

Основные тенденции в современной астрофизике

Сергей Попов
ГАИШ МГУ

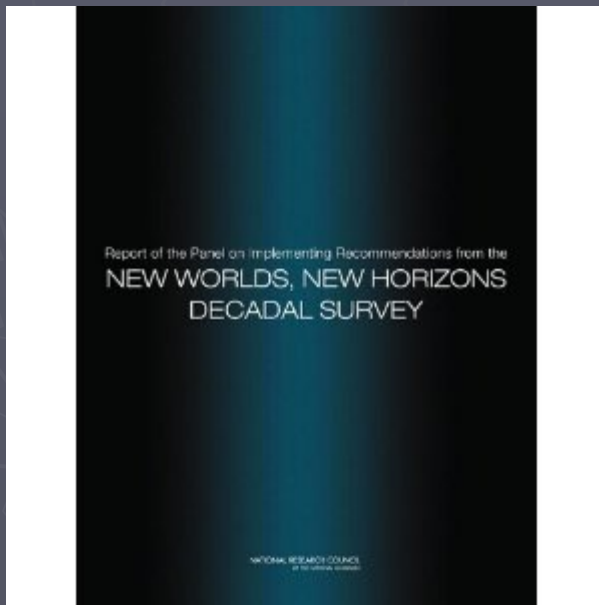
Статистика публикаций

Согласно NASA ADS за год более 120 000 астрономических публикаций.
В реферируемых изданиях более 23 000.
В астрофизической части Архива – более 1000 в месяц.

http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/current.html

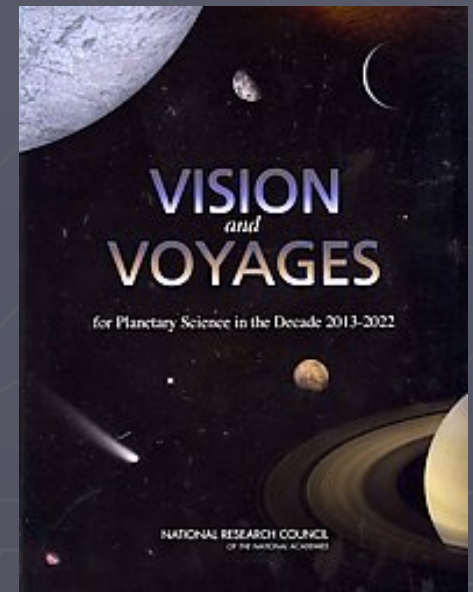
Два больших обзора

Астрономия – наблюдательная наука. Поэтому развитие в ближайшие годы во многом можно понять, посмотрев на планируемые крупные миссии.



New Worlds, New Horizons
in Astronomy and Astrophysics

books.nap.edu



Vision and Voyages for
Planetary Science
in the Decade 2013-2022

Вероятные направления развития

- Темное вещество: лабораторная регистрация и гамма-сигнал
- Темная энергия
- Первичная инфляция (данные по поляризации реликта)
- Первые звезды и галактики (прямые наблюдения)
- Природа черных дыр (гравитационно-волновой сигнал)
- Источники космических лучей сверхвысоких энергий
- Физика недр нейтронных звезд
- Механизм взрыва сверхновых
- Экзопланеты:
 - земноподобные планеты в зонах обитания
 - состав атмосфер гигантских планет и уравнение состояния
 - образование и эволюция планетных систем

В наблюдениях важной тенденцией будет появление быстрых обзоров неба в разных диапазонах.

Состав вселенной

Обычное вещество (протоны, нейтроны) вносит вклад в полную плотность вселенной лишь порядка нескольких процентов.

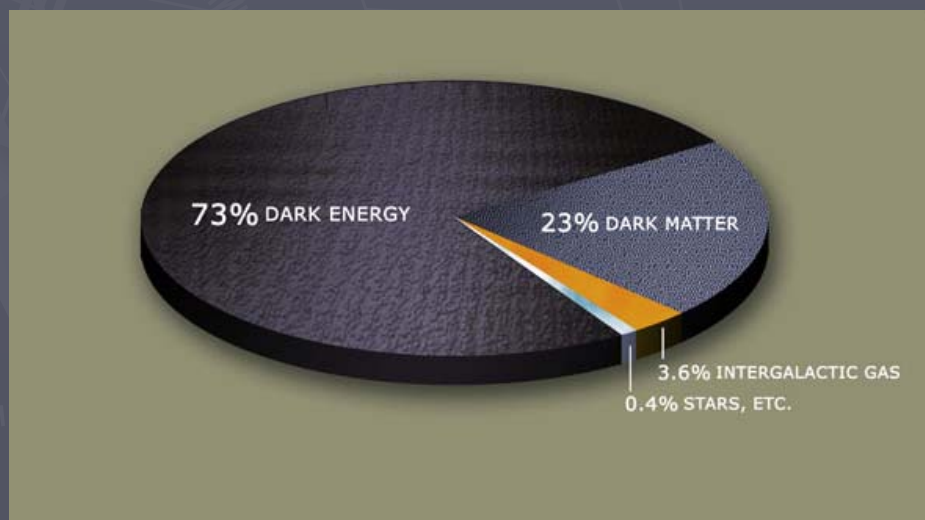
Около четверти плотности вселенной связано с темным веществом. Оно состоит из частиц, слабо взаимодействующих друг с другом и с обычным веществом.

Мы пока наблюдаем лишь гравитационное действие темного вещества.

Около 70 процентов плотности вселенной связано с темной энергией.

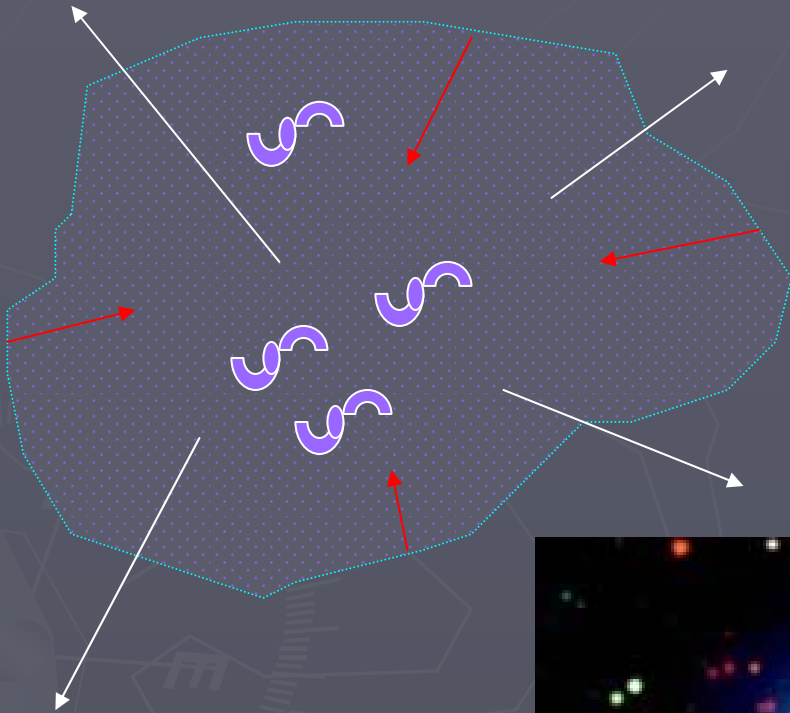
Из-за нее расширение вселенной идет все быстрее.

Природа темной энергии не ясна.

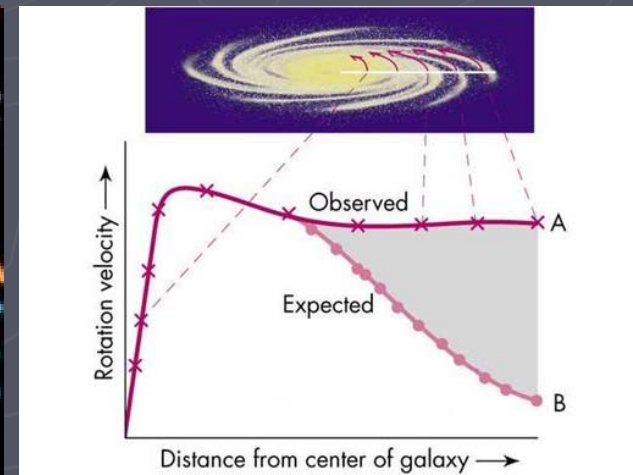


Темное вещество

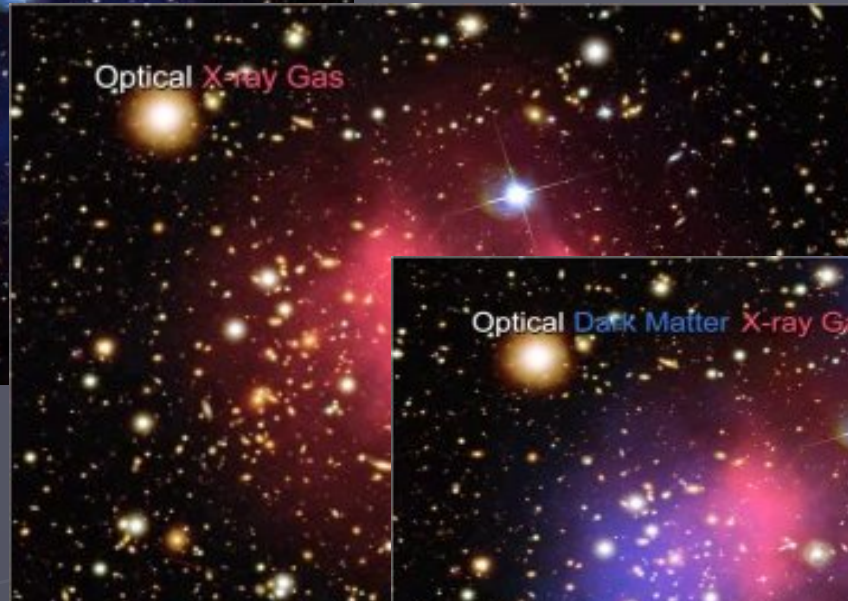
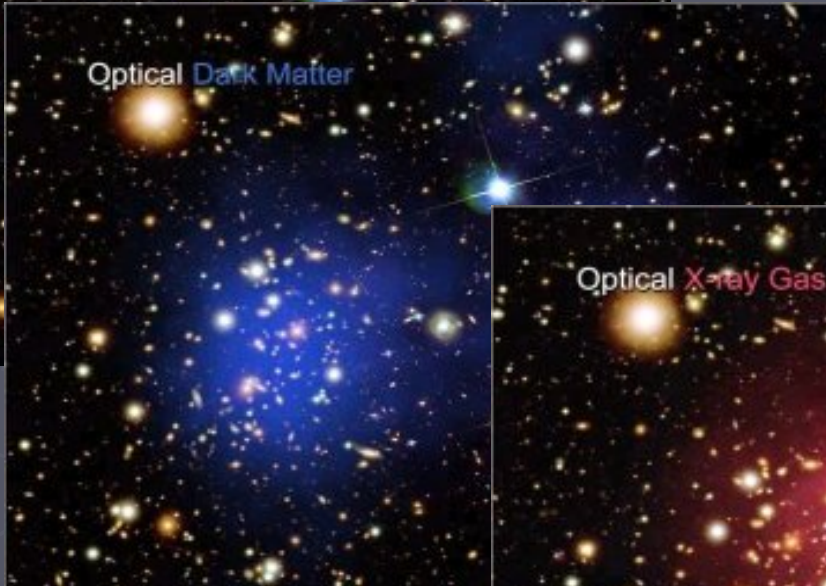
Сама идея появилась в 30-гг. благодаря работам Фрица Цвикки.



Подсчет массы видимого вещества в скоплениях галактик показывал, что его недостаточно для того, чтобы галактики и газ не разлетелись.

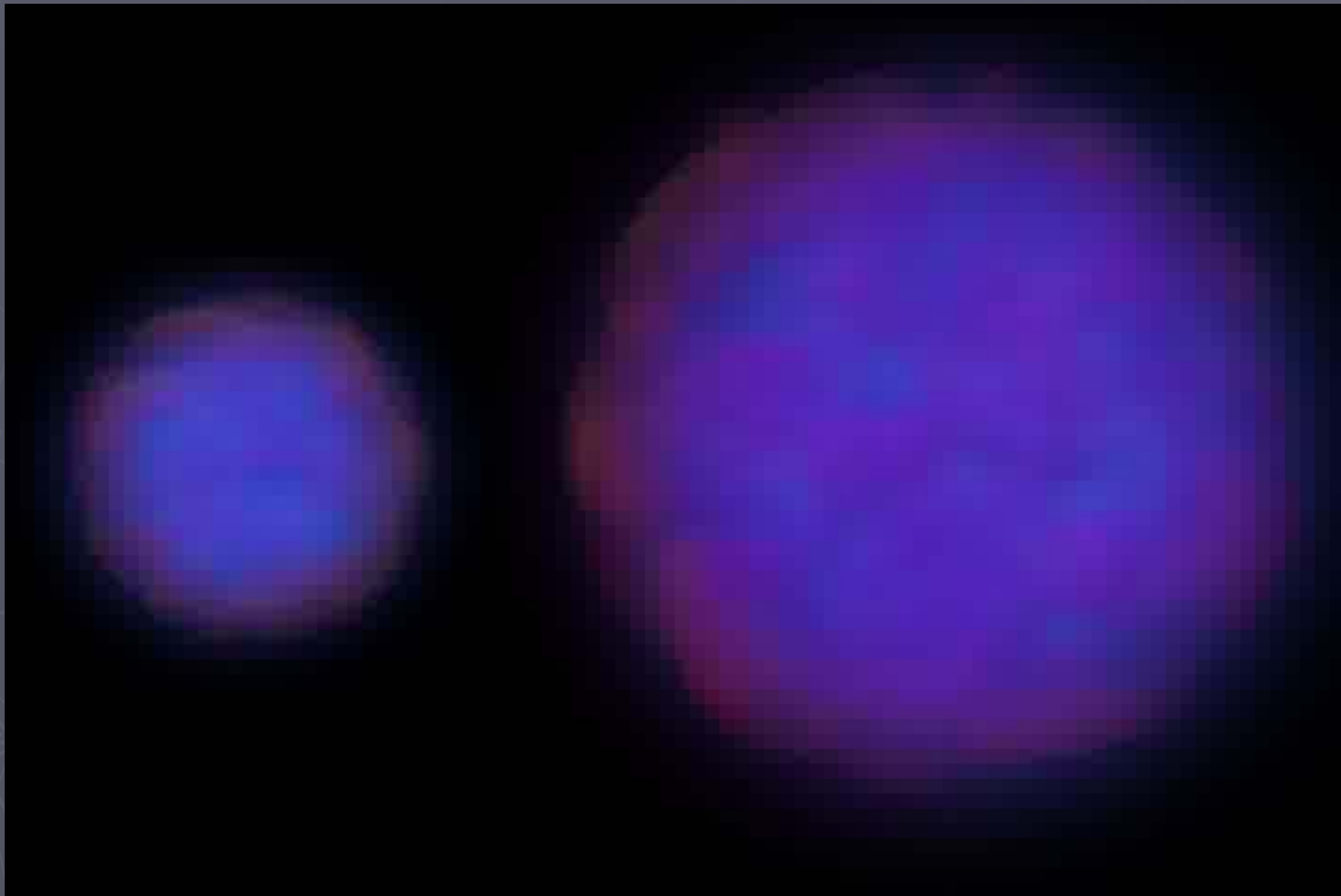


Яркий пример



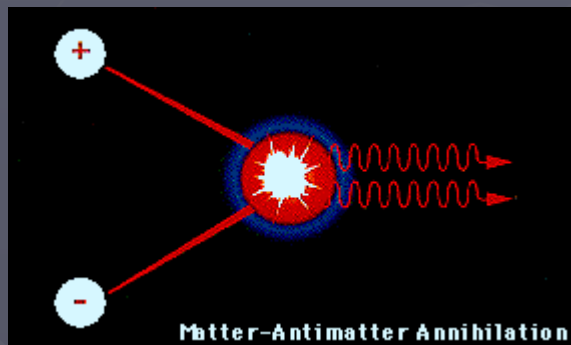
Сталкивающиеся скопления галактик
1E 0657-56 (Bullet cluster)

Столкновение скоплений галактик



Поиск темной материи

- 1) Частицы темного вещества пытаются поймать в подземных лабораториях. Есть основания думать, что в ближайшие годы это будет сделано.



- 2) Также можно искать гамма-лучи от аннигиляции частиц темного вещества

Такие исследования активно ведутся с помощью обсерватории имени Ферми и наземных гамма-телескопов.

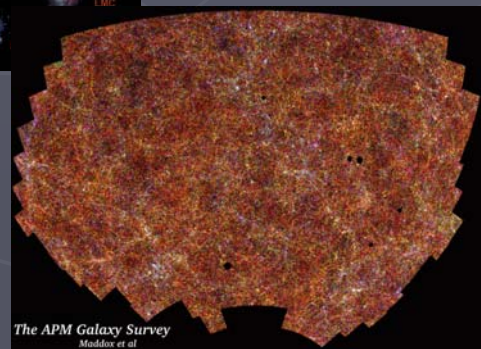


Галактика

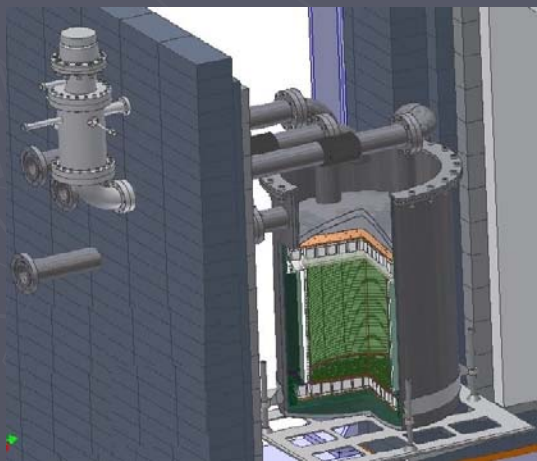


Близкие галактики

Фон от далеких галактик



Поиски темного вещества



XENON100 (1104.2549)
Нет сигнала от
темного вещества

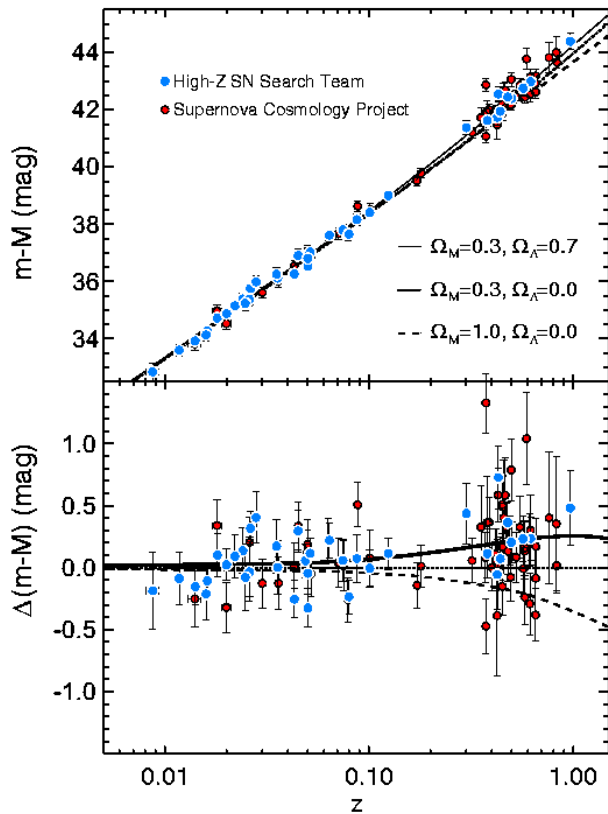


EDELWEISS-II (1103.4070)
Нет сигнала . . .



CRESST-II (1109.0702)
Виден слабый
необъяснимый сигнал

Нобелевская премия 2011



Две независимые группы ученых изучали особый тип сверхновых, для которых можно с хорошей точностью узнать светимость.

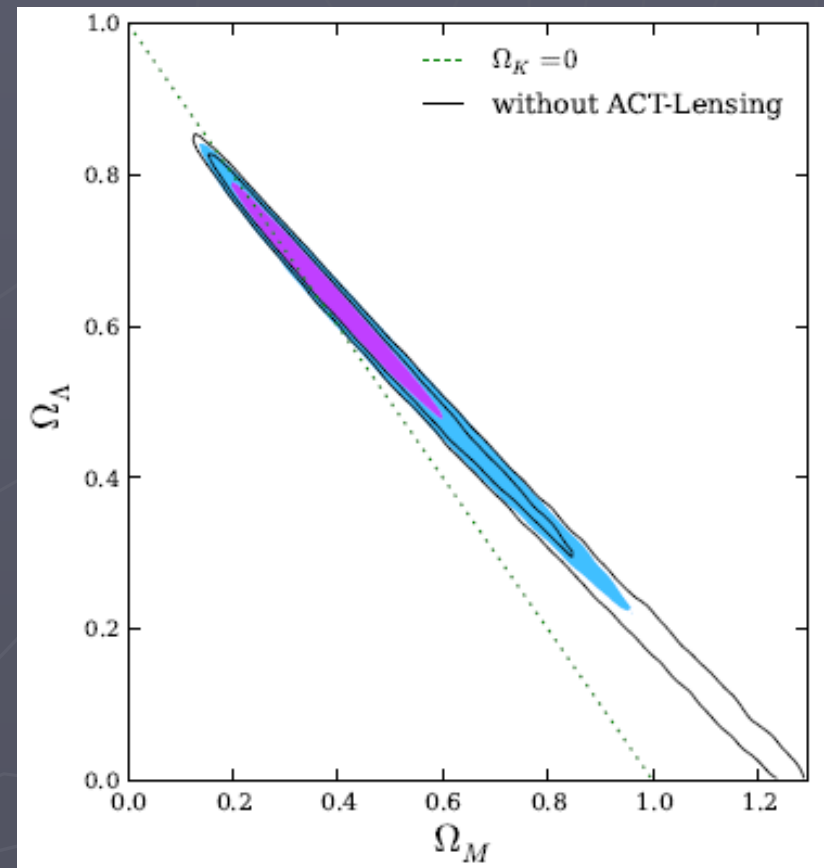
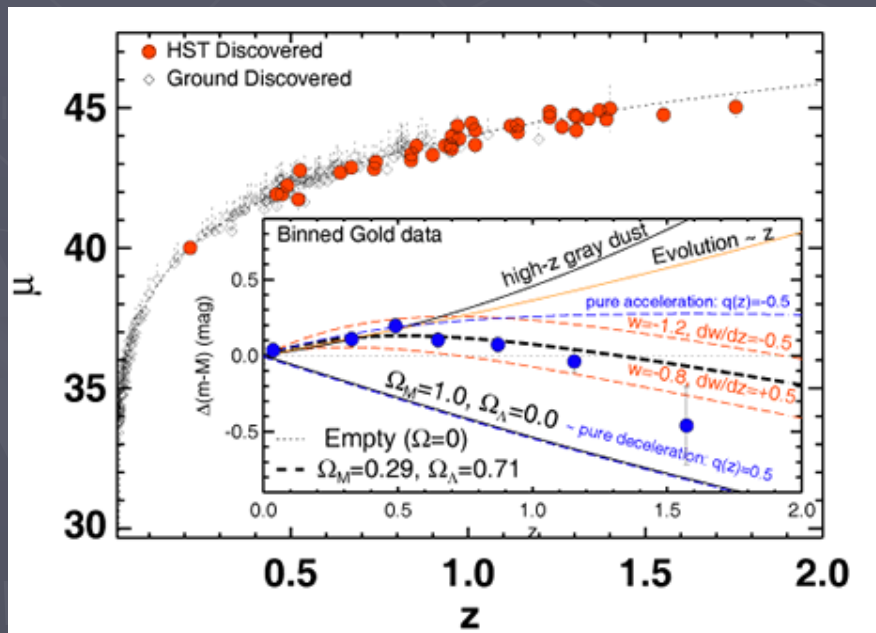
Выяснилось, что видимый блеск сверхновых уменьшается с увеличением красного смещения не так, как это предсказывает стандартная космологическая модель.

Интерпретация состоит в ускоренном расширении

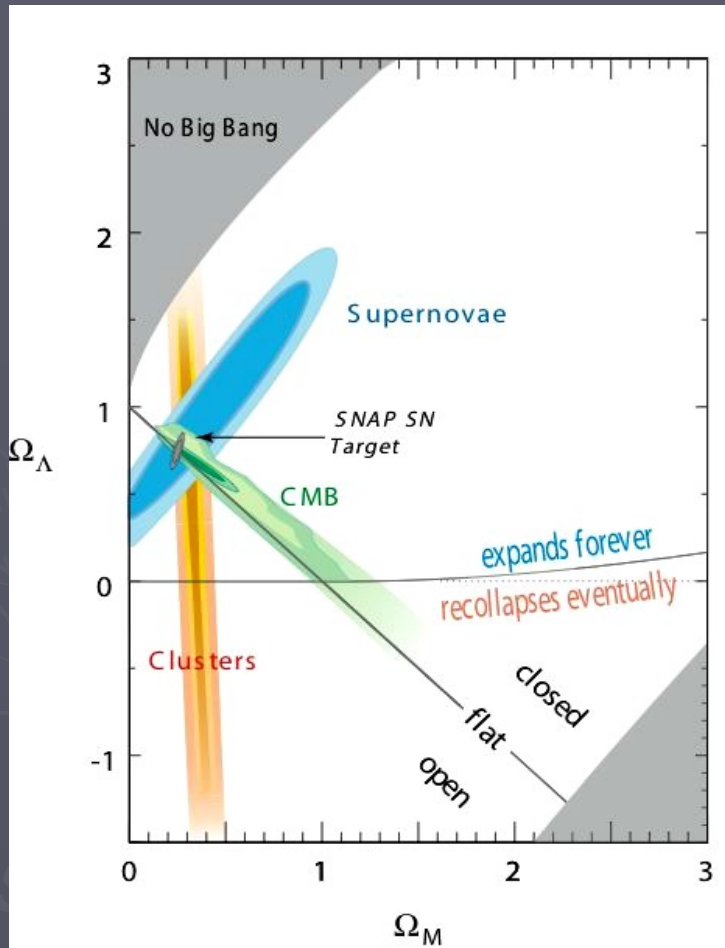
Темная энергия

Свидетельства в пользу ускоренного расширения вселенной видны по самым разным данным:

- сверхновые,
- реликтовое излучение,
- крупномасштабная структура



Независимые свидетельства



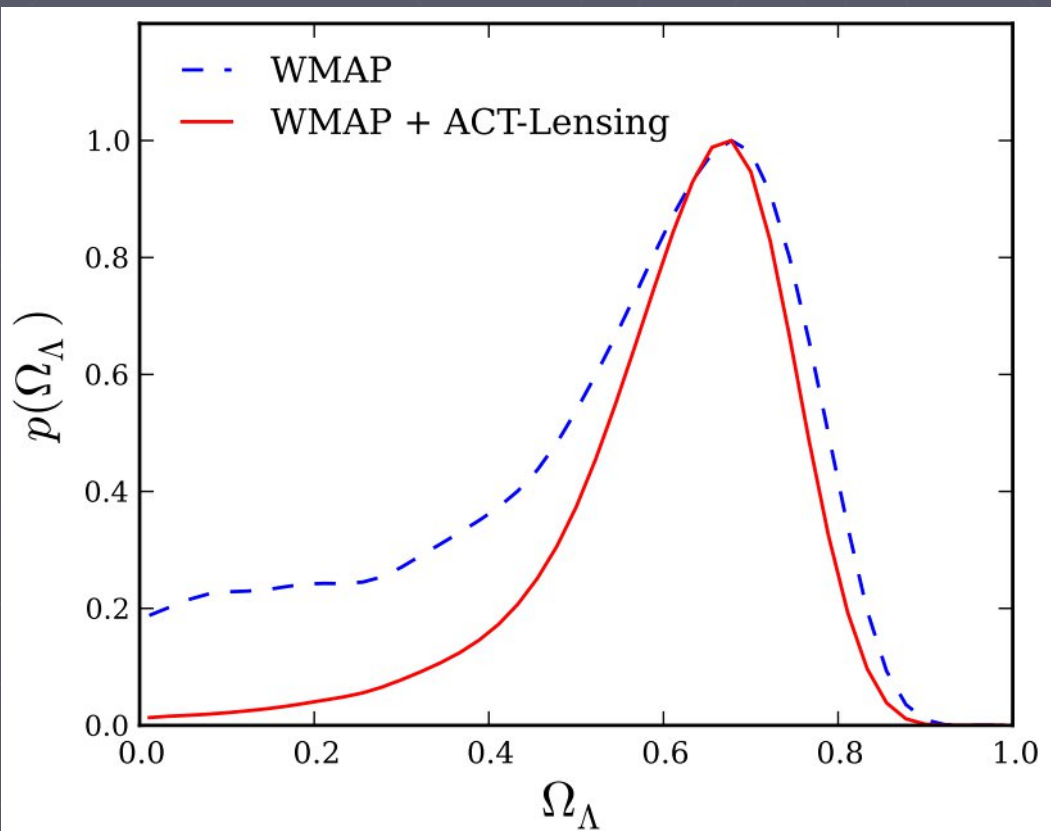
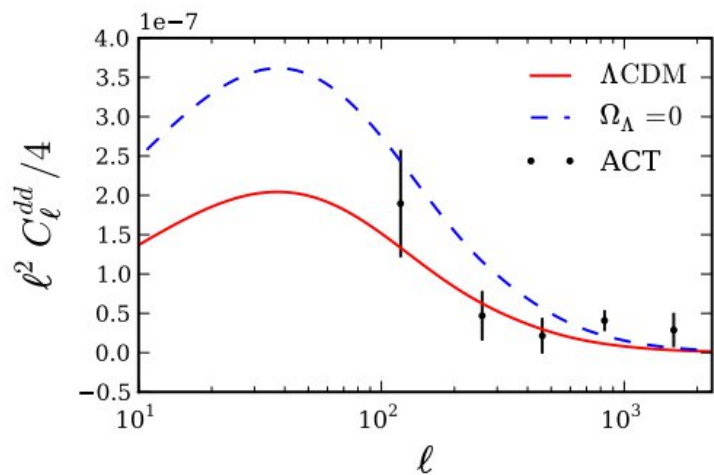
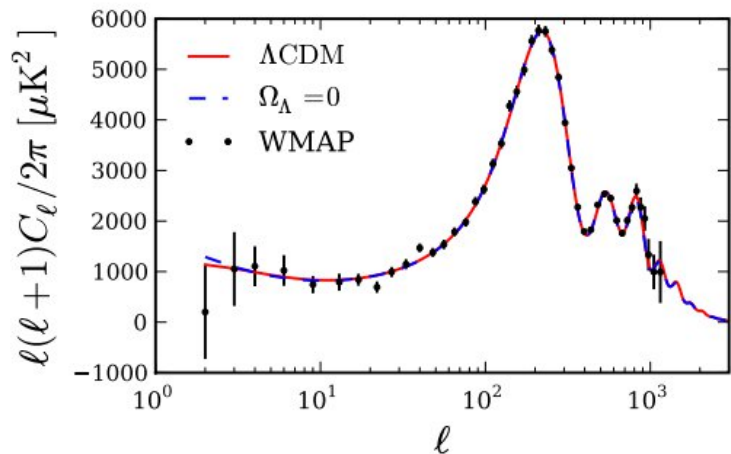
Сейчас есть много разных независимых свидетельств в пользу существования темной энергии:

- Сверхновые
- Реликтовое излучение
- Крупномасштабная структура

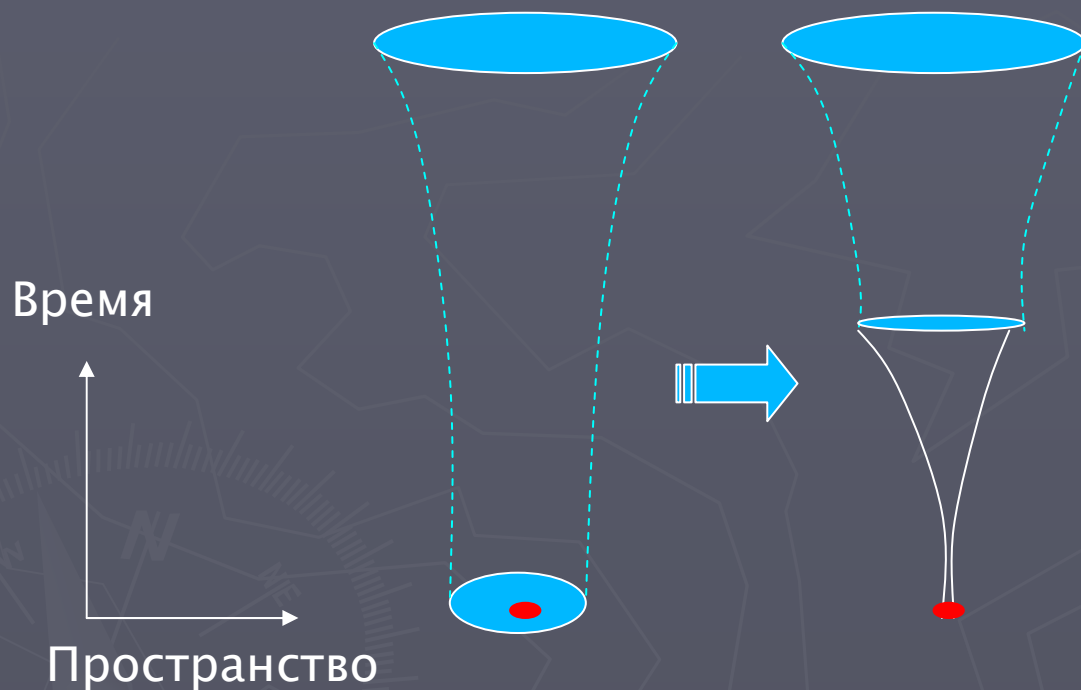
Объединяя все данные вместе, можно определить основные космологические параметры с высокой точностью.

Темная энергия по данным о реликтовом излучении

Данные Atacama Cosmology Telescope



Инфляция

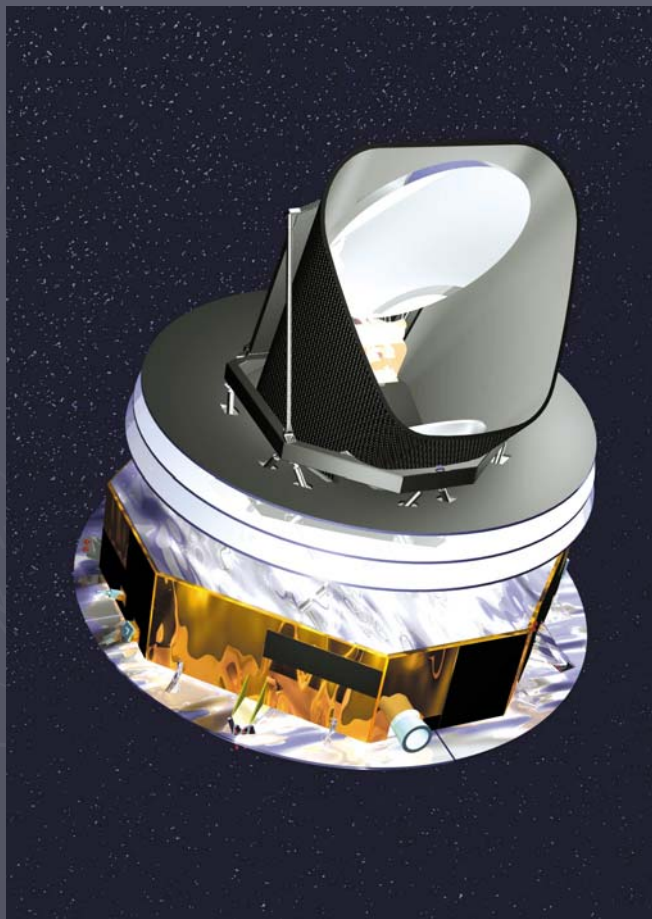


За время от 10^{-36} до 10^{-32} сек
вселенная многократно
увеличила свой объем.

Все неоднородности
растянулись.

Экзотические частицы
разлетелись ...

Что сможем узнать в ближайшее время?



Спутник Planck (ESO)

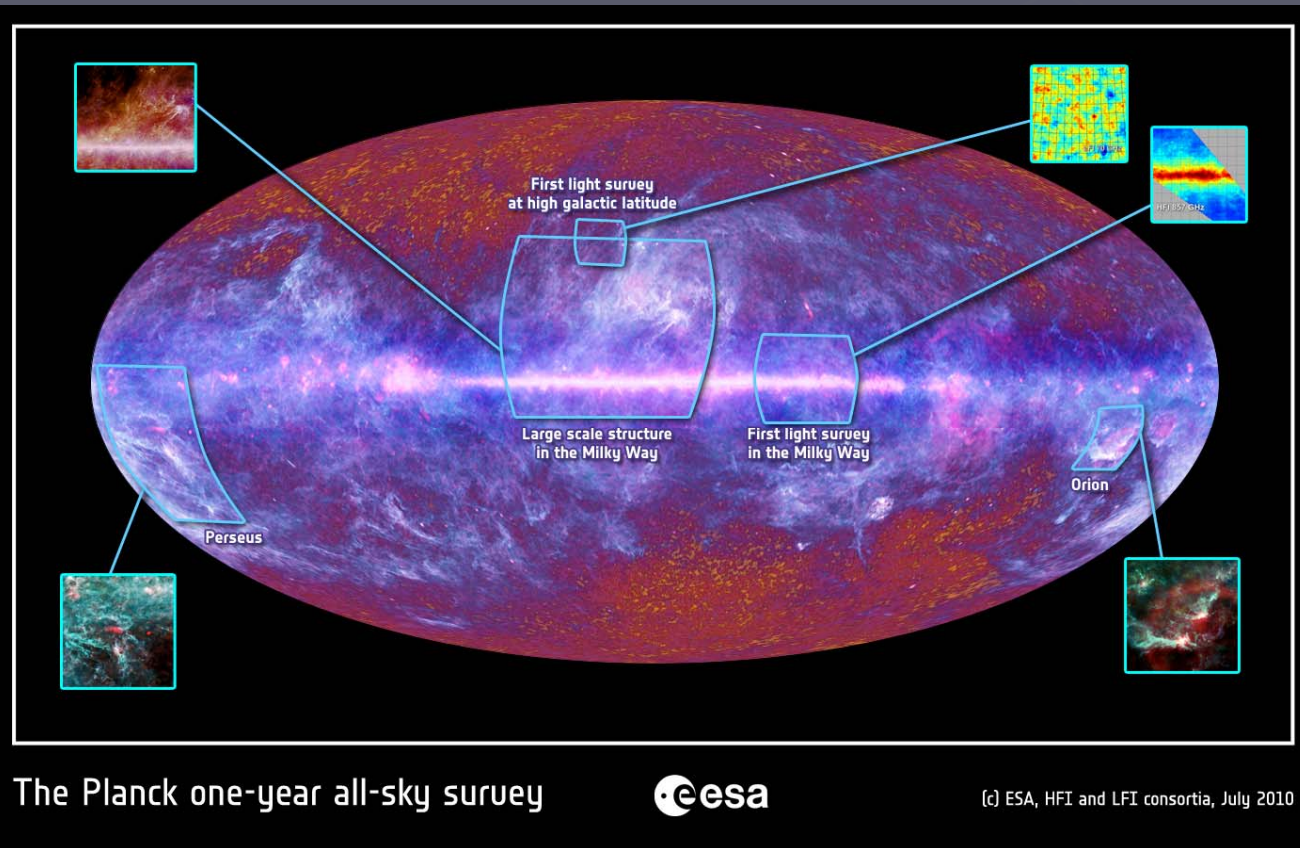
С помощью детальных наблюдений реликтового излучения можно получить данные о стадии инфляции.

В более далекой перспективе нужно ловить гравитационные волны из ранней вселенной. Ясно, как это делать, но пока это просто очень дорого.



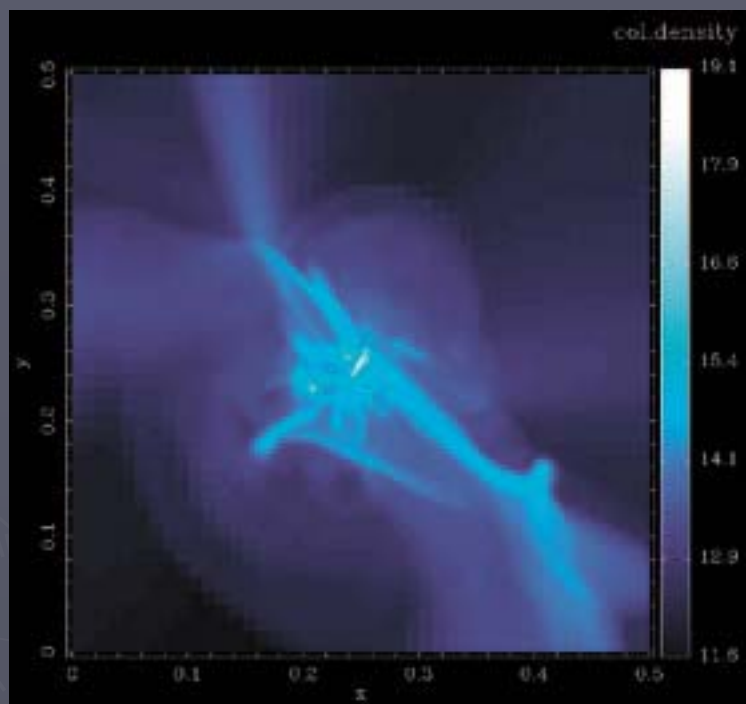
LISA

Предварительные результаты спутника Planck

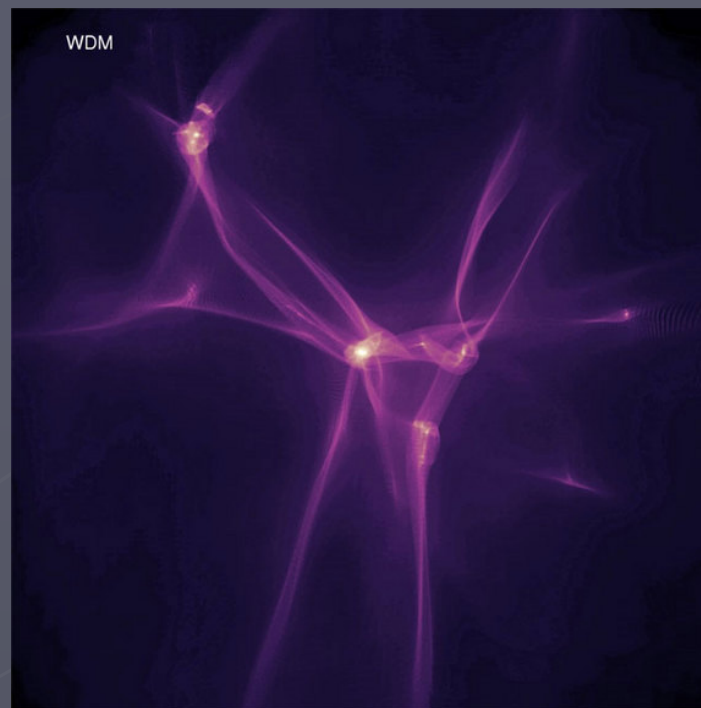


Пока публикуются не космологические результаты, а данные по межзвездной среде и источникам в нашей Галактике, а также по отдельным внегалактическим объектам

Первые звезды и галактики



Моделирование образования
дисковой галактики (А. Кравцов и др.)



Моделирование образования
первых звезд

Перспективы



Космический телескоп
имени Джеймса Вебба

Мы не видим первые звезды и галактики.
Нужны новые инструменты.

- Новый космический телескоп
- Система радиотелескопов SKA
- Atacama Large Millimeter Array
- Новые рентгеновские спутники

Основные типы черных дыр: два реальных и два гипотетических



Звездные массы

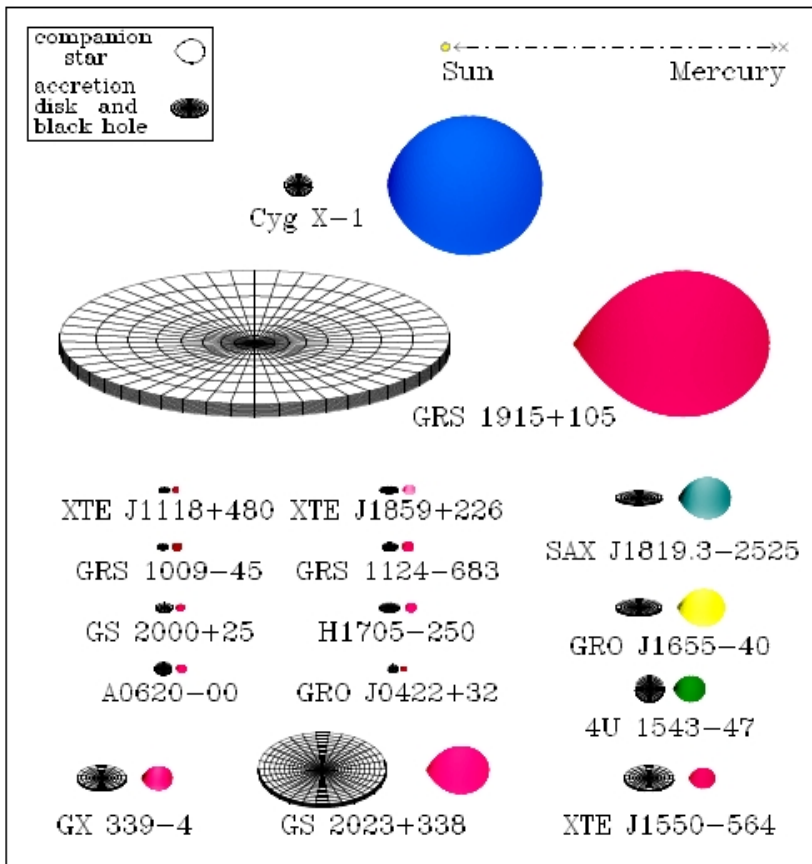
Сверхмассивные

Первичные

Промежуточные

Кандидаты в черные дыры

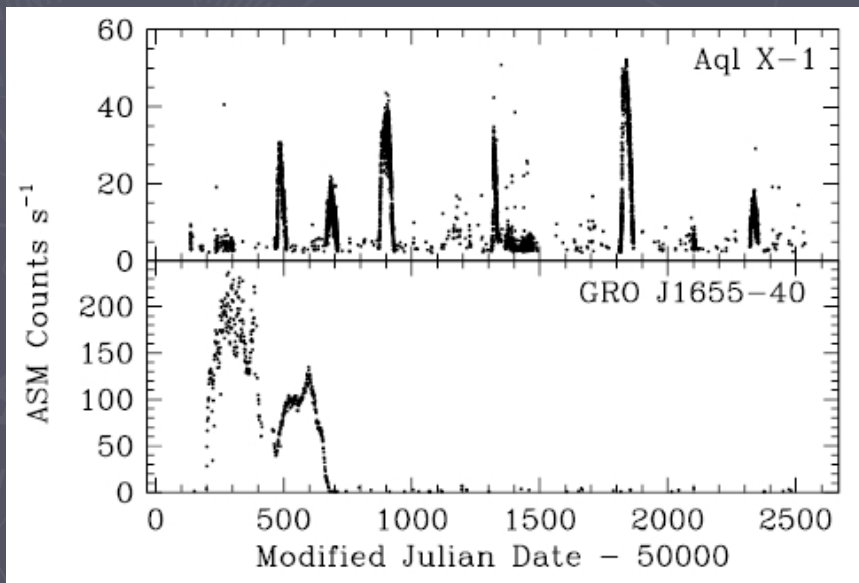
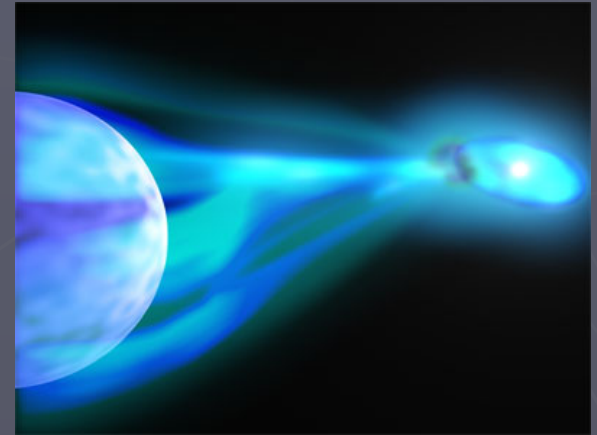
Black Hole Binaries in the Milky Way



Почему считаем их кандидатами?

- нет пульсаций
- особенности излучения
- ТЯЖЕЛЫЕ!

Двойные системы



НЗ

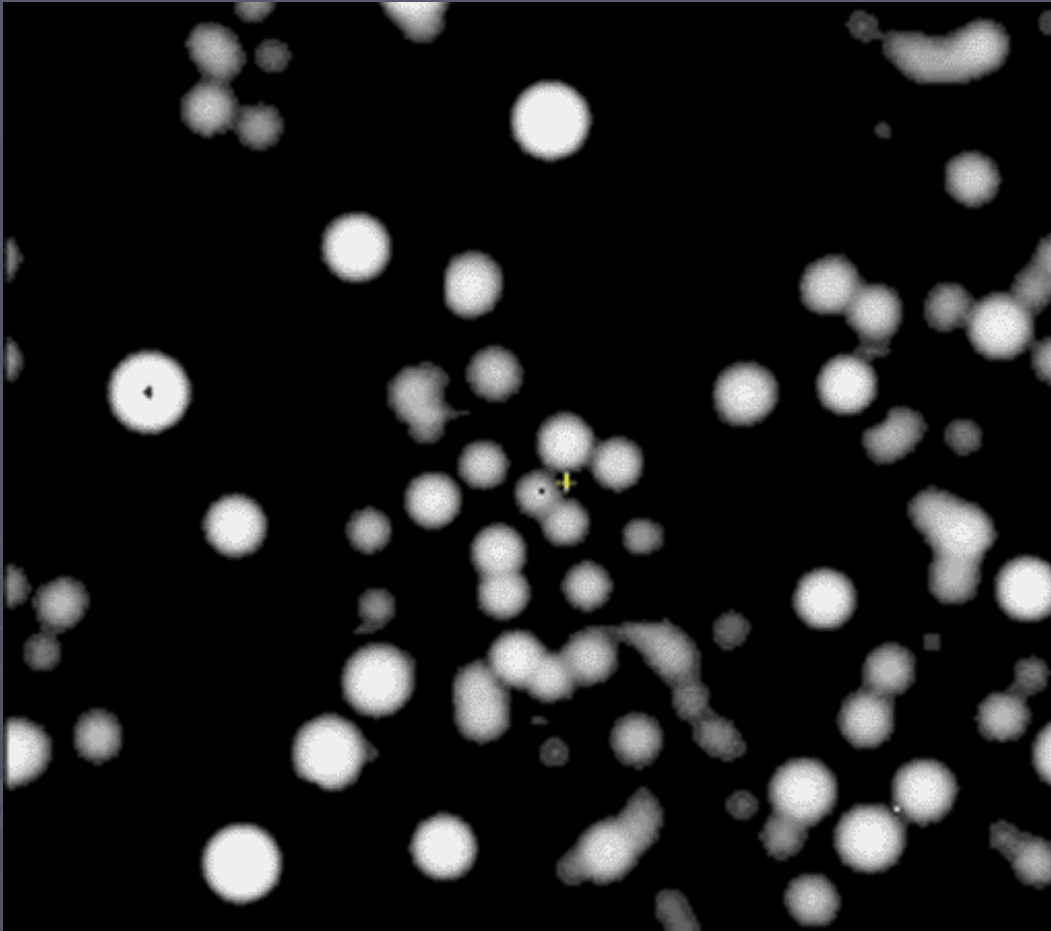


У кандидатов в черные дыры нет барстерных вспышек, хотя, если бы не было горизонта, то они должны были бы быть в ряде потенциальных альтернативных моделей.

ЧД



Звездная динамика вокруг Sgr A*

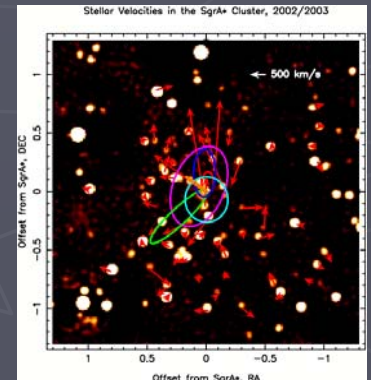


С высокой точностью мы знаем динамику внутри центральной угловой секунды.

Оценка массы ЧД (3-4) $10^6 M_\odot$

Было бы здорово открыть радиопульсар около Sgr A*

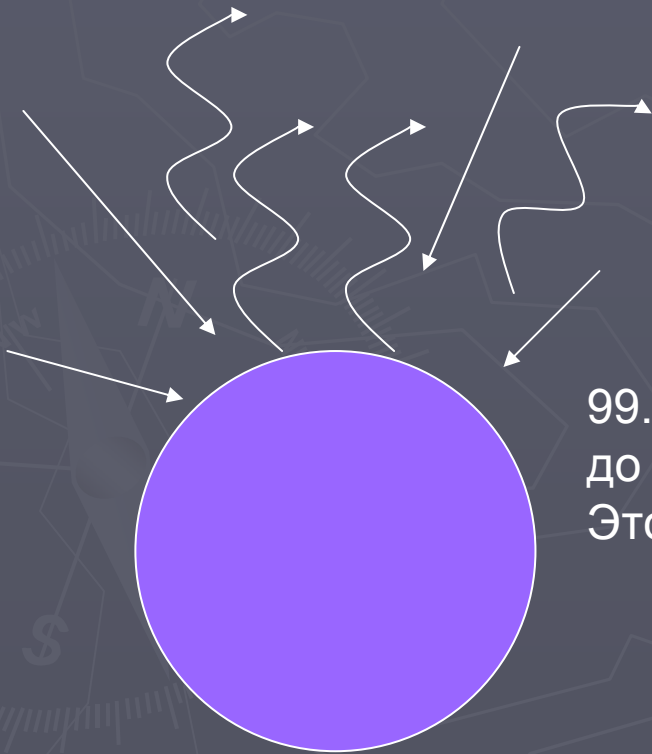
(APOD [A. Eckart](#) & [R. Genzel](#))



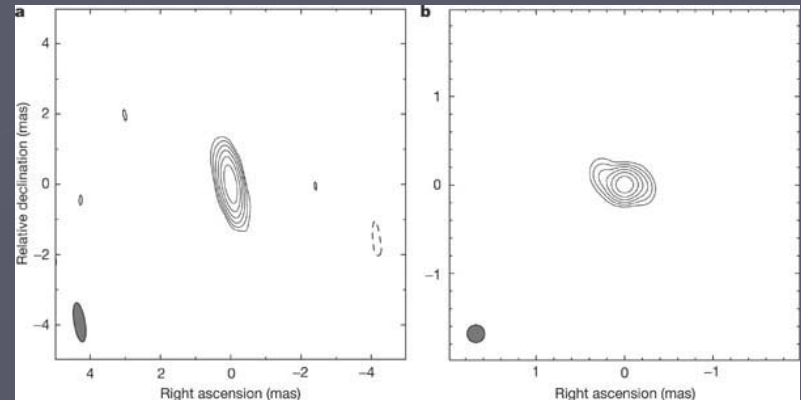
В Sgr A* нет поверхности?

Наблюдается только излучение от потока, но не от поверхности.

Наиболее легко это объясняется наличием горизонта.



99.6% энергии должно выделять в потоке до контакта с «поверхностью».
Это невозможно, значит поверхности нет.

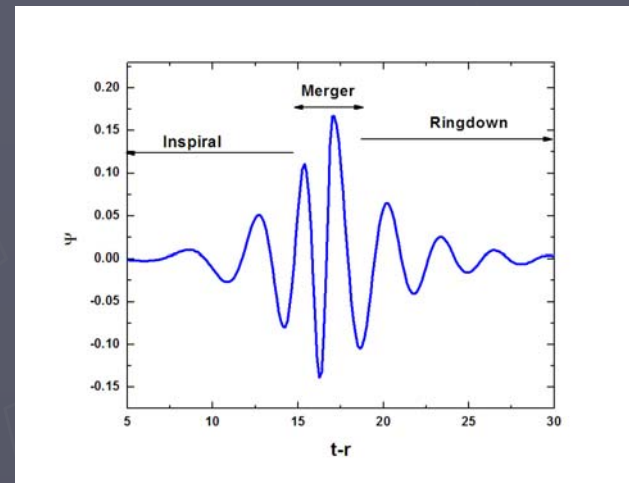
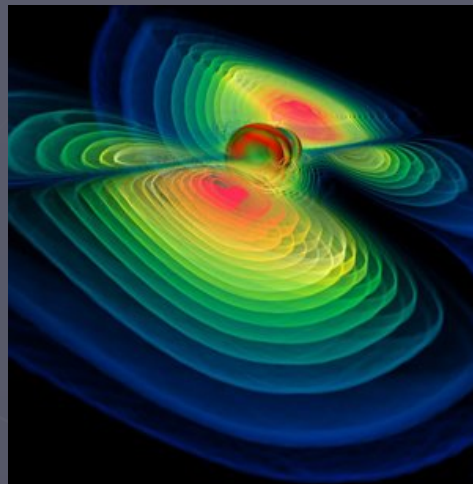


Используя VLBI,
удалось получить очень
жесткое ограничение
на размер источника : 1 а.е.

Как увидеть горизонт?



Детектор LIGO

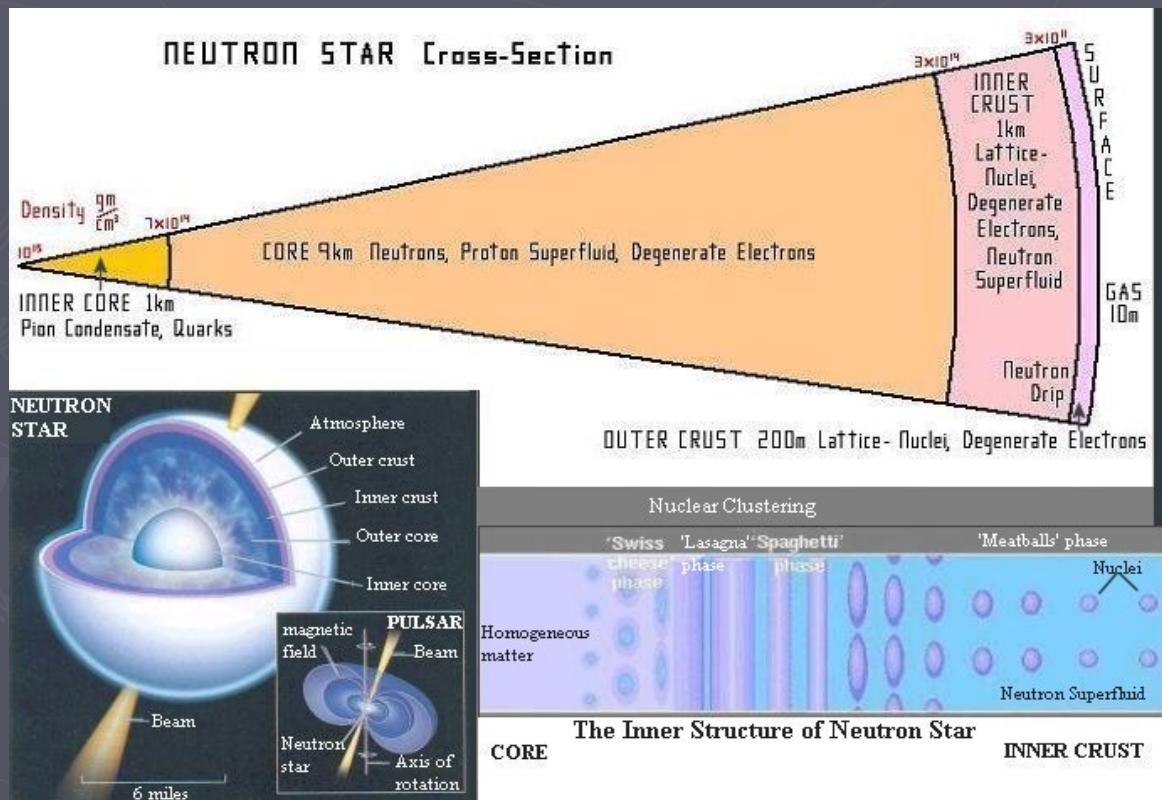


Слияние черных дыр

В ближайшие несколько лет детекторы LIGO и VIRGO смогут увидеть слияния двойных черных дыр. Можно будет узнать, как взаимодействуют горизонты.

Нейтронные звезды – экстремальные источники

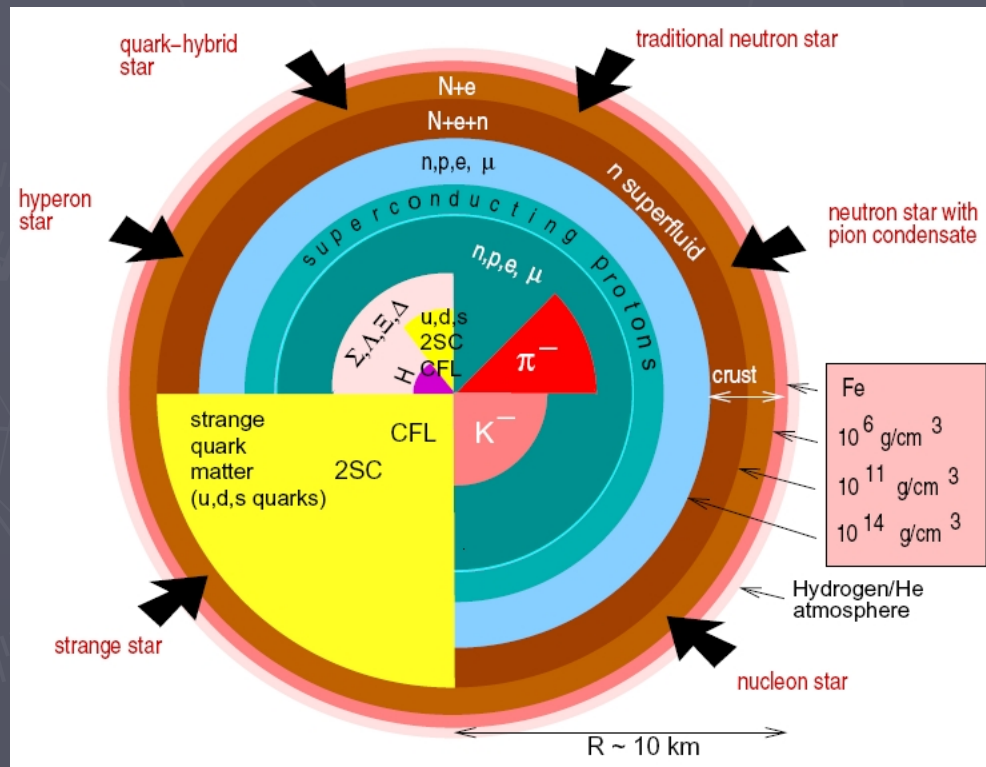
- Сверхсильные магнитные поля (больше швингеровского)
- Сильная гравитация (радиус порядка 3-4 шварцшильдовских)
- Сверхплотное вещество (в центре плотность выше ядерной)



Загадка нейтронных звезд

В недрах — очень плотное вещество.

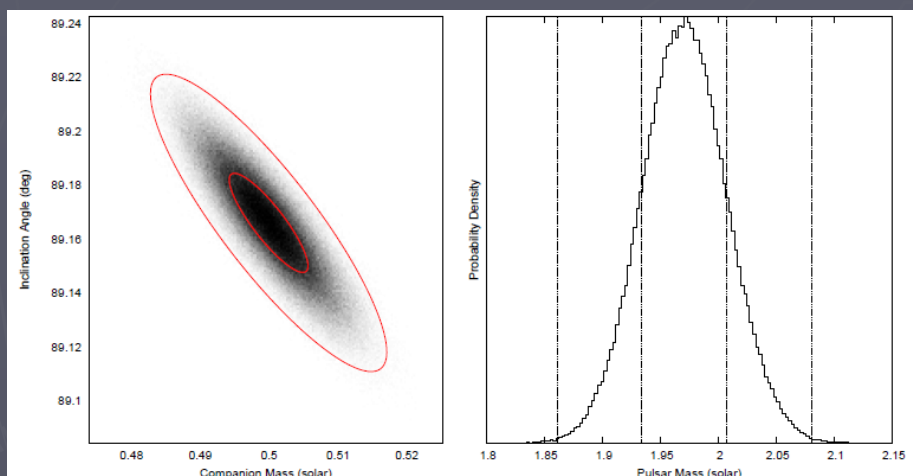
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



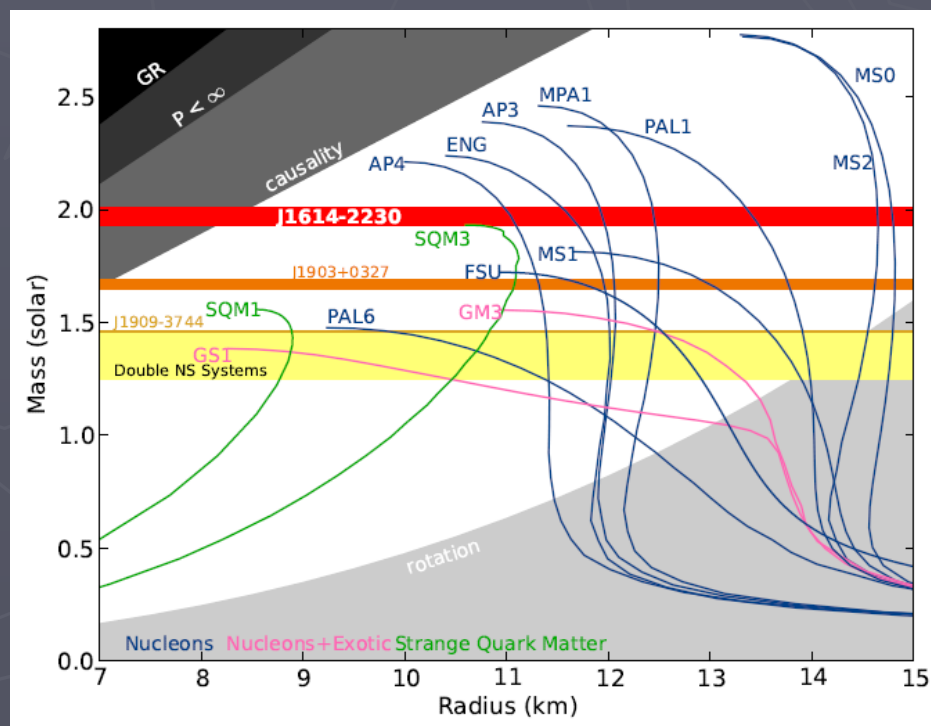
- «Обычные» нейтронные звезды
- Псионный конденсат
- Каонный конденсат
- Странные звезды
- Гиперонные звезды
- Гибридные звезды

Почему важно искать массивные нейтронные звезды?

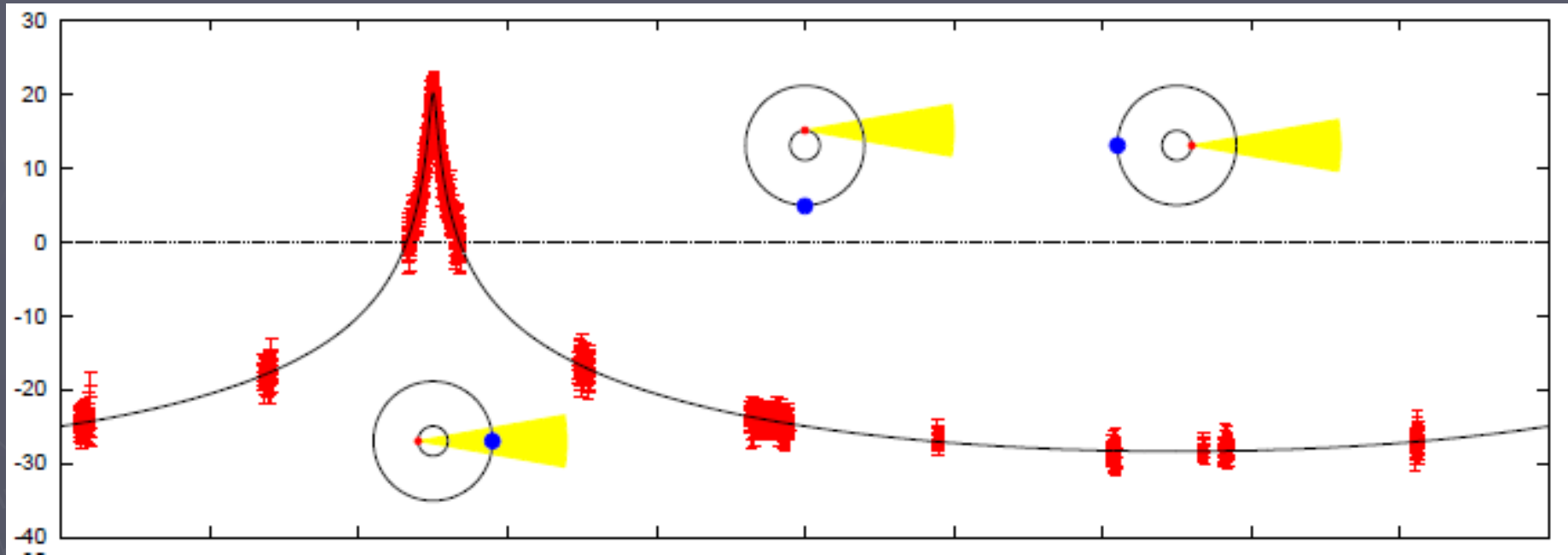
Чем больше масса – тем сильнее сжато
вещество в недрах нейтронной звезды.



Мы плохо знаем, как ведет
себя вещество при
плотности в 10-20 раз
выше ядерной.
Сколько выдержит до
коллапса в черную дыру?

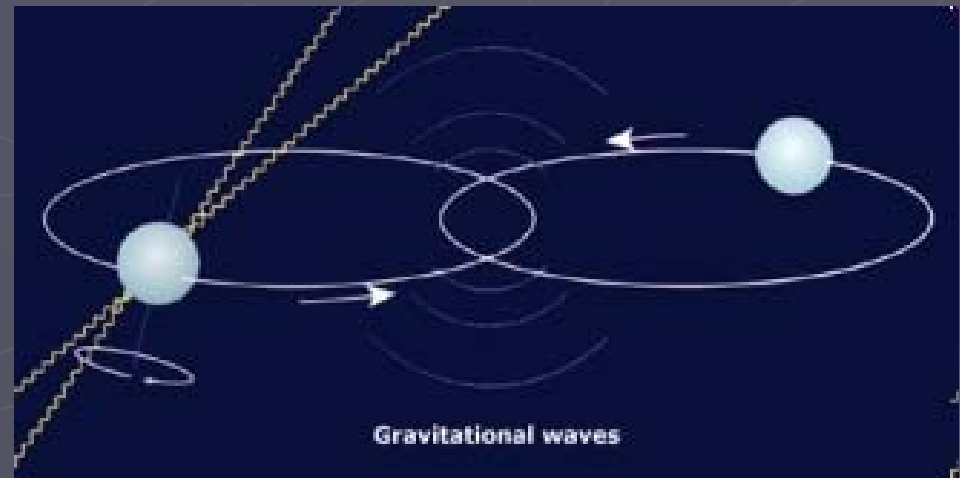


Массивная нейтронная звезда



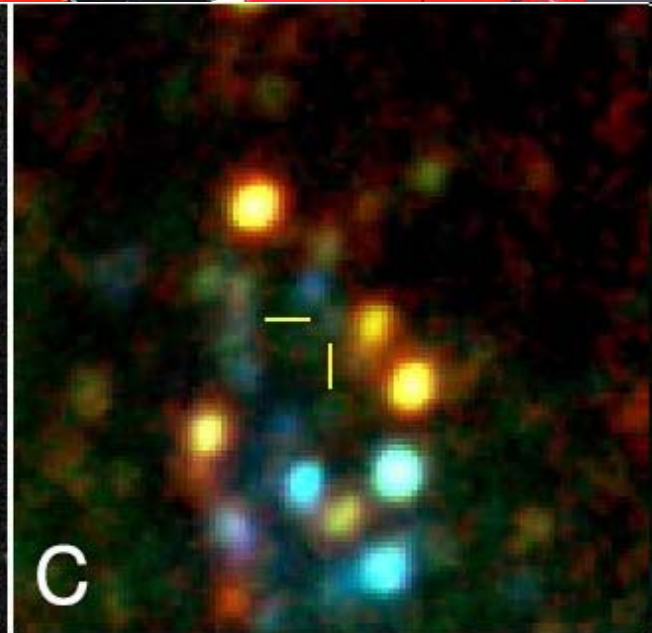
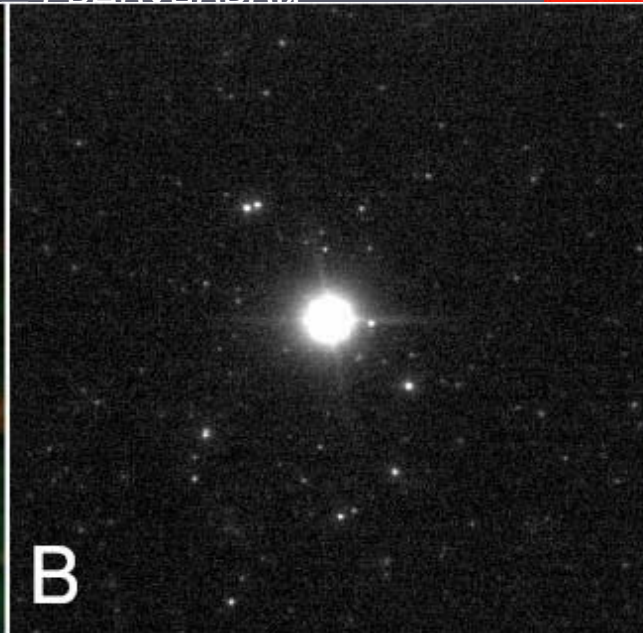
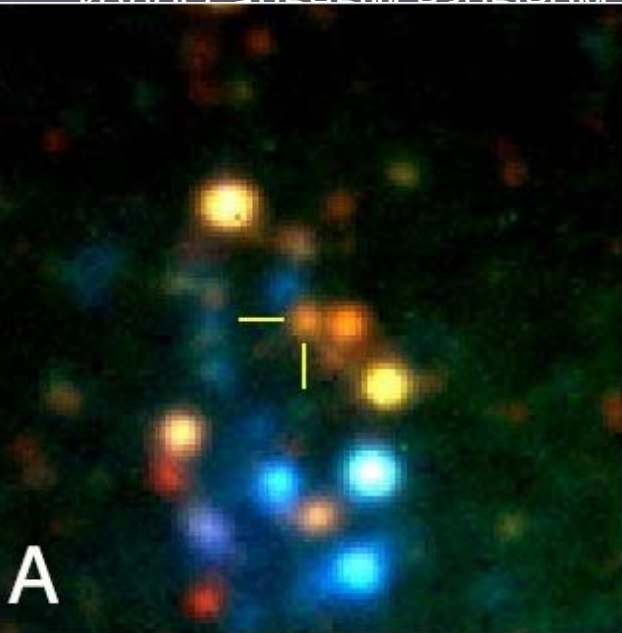
Двойная система:
радиопульсар и
белый карлик

Масса ~ 2 солнечных

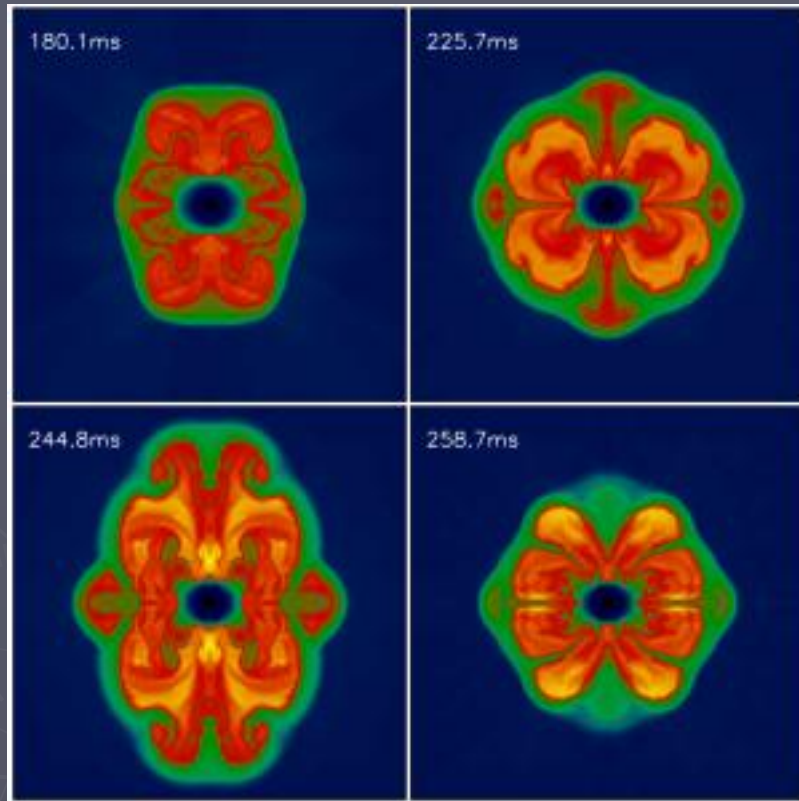


Сверхновые

Жизнь массивной звезды заканчивается
колоссальным взрывом — сверхновой



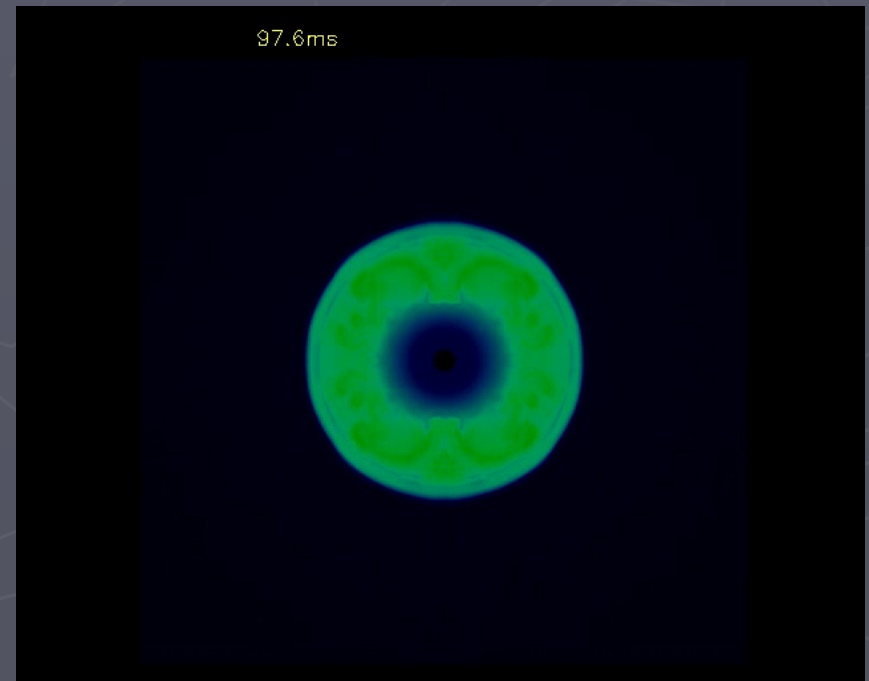
Взрыв сверхновой



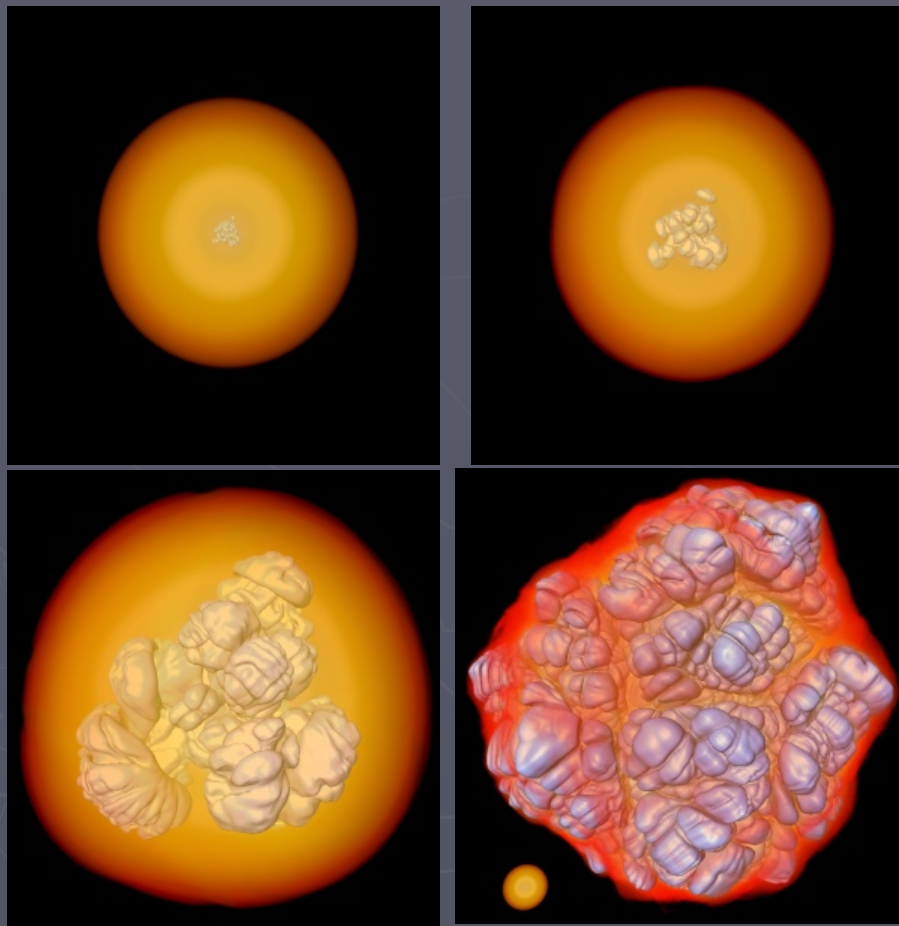
(Buras, Janka et al.)

Расчеты взрывов сверхновых можно смело отнести к числу самых сложных задач

- термоядерные реакции
- магнитные поля
- гидродинамика
- нейтрино
- эффекты теории относит.



Взрыв SN Ia



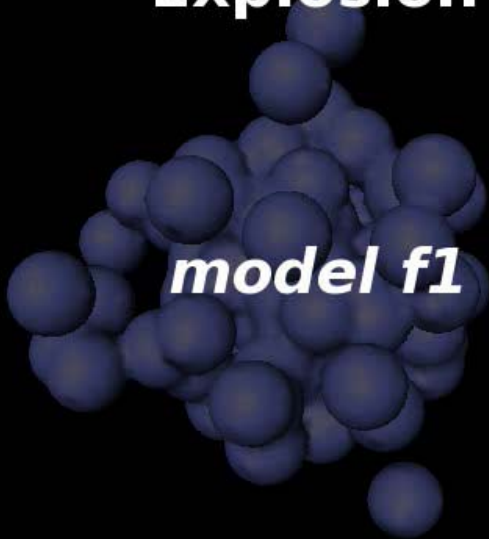
Наблюдения именно таких сверхновых
привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для
синтеза многих тяжелых элементов.

(Roeper et al.)

Взрыв сверхновой типа Ia

Thermonuclear Supernova Explosion



(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

Прогресс в изучении сверхновых



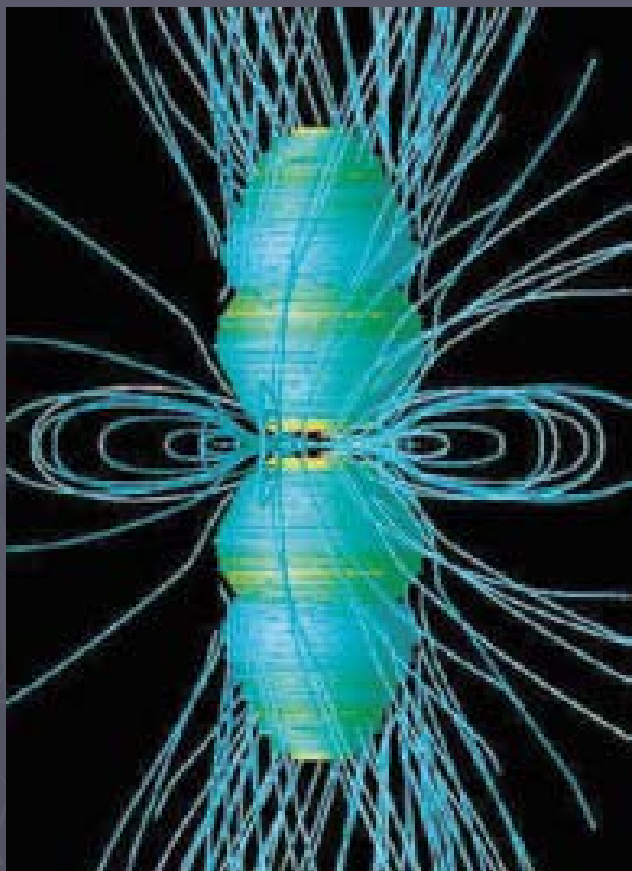
Теория

- Более мощные компьютеры позволят считать в деталях
- Учет многих эффектов сразу

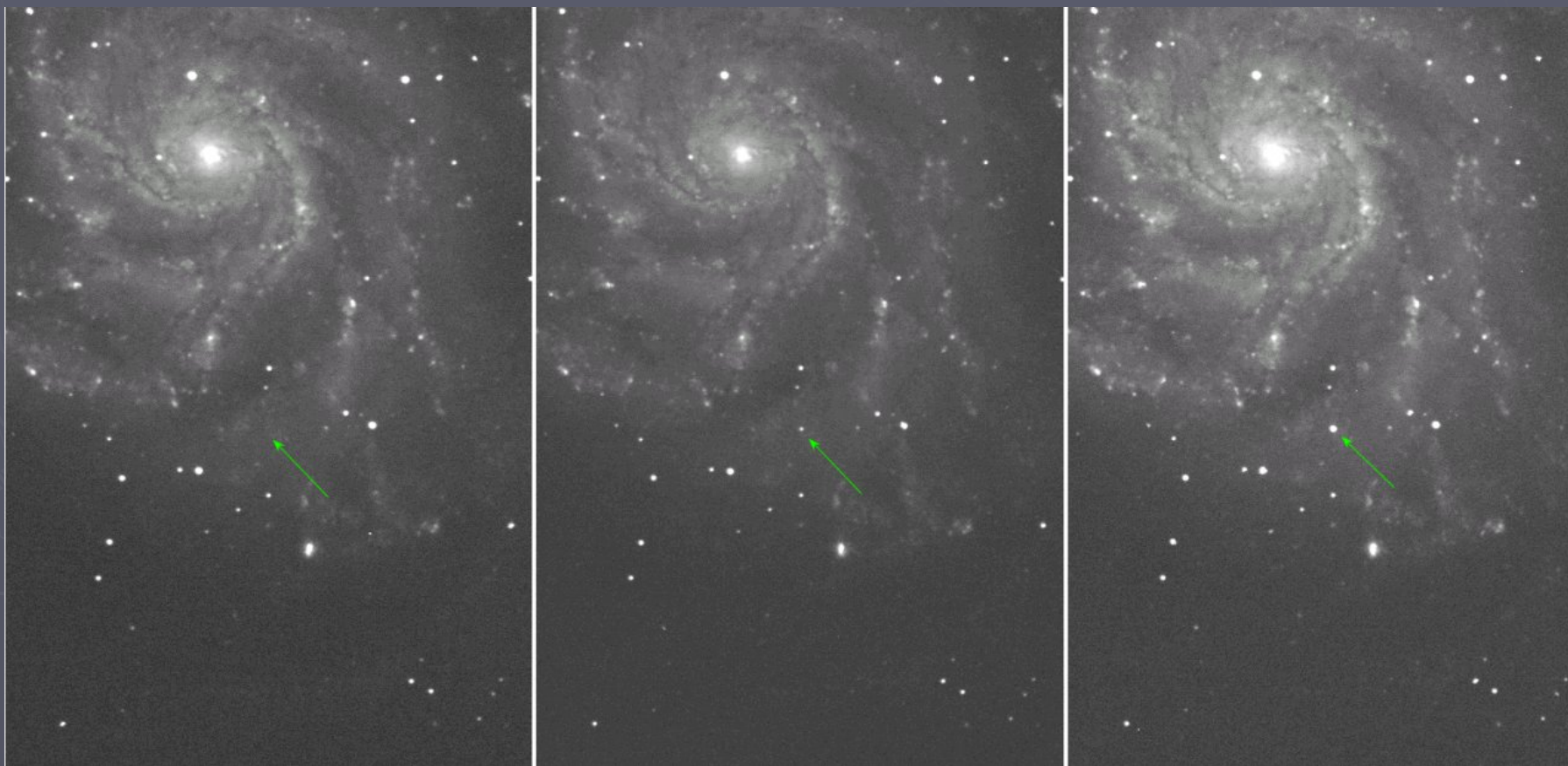


Наблюдения

- Наблюдения нейтрино
- Наблюдения очень ранних стадий вспышки сразу в нескольких диапазонах спектра



Сверхновая Ia в близкой галактике



Галактика M101. 6.4 Мпк. Самая близкая сверхновая Ia за последние 25 лет.

Новые расчеты: роль эффектов ОТО

A New Multi-Dimensional General Relativistic Neutrino Hydrodynamics Code for Core-Collapse Supernovae II. Relativistic Explosion Models of Core-Collapse Supernovae

Authors: B. Mueller, H.-Th. Janka, A. Marek

Авторы представляют расчеты взрывов сверхновых с коллапсом ядра с помощью нового кода.

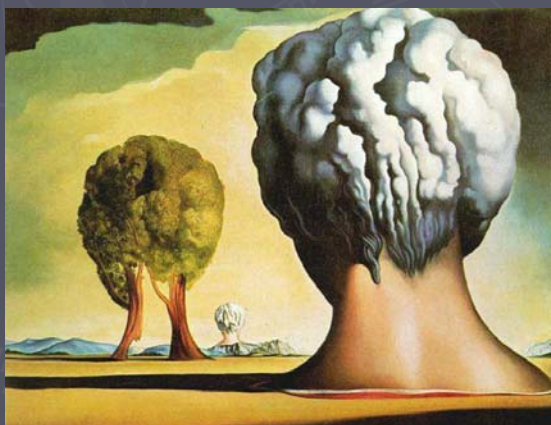
Это двумерный код, учитывающий реалистичную нейтринную физику и, что является ключевым, эффекты ОТО.

Именно благодаря последним авторам удастся взорвать стандартную звезду. В той мере, в какой результаты нового кода можно было сравнить с данными известных более старых (и примитивных) кодов (т.е., "отключая" дополнительные эффекты) - все совпадает. Т.е. именно добавка эффектов ОТО дает эффект.

Экзопланеты

Одним из самых важных открытий последних 20 лет стало обнаружение экзопланет.

Первая была открыта в 1994.
Сейчас специализированные наземные программы и спутники существенно увеличили число известных планет у других звезд.

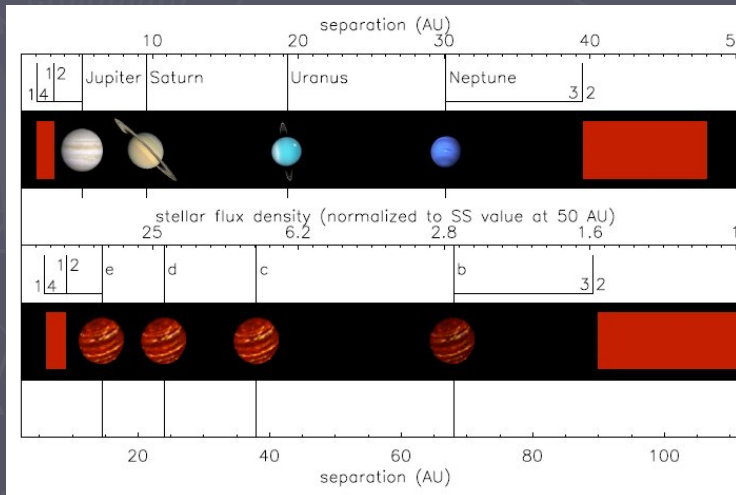


Изображение четвертой планеты вокруг HR 8799

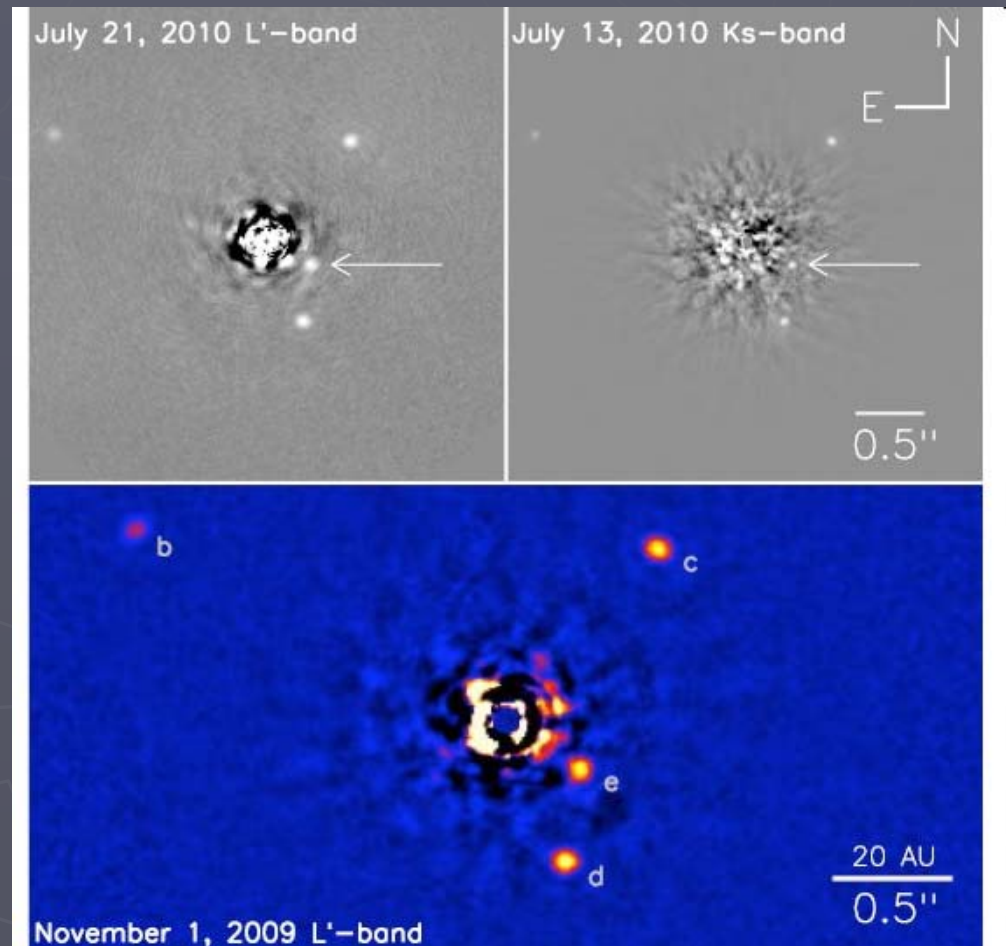
Keck II

Расстояние 14 а.е.
Это меньше, чем
у трех других.

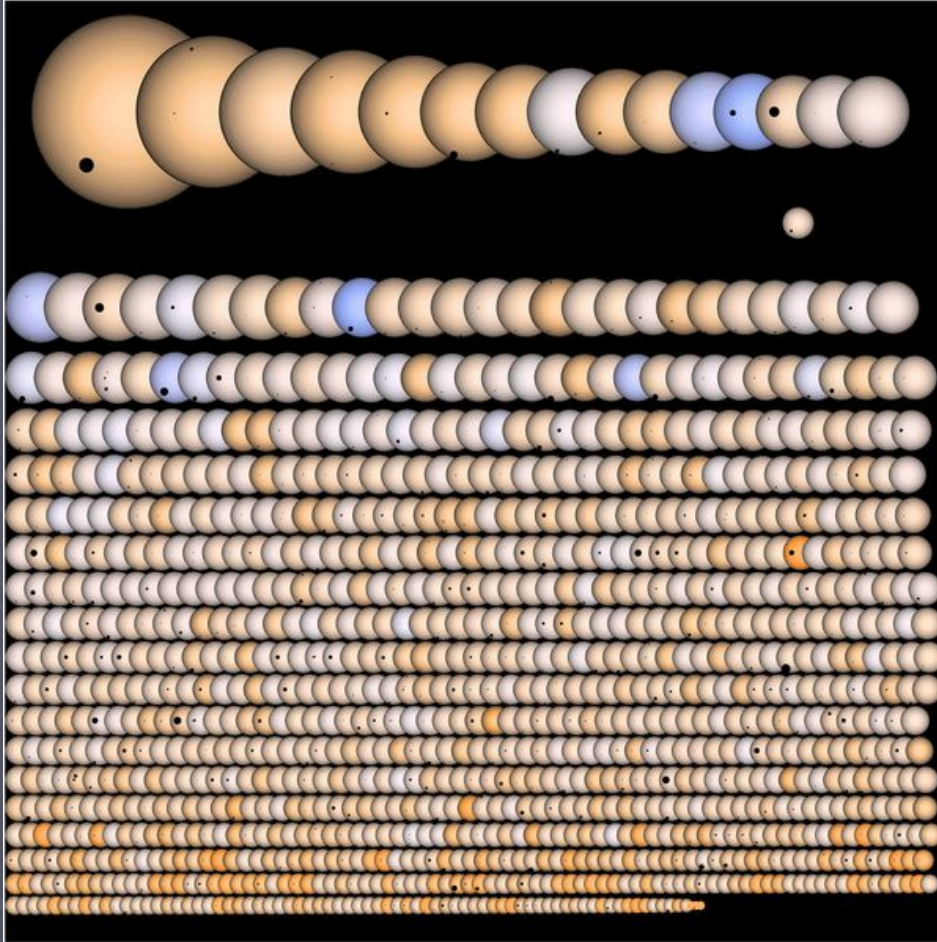
Похожа на Солнечную



arXiv: 1011.4918



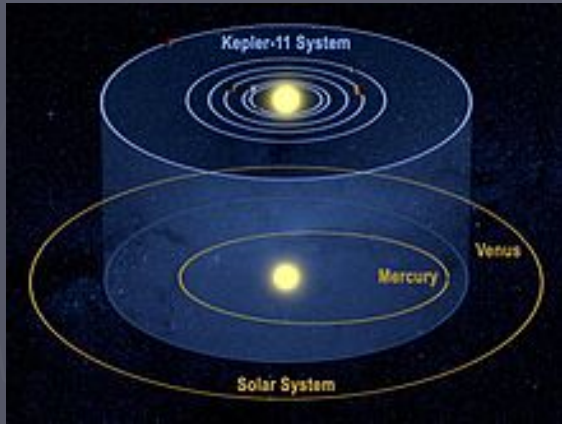
>1200 кандидатов в планеты



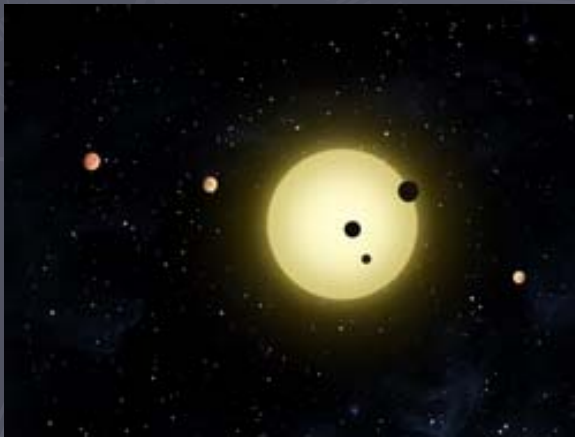
Работа спутника Kepler
Кандидаты имеют размеры
от долей радиуса Земли
до пары радиусов Юпитера.
Больше всего (половина выборки)
нептуноподобных планет
(2-6 радиусов Земли).

Новые подтверждения 1201.5424

Кеплер-11

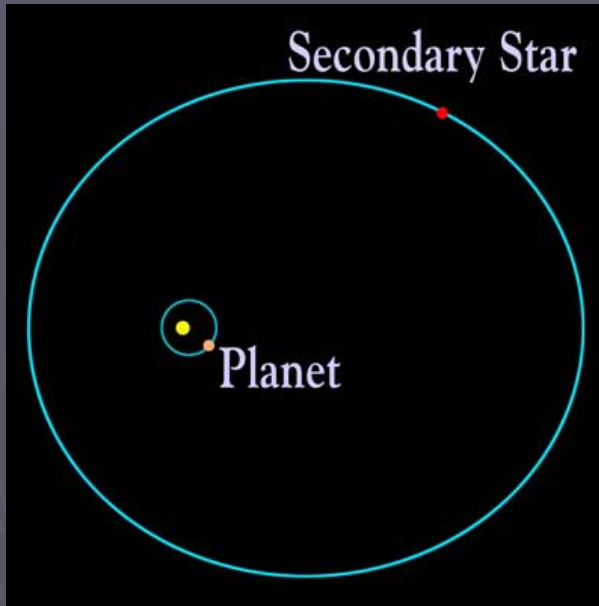


У звезды типа Солнца вращаются шесть планет. Все они транзитные. Пять имеют орбитальные периоды от 10 до 47 дней. Внутренние планеты относятся к числу самых легких из известных, но оценки радиуса указывают на низкую среднюю плотность: у планет есть оболочки из легких газов.



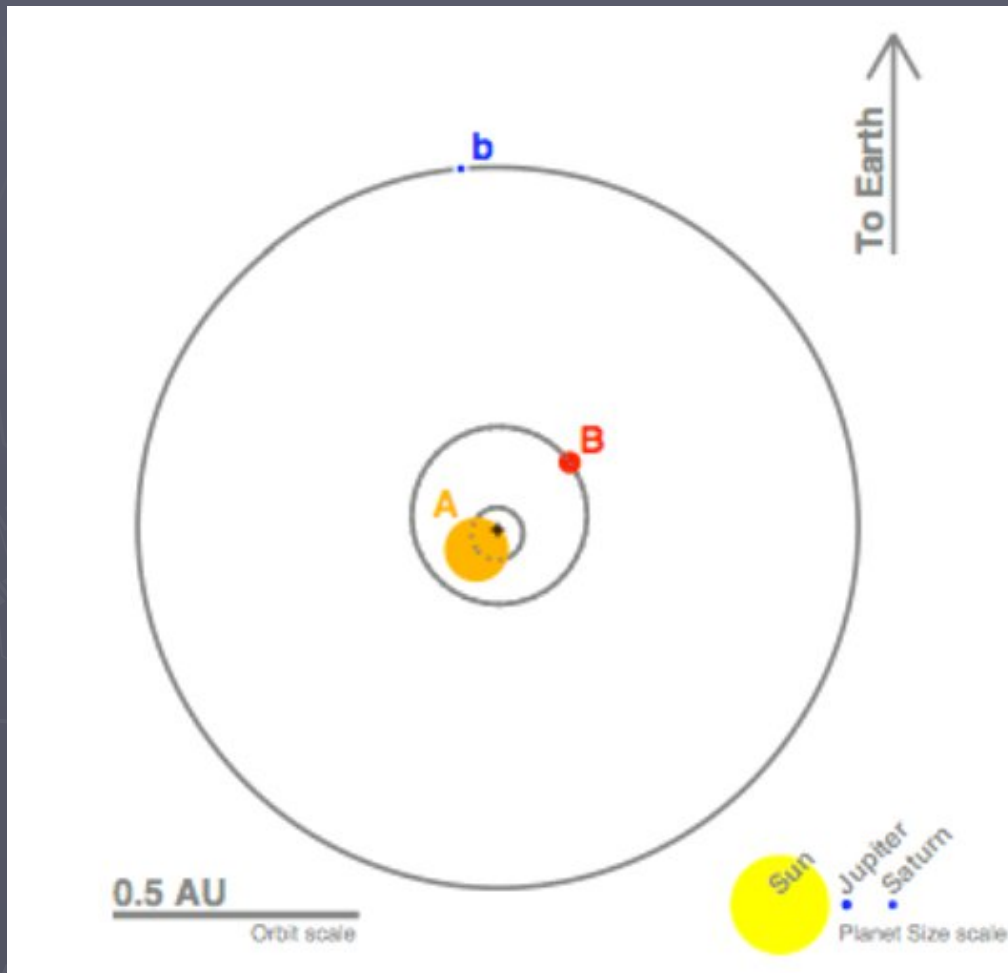
Планеты у двойных звезд

Есть две основные конфигурации:
близко к одной из звезд или далеко от обеих



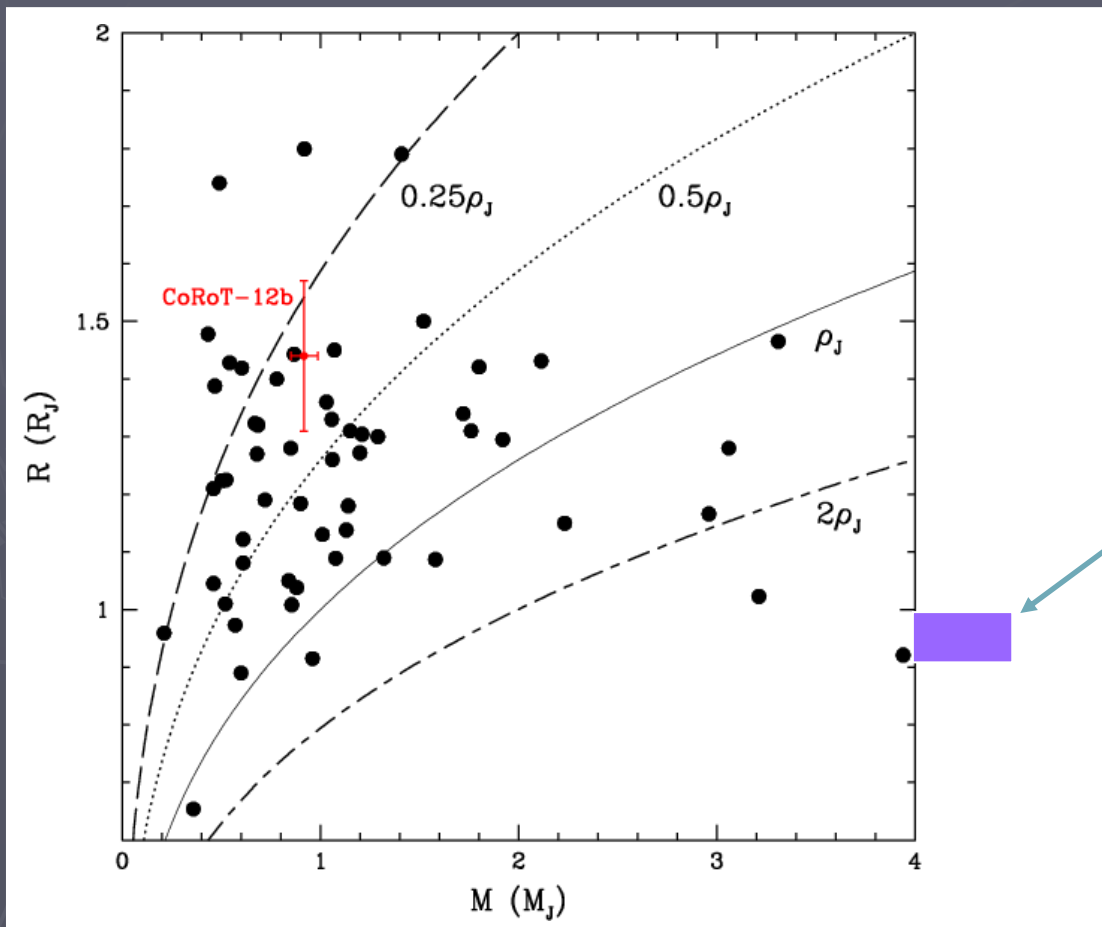
[1 AU = distance between Earth and Sun]

Kepler-16: планета Татуин



Транзитная планета вокруг двойной. Звезды имеют массы 0.2 и 0.7 масс Солнца и орбитальный период 41 день. Планета вращается в плоскости, и ее период 230 дней.

Плотная гигантская планета: CoRoT-20b



Горячий юпитер
Плотность 8-9 г/см³

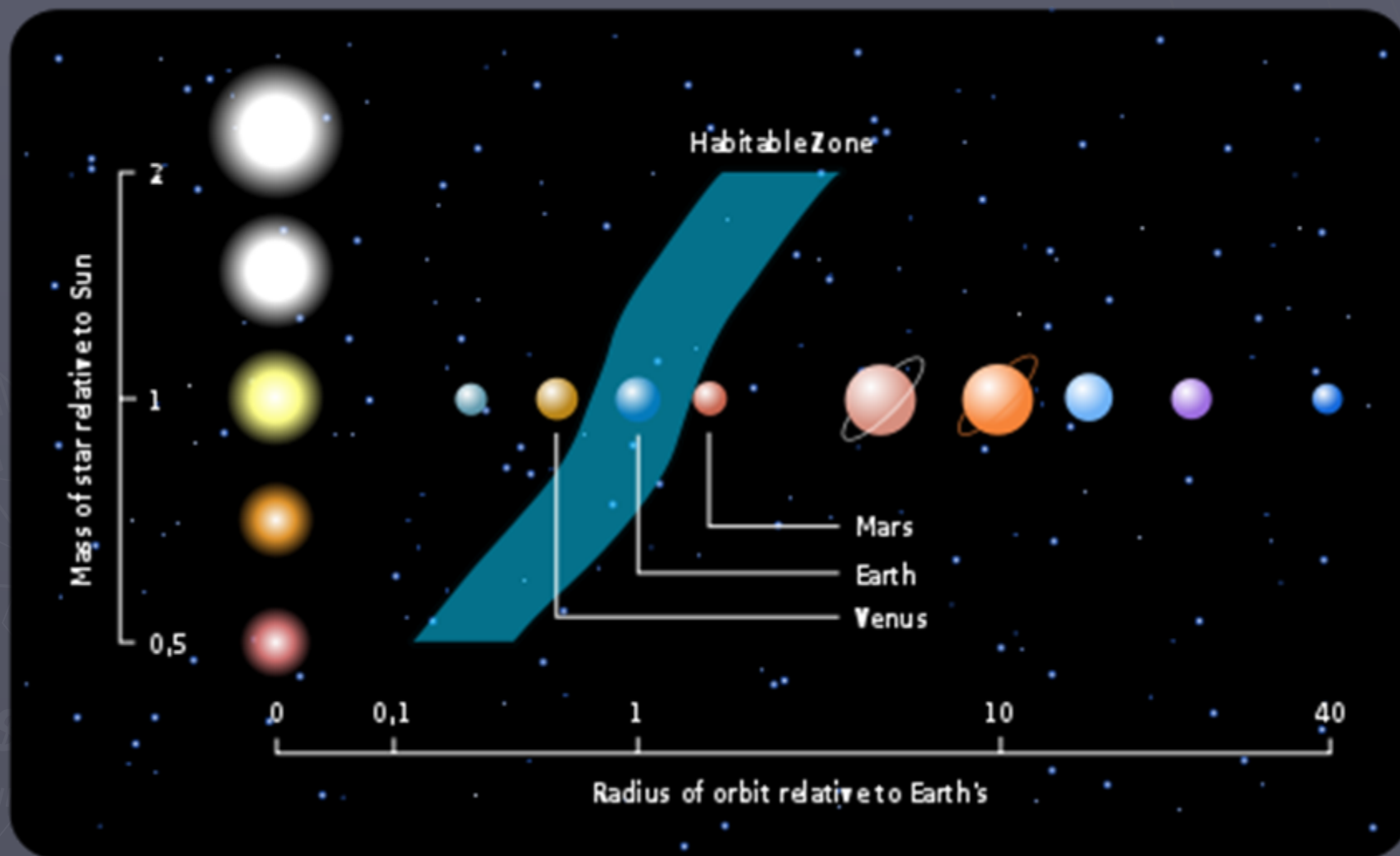
Масса 4-4.5 $M_{\text{ЮПИТЕРА}}$

Радиус 0.8-0.9 $R_{\text{ЮПИТЕРА}}$

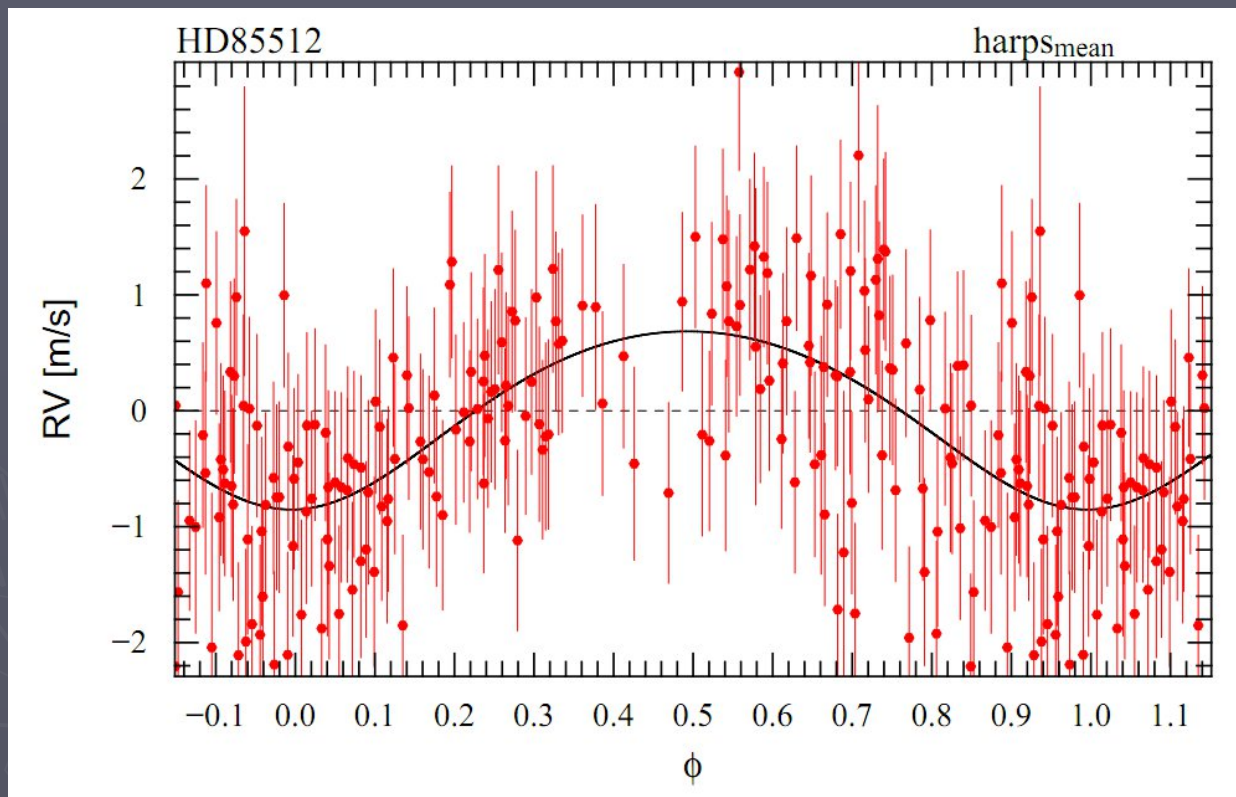
Орбита имеет большой (0.56) эксцентриситет и должны сильно эволюционировать.

Существование такой планеты ставит интересные вопросы перед моделями формирования и эволюции экзопланет

Планеты в зонах обитаемости

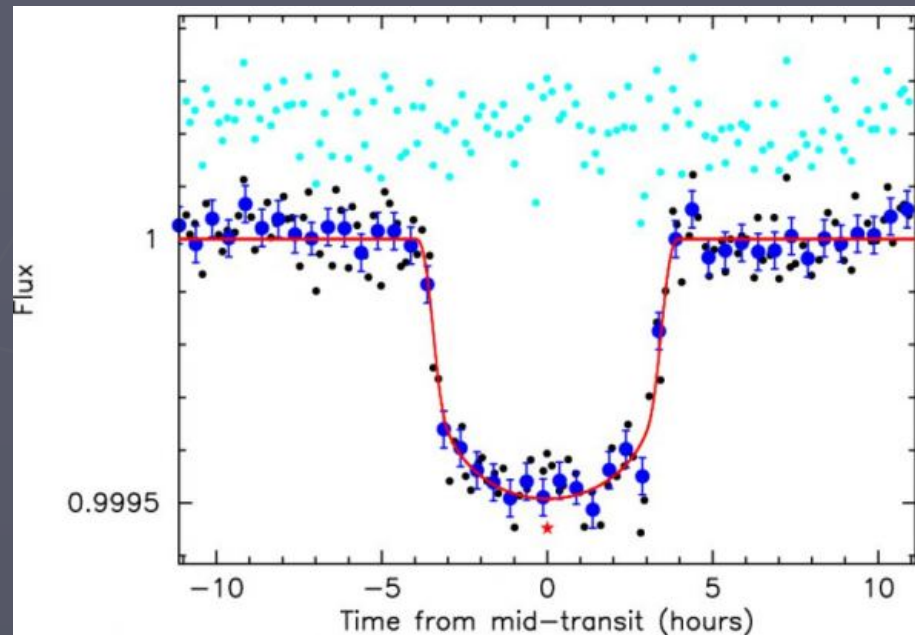
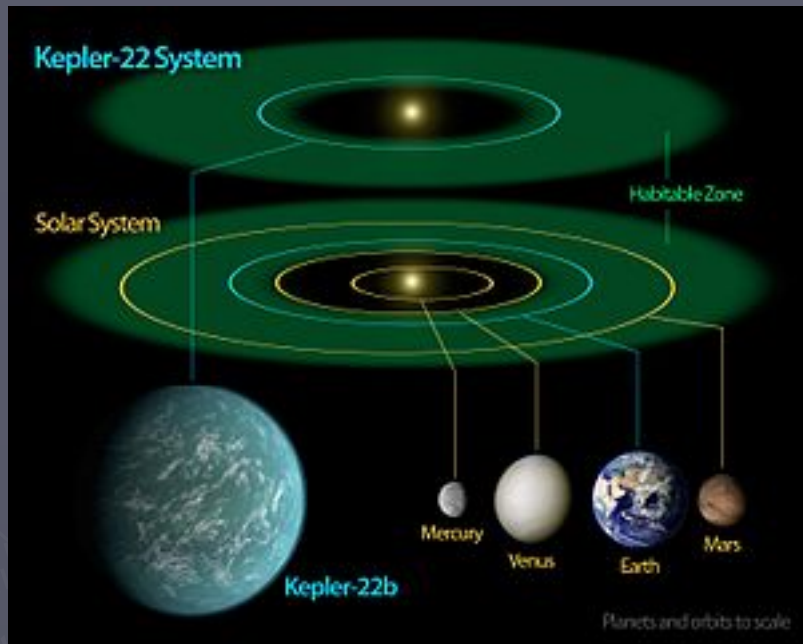


Первые открытия



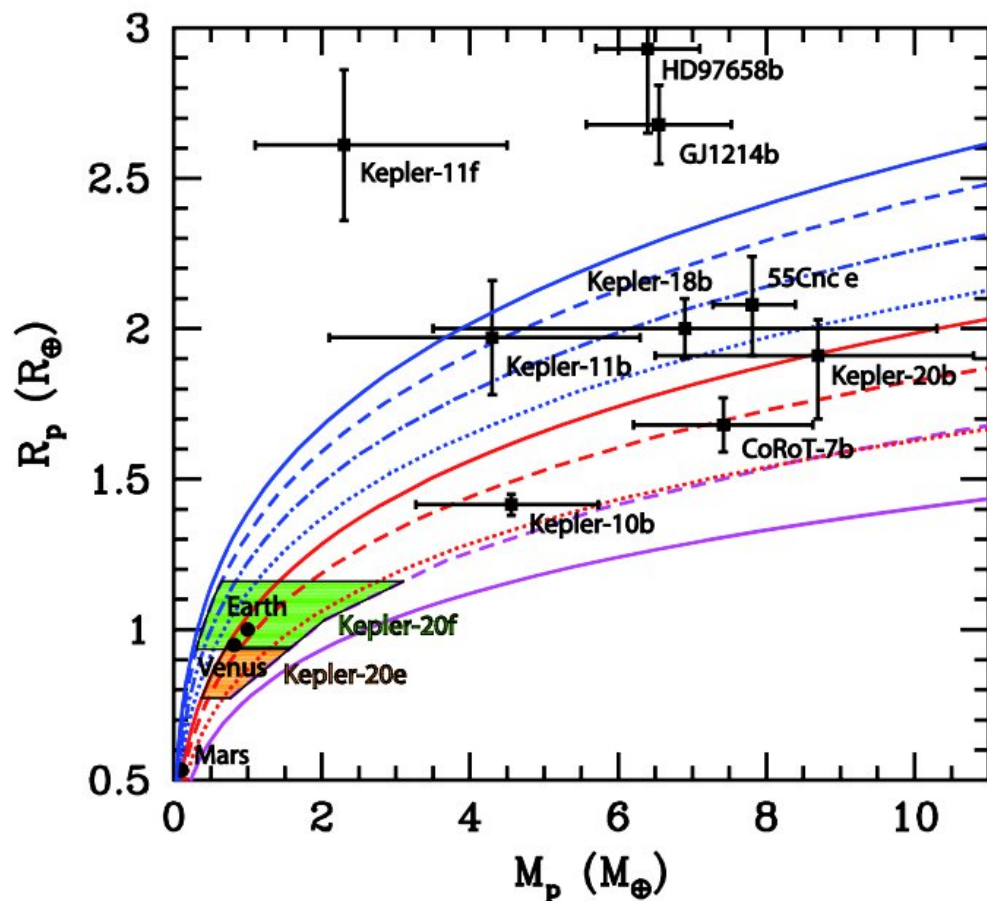
Маломассивная планета на самой границе зоны обитаемости. Открыта по данным HARPS. Это наземный проект. Измеряется масса, т.к. наблюдается изменение лучевой скорости звезды.

Планета Kepler-22b



Транзитная планета у близкой звезды типа Солнца (класс G5)
Радиус 2.25-2.5 земных. Для массы пока есть только верхний предел.
Орбитальный период 290 дней.
Планета находится в т.н. зоне обитания.

Маленькие планеты



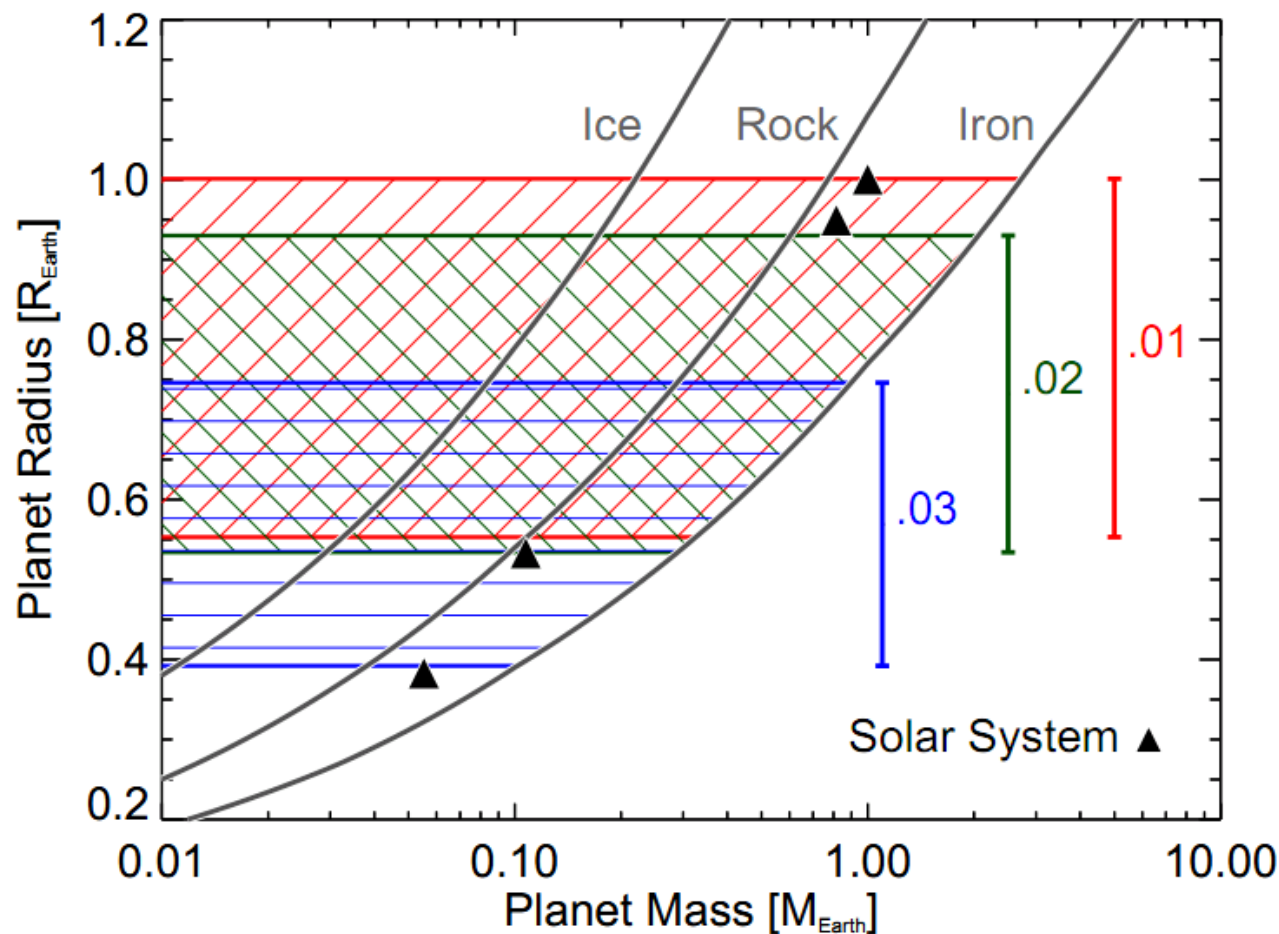
Система Кеплер-20.

Пять планет, две из которых имеют маленькие радиусы:

примерно 1 и 0.9 радиуса Земли.

Планеты находятся близко от звезды, т.е. вне зоны обитаемости.

Еще ...



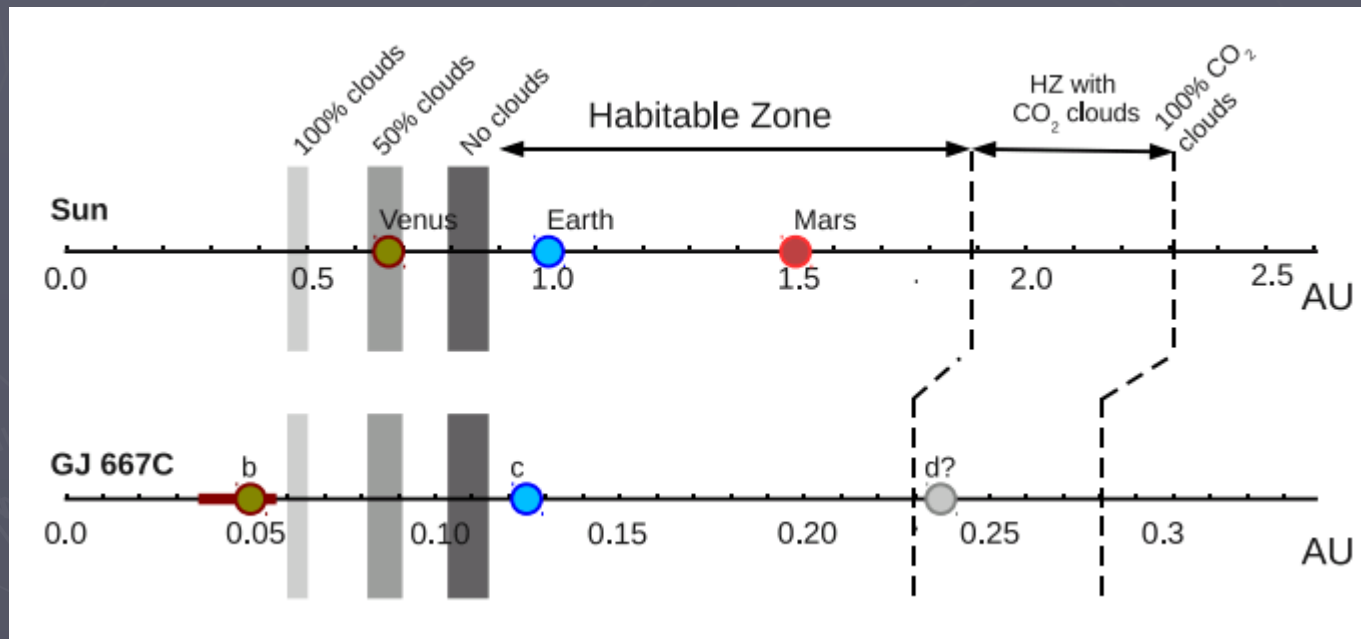
KOI 961

Радиусы:
0.5-1 радиуса Земли
0.5-0.9 и 0.4-0.8

Звезда – близкий
М-карлик (100 св.лет)

Орбитальные периоды
от 0.5 до 2 дней.

Планета в зоне обитаемости у тройной звезды



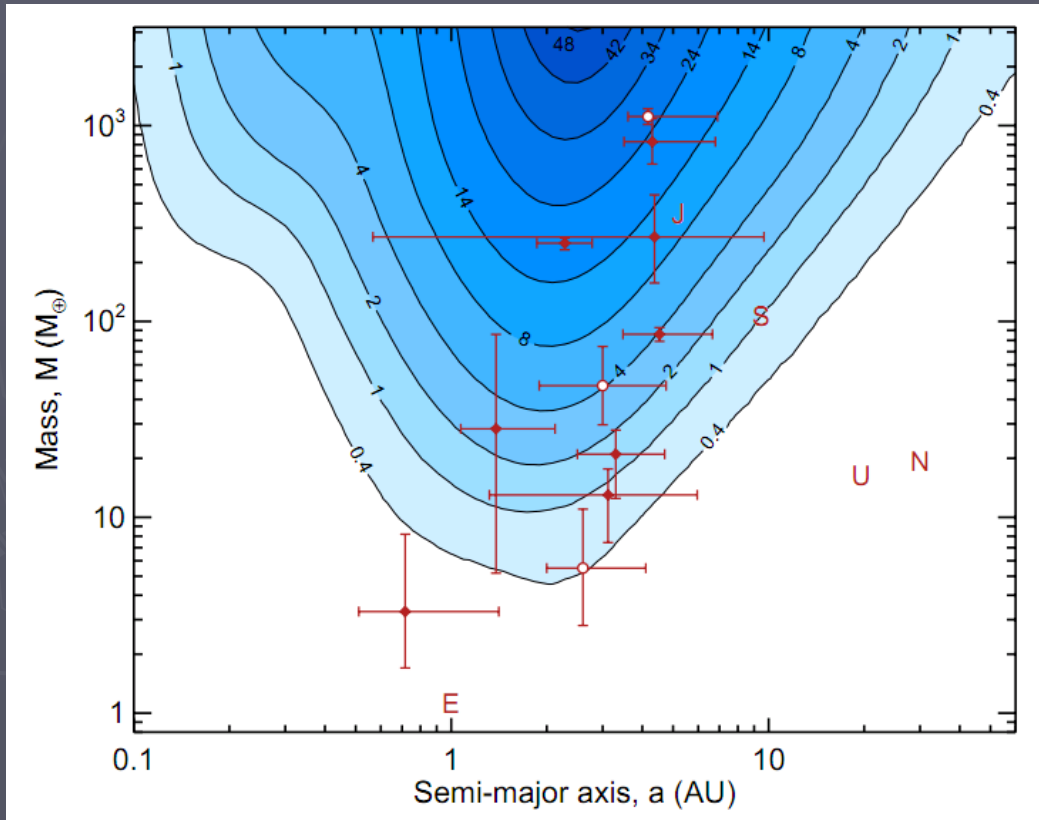
Новый анализ
данных HARPS

Три планеты

Одна из них (c) –
в зоне обитаемости.
Ее масса $>4.5 M_{\text{Земли}}$

Звезда – близкий (20 св. лет) красный карлик. Он вращается вокруг двойной системы из двух К-карликов. Расстояние до пары >250 а.е.
Звезда имеет пониженную металличность.

Экзопланеты и микролинзирование

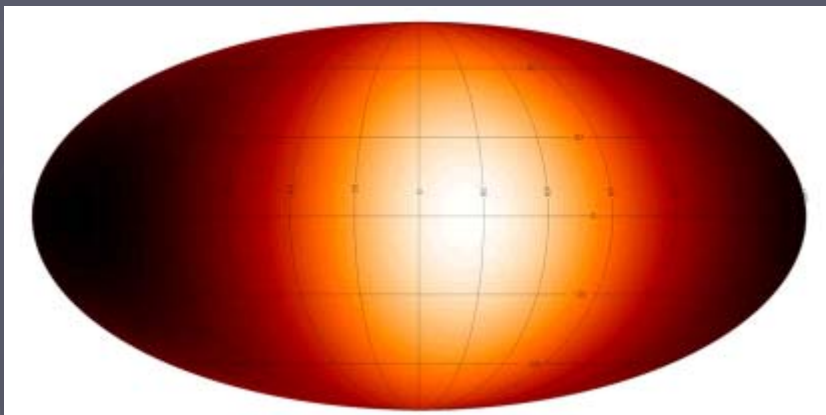


Микролинзирование —
эффективный способ поиска
экзопланет.

Авторы проанализировали
большой массив данных.

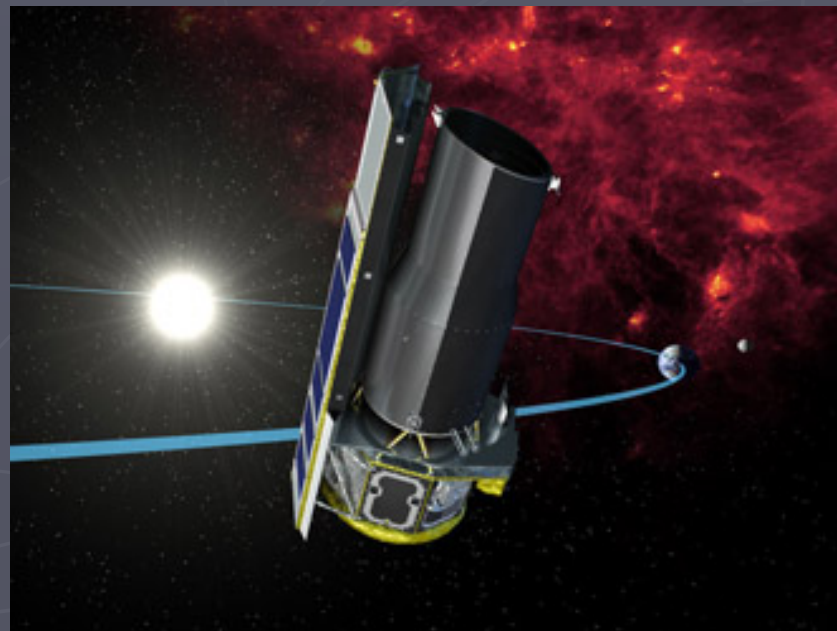
Статистика такова: 10-20% звезд имеют планеты с массой 0.3-10 масс Юпитера;
холодные нептунopodobные планеты (10-30 масс Земли) есть у 30-70% звезд;
наконец, суперземли (5-10 масс Земли) есть у 25-95%.
Речь идет об орбитах размером 0.5-10 а.е.

Карта экзопланеты HD 189733b



По данным о затмениях удалось построить карту экзопланеты.
Инфракрасная космическая обсерватория имени Спитцера.

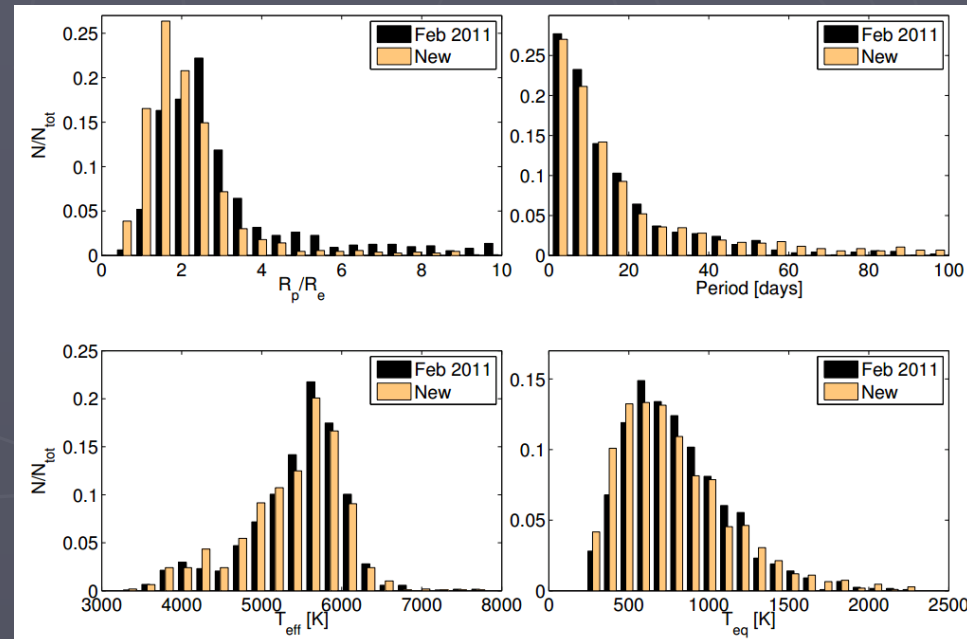
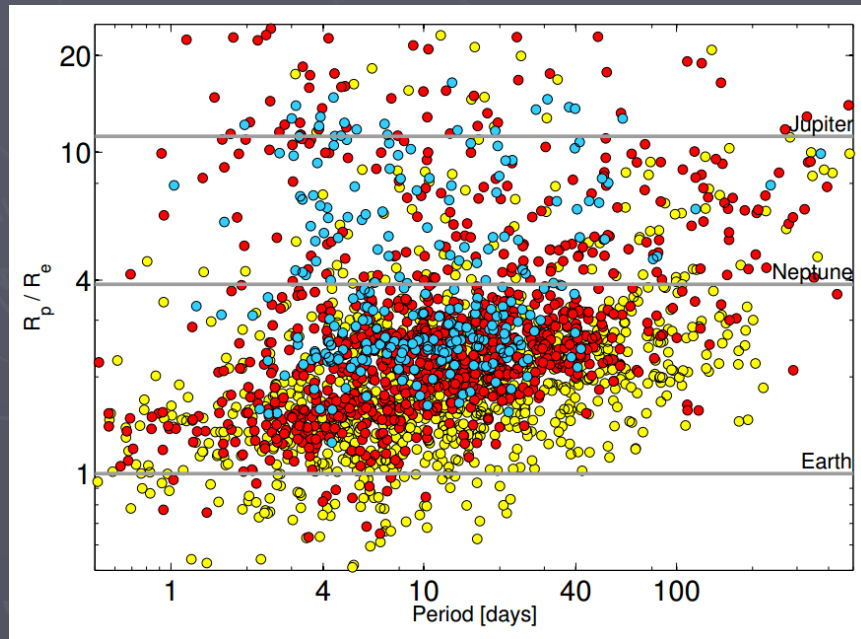
Горячее пятно в экваториальной области.



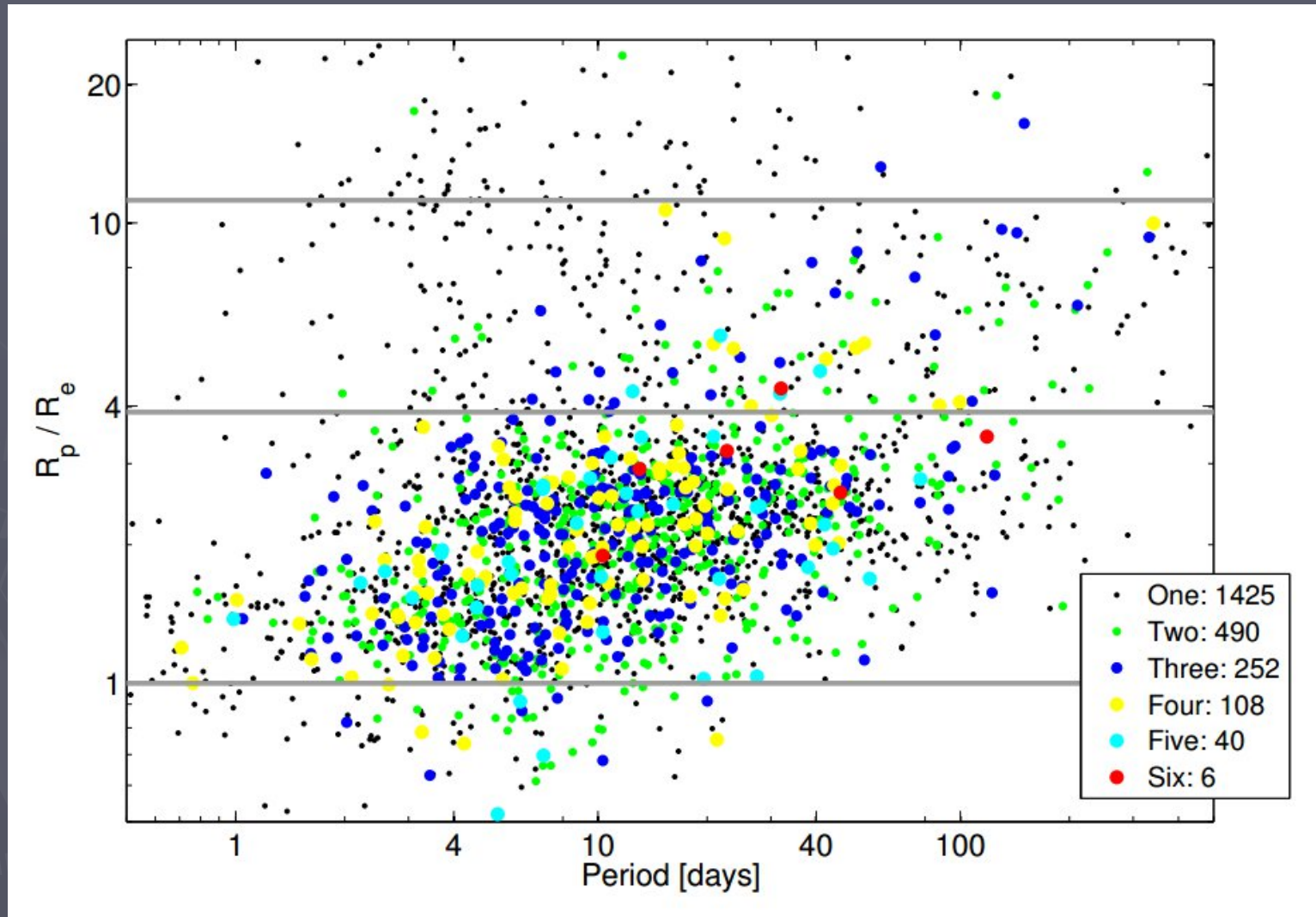
Свежайшие данные Кеплера

Вчера (28 февраля) в Архиве появилась новая статья, в которой по результатам использования данных за первые 16 месяцев работы спутника говорится уже о 2300 планетных кандидатах.

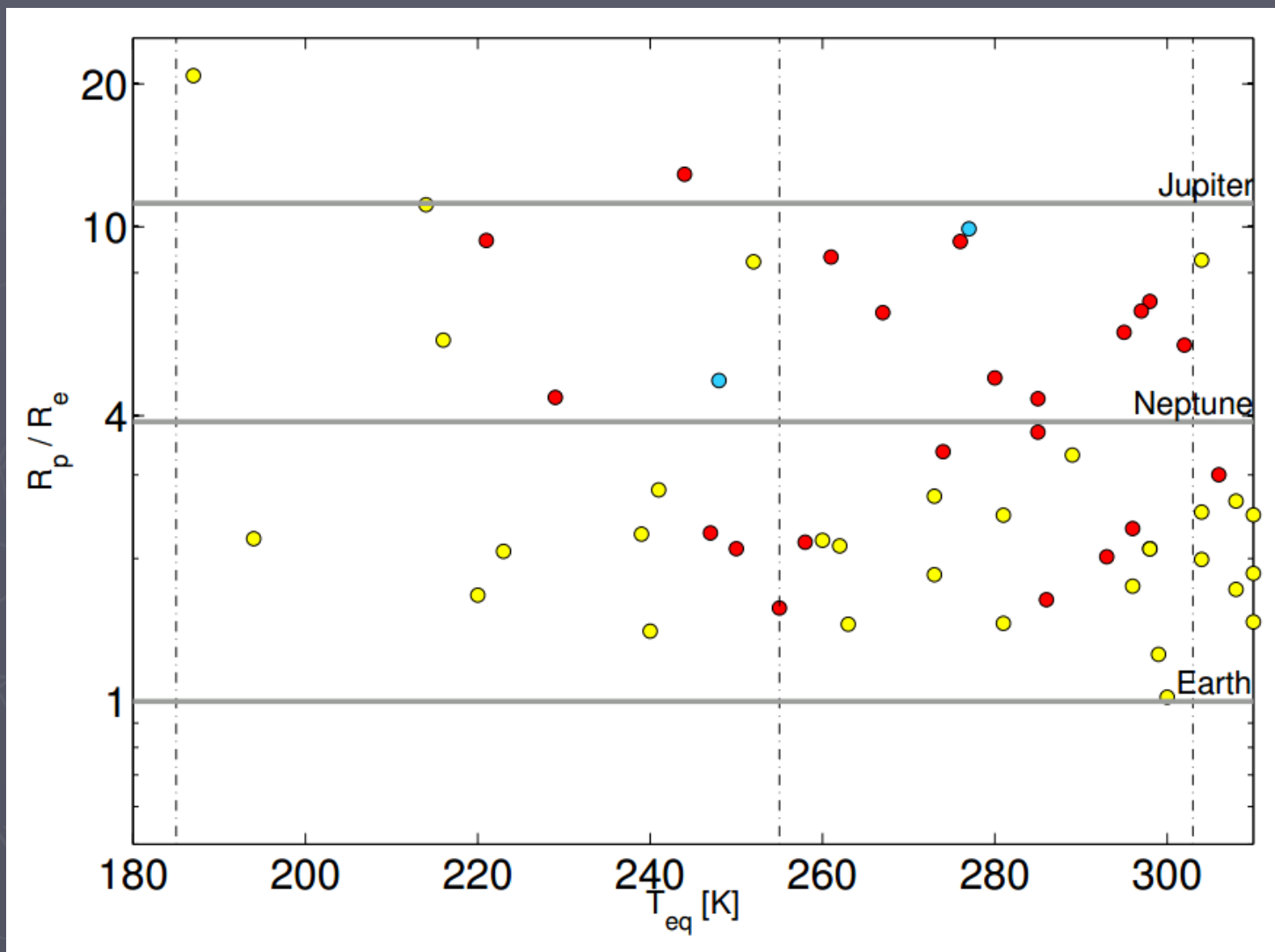
Особенно возросла доля маленьких (менее 2 земных радиусов) планет и доля планет с большими орбитальными периодами.



Планетные системы на 28.02.12



Планеты в зоне обитания



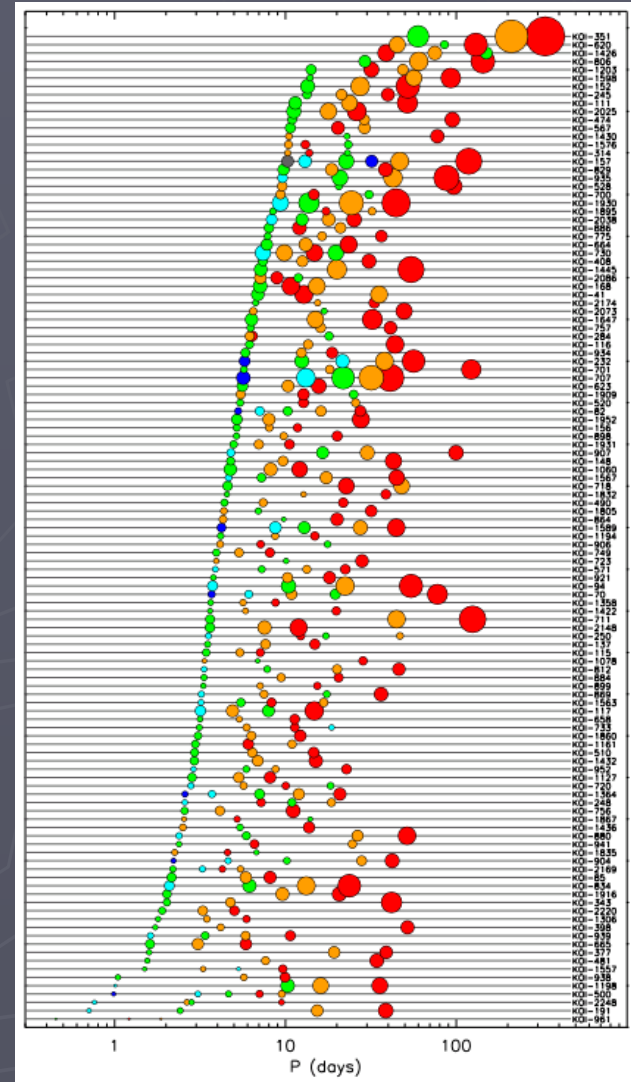
Архитектура экзопланетных систем

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.



Вероятные направления развития

- Темное вещество: лабораторная регистрация и гамма-сигнал
- Темная энергия
- Первичная инфляция (данные по поляризации реликта)
- Первые звезды и галактики (прямые наблюдения)
- Природа черных дыр (гравитационно-волновой сигнал)
- Источники космических лучей сверхвысоких энергий
- Физика недр нейтронных звезд
- Механизм взрыва сверхновых
- Экзопланеты:
 - земноподобные планеты в зонах обитания
 - состав атмосфер гигантских планет и уравнение состояния
 - образование и эволюция планетных систем

http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/current.html