

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Математико-Механический факультет  
Кафедра астрофизики

---

Доклад на тему:

## **Звезды с экзопланетными системами**

**Забродина Надежда Игоревна**

Санкт-Петербург,  
2012 г.

## Содержание

1	Введение . . . . .	2
1.1	Определения . . . . .	2
1.2	История открытия экзопланет . . . . .	2
2	Методы обнаружения. . . . .	3
2.1	Метод Доплера . . . . .	4
2.2	Транзитный метод . . . . .	4
2.3	Метод гравитационного микролинзирования . . . . .	4
2.4	Астрометрический метод . . . . .	4
2.5	Радионаблюдение пульсаров . . . . .	4
2.6	Прямое наблюдение . . . . .	4
3	Номенклатура . . . . .	5
4	Основные характеристики планет . . . . .	5
4.1	Орбитальные характеристики . . . . .	5
4.2	Распределение по массам . . . . .	6
4.3	Особенности соотношения масса-период . . . . .	6
5	Дисперсия лучевых скоростей . . . . .	7
6	Планетные системы и резонансы . . . . .	8
6.1	Влияние многопланетных систем на изменение лучевых скоростей звезды. . . . .	8
7	Свойства «Host Stars» . . . . .	9
7.1	Корреляция металличности звезд с планетами-гигантами . . . . .	9
8	Гипотеза формирования планетных систем . . . . .	10
8.1	Факты в пользу гипотезы «формирования» (опровержение теории загрязнения конвективной зоны) . . . . .	10
9	Металличность звезд, имеющих планеты с массами порядка массы Нептуна . . . . .	11
10	Эффект массы центральной звезды . . . . .	11
11	Инструменты и проекты изучения экзопланет . . . . .	11
12	Литература . . . . .	12

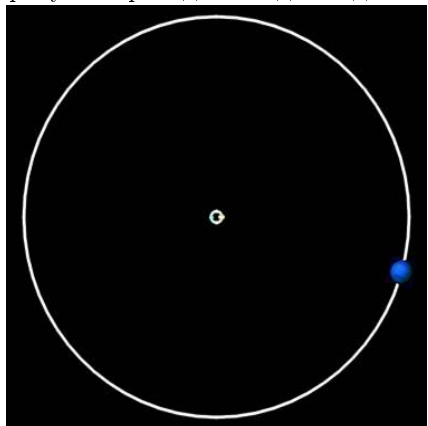
## 1 Введение

До 1995 года Солнечная система была единственным примером планетной системы вокруг солнцеподобной звезды, и вопрос о распространенности планетных систем был более философским, нежели научным. Планеты чрезвычайно малы и тусклы по сравнению со звёздами, а сами звёзды находятся далеко от Солнца (ближайшая — на расстоянии 4,22 световых года). Поэтому долгое время задача обнаружения планет возле других звёзд была неразрешимой, первые экзопланеты были обнаружены в конце 1980-х годов. Сейчас такие планеты стали открывать благодаря усовершенствованным научным методам, зачастую на пределе их возможностей.

### 1.1 Определения

- *Экзопланета* (др.-греч.  $\epsilon\zeta\omega$ , *exo* — вне, снаружи), или внесолнечная планета — планета, обращающаяся вокруг звезды за пределами Солнечной системы.
- *Эффективная земная орбита* - орбита, на которой планета, во всем подобная Земле (по массе и радиусу), имела бы климат, аналогичный земному.

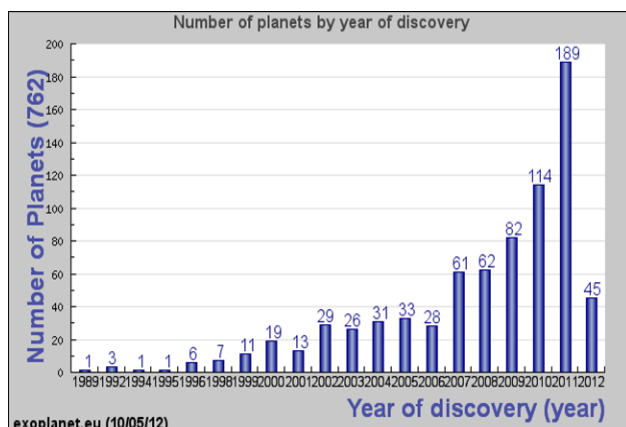
На рисунке приведена модель одной из самых известных экзопланет - Мафусаил:



Мафусаил - это экзопланета, расположенная на расстоянии 12 400 световых лет в созвездии Скорпиона. Планета является одной из самых древних из ныне известных экзопланет — по некоторым оценкам, её возраст составляет около 12,7 миллиардов лет.

### 1.2 История открытия экзопланет

Об открытии первых экзопланет было объявлено в 90х годах 20 века. Существование экзопланеты у звезды главной последовательности впервые подтверждено в 1995 году. К настоящему времени подтверждено существование более 800 экзопланет. Космический аппарат Кеплер обнаружил более 2000 кандидатов в экзопланеты. Аппарат Gaia, запуск которого состоится в 2013 году, откроет до 10000 экзопланет. Большая часть планет открыта методом лучевых скоростей, немногие наблюдаются непосредственно.



Число открытых экзопланет в год с 1989 года (*exoplanet.eu (10/05/12)*)

Первые попытки обнаружить или косвенно подтвердить наличие экзопланет были сделаны еще в середине 20 века. Так группой под руководством Carl. W. S. Jacob в 1955 году было сделано предположение о наличии «планетарного тела» в двойной системе 70 Змееносца. Позже, при более детальных расчетах и повторных наблюдениях это предположение было опровергнуто. Питер Ван де Камп в 1960-е годы «обнаружил» спутник с массой приблизительно равной массе Юпитера, но и это «открытие» оказалось ложным. Впервые внесолнечная планета была найдена канадцами Б.Кэмпбеллом, Г.Уолкером и С.Янгом (1988г.) у оранжевого субгиганта Гамма Цефея А, но подтверждена лишь в 2002 году. А в 1995 году Michel Mayor и Didier Queloz с помощью сверхточного спектрометра обнаружили покачивание звезды 51 Пегасас периодом 4,23 сут. Планета, вызывающая покачивания, напоминает Юпитер, но находящийся в непосредственной близости от светила.

## 2 Методы обнаружения.

На сегодняшний день известны и активно применяются 6 методов для обнаружения экзопланет:

1. Метод Доплера - спектральное измерение радиальной скорости звезды.
2. Транзитный метод - связан с прохождением планеты на фоне звезды. В этот момент светимость звезды уменьшается.
3. Метод гравитационного микролинзирования.
4. Астрометрический метод. Основан на изменении собственного движения звезды под гравитационным воздействием планеты.
5. Радионаблюдение пульсаров.
6. Прямые наблюдения.

Каждый из этих методов имеет свою область применимости и, как правило, дает положительные результаты для определенного вида экзопланет (ограничение по массе, эксцентриситету орбиты и др) или при наличии определенной конфигурации систем «звезда- планета - наблюдатель».

## 2.1 Метод Доплера

Данный метод основан на спектрометрическом измерении радиальной скорости звезды. Это самый распространённый метод. С его помощью можно обнаружить планеты с массой не меньше нескольких масс Земли, расположенные в непосредственной близости от звезды, и планеты-гиганты с периодами до примерно 10 лет. Планета, обращаясь вокруг звезды, как бы раскачивает её, и мы можем наблюдать доплеровское смещение положений линий в спектре звезды. Этот метод позволяет определить амплитуду колебаний радиальной скорости для пары «звезда — одиночная планета», массу планеты, период обращения, эксцентриситет и нижнюю границу значения массы экзопланеты. Угол между нормалью к орбитальной плоскости планеты и направлением на Землю современные методы измерить не позволяют. На ноябрь 2011 года этим методом зарегистрировано 647 планет.

## 2.2 Транзитный метод

Транзитный метод связан с прохождением планеты на фоне звезды. В этот момент светимость звезды уменьшается. Метод позволяет определить размеры планеты, а в сочетании с методом Доплера — плотность планет. Дает информацию о наличии и составе атмосферы. Следует понимать, что этим методом можно обнаружить лишь те планеты, орбита которых лежит в одной плоскости с точкой наблюдения. На ноябрь 2011 года обнаружено 185 планет.

## 2.3 Метод гравитационного микролинзирования

Между наблюдаемым объектом (звездой, галактикой) и наблюдателем на Земле должна быть другая звезда (она выступает в роли линзы), фокусирующая своим гравитационным полем свет наблюдаемой звёздной системы. Если у звезды-линзы есть планеты, то появляется асимметричная кривая блеска и возможно отсутствие ахроматичности. У этого метода крайне ограниченное применение. Метод чувствителен к планетам с малой массой, вплоть до земной. На сентябрь 2011 года было открыто 13 планет.

## 2.4 Астрометрический метод

Основан на изменении собственного движения звезды под гравитационным воздействием планеты. С помощью астрометрии были уточнены массы некоторых экзопланет, в частности, Эпсилона Эридана b. Будущее этого метода связано с орбитальными миссиями, такими, как SIM.

## 2.5 Радионаблюдение пульсаров

Если вокруг пульсара вращаются планеты, то излучаемый сигнал имеет осциллирующий характер. Мощные направленные пучки излучения образуют в пространстве конические поверхности. Если на такой поверхности окажется Земля, тогда возможно зарегистрировать данное излучение. На март 2010 года у двух пульсаров найдено пять планет.

## 2.6 Прямое наблюдение

На сегодняшний день ни один современный телескоп не позволяет напрямую наблюдать экзопланету. Это связано с тем, что свет от планеты в миллиарды раз слабее, чем свет от звезды, а с учётом огромных астрономических расстояний — это сравнимо с тем, что пытаться разглядеть свет от свечи на фоне огромного города огней. Предполагается, что космический телескоп имени Джеймса Вебба

благодаря огромному зеркалу 6,5 м и высокой разрешающей способности, возможно, станет первым телескопом, способным напрямую обнаруживать экзопланеты, а также подробно изучать состав их атмосфер.

### 3 Номенклатура

Важную роль в составлении различных каталогов, обзоров и баз данных играет номенклатура. Открытым экзопланетам в настоящее время присваиваются названия состоящие из названия звезды, около которой обращается планета, и дополнительной строчной буквы латинского алфавита, начиная с буквы «b» (например: 51 Пегаса b). Следующей планете присваивается буква «c», потом «d» и так далее по алфавиту. При этом буква «a» в названии не используется, так как такое название подразумевало бы собственно саму звезду. Кроме того, следует обратить внимание на то, что планетам присваиваются названия в порядке их открытия, а не по мере удаления от звезды обращения. То есть, планета «c» может быть ближе к звезде, чем планета «b», просто открыта она была позднее (как, например, в системе Глизе 876).

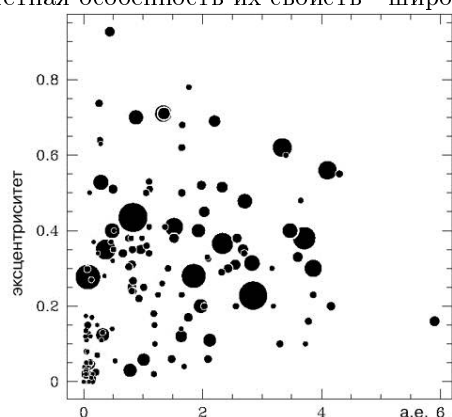
В названиях экзопланет существовало исключение. Дело в том, что до открытия системы 51 Пегаса в 1995 году экзопланеты называли иначе. Первые обнаруженные экзопланеты у пульсара PSR 1257+12 были названы прописными буквами PSR 1257+12 B и PSR 1257+12 C. Кроме того, после обнаружения новой, более близкой к звезде планеты, она была названа PSR 1257+12 A, а не D. Впоследствии эти планеты были переименованы во избежание путаницы в соответствии с современной системой именования экзопланет.

Некоторые экзопланеты имеют дополнительные неофициальные «прозвища» (как, например, 51 Пегаса b неофициально названа «Беллерофонт»). Однако в научном сообществе в настоящее время присвоение официальных личных имён планетам считается непрактичным и, соответственно, широко не распространено.

## 4 Основные характеристики планет

### 4.1 Орбитальные характеристики

В результате работы множества программ поиска планет (Лик, Кек, AAT, ELODIE, CORALIE) и начала новых крупных проектов (напр. HARPS), нам известно множество внесолнечных планет. Наиболее заметная особенность их свойств - широкое разнообразие орбитальных характеристик.



*Диаграмма эксцентриситет - большая полуось орбиты.*

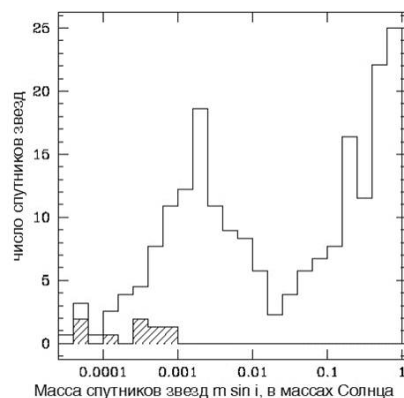
Величина "точек" пропорциональна минимальной массе кандидатов в планеты, т.е. величине  $m \sin i$ .

(<http://www.ifa.hawaii.edu/UHNAI/ppv/sec7-7.pdf>)

На рисунке ясно видны различные свойства внесолнечных планет: малое расстояние до звезды, высокий эксцентриситет орбит, большая масса. Однако очень важно учитывать факторы, приводящие к наблюдательной селекции. Есть несколько программ, которые отвечают этим требованиям, включая программу поиска планет в ограниченном объеме CORALIE (Udry и др., 2000), а также FGKM-обзор на телескопе им. Кека, где рассматривались звезды ограниченной звездной величины ((Marcy et al., 2005). На приведенных в обзоре диаграммах представлены планеты, обнаруженные во всех программах поиска, основанных на измерении лучевых скоростей.

## 4.2 Распределение по массам

Уже после обнаружения нескольких внесолнечных планет стало ясно, что эти объекты нельзя рассматривать как маломассивный хвост распределения звездных компаньонов в двойных звездных системах (с низкой величиной  $m \sin i$  из-за малого наклона  $i$  оси вращения системы к лучу зрения). Из диаграммы зависимости числа спутников звезд от их "минимальной массы", показанное ниже, явно демонстрирует бимодальное распределение, что является основным свидетельством в пользу того, что механизмы формирования звездных пар и планетных систем существенно различаются.



<http://www.allplanets.ru/10let.htm#3>

Интервал между двумя популяциями (еще называемый "пустыней коричневых карликов"), соответствующий массам между 20 и 60 масс Юпитера, практически пуст. Дело в том, что в этой области нелегко разделить маломассивные коричневые карлики от массивных газовых планет только по измеряемой величине  $m \sin i$ .

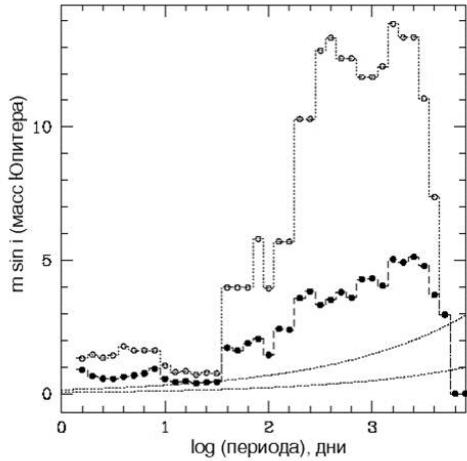
## 4.3 Особенности соотношения масса-период

Для данного соотношения можно выделить 2 характерные особенности:

1. На тесных орбитах наблюдается недостаток массивных планет. И это не эффект селекции. Возможное объяснение этому факту заключается в том, что массивные газовые объекты, находясь в

непосредственной близости от звезды начинают взаимодействовать со звездой и теряют массу по средством аккреции.

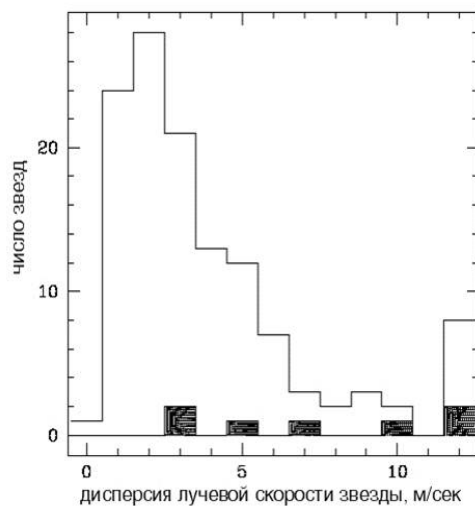
2. Массивные планеты располагаются дальше от звезды. Объяснение вытекает исходя из условий формирования планет из протопланетного облака.



<http://www.allplanets.ru/images/10let.htm>

## 5 Дисперсия лучевых скоростей

У большинства звезд дисперсия лучевых скоростей составляет около 2 м/сек, с увеличением дисперсии количество звезд быстро уменьшается. Более 80% звезд имеют дисперсию меньше 5 м/сек, и более 35% звезд имеют дисперсию меньше 2 м/сек.





<http://www.ifa.hawaii.edu/UHNAI/>

Так как планеты имеют существенно меньшие массы по сравнению со своими “родительскими” звездами, то заметить возмущения в лучевых скоростях звезд возможно только при наблюдениях с помощью спектрометров высокого разрешения (например HARPS).

## 6 Планетные системы и резонансы

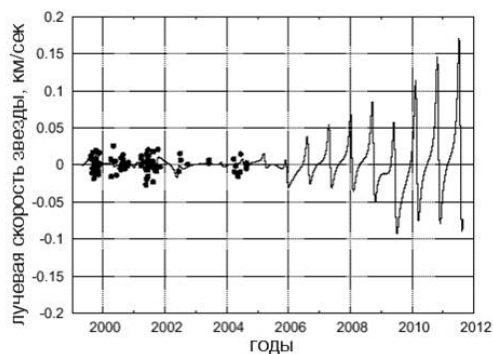
Многие системы показывают дополнительный дрейф простой кеплеровской кривой с одной планетой, совместимый с наличием второго планетного компаньона. Также многие системы являются или иерархическими, или резонансными системами. Среди известных многопланетных систем, по крайней мере, почти половина находятся в средних резонансах движения с характерными соотношениями 2:1, 3:1 и 4:1.

Примеры систем с орбитальными резонансами:

- HD 12661
- HD 202206
- Gl 876
- HD 128311

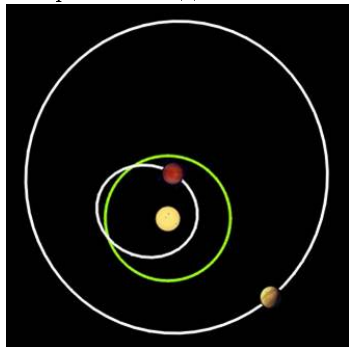
### 6.1 Влияние многопланетных систем на изменение лучевых скоростей звезды.

Присутствие двух или более взаимодействующих планет в системе значительно увеличивает нашу способность понять процессы формирования и эволюции планетных систем. Краткосрочные динамические взаимодействия особенно интересны из-за непосредственно наблюдаемых последствий. Среди них наиболее важны наблюдения 2:1 резонансных систем, потому что когда расстояние между планетами становится невелико, в течение близкого пролета гравитационное планет-планетное взаимодействие становится довольно заметным. Оно будет заметно влиять на эволюцию системы в масштабе времени нескольких периодов внешней планеты. Изменения лучевой скорости центральной звезды тогда будут заметно отличаться от изменений лучевой скорости, полученных в предположении независимых кеплеровских орбит.



HD 202206, <http://www.allplanets.ru>

Далее приведем пример структуры, которая объясняет наблюдательные эффекты изменения лучевой скорости звезды HD 202206 с помощью многопланетной системы.

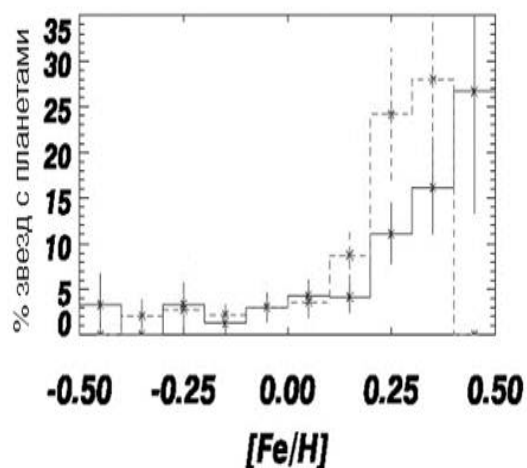


HD 202206, <http://www.allplanets.ru>

## 7 Свойства «Host Stars»

### 7.1 Корреляция металличности звезд с планетами-гигантами

Корреляция между обнаруженными с помощью эффекта Доплера газовыми гигантами и высокой металличностью родительских звезд была замечена в первые же годы исследования экзопланет. Однако до сих пор не существует единого объяснения этого факта, есть лишь несколько предположений. Одно из наиболее распространенных объяснений: “высокая металличность способствует формированию планет, потому что увеличивает количество маленьких сконденсировавшихся частиц - строительных блоков планетезималей”. Другое - “увеличение звездной металличности может быть результатом загрязнения звездной конвективной зоны лишённым газа материалом на последней стадии аккреции” - не получило должной поддержки в научных кругах (из-за нескольких противоречий с гипотезами формирования).



Thomas M. Brown, THE STELLAR POPULATION AND EXOPLANET HOSTS, <http://www.allplanets.ru/10let.htm#11>

Возникновение планет как функция металличности родительских звезд была аппроксимирована формулой:

$$\mathcal{P}(\text{planet}) = 0.03 \times \left( \frac{(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})}{(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}} \right)^2$$

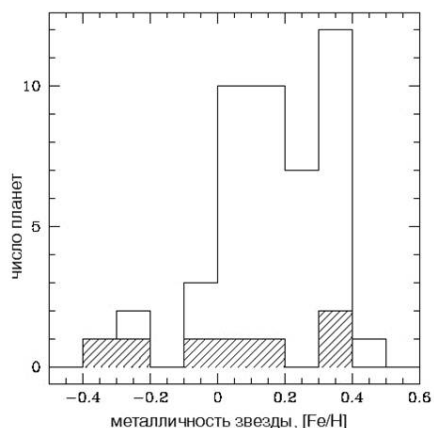
## 8 Гипотеза формирования планетных систем

Стандартная модель (например, Pollack et al., 1996) предполагает, что планеты-гиганты формируются из ледяных гранул во внешних частях системы, где температура протопланетной туманности достаточно низка. Слипание таких гранул обеспечивает формирование твердого ядра, которое начинает притягивать окружающий газ в течение жизни протопланетного диска (примерно 10 миллионов лет). Однако обнаружение планет-гигантов глубоко внутри "ледяной линии" требует, чтобы эти планеты подверглись процессу перемещения, миграции по направлению к родительской звезде. Альтернативная точка зрения предлагает формирование таких планет уже "на месте", возможно, благодаря неустойчивости в протопланетном диске. Заметим, однако, что даже в таком случае взаимодействие планеты и диска будет изменять орбиту планеты, как только та сформируется.

### 8.1 Факты в пользу гипотезы «формирования» (опровержение теории загрязнения конвективной зоны)

- Наблюдаемая металличность не увеличивалась с уменьшением глубины конвективной зоны звезд главной последовательности, как предполагала гипотеза загрязнения звезды металлами во время заключительного этапа аккреции.
- Субгиганты, имеющие планеты, имеют также высокую металличность, Так как у звезд ветви субгигантов происходит перемешивание всей конвективной зоны, тот факт, что высокая металличность сохранилась у субгигантов, имеющих планеты, говорит о том, что эти звезды были богаты металлами целиком. (иначе они растворили бы тяжелые элементы).

Существование корреляции между наличием планет и металличностью родительских звезд согласуется с гипотезой о гравитационной неустойчивости и аккреции на ядро в качестве механизма формирования газовых гигантов с орбитальными периодами до 4 лет.



(Fischer et al., 2005; Sato et al., 2005; Bouchy et al., 2005b; Da Silva et al., 2006)

Замечание: До сих пор не наблюдается никакой очевидной корреляции между металличностью родительских звезд и орбитальными параметрами планет.

## 9 Металличность звезд, имеющих планеты с массами порядка массы Нептуна

Предполагают, что такие планеты средних масс есть суть остатки испарившихся древних планет-гигантов, их родительские звезды должны также иметь преимущественно высокую металличность, наблюдаемую у родительских звезд планет-гигантов (не наблюдается). Было найдено, что планеты с массой  $m \sin i < 21$  массы Земли вращаются вокруг звезд с металличностью от -0,31 до 0,33. Таким образом видно, что никакой явной корреляции формирования планет типа Нептуна с металличностью нет. На основе достаточно бедной статистики получено, что вокруг красных карликовых звезд спектрального класса M и солнцеподобных звезд в случае низкой металличности протозвездной туманности (Ida and Lin, 2004b; Benz et al., 2005) наблюдается формирование маломассивных планет.

## 10 Эффект массы центральной звезды

Масса центральной звезды также является важным параметром процесса формирования планет. В последние годы было установлено несколько интересных фактов по поводу свойств и классов центральных звезд, обладающих экзопланетными системами. У маломассивных M-звезд наличие газовые гигантов редко наблюдается по сравнению со звездами F, G, K-классов. (Исключение Gl 876). Около M-звезд до сих пор не найдено ни одного горячего юпитера, однако многие «кандидаты» в твердые планеты принадлежат системам с M-звездами.

## 11 Инструменты и проекты изучения экзопланет

### АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

- COROT (ЕКА) — специализированный 30-сантиметровый орбитальный космический телескоп, снимающий кривые блеска многих звезд в момент прохождения перед ними планет. (2006 г).

- «Кеплер» (НАСА) — космический телескоп системы Шмидта с диаметром зеркала 0,95 м, способный одновременно отслеживать 100 тыс. звёзд. (2009 г)

#### НАЗЕМНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ

- SuperWASP— самый успешный наземный обзор. Более 70 экзопланет найденных транзитным методом на 2012.
- Проект HATNet— сеть 6 автоматических телескопов с широким полем зрения.

#### ПРОЕКТЫ, ВЕДУЩИЕ НАБЛЮДЕНИЕ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ (ДОПЛЕРОВСКИМ)

- HARPS— высокоточный спектрограф, установленный в 2002 году на 3,6-метровом телескопе в обсерватории Ла-Силья в Чили. Наблюдение ведётся методом лучевых скоростей.
- Обсерватория Кека— обсерватория из 2-х крупнейших в мире зеркальных телескопов.

Также в будущем ожидаются миссии: Gaia (~2013г), PEGASE (2013 г), TESS (2016 г), EChO (2022 г), Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope (ATLAST – 2025 г)

## 12 Литература

1. <http://www.astronomyonline.org/Exoplanets/Exoplanets.asp>
2. <http://www.astronet.ru/db/msg/1173280>
3. <http://exoplanet.eu/>
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar\\_planet](http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar_planet)
5. <http://www.allplanets.ru/>
6. <http://www.esa.int/science/corot>
7. <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2003/19>
8. <http://www.astronet.ru> J. Souchay, R. Dvorak (Eds.), “Dynamics of Small Solar System Bodies and Exoplanets”, Springer, Berlin 2010
9. Mercedes Lypez-Morales, “Exoplanet caught speeding”, Nature 24 June 2010
10. Thomas M. Brown, Kailash Sahu, “THE WFC3 GALACTIC BULGE TREASURY PROGRAM: METALLICITY ESTIMATES FOR THE STELLAR POPULATION AND EXOPLANET HOSTS”, The Astrophysical Journal Letters, Dec 2010
11. HELMUT A. ABT , “The Origin of the Exoplanets”, The Astronomical Society of the Pacific, 2010
12. Fischer et al., 2005; Sato et al., 2005; Bouchy et al., 2005b; Da Silva et al., 2006