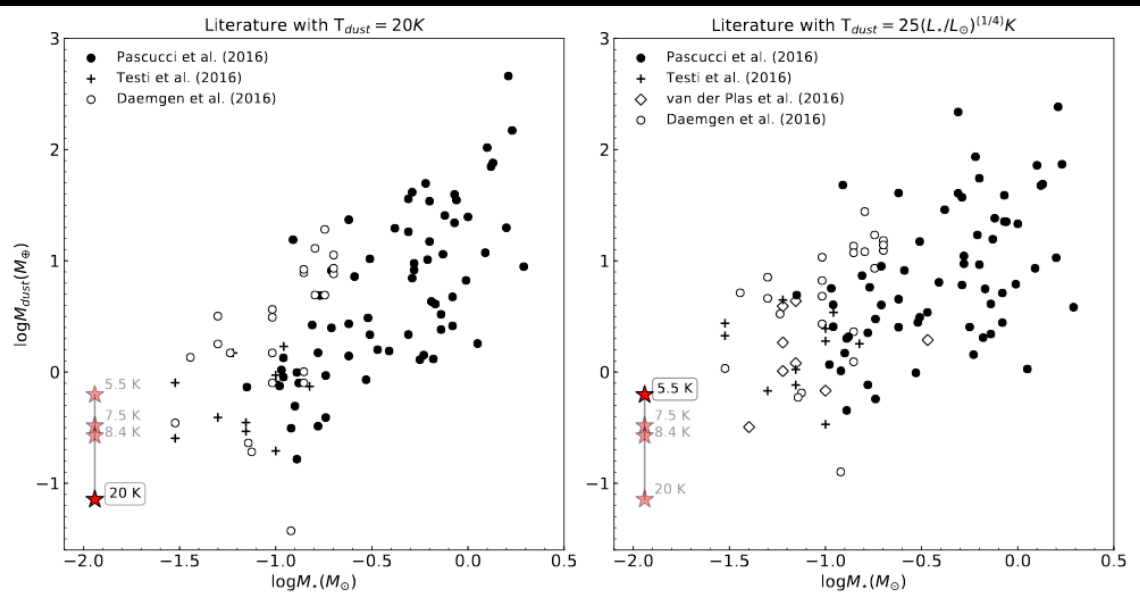
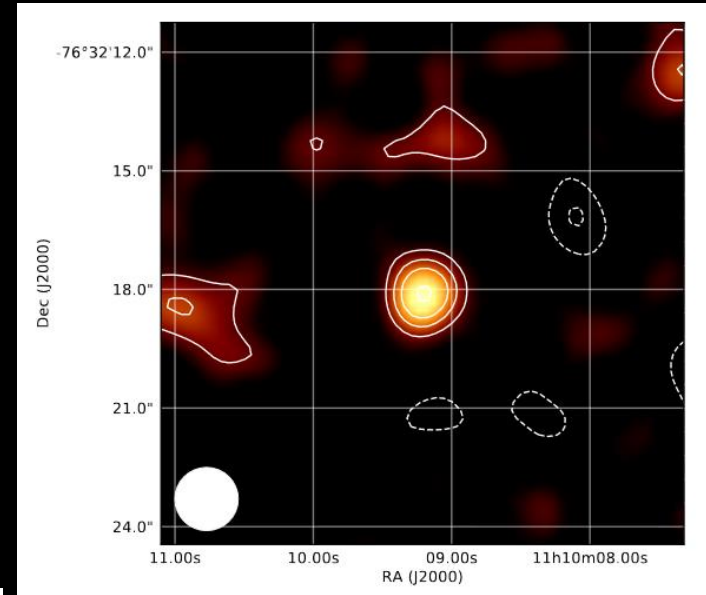
OTS44 – одна из четырех известных одиночных планет.

И лишь у нее есть диск.

Масса  $\sim 12 M_{\text{jupiter}}$

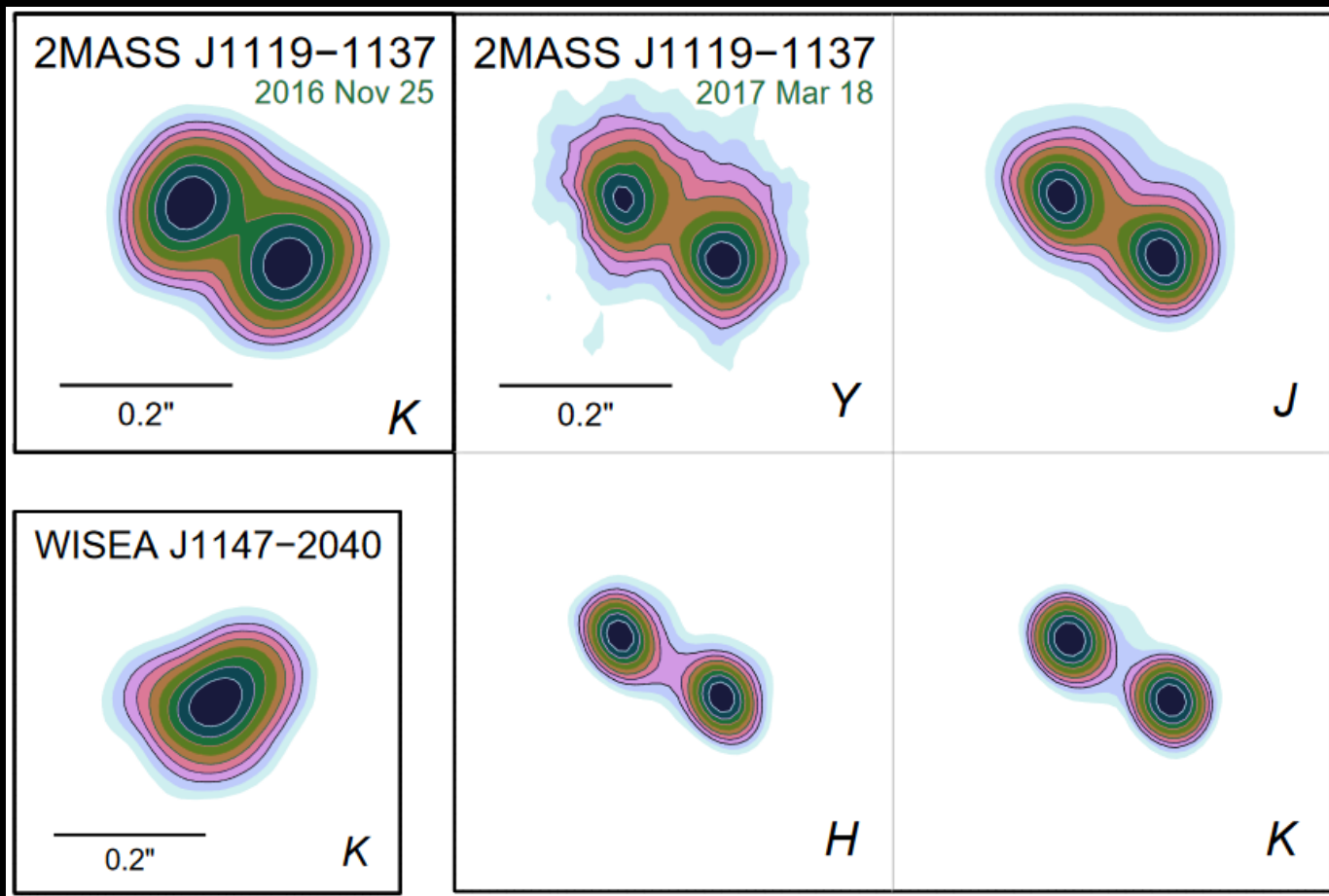
ИК избыток наблюдался на Спитцере и Гершеле

Диск смогла разглядеть ALMA





# Бурый карлик оказался парой планет



2MASS  
J11193254-1137466

Возраст ~10 млн. лет  
20-30 пк

$M \sim 3-5 M_{\text{jupiter}}$   
Орб. период ~50-150 лет  
3-5 а.е.

1706.01883

# Протопланетный диск в двойной

HK Tau

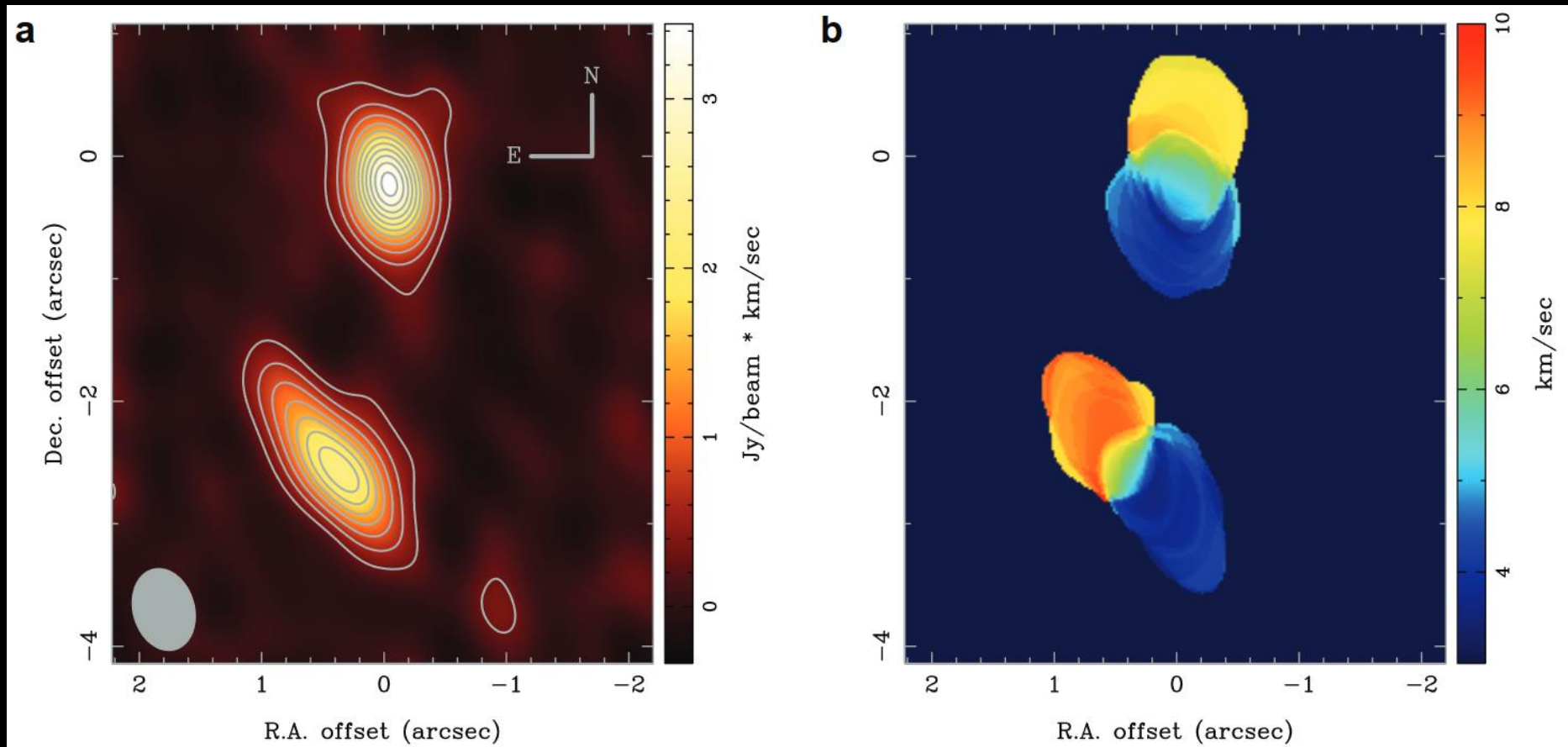
161 пк

1-4 млн. лет

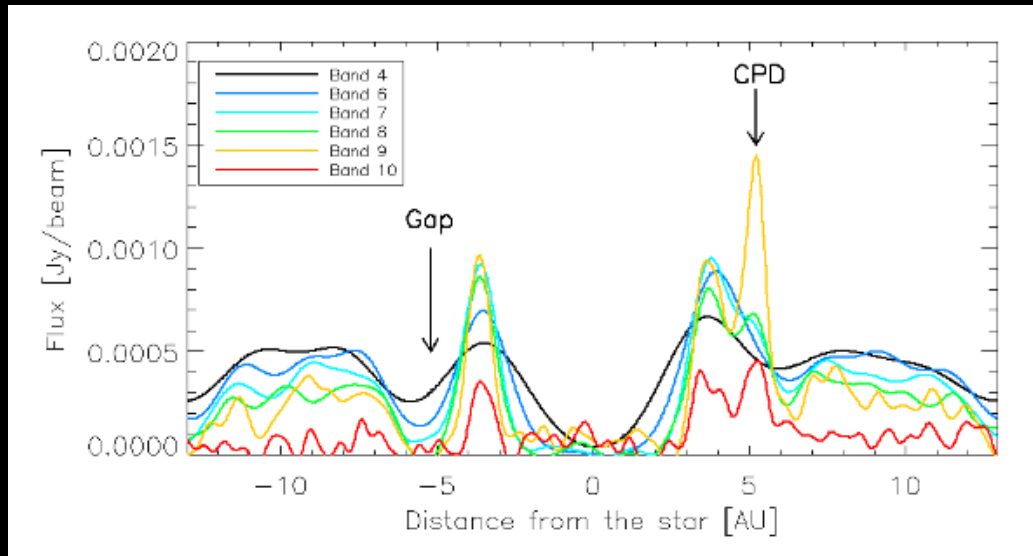
386 Аа.е. между компонентами

ALMA

1407.8211

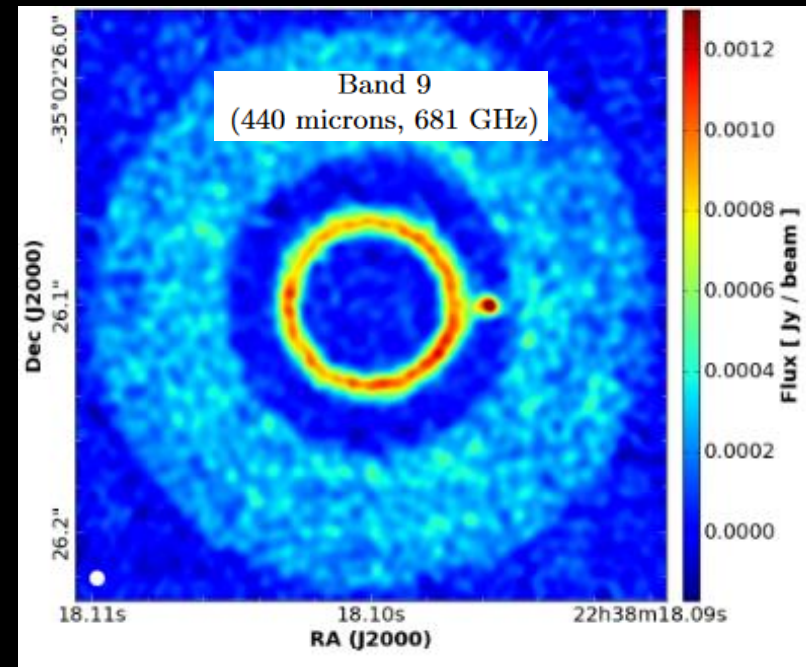


# Можно ли увидеть околопланетный диск?



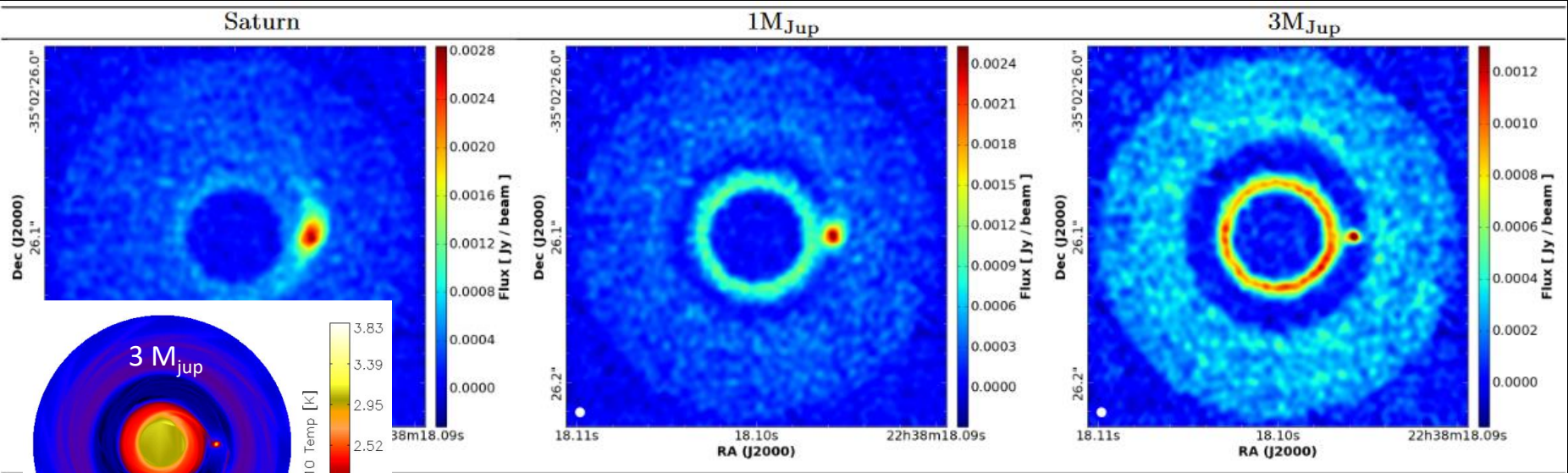
Размер околопланетного диска  
порядка половины радиуса Хилла.  
Потенциально, его трудно разглядеть  
с помощью ALMA,  
но можно задетектировать.

3 Массы Юпитера  
5 часов наблюдений  
Лучше видно на коротких волнах  
Важно открытие щели  
Температура планеты 4000К  
(возраст 1 млн. лет)

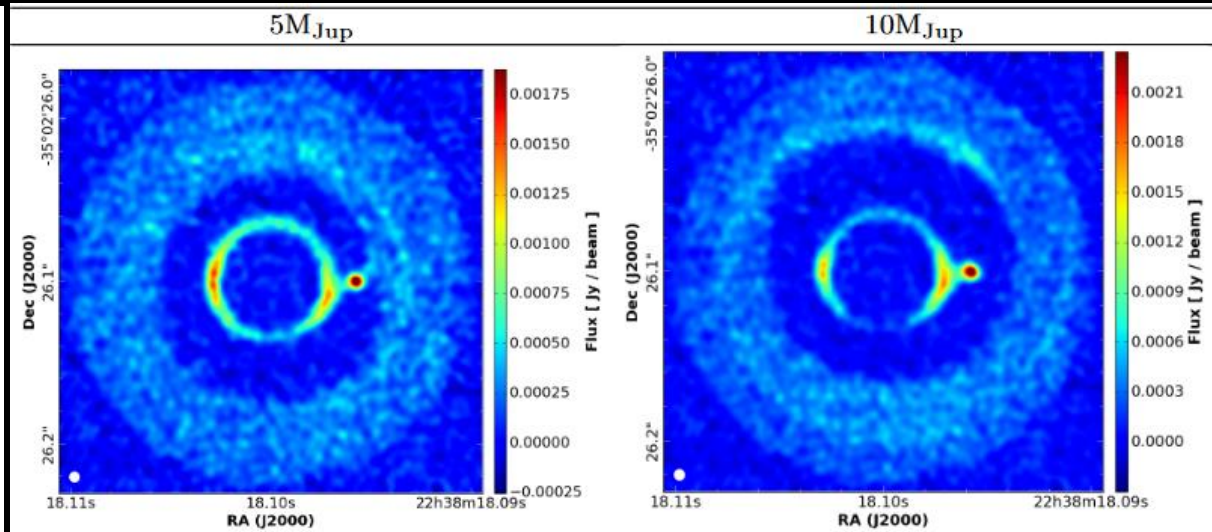
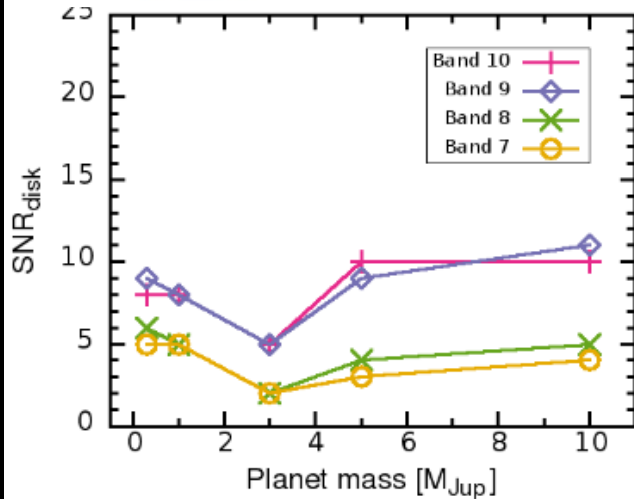




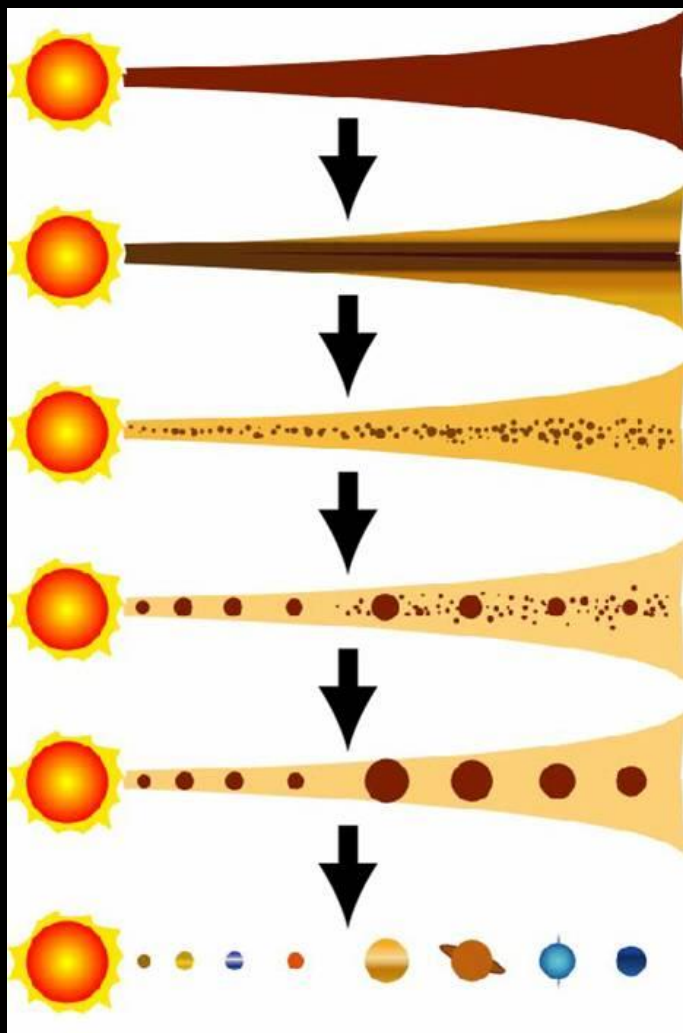
# Зависимость от массы планеты



Легкие (как Сатурн) планеты могут быть зарегистрированы



# Упрощенная картина рождения



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

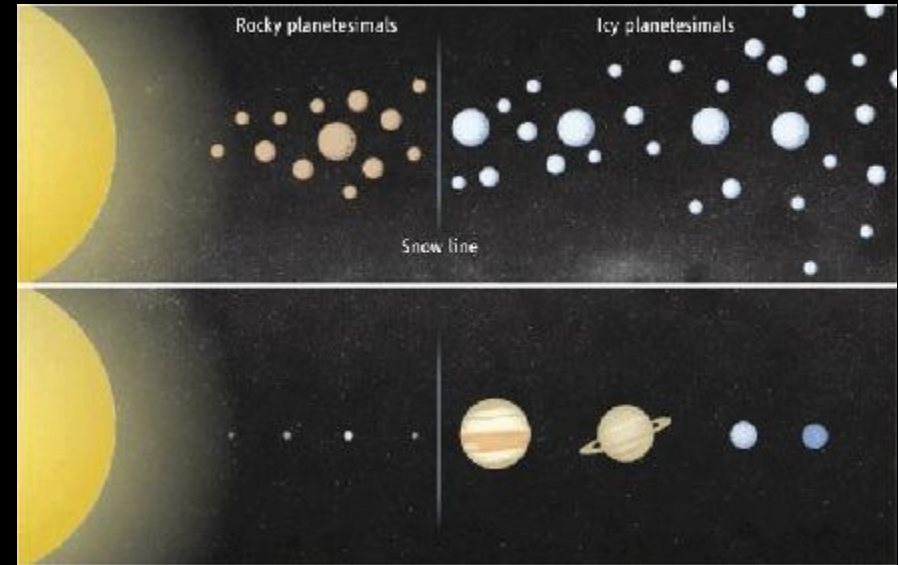
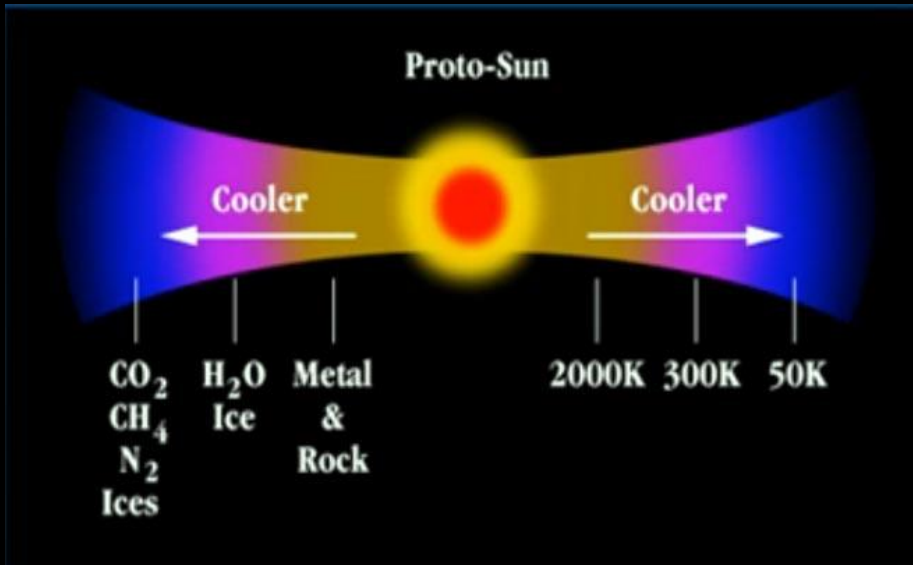
- возникает звезда и диск вокруг нее
- в диске начинается слипание пылевых частиц
- постепенно из них образуются планетезимали
- крупные планетезимали растут, поглощая мелкие
- наконец, остаются крупные планеты.

Все планеты стоят примерно на своих местах:

- вблизи звезды – маленькие железно-каменные
- далее – газовые гиганты
- еще дальше – газово-ледяные гиганты

Эта картина усложнилась с открытием экзопланет.

# Снеговая линия



Вблизи звезды жарко, поэтому лед не может существовать. Там образуются каменные и железно-каменные тела.

В Солнечной системе снеговая линия соответствует примерно 5 а.е.

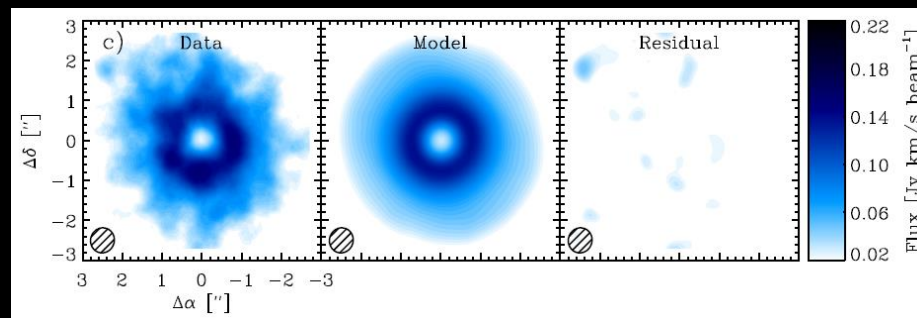
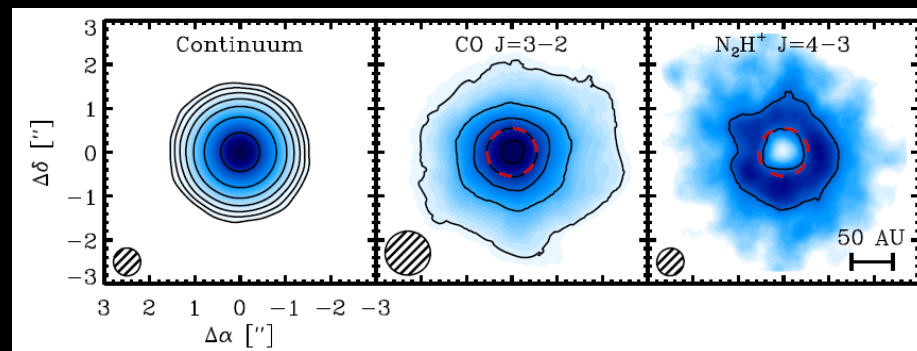
Однако, ледяные объекты после образования могут попасть ближе к звезде, а каменные могут быть выброшены во внешние области системы.



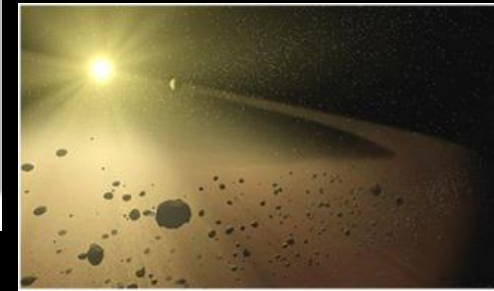
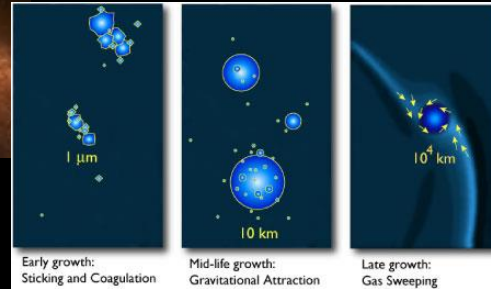
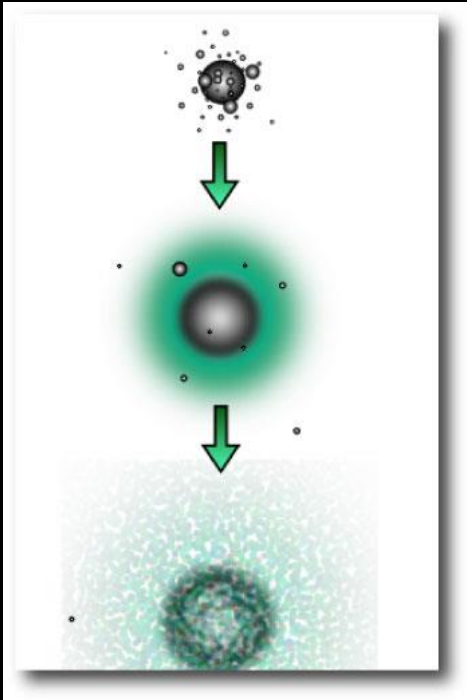
# TW Гидры: наблюдения на ALMA

Замерзание CO

Наблюдали излучение ионов  $N_2H^+$   
Они обильны,  
только если CO вымерз.



# От пылинок до километров

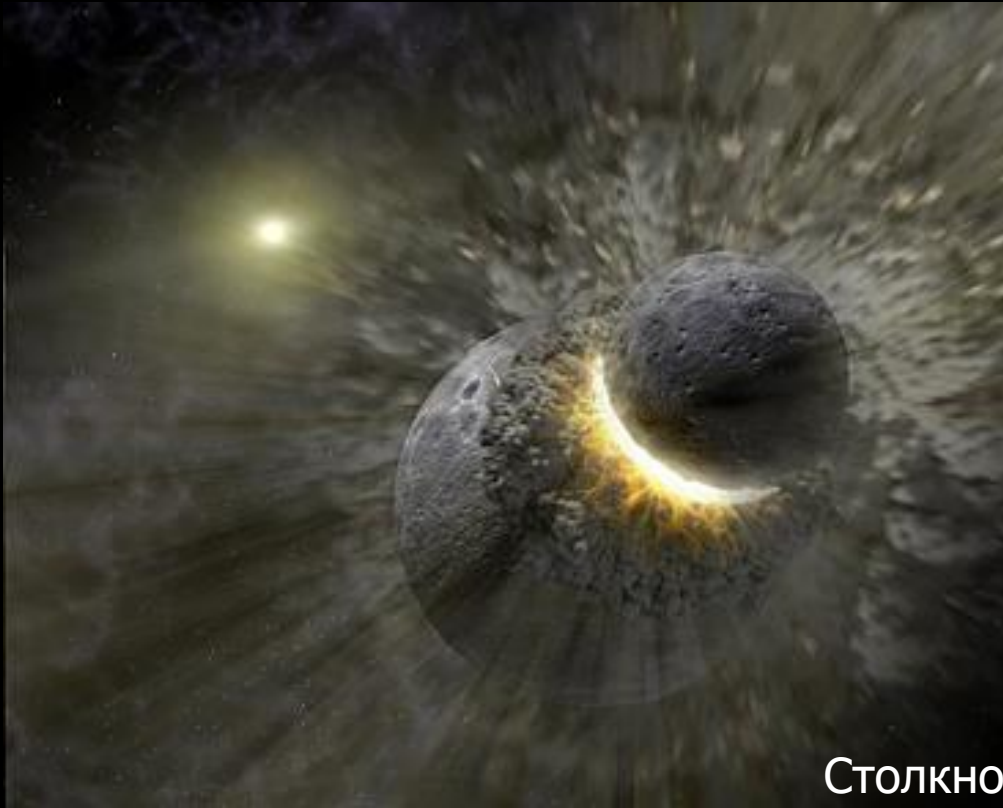


Пылинки сталкиваются и начинают слипаться.  
Так можно быстро создать частицы миллиметрового размера.  
... Дальше возникают проблемы ...

- а) сантиметровые тела при столкновении начинают разрушаться, а не расти
- б) из-за взаимодействия с газом такие частицы быстро тормозятся и выпадают на звезду

Возможно, что или происходит быстрое формирование планетезималей за счет гравитационных эффектов, или же – из-за аэродинамических.

# От километров до Земли



Тут все просто!

Столкновения происходят на такой скорости, что осколки войдут в состав крупного тела.

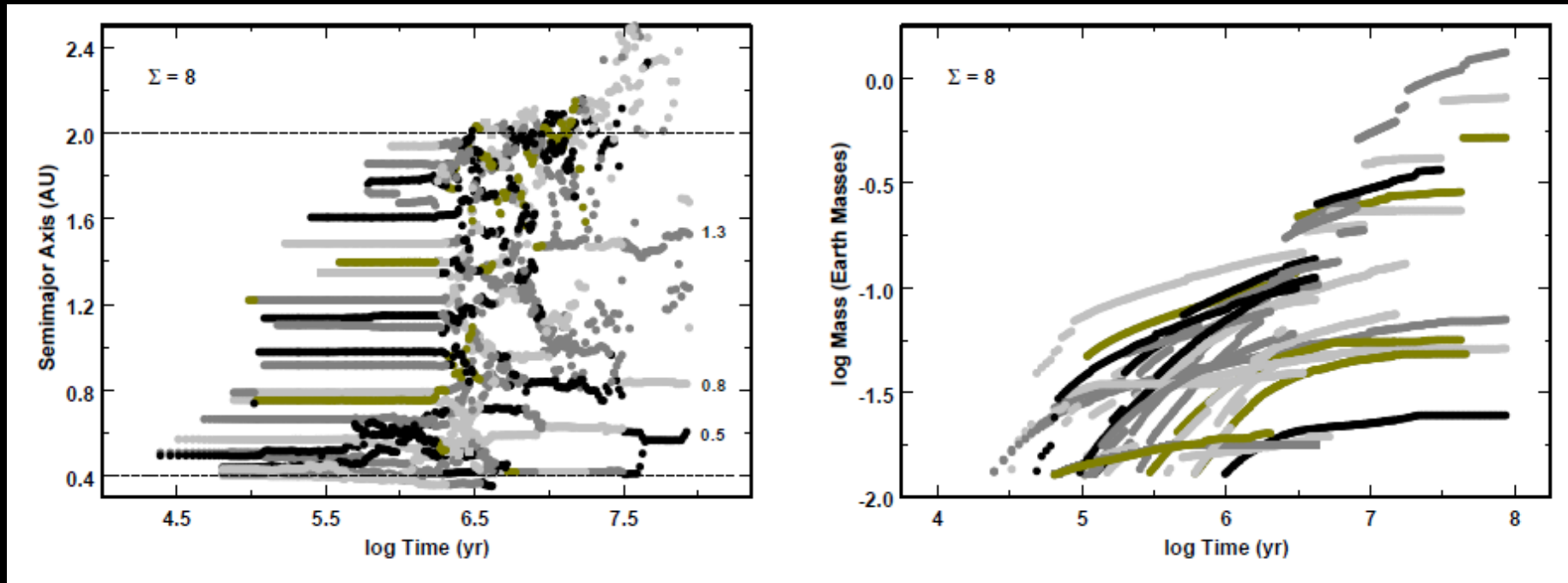
Так можно делать твердые планеты (ядра) массой до нескольких масс Земли.

Дальше, чтобы стать Юпитером, надо набирать газ.



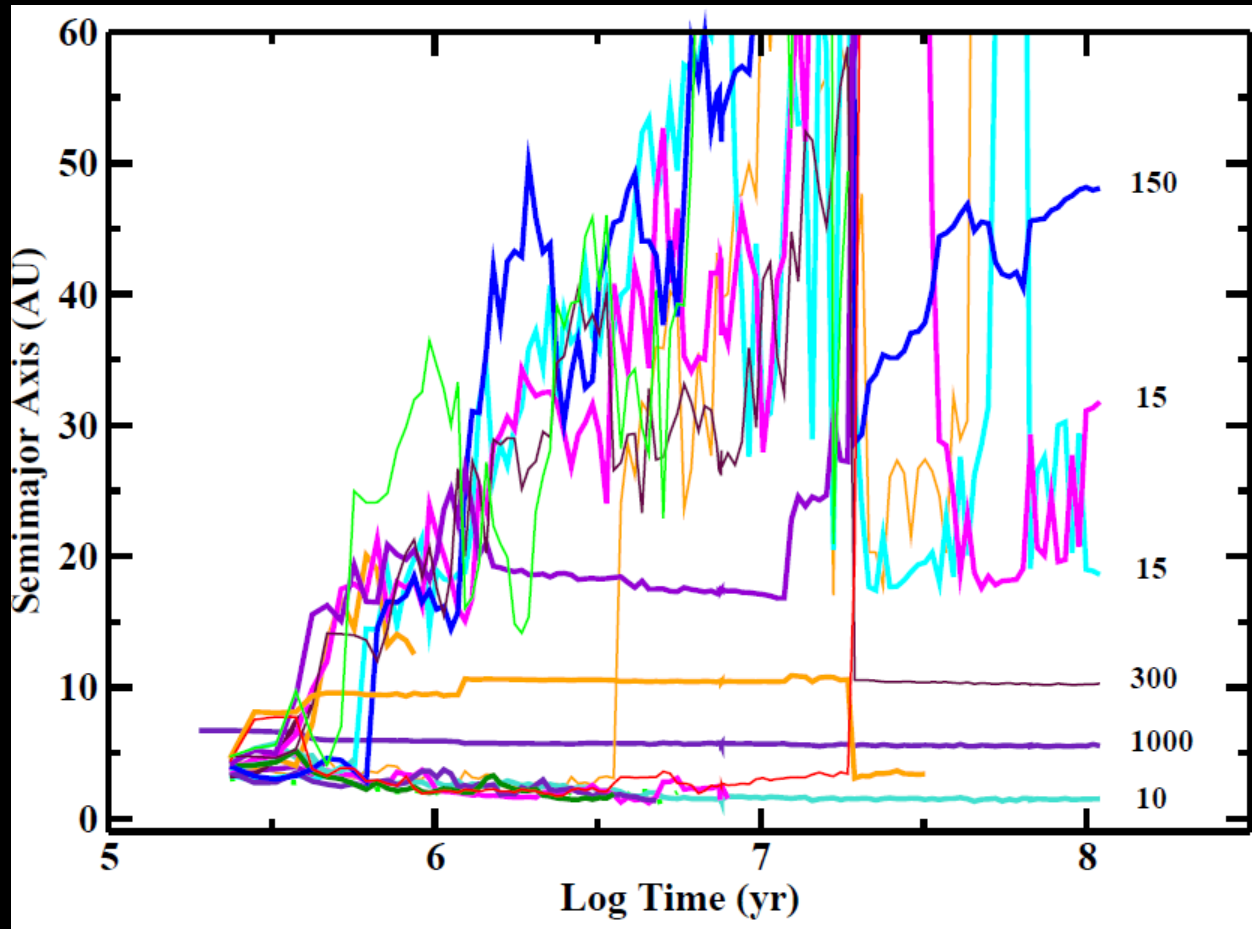
# Олигархический рост планетезималей

1206.0738



Крупные планетезимали активно поглощают более мелкие. Это называется «олигархический рост», т.к. чем крупнее объект, тем быстрее он растет. Наконец, остается лишь несколько крупных тел, которые уже почти не мешают друг другу.

# Эволюция орбит ледяных олигархов

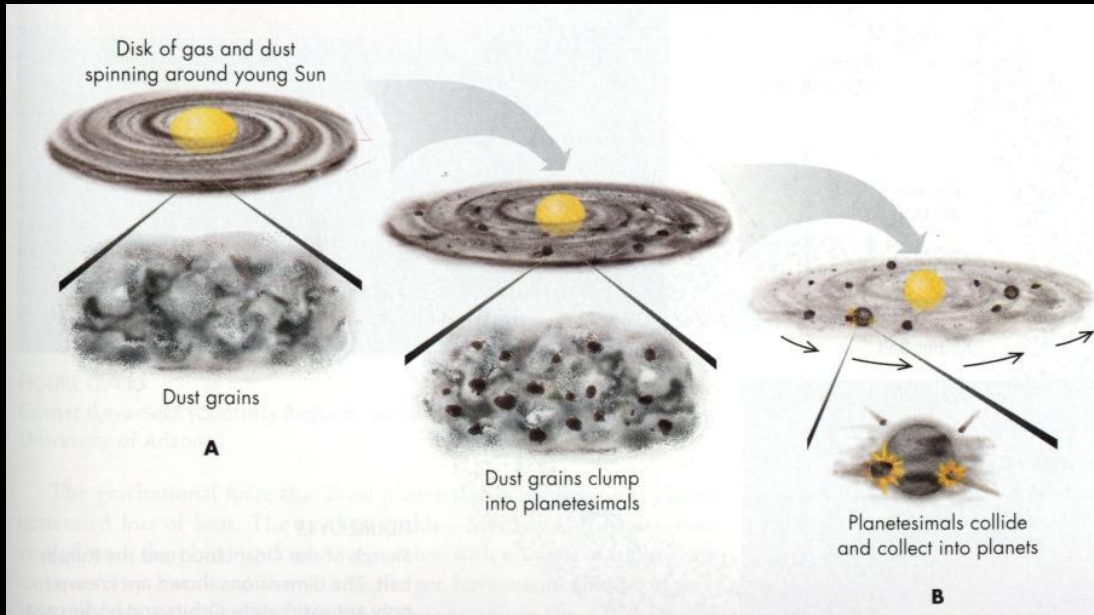


Из-за взаимодействия меняется не только масса объектов, но и их местоположение в системе (т.е. орбита).

Выбросить проще легкие объекты, но потом они еще могут нарастить свою массу.

# От Земли до Юпитера

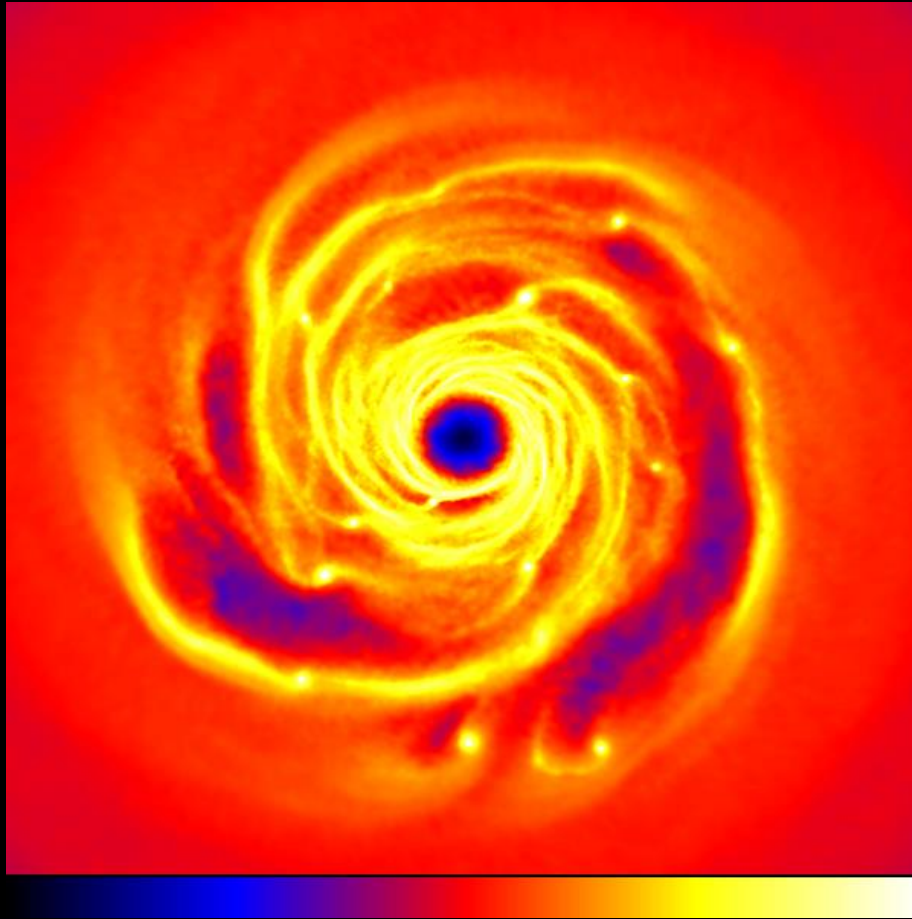
Стать Юпитером легко,  
если быстро набрать 20 масс Земли.  
Но модели показывают,  
что сделать это совсем не просто!



Дело в том, что протопланетный диск постепенно теряет массу, поэтому время формирования планет ограничено.

Если тело будет просто своей гравитацией захватывать газ, то времени не хватит.

# Фрагментация диска



Крупные планеты могут образовываться в результате неустойчивостей в диске.

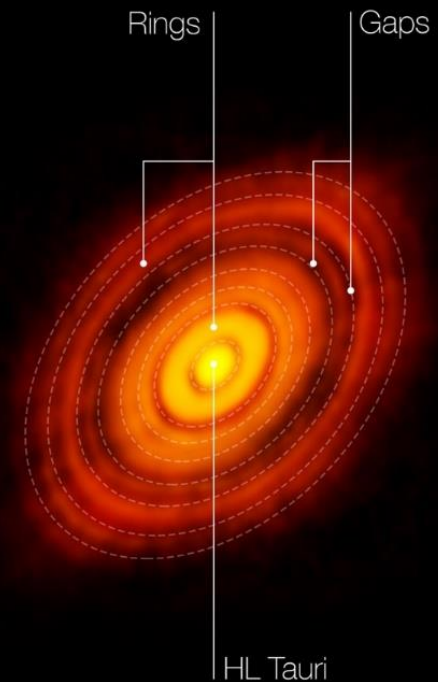
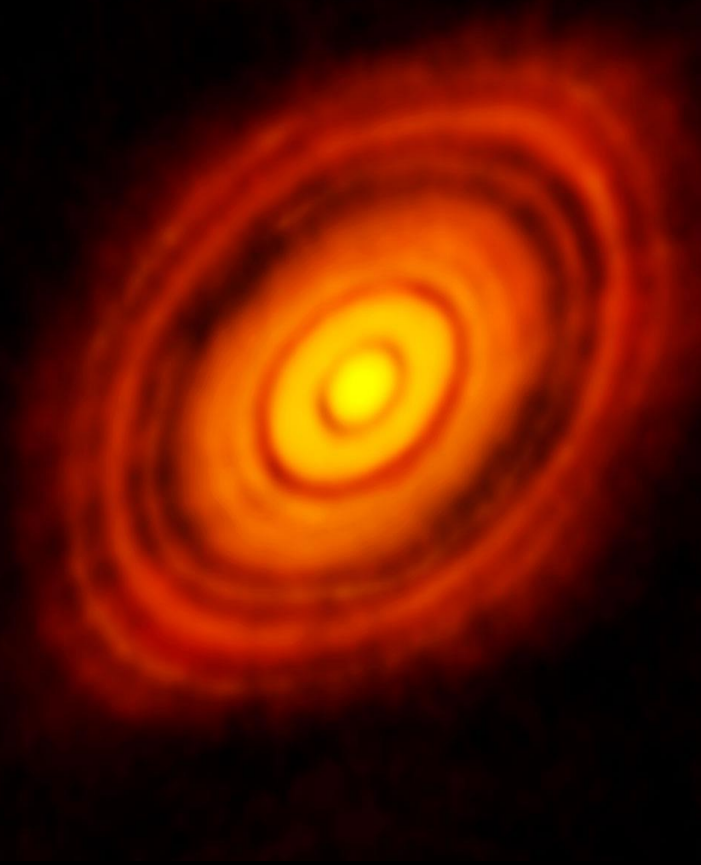
Это подтверждается некоторыми численными моделями.

Это происходит на значительном расстоянии от звезды.



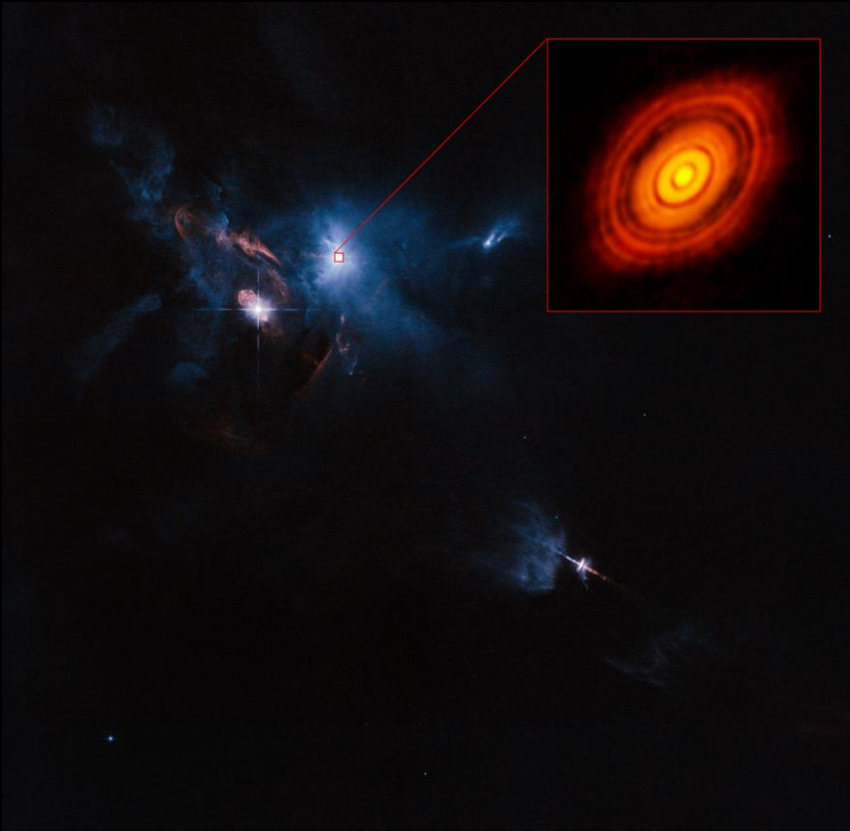
# Протопланетный диск HL Тельца

Темные кольца - результат действия массивной планеты в диске

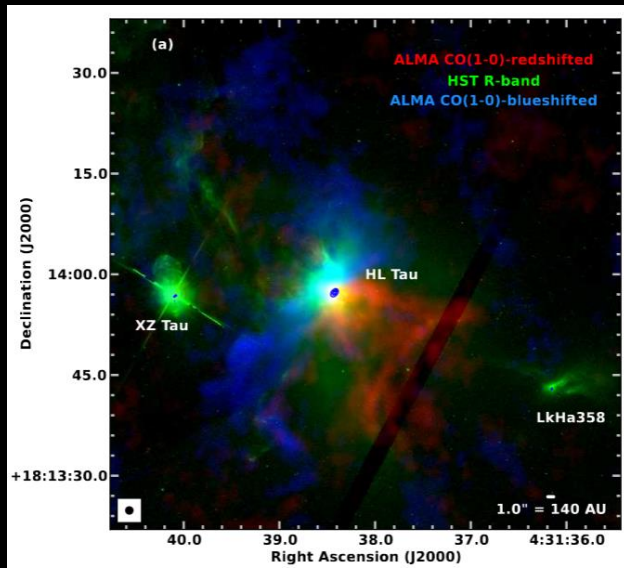


# Место, где рождаются звезды и планеты

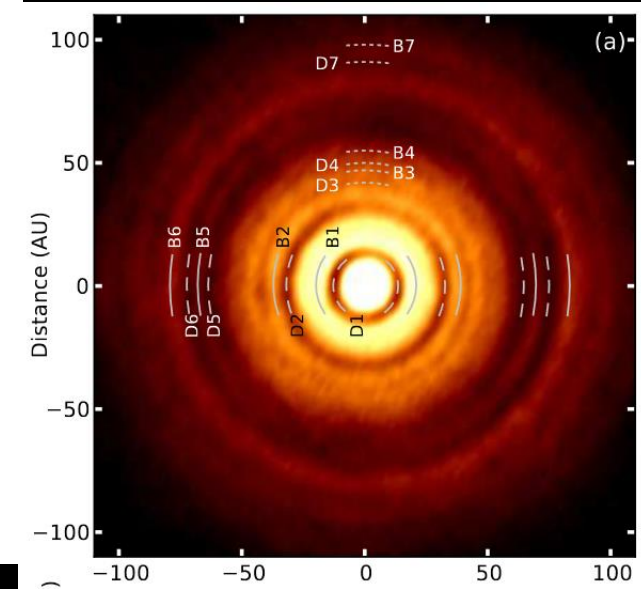
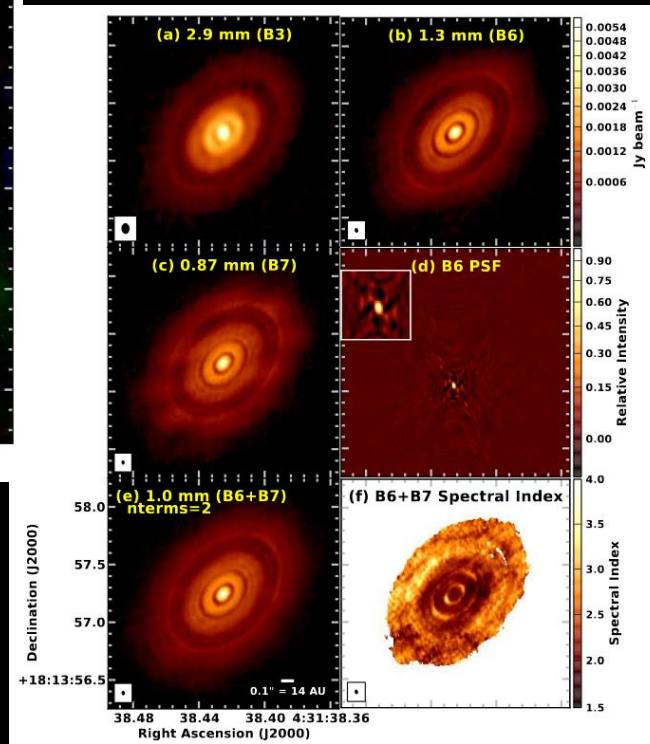
Наблюдения проводились  
на установке ALMA.



# Протопланетный диск HL Tau



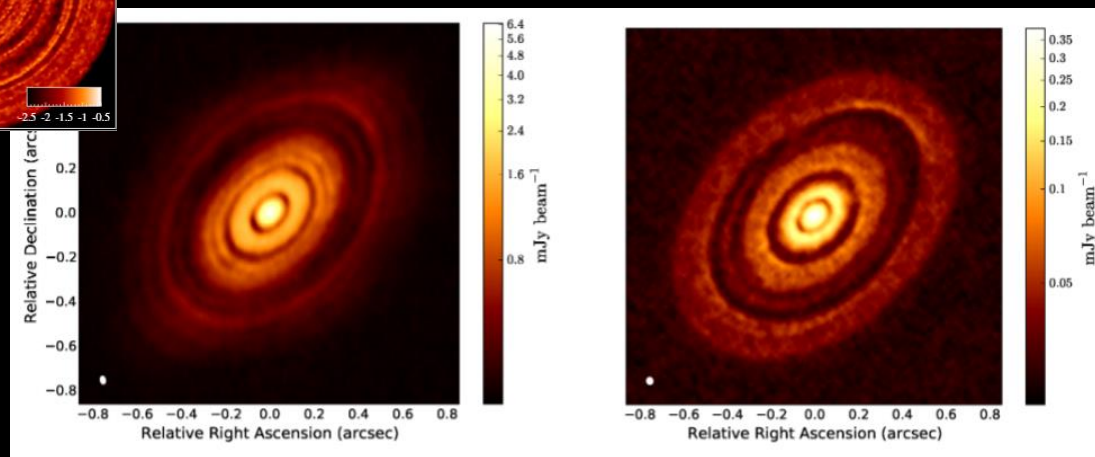
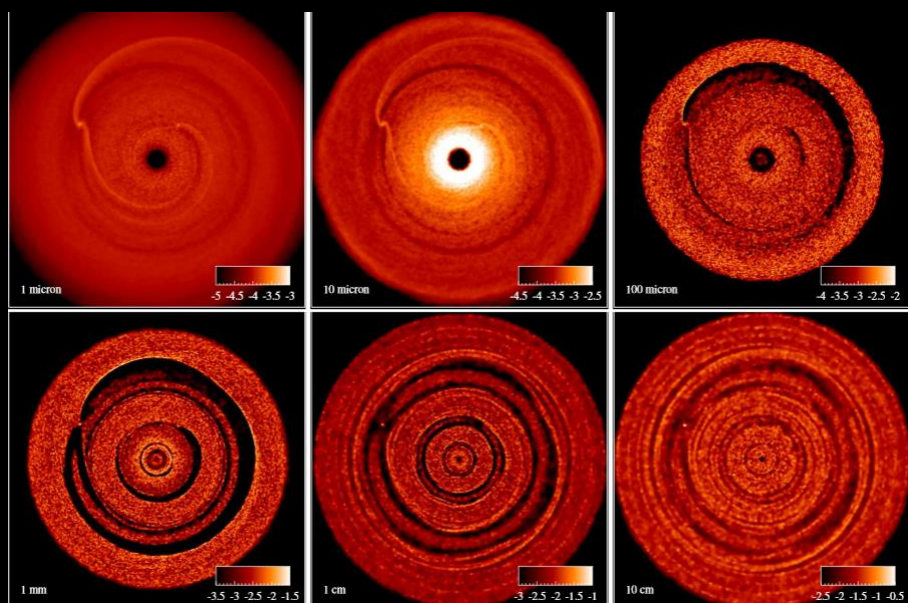
1503.02649





# Моделирование диска HL Tau

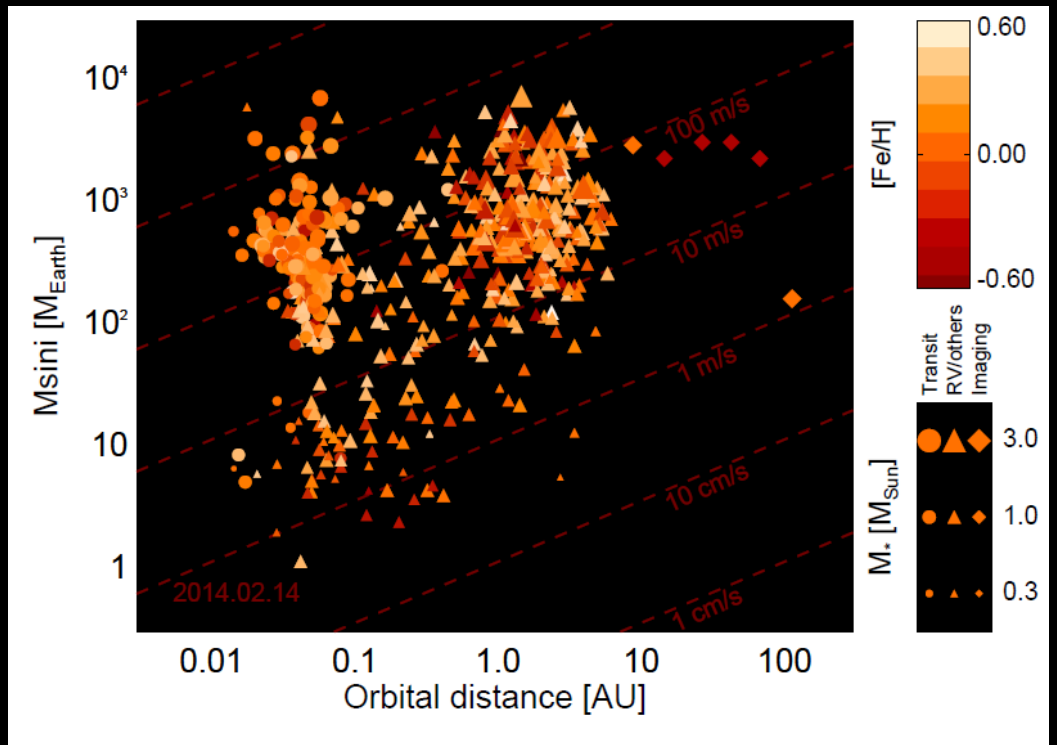
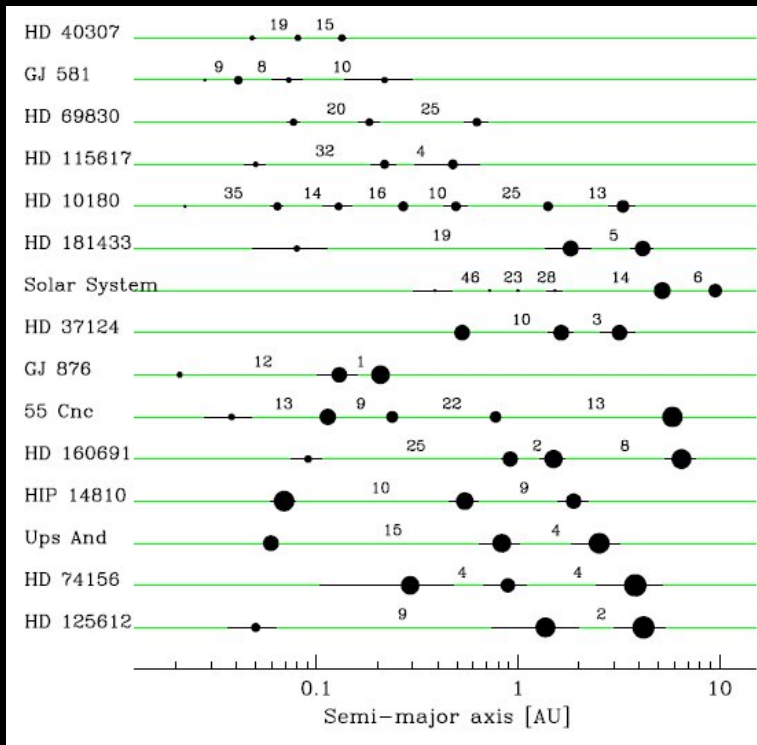
Три планеты с массами от 0.2 юпитерианских до 0.55. На нижнем рисунке сравниваются результаты наблюдений (слева) с результатами моделирования.



1507.06719

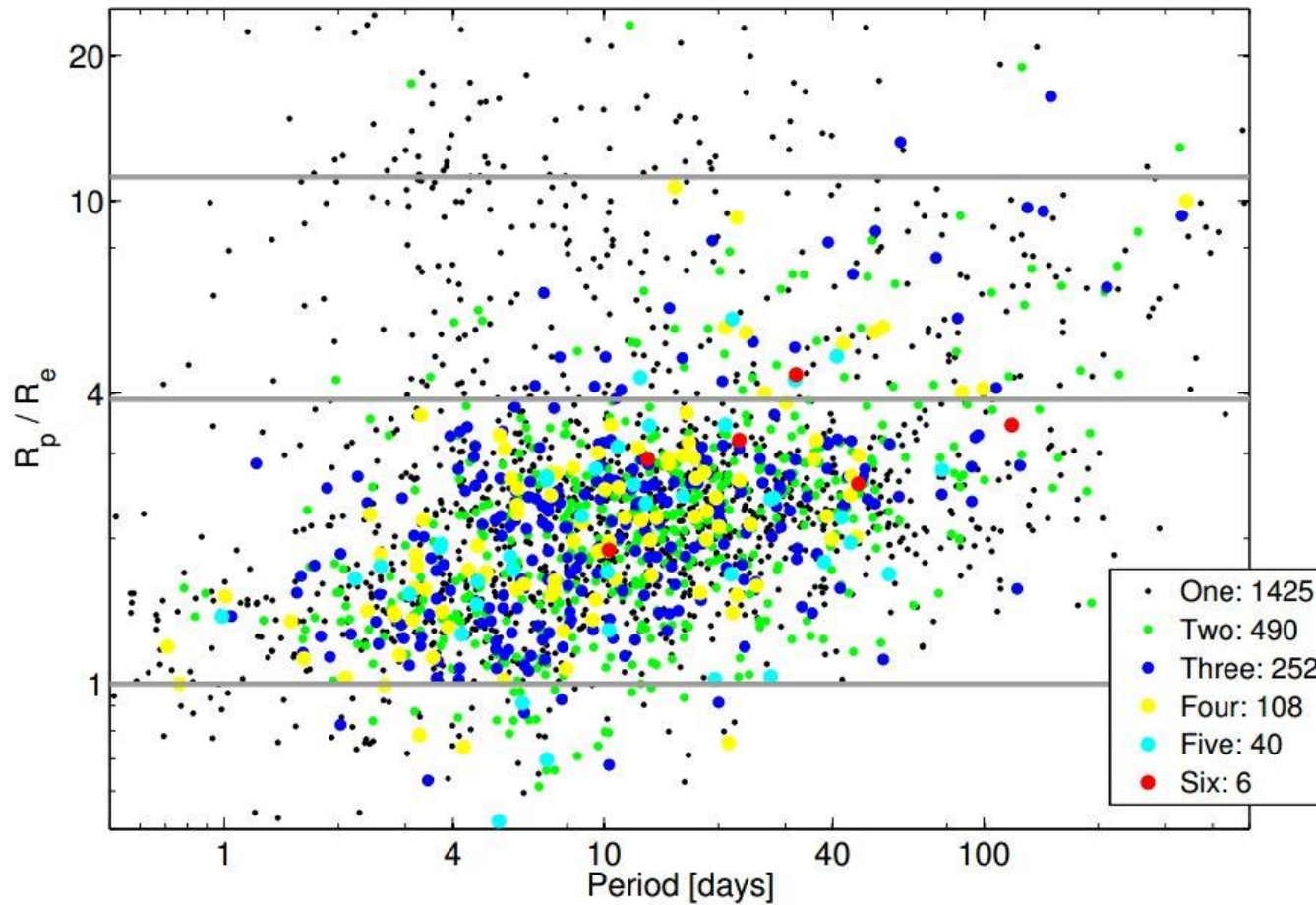


# Газовые и ледяные планеты вблизи своих звезд



Есть много массивных (т.е. газовых!) планет там,  
где им было бы трудно образоваться

# Планетные системы



Данные Кеплера четко показывают, что есть много крупных планет вблизи звезд.

# Архитектура экзопланетных систем

Системы с тремя и более планетами.

885 планет в 361 системе.

Цвет кружка отражает размер планеты относительно других членов системы.

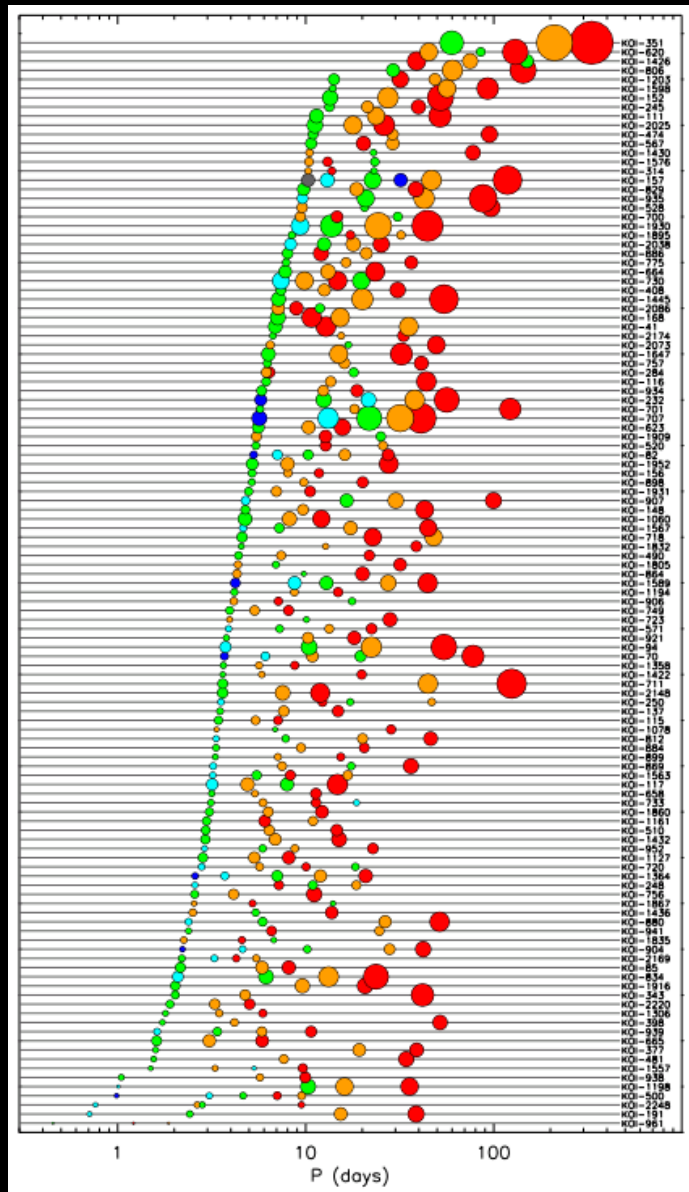
Больше всего «нептунов» и сверхземель с орбитальными периодами около 10 дней.

Т.е., системы не похожи на нашу.

Однако одно важное свойство, видимо, общее: орбиты планет лежат практически в одной плоскости.

Еще важно, что более крупные планеты в системе лежат снаружи, а более мелкие – внутри.

1202.6328

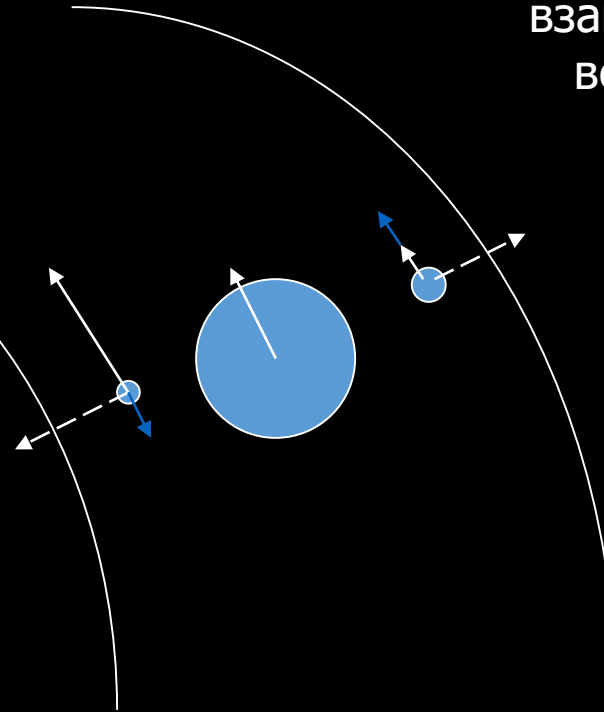


# Миграция планет

Планета может менять свою орбиту, за счет взаимодействия с веществом диска.

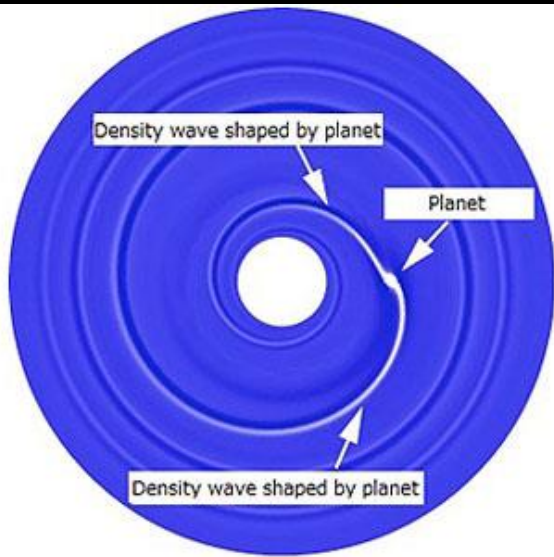
Взаимодействие с внешними частями приводит к торможению планеты и ее движению внутрь. С внутренними – наоборот.

Чаще планеты в итоге двигаются ближе к звезде.



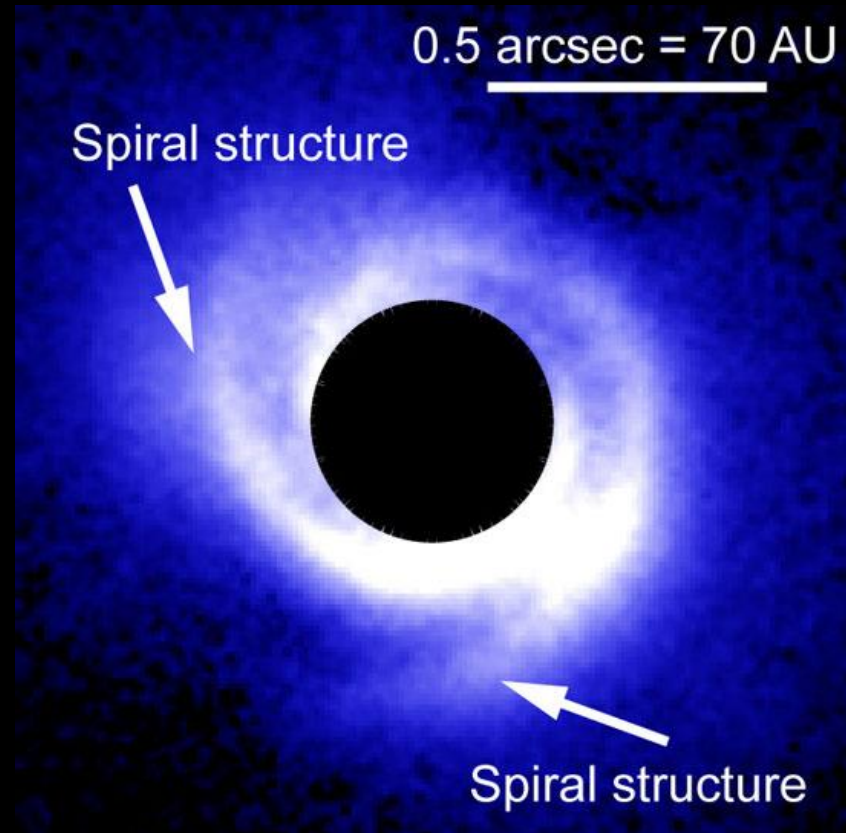


# Структуры в диске

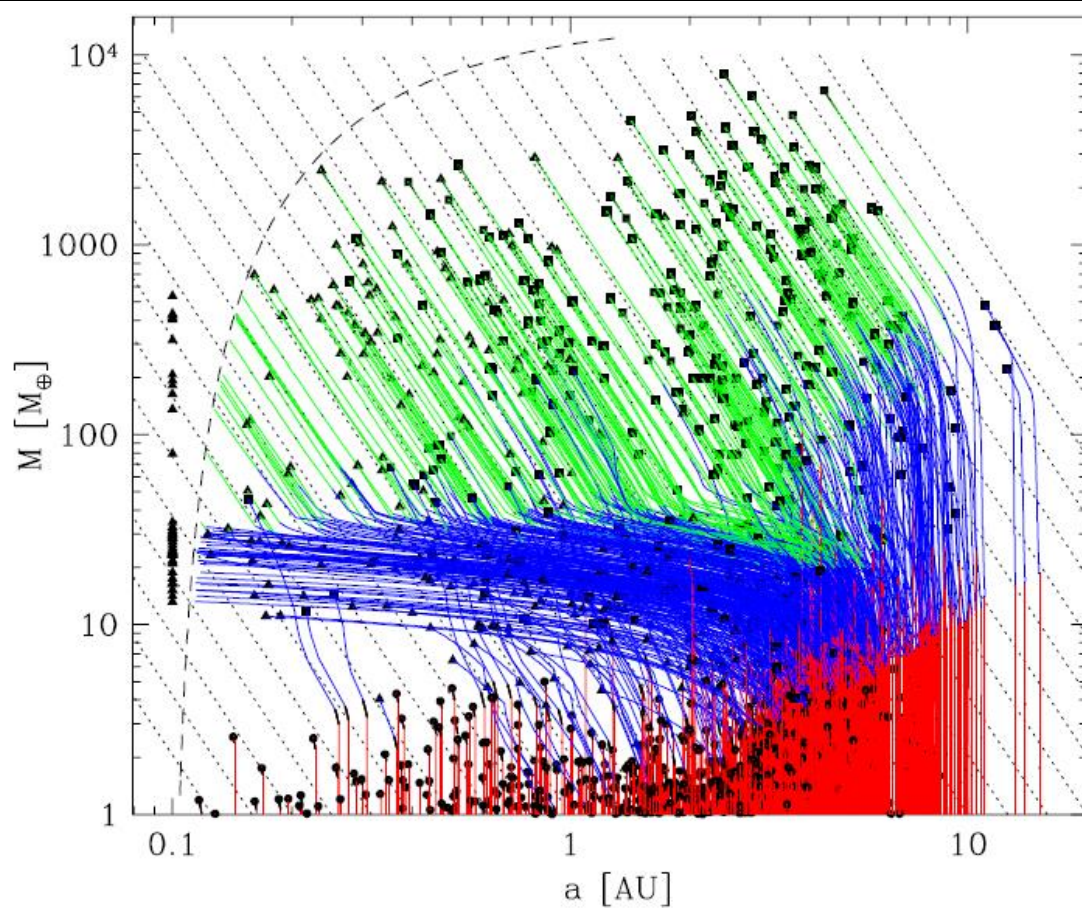


Планета рождает в диске структуру и взаимодействует с ней.

Наблюдения на Субару в 2012 г. позволили увидеть такие спирали.



# Моделирование миграции

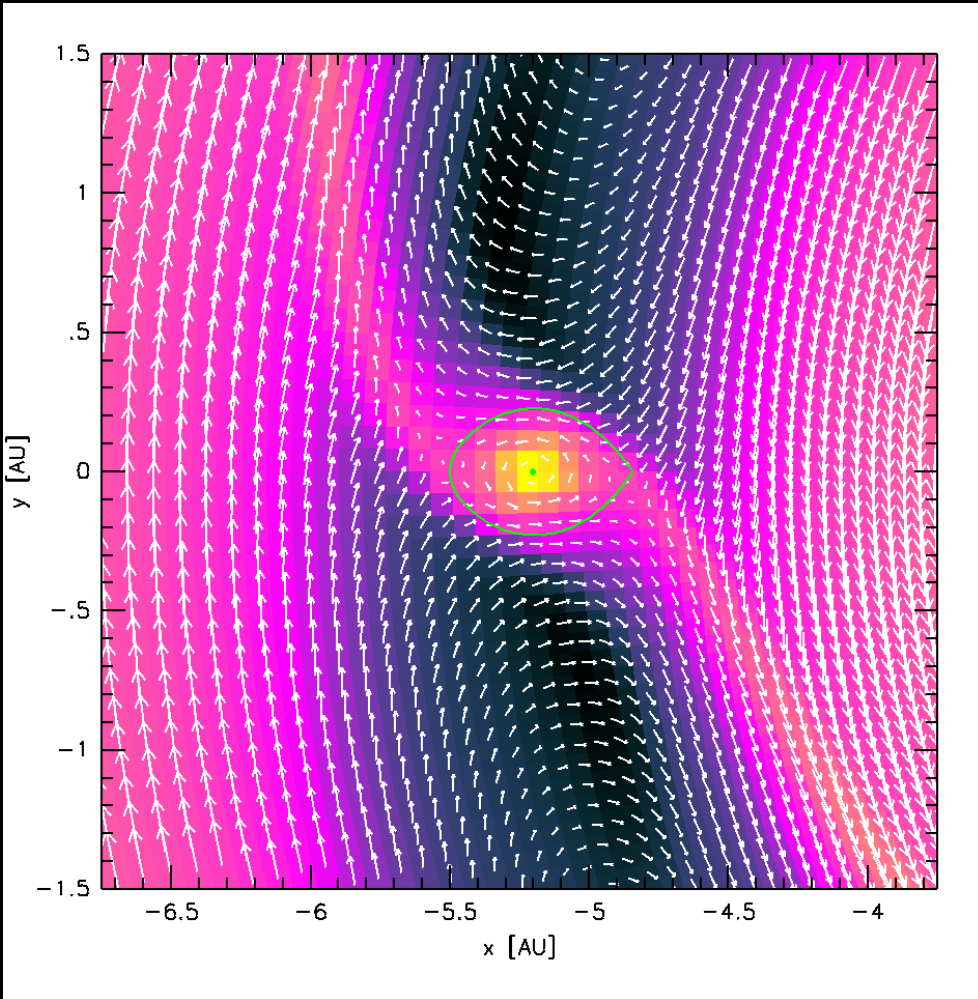


Миграция настолько важна, что может полностью поменять вид системы.

Показано, как планеты меняют свою массу и орбиту.

Ясно выделяются три типа миграции.

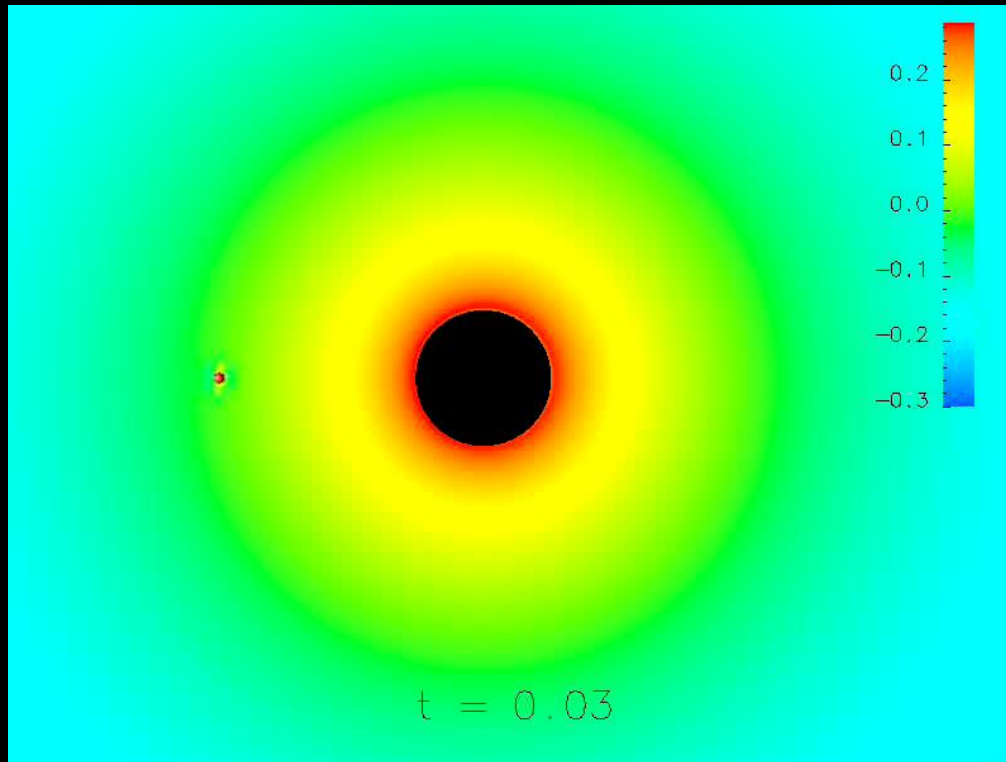
# Щели и мосты



Аналитические модели и численное моделирование показывают, что планета будет «отталкивать» вещество, в результате чего в диске образуется щель. Однако сама планета служит «мостом», перенося вещество и угловой момент.

# Численное моделирование

www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley/



Планета движется против часовой стрелки, но выбрана такая система отсчета, в которой мы видим ее покоящейся.

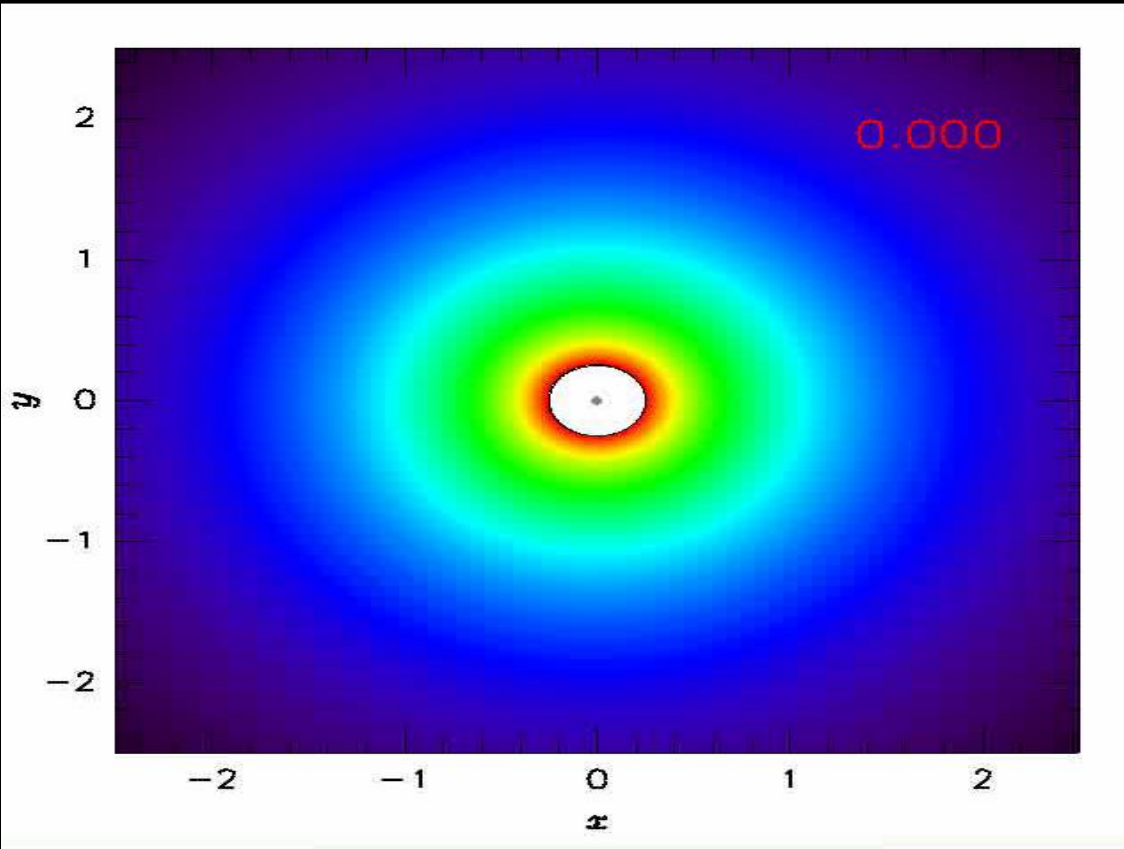
Возникают спиральные волны, и постепенно открывается щель.

Щель становится хорошо заметной, когда ее ширина достигает толщины диска.



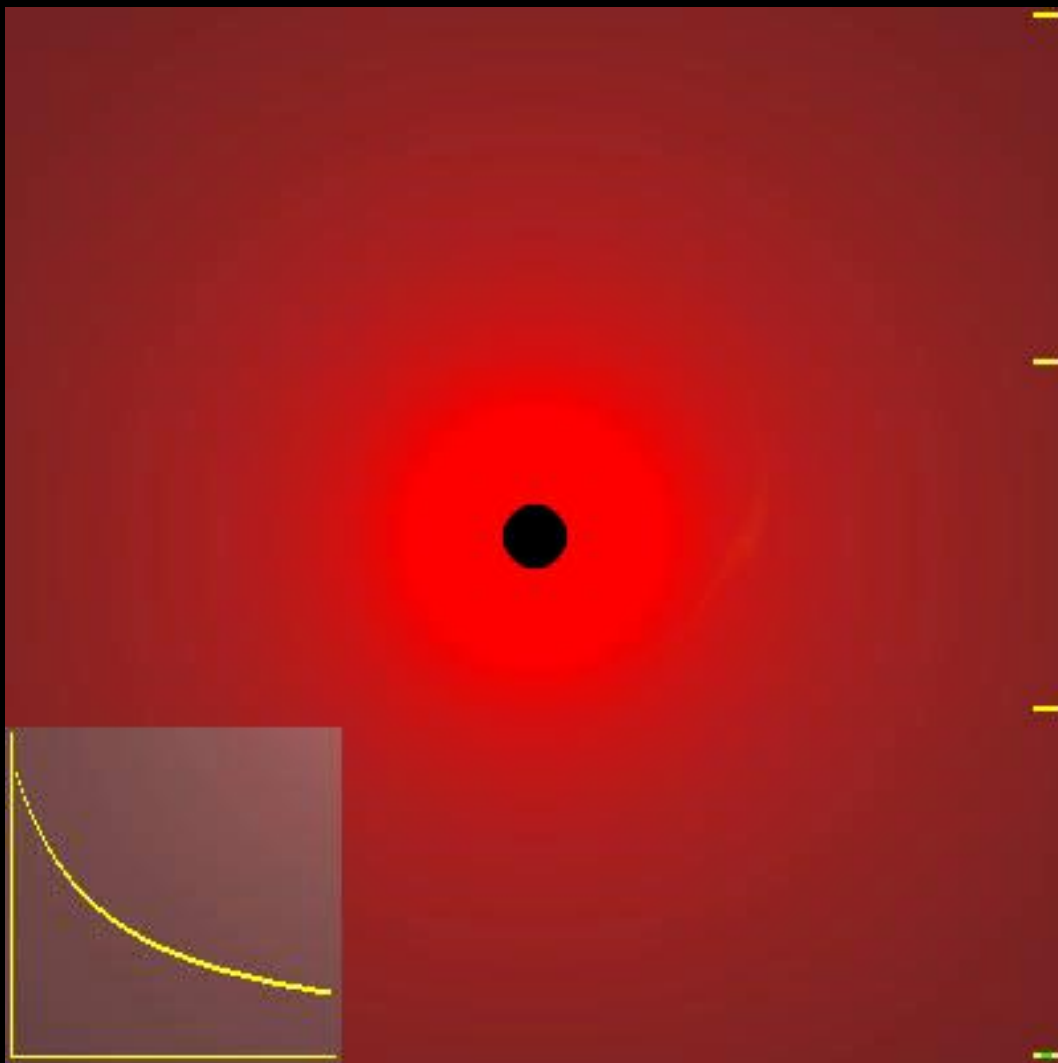
# Численное моделирование

По мере хода времени планета увеличивает свою массу. Именно поэтому ее влияние на диск становится все заметнее.

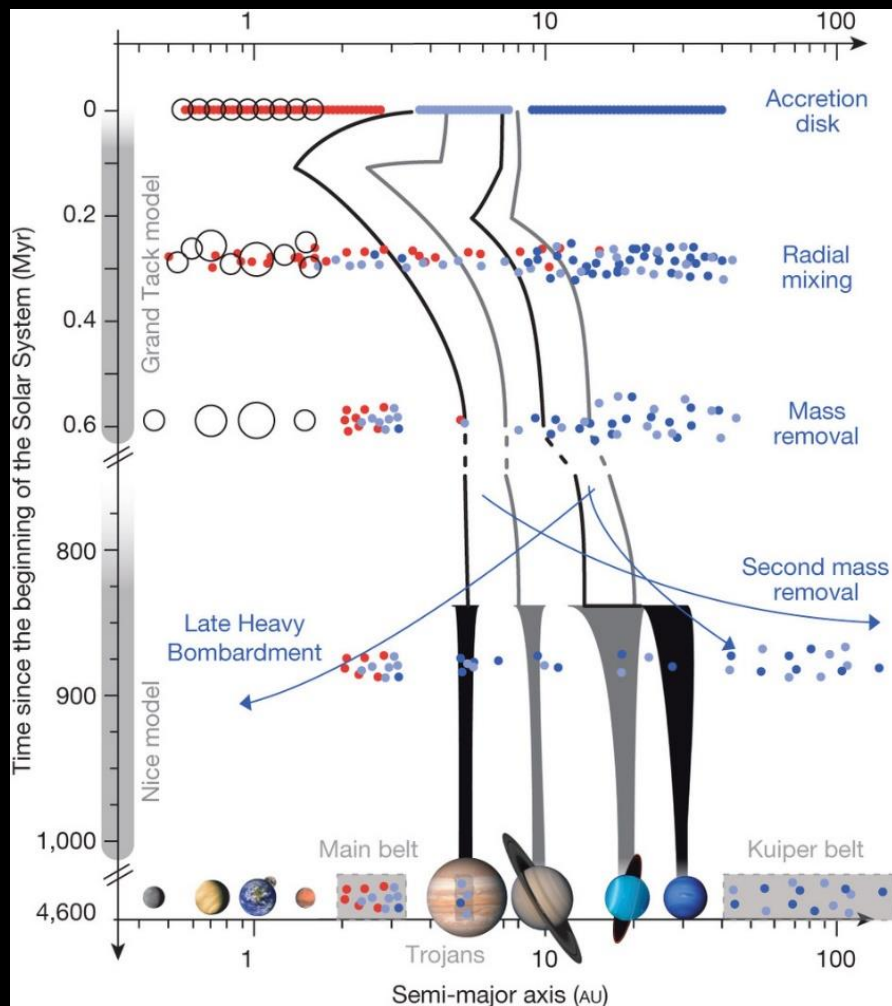


# Численное моделирование

Armitage



# Солнечная система



Как мигрировали планеты в Солнечной?

Авторы использовали данные по астероидам, которые были вынуждены активно перемещаться из-за воздействия на них больших планет.

Поэтому по распределению астероидов можно отследить историю миграции.

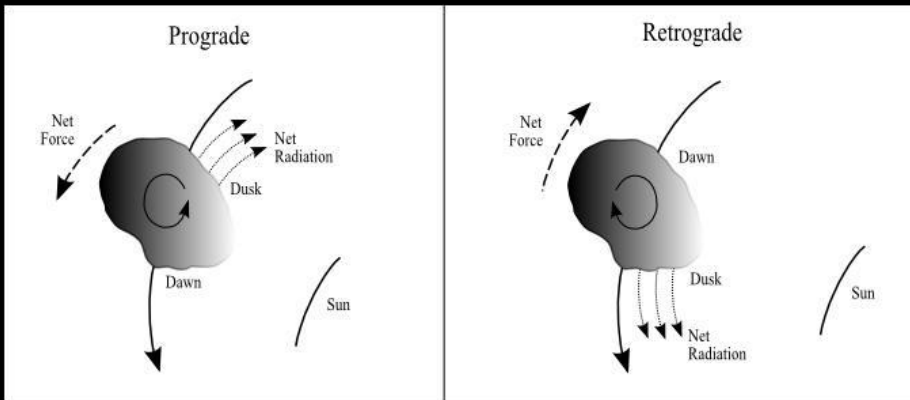
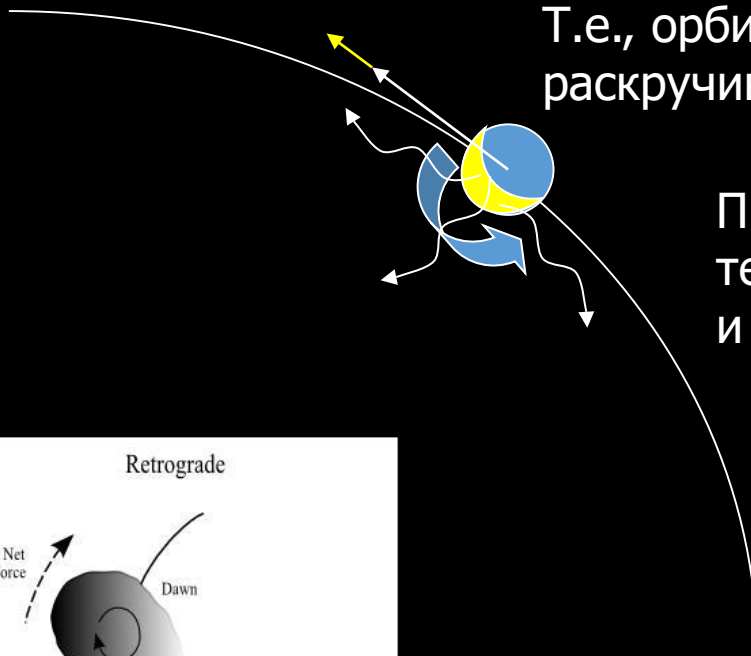
Планетная миграция полностью заканчивается менее чем за миллиард лет. Правда, астероиды продолжают менять свои орбиты, например, за счет эффекта Ярковского.

Историю миграции отчасти можно восстановить по свойствам орбит малых тел.

# Эффект Ярковского

При таком вращении горячая часть будет разгонять объект. Т.е., орбита будет раскручивающейся спиралью.

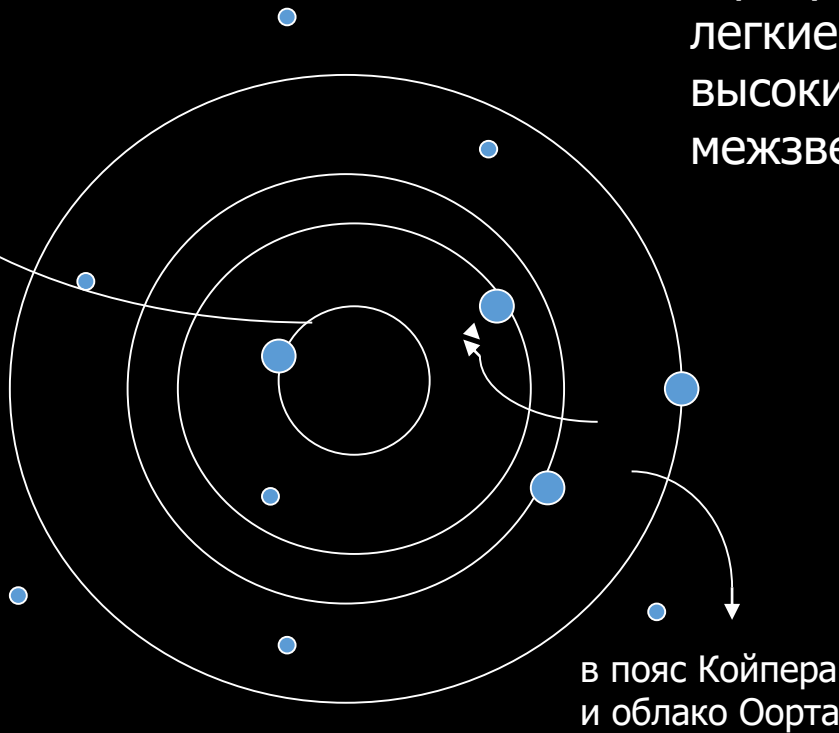
При обратном вращении тело будет тормозиться и приближаться к звезде.



# Эжекция

Взаимодействие тел (планет, планетезималей) в диске должно приводить к тому, что значительная часть более легких объектов (с размерами порядка километров) будет выбрасываться.

в облако Оорта  
и из Сол. Сист.

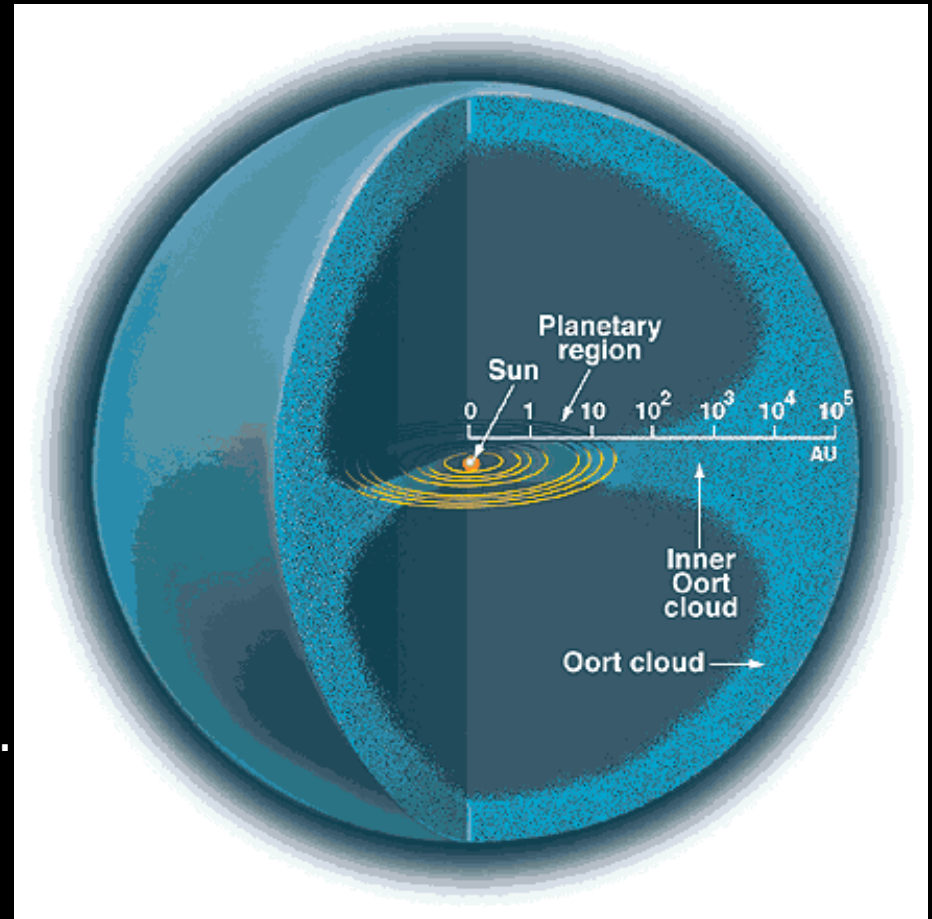
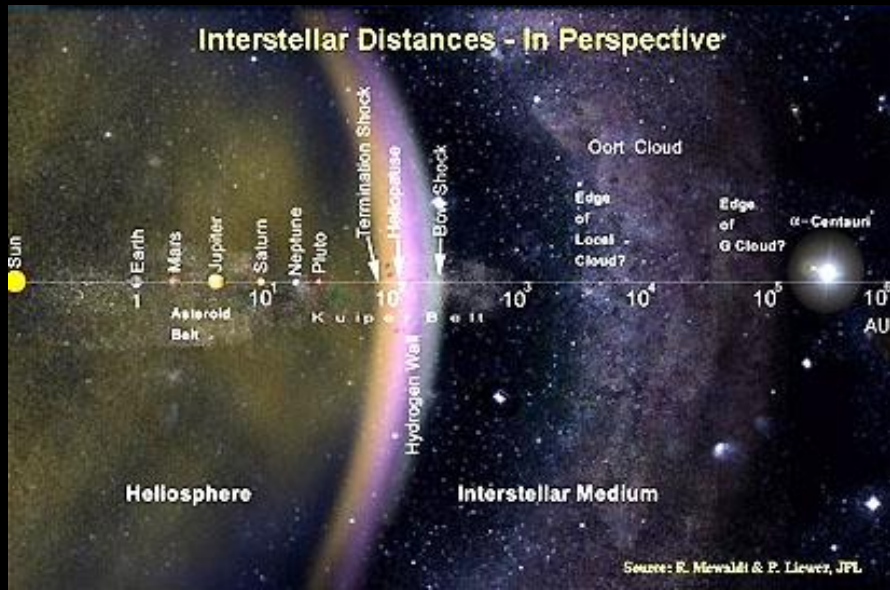


В результате действия планет-гигантов легкие объекты выбрасывались на высокие орбиты и даже совсем в межзвездное пространство.

Также на этой стадии происходит т.н. *поздняя тяжелая бомбардировка*.



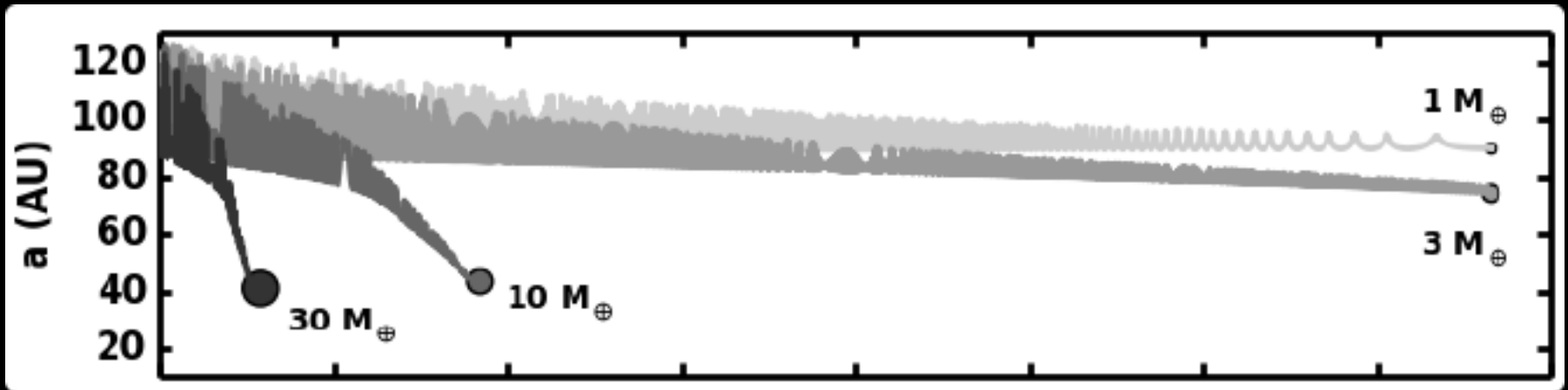
# Облако Оорта



Современная масса облака Оорта составляет примерно 1-10 масс Земли. Эти объекты родились гораздо ближе к Солнцу: на <(40-50) а.е. Они были выброшены оттуда благодаря взаимодействию с массивными телами.

# Судьба рассеянных планет

1410.2816



Взаимодействие тел в протопланетном диске может приводить к выбрасыванию на далекие внешние орбиты достаточно крупных тел. Орбиты самых массивных рассеянных тел быстро становятся круглыми. А вот легкие могут оставаться на вытянутых орбитах.

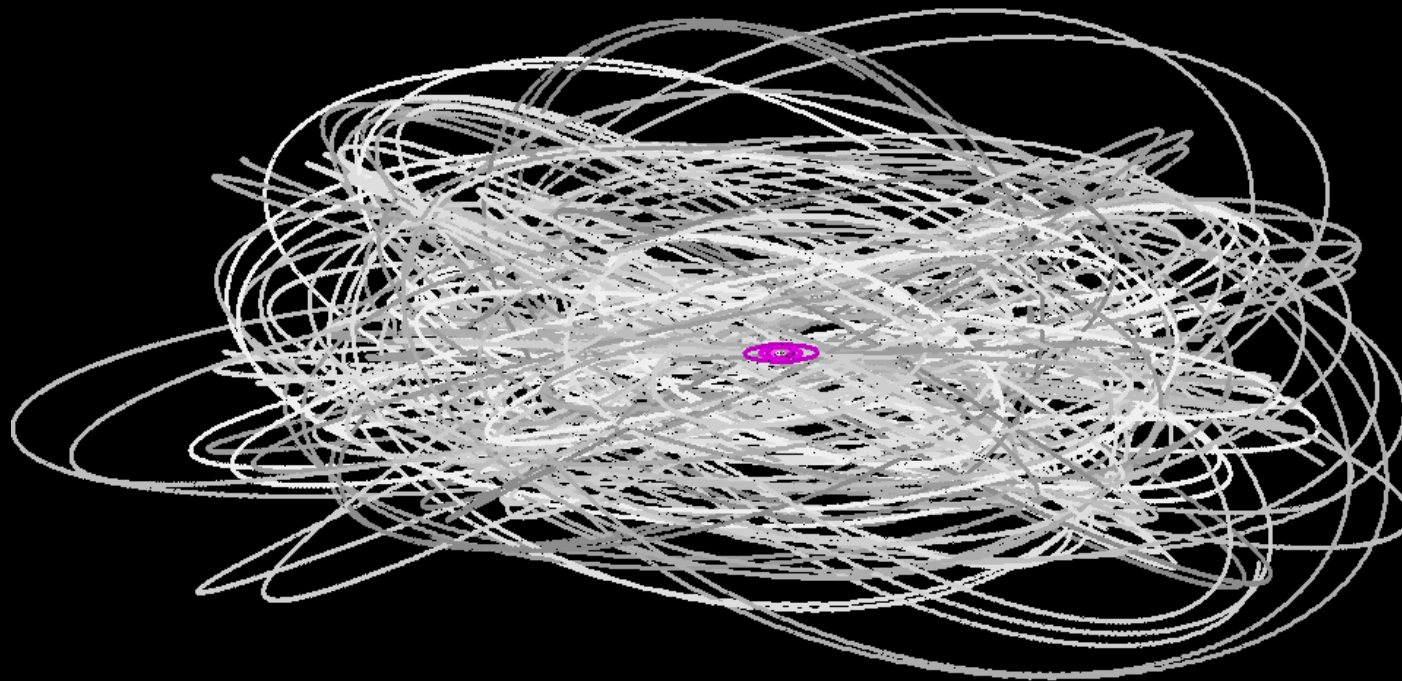
Авторы полагают, что даже в Солнечной системе может быть сверхземля на расстоянии порядка 300 а.е.

# Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

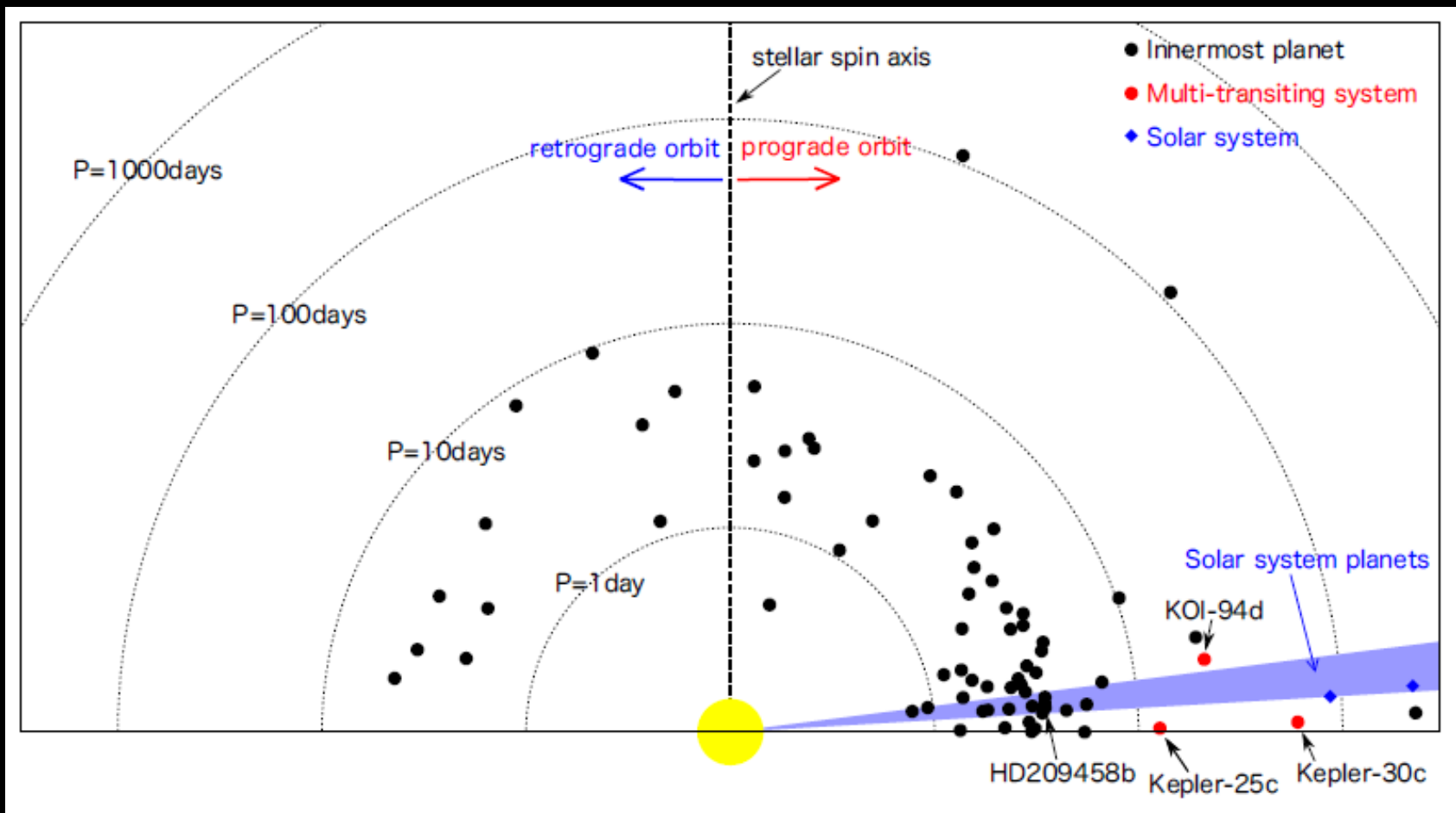
$$e_{\max} \approx \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0}$$



Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 г., а затем в 1962 г. был описан Козаи для астероидов.

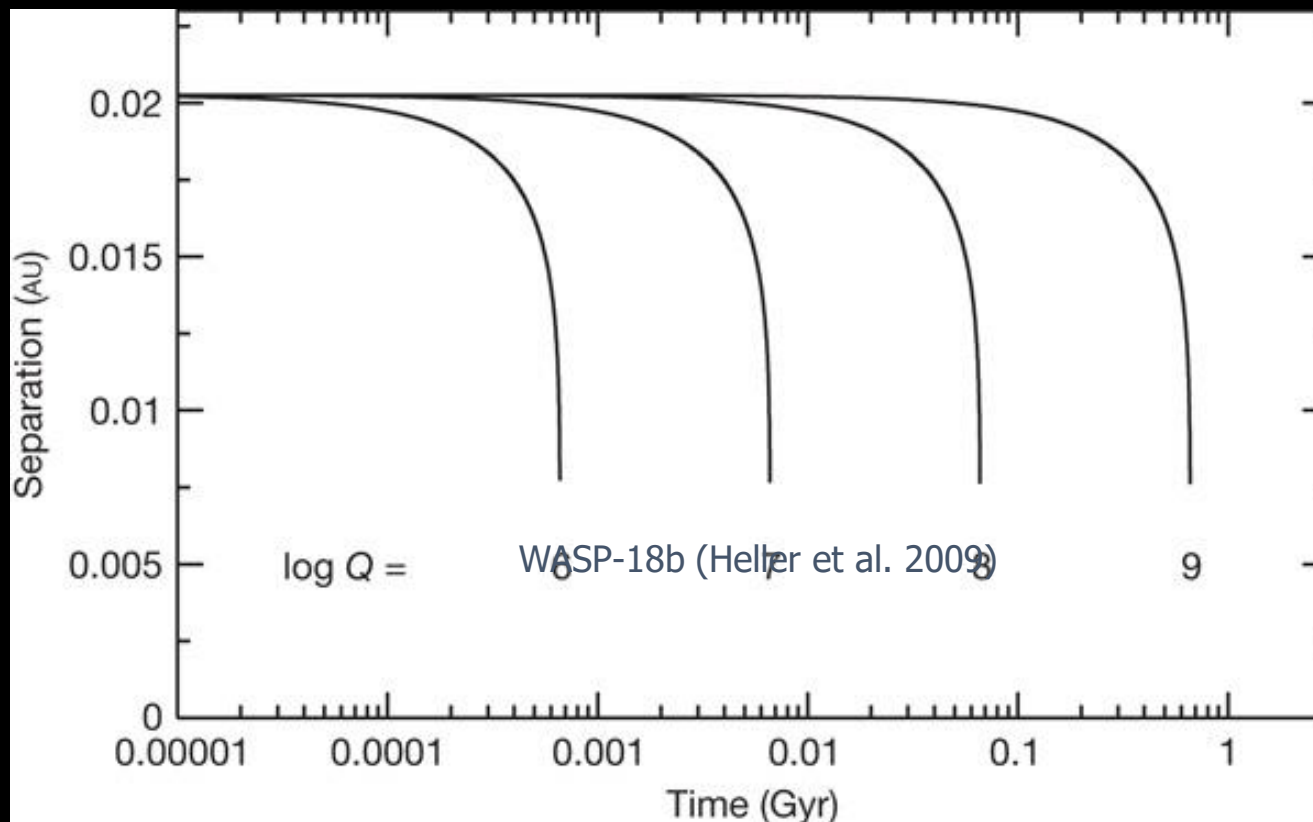
# Распределение планет по ориентации орбиты

Есть планеты с полярными и даже обратными орбитами.



# Приливы

Планеты и звезды (а также планеты друг с другом) могут активно взаимодействовать за счет приливов. Это будет приводить к изменению орбиты и скорости собственного вращения.

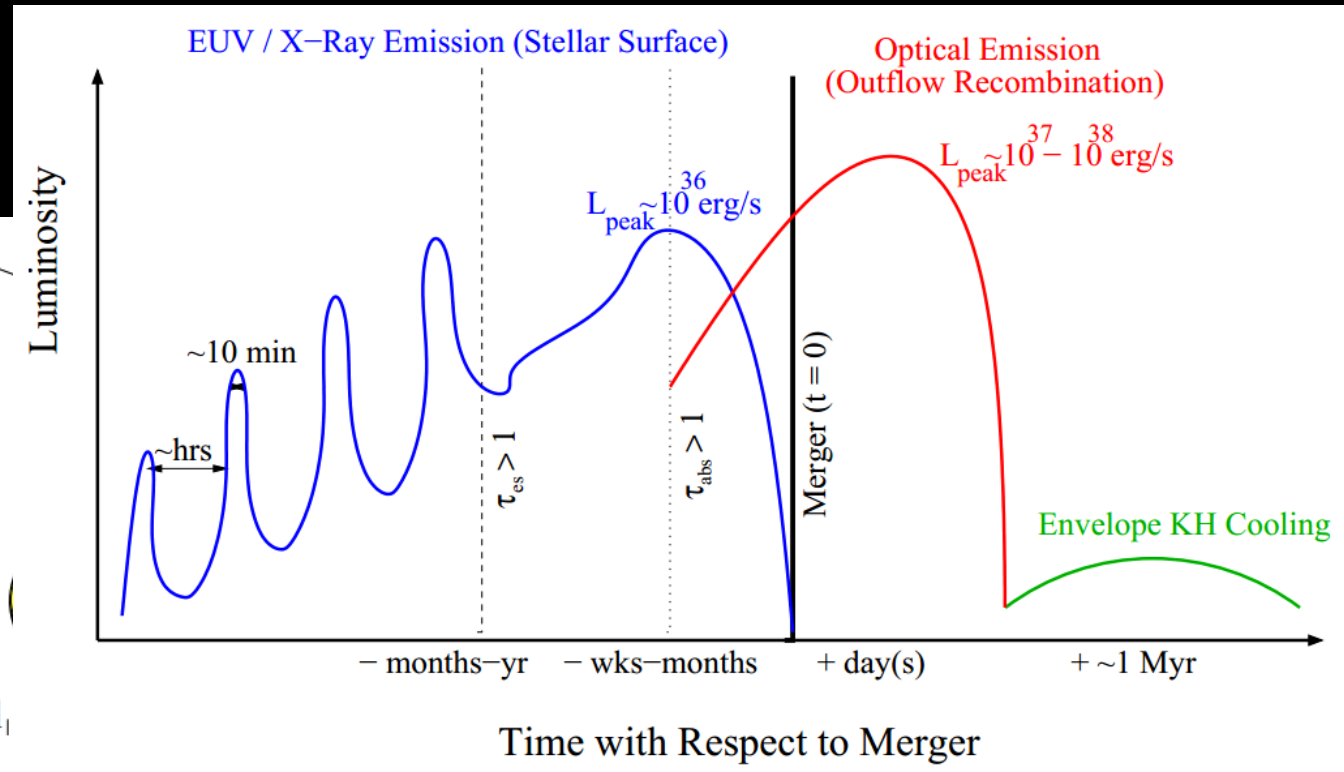


При орбитальном периоде короче нескольких дней (орбита менее 0.02 а.е.) невозможно равновесие, и орбита планеты постоянно сокращается, пока планета не будет разрушена и/или поглощена.



# Слияния звезд и планет

Раз в несколько лет в Галактике

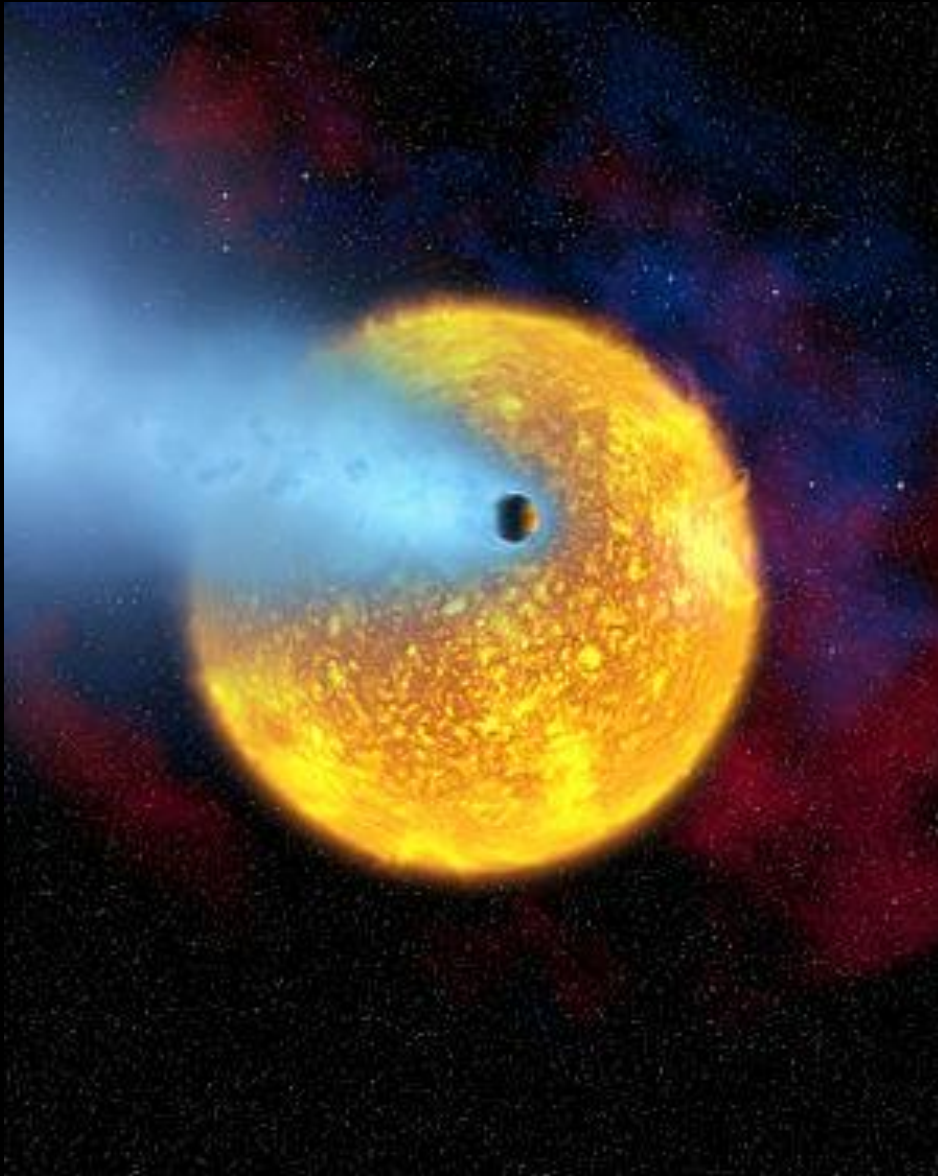


Top View

$$l_1 \sim (HR_p)^{1/2} \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right.$$

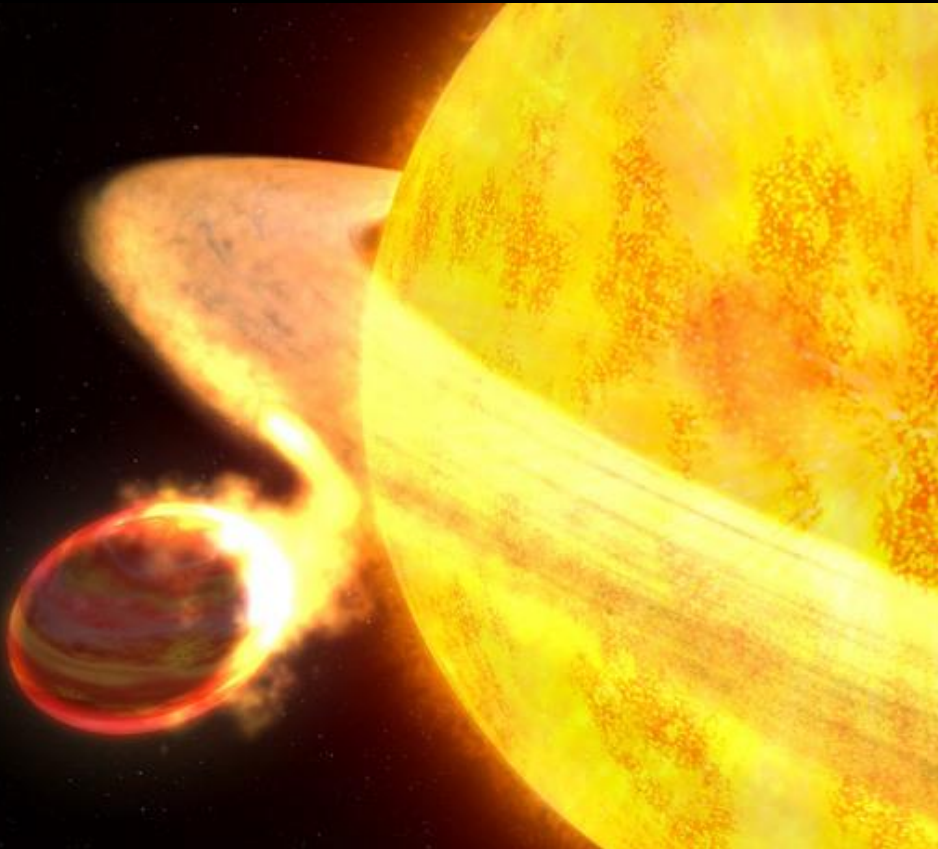
$l_1$

# Испарение HD209458 b



Самые «горячие» планеты могут терять свою газовую оболочку из-за прямого нагрева, а также из-за разогрева приливами.

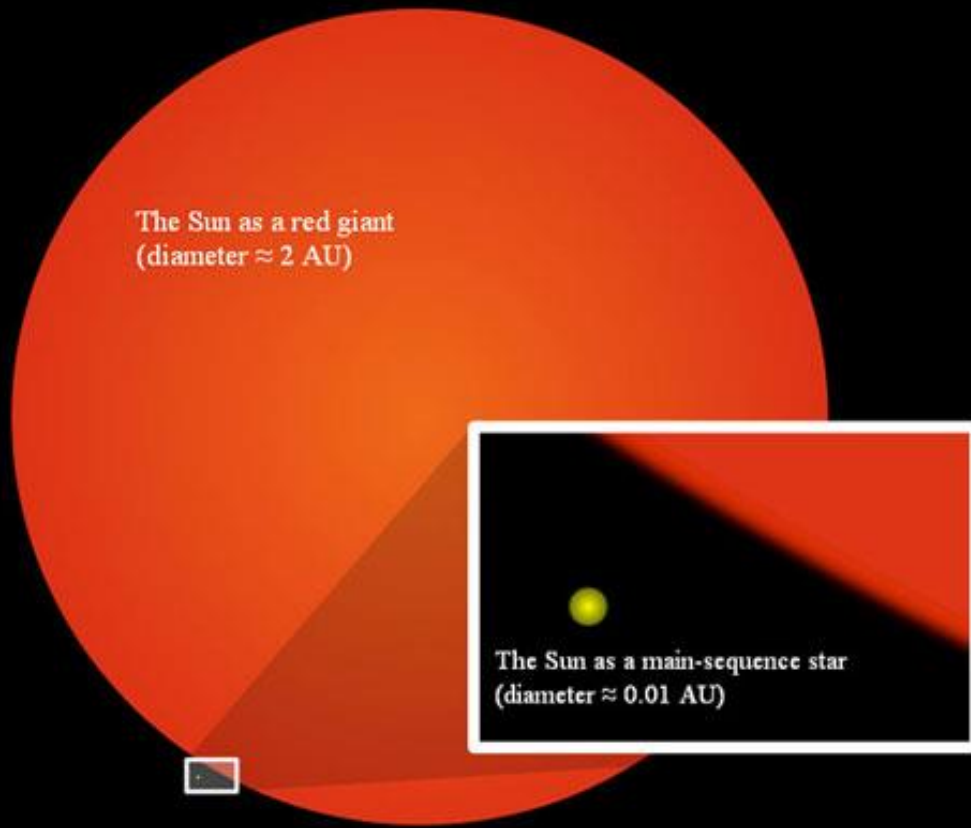
# Поглощение WASP-12b



Приблизившись совсем близко к звезде, планета может начать терять свое вещество.

Планета WASP-12b является таким примером (1005.3656). Удалось увидеть поглощающее облако, состоящее, в том числе, и из тяжелых элементов.

# Превращение звезды в красного гиганта



Звездная эволюция отражается на планетах.

При превращении звезды в красного гиганта часть планет оказывается поглощенными.

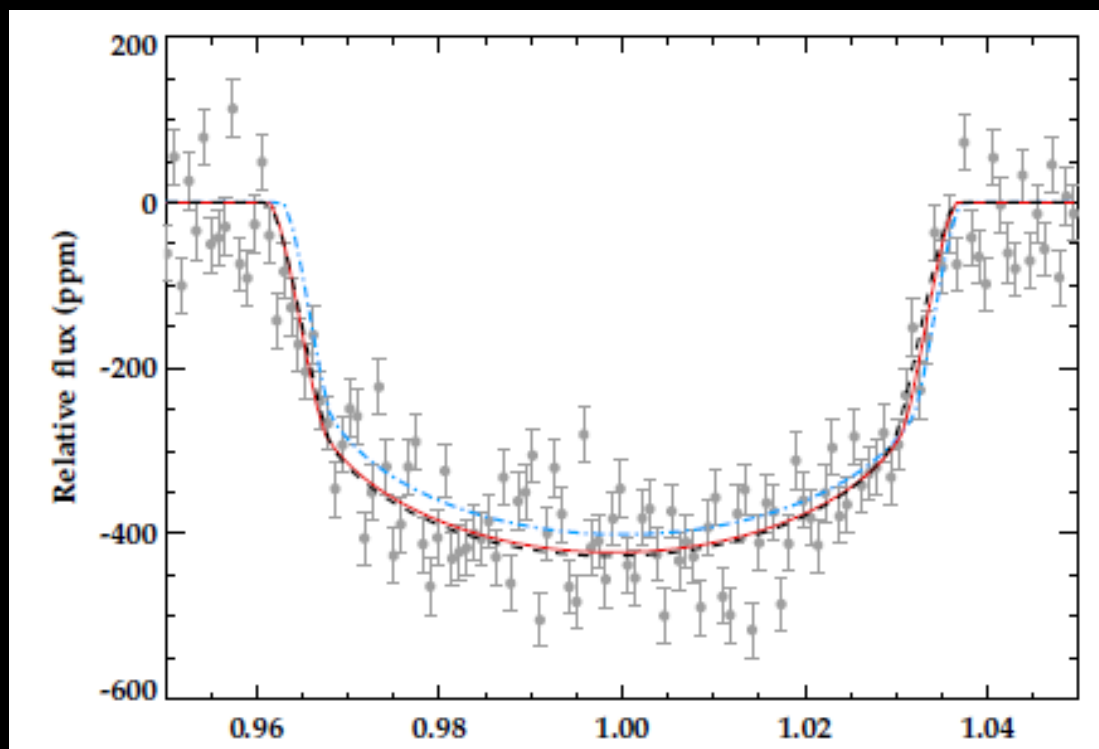


# Планеты вокруг звезд-гигантов

Известно несколько десятков таких планет. Они особенно интересны в связи с пониманием судьбы планетных систем на поздних стадиях эволюции звезд.

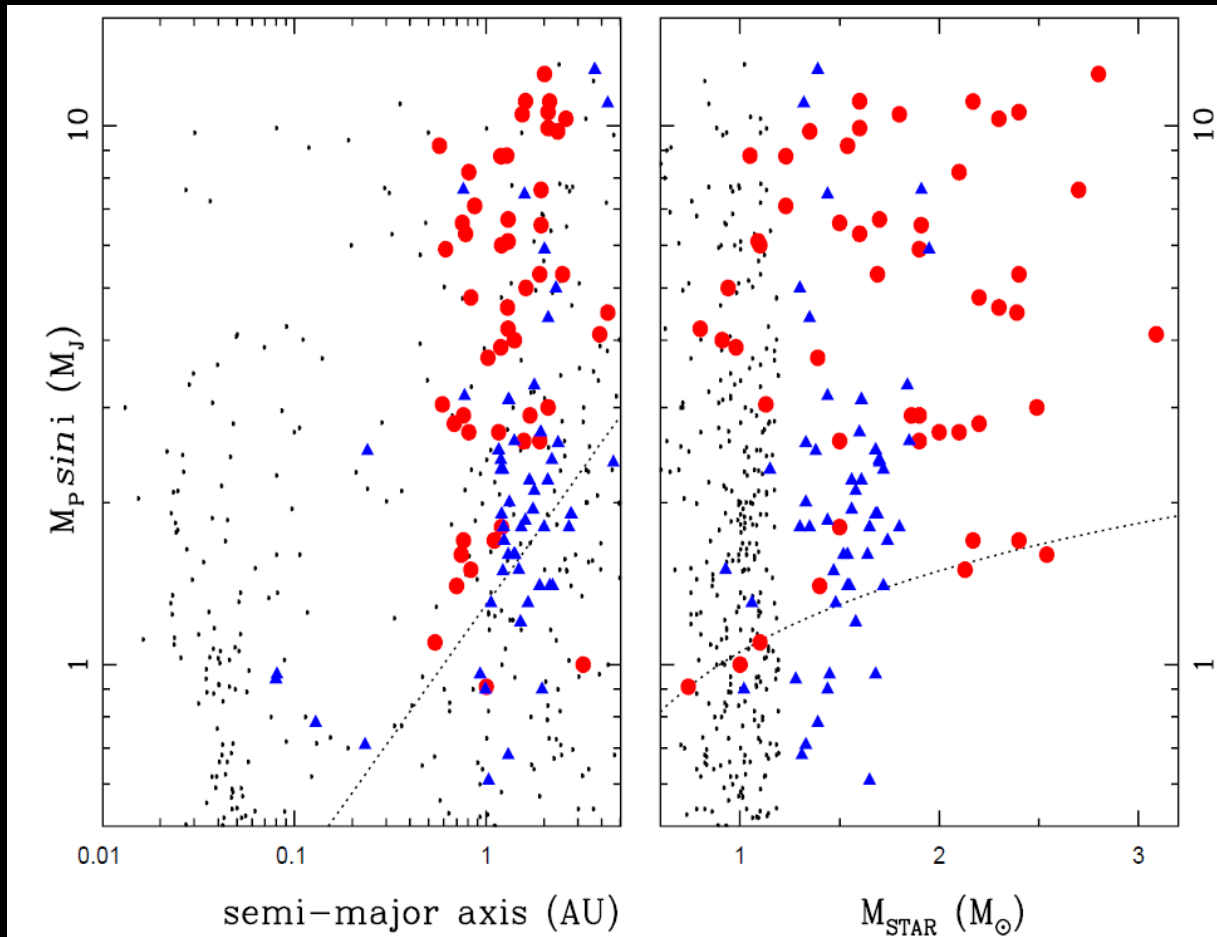
Планета Кеплер-91b, во-первых, является самой близкой к звезде среди планет у гигантов (<1.5 радиуса звезды над поверхностью). Звезда закрывает 10% неба!

Во-вторых, через <55 млн лет планета упадет на звезду.



Кеплер-91

# Статистика планет вокруг гигантов



Все надежные планеты вокруг гигантов вращаются не слишком близко к самой звезде.

Концентрация планет на орбитах 0.5-0.9 а.е. может быть связана с приливными эффектами.

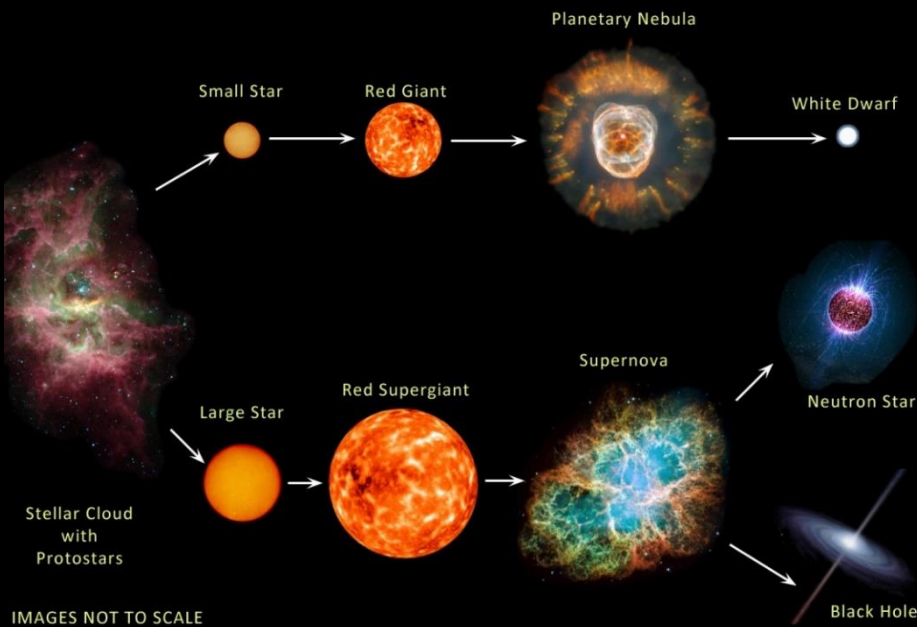
Планеты массивны, и авторы выдвигают гипотезу, что масса планет могла расти за счет вещества звезды.

Орбиты более круглые — за счет взаимодействия.

# Выброс планет звездами

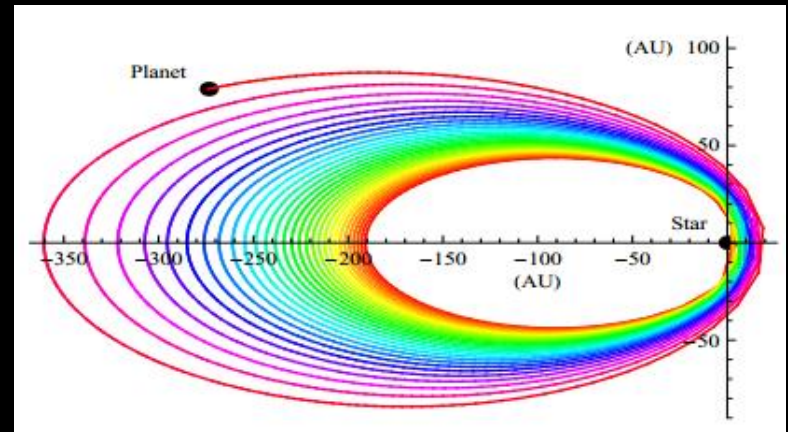
Что происходит с планетами  
когда звезда теряет массу?

EVOLUTION OF STARS



У звезд типа Солнца  
планеты на орбитах, как в СС,  
останутся в системе, но  
орбиты будут шире.  
Поэтому и наблюдают планеты  
у белых карликов

Далекие планеты могут «улетать»



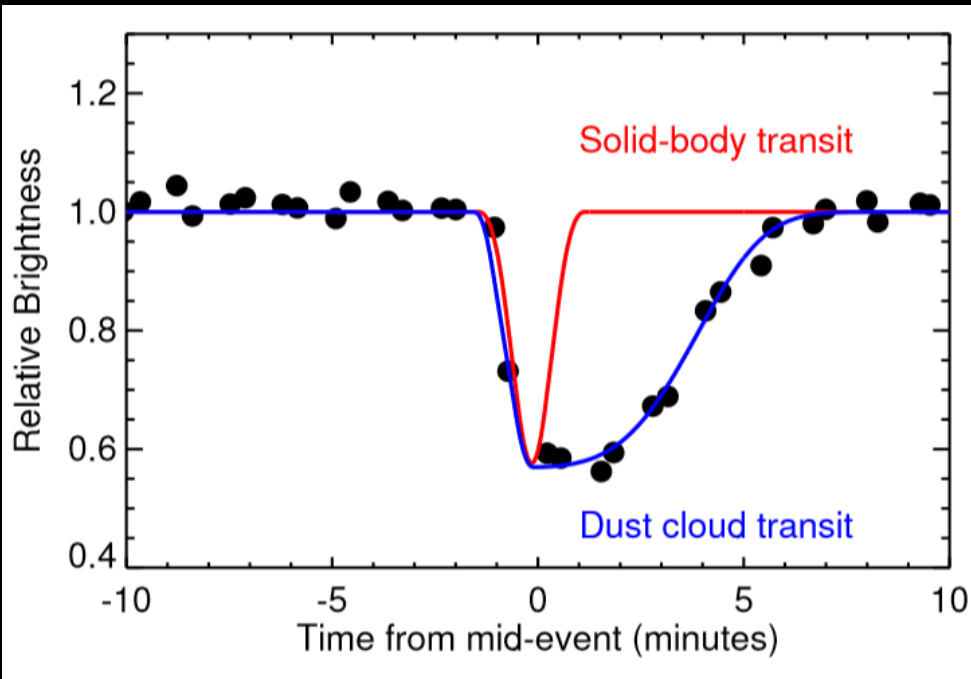
Интересные потери планет могут  
происходить в двойных системах!

1107.1239, 1202.3139

# Разрушение планеты белым карликом

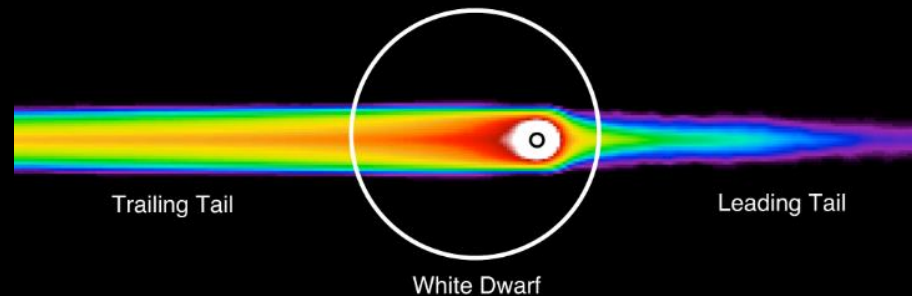
Удалось пронаблюдать транзиты газопылевых облаков. Кроме того, видны аномалии в спектре белого карлика.

Наиболее вероятно, что было разорвано тело планетной массы. Хотя, может быть, и несколько тел типа крупных астероидов.



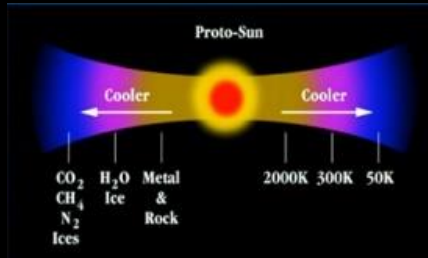
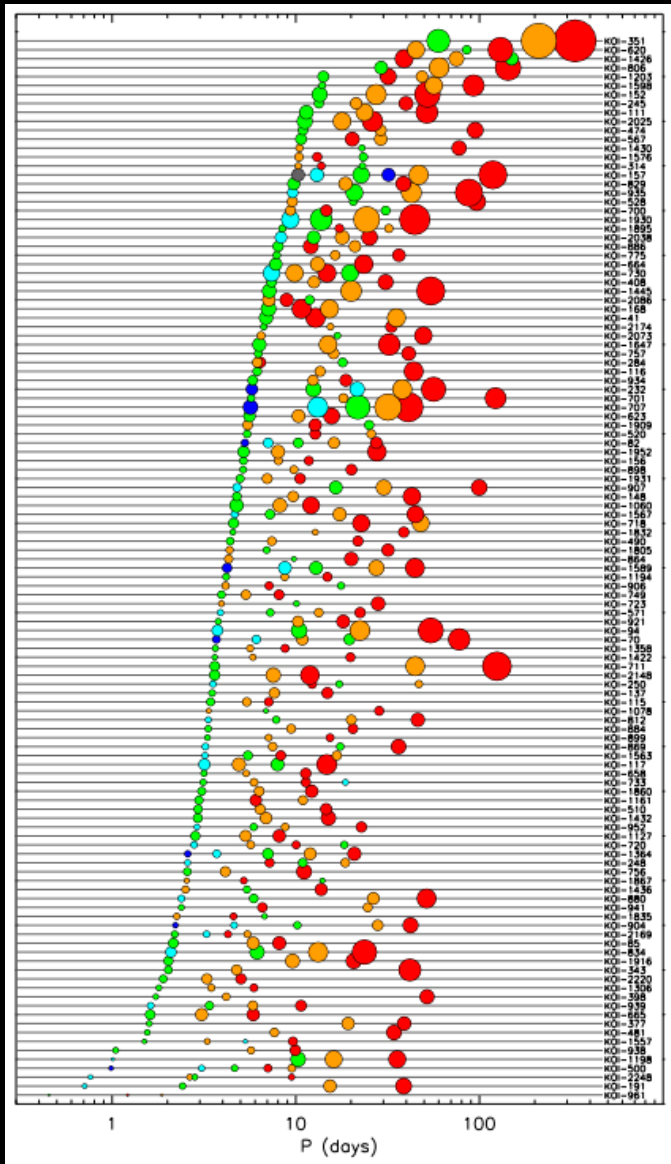
1510.06387

○ Planetesimal Size  
|——| 1 Earth Radius



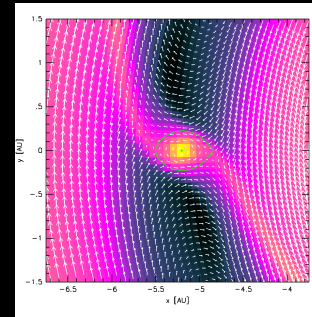


# Самое главное

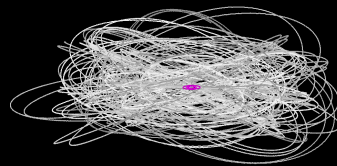


Снеговая линия

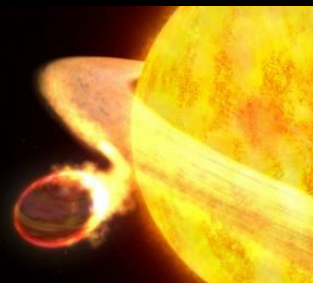
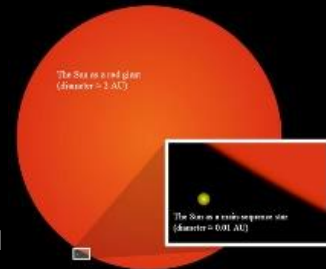
Миграция в диске



Взаимодействия между планетами



Эволюция звезды



Испарение и поглощение