

Владимир Моисеев



**Краткая история астрономии
1-ый доп. том. Экзопланеты**

Краткая история астрономии

Первый дополнительный том

Экзопланеты

От автора

Изобретение телескопа позволило астрономам увидеть то, что ранее было недоступно невооруженному взгляду.

В 1781 году Уильям Гершель открыл седьмую планету: Уран. А в 1843-1846 годах Джон Коуч Адамс и Урбен Жан Леверье рассчитали орбиту восьмой планеты: Нептуна.

Желание обнаруживать новые небесные тела, новые планеты только крепло. Казалось, что обнаружить планеты у далеких звезд будет не трудно, однако...

Перед вами попытка коротко, без лишних технических подробностей, рассказать об истории длительного процесса обнаружения и изучения внесолнечных планет (экзопланет). От первых попыток, предпринятых еще в XIX веке, до получения учеными Нобелевской премии.

Предлагаемая история изучения экзопланет, само собой, продолжается. Рассказ ограничен 2019 годом. Продолжение следует.

Полезно сообщить, что есть возможность знакомиться с первоисточниками. Для этого достаточно в поисковой системе отыскать источник, использовав для этого названия глав, в которых упоминается сайт nplus1.ru. В соответствующей статье содержится ссылка на профессиональную публикацию из научного журнала.

Оглавление

Часть 1. Исследования XX века

- 1.1. Введение
- 1.2. Историческая справка
- 1.3. Теоретические предпосылки и ранние попытки обнаружения экзопланет
- 1.4. Уильям Стивен Джейкоб
- 1.5. Томас Джефферсон Джексон Си
- 1.6. Звезда Ван Маанена
- 1.7. Звезда Барнарда
- 1.8. Телескоп Хобби — Эберли
- 1.9. Первая открытая экзопланета Гамма Цефея A b
- 1.10. Первое подтвержденное обнаружение системы экзопланет у пульсара PSR 1257+12
- 1.11. Александр Вольщан
- 1.12. Дейл Фрейл
- 1.13. Экзопланета 51 Пегаса b
- 1.14. Мишель Майор
- 1.15. Дидье Кело
- 1.16. Экзопланета 47 Большой Медведицы b
- 1.17. Джеффри Марси
- 1.18. Роберт Батлер
- 1.19. Экзопланета Глизе 876 b
- 1.20. Система Ипсилон Андромеды (HD 9826)
- 1.21. Мафусаил или PSR B1620-26 b
- 1.22. Экзопланета HD 209458 b (Осирис)
- 1.23. Атмосферные явления на HD 209458 b

Часть 2. Исследования 2000 – 2014 годов

- 2.1. Хроника открытий экзопланет
- 2.2. Звезда 2M1207 и экзопланета 2M1207 b
- 2.3. Система HR 8799
- 2.4. Система Фомальгаута
- 2.5. Экзопланета Kepler-69 c

- 2.6. Атмосферы экзопланет
- 2.7. Экзопланета HD 189733 A b
- 2.8. Астрономы нашли сверхзвуковые ветра на экзопланете
- 2.9. Ученые показали облака на экзопланете Kepler-7b
- 2.10. Астрофизики определили состав облаков экзопланеты Kepler-7b
- 2.11. Астрономы смоделировали облака на экзопланетах
- 2.12. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

Часть 3. Определения и методы наблюдений

- 3.1. Определение термина «планета»
- 3.2. Методы поиска экзопланет
 - Метод Доплера
 - Транзитный метод
 - Метод гравитационного микролинзирования
 - Астрометрический метод
 - Радионаблюдение пульсаров
 - Прямые наблюдения
 - Переменная частота пульсаций звезд
 - Модуляции отражения/излучения
 - Релятивистское излучение
 - Эллипсоидальные вариации
 - Поляриметрия
- 3.3. Проект HATNet
- 3.4. Телескоп SuperWASP
 - Открытия команды SuperWASP
- 3.5. Дифракционная решетка. Справка
- 3.6. Решетка Эшелле. Справка
- 3.7. Высокоточный эшелле спектрограф HARPS
- 3.8. Эшелле спектрограф ESPRESSO
- 3.9. Космический телескоп COROT
- 3.10. Проект SWEEPS
- 3.11. Космический телескоп «Кеплер»
- 3.12. Космический телескоп Gaia
- 3.13. Научные результаты миссии Gaia
- 3.14. Космический телескоп TESS

- 3.15. Энциклопедия внесолнечных планет
- 3.16. Жан Шнайдер
- 3.17. NASA Exoplanet Archive
- 3.18. На Паранале появилась система телескопов для поиска экзопланет

Часть 4. Классификация экзопланет

- 4.1. Классификация экзопланет по Сударскому
Планетарные классы
виды экзопланет
- 4.2. Класс I. Аммиачные облака
Экзопланета 47 Большой Медведицы c
- 4.3. Класс II. Водные облака
- 4.4. Экзопланета 47 Большой Медведицы b
- 4.5. Экзопланета HD 28185 b
- 4.6. Класс III. Безоблачные
- 4.7. Экзопланета Глизе 876 b
- 4.8. Класс IV. Планеты с сильными линиями спектров щелочных металлов
- 4.9. Класс V. Кремниевые облака

Часть 5. Современная классификация экзопланет

- 5.1. Холодные юпитеры
- 5.2. Экзопланета Эпсилон Эридана b или Эгир
- 5.3. Горячие юпитеры
- 5.4. Короткопериодические горячие юпитеры
- 5.5. Экзопланета KELT-9 b
- 5.6. Рыхлая планета
- 5.7. Холодные нептуны (или ледяные гиганты)
- 5.8. Гелиевые экзопланеты
- 5.9. Гиганты с облаками из водяного пара
- 5.10. Супер-юпитеры
- 5.11. Эксцентрические юпитеры
- 5.12. Планеты-сироты
- 5.13. Супер-Ио
- 5.14. Экзопланета CoRoT-7 b
- 5.15. Экзопланета Глизе 876 d

- 5.16. Супер-Венеры
- 5.17. Экзопланета Глизе 832 c
- 5.18. Экзопланета Kepler-69 c

Часть 6. Газовые гиганты. 2016 – 2019 годов

- 6.1. «Горячие юпитеры». Справка
- 6.2. Астрономы разгадали загадку «потерянной» воды на горячих юпитерах
- 6.3. Облака скрыли воду на горячих юпитерах
- 6.4. На экзопланете нашли облака из рубинов и сапфиров
- 6.5. «Горячий юпитер» KELT-16 b открывает перспективы для новых исследований
- 6.6. Экзопланета-рекордсмен оказалась горячее большинства звезд
- 6.7. Астрономы измерили магнитное поле самой горячей планеты в нашей Галактике
- 6.8. У экзопланеты впервые нашли стратосферу
- 6.9. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид титана
- 6.10. На горячем юпитере выпал снег из оксида титана
- 6.11. Ветер на горячем юпитере подул в «неправильную» сторону
- 6.12. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид алюминия
- 6.13. Оптическая интерферометрия прояснила состав атмосферы экзопланеты
- 6.14. В атмосфере ультрагорячего юпитера впервые нашли пары иттрия и хрома
- 6.15. Астрономы впервые провели расчеты магнитной активности «горячих юпитеров»
- 6.16. «Хаббл» увидел железные испарения с разрушающейся экзопланеты
- 6.17. В атмосфере горячего юпитера впервые нашли калий
- 6.18. Гигантские «горячие юпитеры» могут становиться ещё крупнее с годами
- 6.19. «Холодные юпитеры». Справка
- 6.20. Астрономы впервые увидели легкую экзопланету

- 6.21. Астрономы открывают новую экзопланету-газового гиганта
- 6.22. «Горячие сатурны» или «рыхлые планеты». Справка
- 6.23. Атмосфера горячего сатурна оказалась богата водяным паром
- 6.24. Астрономы нашли безоблачный горячий Сатурн
- 6.25. Астросейсмология помогла узнать свойства «горячего сатурна»

Часть 7. Экзонептуны

- 7.1. Большинство далеких экзопланет оказались холодными нептунами
- 7.2. Австралийские астрономы подтвердили существование планеты-переростка
- 7.3. Обнаружена планета с кометным хвостом
- 7.4. На нептуноподобной экзопланете нашли воду
- 7.5. Вокруг «теплого нептуна» открыта примитивная атмосфера
- 7.6. В атмосфере экзопланеты впервые нашли гелий
- 7.7. Гелий раздул атмосферу горячего Нептуна
- 7.8. «Хаббл» разглядел стремительно исчезающий горячий Нептун
- 7.9. Астрономы нашли «запрещенную» экзопланету
- 7.10. Астрономы заподозрили существование ледяного гиганта у белого карлика

Часть 8. Экзопланеты земного типа. 2015 – 2019 гг.

- 8.1. «Кеплер» помог измерить массу одной из самых маленьких экзопланет
- 8.2. Астрономы подтвердили существование ближайшей экзопланеты-суперземли
- 8.3. Небольшие звезды помогут своим планетам формировать магнитное поле
- 8.4. В суперземлях предсказали существование запрещенных веществ
- 8.5. Облака заставили маленькие экзопланеты казаться больше

- 8.6. Двойника Солнца уличили в поедании собственных планет
- 8.7. У экзопланеты земного типа впервые нашли атмосферу
- 8.8. У ближайшего «близнеца» Солнца нашли четыре экзопланеты
- 8.9. Массу проглоченных Кроносом планет оценили в 15 Земель
- 8.10. «Кеплер» нашел «сестру» Солнечной системы
- 8.11. Астрономы нашли самую плотную суперземлю
- 8.12. Астрономы нашли «старшего брата» Меркурия размером с Землю
- 8.13. Астрономы определили массу «планеты-младенца» из системы Беты Живописца
- 8.14. Астрономы обнаружили разрушающуюся экзопланету
- 8.15. У экзопланет в системах молодых звезд «нет шансов» сохранить атмосферу
- 8.16. Астрономы нашли у звезды Тигардена две землеподобные планеты
- 8.17. Боннард Джон Тигарден
- 8.18. Телескоп TESS открыл свою самую маленькую экзопланету
- 8.19. «Спитцер» не нашел атмосферы у близкой экзопланеты земного типа
- 8.20. Лаура Крейдберг
- 8.21. Обнаружены тысячи планет за пределами Млечного Пути
- 8.22. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

Часть 9. Система TRAPPIST-1

- 9.1. Астрономы нашли сразу три экзопланеты в потенциально обитаемой зоне TRAPPIST-1
- 9.2. Мишель Гиллон
- 9.3. «Хаббл» впервые изучил атмосферу землеподобной экзопланеты
- 9.4. Найдена система с семью землеподобными экзопланетами

9.5. Планеты системы TRAPPIST назвали малопригодными для жизни

9.6. Все планеты системы TRAPPIST-1 признали землеподобными

Часть 10. Проксима b

10.1. Проксима b (справка)

10.2. Гильем Англада

10.3. Ближайшей экзопланете Проксиме b разрешили иметь океаны

10.4. Проксима Центавра оказалась похожа на Солнце

10.5. Жизнь на Проксиме b возможна, если планета имеет толстую атмосферу

10.6. Астрономы рассказали о судьбе Земли на орбите Проксимы Центавра

10.7. Астрономы увидели у Проксимы Центавра следы двух пылевых колец

10.8. Вспышка на Проксиме Центавра увеличила яркость звезды в тысячу раз

Часть 11. Экзопланеты в обитаемой зоне. 2015- 2016 гг.

11.1. Обитаемость

11.2. Потенциально пригодные для жизни планеты

11.3. Открытие древней планетной системы повышает шанс обнаружить жизнь во Вселенной

11.4. Наличие у звезд планет в «обитаемой зоне» оказалось обыденным явлением

11.5. Потенциально обитаемые планеты смогли поселиться в «неудобных» системах

11.6. Изобилие тория улучшило шансы экзопланет на обитаемость

11.7. Ученые обнаружили ближайшую к Земле планету в потенциально обитаемой зоне

11.8. Мини-нептуны могут переходить в разряд потенциально пригодных для жизни планет

- 11.9. Найдена первая землеподобная экзопланета в обитаемой зоне солнцеподобной звезды
- 11.10. Красный карлик лишил «двойника Земли» шансов на обитаемость
- 11.11. Астрономы находят «самозванок» среди потенциально обитаемых планет
- 11.12. Составлен список газов для поиска жизни на экзопланетах

Часть 12. Экзопланеты в обитаемой зоне. 2017- 2019 гг.

- 12.1. Опубликован новый каталог экзопланет, лежащих в обитаемых зонах звезд
- 12.2. Лазер предложили использовать для общения с инопланетянами
- 12.3. Телескоп ALMA обнаружил «ингредиенты жизни» вблизи солнцеподобной звезды
- 12.4. Струйные течения спрятали от астрономов признаки жизни на экзопланетах
- 12.5. Внеземные цивилизации предложили искать по космическому мусору
- 12.6. Рентгеновское излучение стерилизовало гипотетические планеты звезды AD Льва
- 12.7. Искусственный интеллект предскажет обитаемость экзопланет
- 12.8. Астрономы пересмотрели шкалу значимости инопланетных сигналов
- 12.9. Климат некоторых планет-океанов оказался подходящим для жизни
- 12.10. Небольшим планетам-океанам пообещали долгую жизнь в обитаемой зоне
- 12.11. Обитаемая зона двойных звезд оказалась способна растягиваться
- 12.12. Отраженного света оказалось достаточно для фотосинтеза на экзопланетах
- 12.13. У экзопланеты в обитаемой зоне впервые нашли водяной пар в атмосфере

Часть 13. Небесная механика экзопланет. 2015 – 2019 года

- 13.1. Обнаружены две гигантские планеты с невозможными орбитами
- 13.2. Астрономы увидели резонанс рекордного количества экзопланет
- 13.3. Астрономы нашли рекордно большую экзопланету у двойной звезды
- 13.4. Астрономы открыли новую планету с тремя солнцами
- 13.5. Гравитационное микролинзирование помогло найти планету с двумя «солнцами»
- 13.6. Невидимая соседка «опрокинула» орбиту экзопланеты GJ 436b
- 13.7. Планетные системы оказались упорядочены по размеру планет и интервалам между ними
- 13.8. Разбросанность орбит планет объяснили врожденной деформацией
- 13.9. Нерезонансные орбиты суперземель объяснили большим наклоном оси
- 13.10. Впервые найдена экзопланета с долгой и эксцентричной орбитой

Часть 14. Протопланетные диски. 2016 – 2019 года

- 14.1. Получены редкие «детские снимки» планетных систем
- 14.2. В диске близлежащей звезды обнаружилась звезда-компаньон небольшой массы
- 14.3. Астрономы отыскивали переходный объект между экзопланетой и коричневым карликом
- 14.4. В остаточном диске близлежащей звезды обнаружены концентрические кольца
- 14.5. Протопланета загнала частицы пыли в ловушку

- 14.6. Искусственный интеллект научили искать протопланетные диски
- 14.7. Астрономы разглядели у молодых звезд разные по форме и структуре околозвездные диски
- 14.8. Движение газа в протопланетном диске выдало три новорожденных планеты
- 14.9. Астрономы впервые обнаружили муравьиную кислоту в протопланетном диске
- 14.10. ALMA обнаружила протопланетный диск у только что родившейся звезды
- 14.11. Астрономы впервые получили прямой снимок зарождающейся планеты

Часть 15. Экзолуны и экзокометы 2016 – 2019 года

- 15.1. Гигантские кольца экзопланеты J1407b
- 15.2. «Хаббл» обнаруживает «экзокометы», падающие на молодую звезду
- 15.3. Размер первой потенциальной экзолуны сравнили с Нептуном
- 15.4. Астрономы усомнились в существовании первой потенциальной экзолуны
- 15.5. Планетологи предсказали извержения железных вулканов на несостоявшихся планетах
- 15.6. Астрономы впервые обнаружили протолунный диск вокруг экзопланеты
- 15.7. Астрономы заподозрили наличие вулканически активной экзолуны

Часть 16. Формирование и эволюция экзопланет. 2016 – 2019 года

- 16.1. Астрономы впервые увидели космический снегопад
- 16.2. Землеподобным планетам разрешили формироваться у тусклых звезд
- 16.3. Как формируются планеты, подобные Юпитеру

- 16.4. Ученые определяют размер зародышей планет
- 16.5. Найдено недостающее звено в формировании планет
- 16.6. Астрономы нашли механизм рождения планет по ускоренному сценарию
- 16.7. Теория образования планет не смогла объяснить гиганта на орбите у карлика
- 16.8. TESS нашел пережившую расширение звезды планету

Часть 1. Исследования XX века

- 1.1. Введение
- 1.2. Историческая справка
- 1.3. Теоретические предпосылки и ранние попытки обнаружения экзопланет
- 1.4. Уильям Стивен Джейкоб
- 1.5. Томас Джефферсон Джексон Си
- 1.6. Звезда Ван Маанена
- 1.7. Звезда Барнарда
- 1.8. Телескоп Хобби — Эберли
- 1.9. Первая открытая экзопланета Гамма Цефея A b
- 1.10. Первое подтвержденное обнаружение системы экзопланет у пульсара PSR 1257+12
- 1.11. Александр Вольщан
- 1.12. Дейл Фрейл
- 1.13. Экзопланета 51 Пегаса b
- 1.14. Мишель Майор
- 1.15. Дидье Кело
- 1.16. Экзопланета 47 Большой Медведицы b
- 1.17. Джеффри Марси
- 1.18. Роберт Батлер
- 1.19. Экзопланета Глизе 876 b
- 1.20. Система Ипсилон Андромеды (HD 9826)
- 1.21. Мафусаил или PSR B1620-26 b
- 1.22. Экзопланета HD 209458 b (Осирис)
- 1.23. Атмосферные явления на HD 209458 b

1.1. Введение. Экзопланеты

Экзопланета или внесолнечная планета, — планета, находящаяся вне Солнечной системы. Долгое время задача обнаружения планет возле других звёзд оставалась неразрешённой, так как планеты чрезвычайно малы и тусклы по сравнению со звёздами, а сами звёзды находятся далеко от Солнца. Первые экзопланеты были обнаружены только в конце 1980-х годов.

По состоянию на 7 августа 2021 года достоверно подтверждено существование 4812 экзопланет в 3558 планетных системах, из которых в 791 имеется более одной планеты. Количество надёжных кандидатов в экзопланеты значительно больше. Так, по проекту космического телескопа «Кеплер» на конец марта 2021 года число кандидатов — 2366, а по проекту космического телескопа «TESS» — более 2200 кандидатов, но для получения статуса подтверждённых планет им требуется повторная регистрация с помощью наземных телескопов.

Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из которых от 5 до 20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными». Также, согласно текущим оценкам, около 34% звёзд, подобных солнцу, имеют в обитаемой зоне планеты, сравнимые с Землёй. По состоянию на август 2016 года обнаружено 216 планет, напоминающих Землю. В конце октября 2020 года ученые подсчитали общее число возможно обитаемых экзопланет в галактике Млечный путь, их число составляет около 300 миллионов.

Подавляющее большинство открытых экзопланет обнаружено с использованием различных непрямых методик детектирования, а не визуального наблюдения. Большинство известных экзопланет — газовые гиганты и более похожат на Юпитер, чем на Землю. Это объясняется ограниченностью методов обнаружения (массивные короткопериодичные планеты обнаружить легче). Ближайшая к Земле экзопланета — Проксима Центавра b.

1.2. Историческая справка

Можно утверждать, что если бы наши далекие предки не обратили внимания на звездное небо и не почувствовали, что оно прекрасно, наша цивилизация не состоялась бы.

Люди стали людьми в тот момент, когда обнаружили, что для них важны вещи, которые не приносят очевидной пользы. Мир немедленно стал очень сложным. Конечно, главными мотивами человеческого существования оставались базовые инстинкты: желание удовлетворить голод, оставить потомство и обладать властью. И вдруг появились другие потребности, удивительным образом изменившие человеческую природу: ощущение красоты, любопытство, желание познать окружающий мир.

Люди научились не только наблюдать, но и делать выводы. Подробнее об этом можно прочитать в «Краткой истории астрономии. Том 1. От неандертальцев до Коперника».

Сейчас нас интересует одно из первых великих астрономических открытий: объекты на небе разные! Есть Солнце, есть Луна, есть неподвижные звезды, есть планеты, есть кометы. Планеты называли «баранами», которые ходят сами по себе. Только после многолетних наблюдений было установлено, что движение планет строго подчиняется законам небесной механики.

В конце концов, именно попытка понять закон движения планет привела к построению первых космологических и космогонических моделей. Так появилась геоцентрическая система мира. Землю еще не считали планетой. Она была объявлена центром мира.

Но дальнейшее изучение движения планет привело к созданию гелиоцентрической системы, сначала Аристарха Самойского. И, со временем, появились теории Коперника и Кеплера. Было объявлено, что в Солнечной системе шесть планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн.

Изобретение телескопа позволило астрономам увидеть то, что ранее было недоступно невооруженному взгляду.

В 1781 году Уильям Гершель открыл седьмую планету: Уран. А в 1843-1846 годах Джон Коуч Адамс и Урбен Жан Леверье рассчитали орбиту восьмой планеты: Нептуна, которая была обнаружена на указанном астрономами месте.

А в 1801 году итальянским астрономом Джузеппе Пиацци была открыта Церера — ближайшая к Солнцу и наименьшая среди известных карликовых планет и самый крупный астероид Солнечной системы. Долгое время Цереру считали девятой планетой. Тем более, что она занимала свободное место в Солнечной системе согласно закону правилу Тициуса — Боде, который выполнялся для всех известных планет. Однако, когда выяснилось, что между орбитами Марса и Юпитера находятся десятки астероидов, Цереру лишили ранга планеты.

Но желание обнаруживать новые небесные тела, новые планеты или астероиды, только окрепло.

Так появилась дерзкая идея обнаружить планеты у звезд. Если звезды небесные тела, подобные Солнцу, то планеты возле них обязательно должны быть. Тем более, что методы поиска двойных звезд были разработаны и успешно применялись. Казалось, что обнаружить планеты у далеких звезд будет не трудно, однако...

1.3. Теоретические предпосылки и ранние попытки обнаружения экзопланет

Исторически первым заявлением о возможности существования планетной системы у другой звезды, кроме Солнца, стало сделанное в 1855 году сообщение капитана Джейкоба (Capt. W. S. Jacob), астронома Мадрасской обсерватории (East India Company's Madras Observatory). Им было обнаружено расхождение между наблюдавшимся и предсказанным движением друг относительно друга компонентов двойной звезды 70 Змееносца, что

позволило предположить наличие в двойной звездной системе третьего тела, «планетарного».

Позже, в 1890-х годах, астроном Томас Дж. Си из Чикагского университета и Военно-морская обсерватория США подтвердили наличие в системе 70 Змееносца несветящего тела (невидимого спутника) с периодом обращения в 36 лет. Однако расчёты Фореста Мультона опровергли представленные Си доказательства, показав, что подобная система неустойчива и обязательно распалась бы за короткое время. Не исключено, что все дело было в скверном характере Томаса Си, которому коллеги не привыкли доверять.

Существование планетной системы у звезды 70 Змееносца до сих пор считается не доказанным. Исследования, проведённые на Обсерватории Макдональд в 2006 году, показали, что если у 70 Змееносца и есть планета (или планеты), то её (их) масса лежит в пределах 0,46 — 12,8 масс Юпитера, а расстояние до звезды — от 0,05 до 5,2 а.е.

Первые попытки найти планеты вне Солнечной системы были связаны с наблюдениями за положением близких звёзд. Ещё в 1916 году Эдуард Барнард обнаружил красную звёздочку, которая «быстро» смещается по небу относительно других звёзд. Астрономы назвали её Летящей звездой Барнарда. Это одна из ближайших к нам звёзд, с массой в семь раз меньше солнечной. Исходя из этого, влияние на неё потенциальных планет должно было быть заметным. В начале 1960-х годов Питер Ван де Камп объявил, что открыл у неё спутник с массой примерно равной массе Юпитера. Однако Дж. Гейтвуд в 1973 году установил, что звезда Барнарда движется без колебаний и, следовательно, массивных планет не имеет. В 2018 году было объявлено об обнаружении у звезды Барнарда суперземли (GJ 699 b) массой не менее 3,2 массы Земли.

В 1952 году Отто Струве высказал предположение, что «горячие юпитеры» можно обнаруживать, наблюдая колебания «материнской» звезды. Однако в те времена телескопное время на подобные исследования не выделялось, так как господствовавшие теоретические

представления отвергали сам факт существования «горячих юпитеров», и возможность обнаружения экзопланет была упущена.

Вероятно, первая экзопланета могла быть обнаружена у звезды ван Маанена — третьего ближайшего к Солнцу после Сириуса В и Прокциона В белого карлика.

В 2014 году, уже после открытия многих экзопланет, в архивах была найдена фотопластинка 1917 года со спектром звезды ван Манена. Изучая ее, британский астроном Джей Фарайхи заметил, что в спектре есть линии поглощения, соответствующие кальцию и другим тяжёлым элементам, хотя в спектре белых карликов обычно присутствуют только линии водорода и гелия. Наличие кальция может указывать на то, что рядом со звездой имеется пылевой диск и, возможно, экзопланета. Вероятно, это первое наблюдательное свидетельство существования экзопланеты.

В 2004 году были сделаны сообщения, подтверждающее это открытие, и одно отрицающее его.

В 2008 году данные, полученные с помощью космического телескопа Спитцер, позволили астрономам исключить существование у Звезды ван Маанена любых спутников на расстоянии 1200 а. е. от звезды, с массой четыре или более масс Юпитера.

Первые публикации

Jacob, W.S. On Certain Anomalies presented by the Binary Star 70 Ophiuchi (англ.) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society : journal. — Oxford University Press, 1855. — Vol. 15. — P. 228.

See, Thomas Jefferson Jackson Researches on the Orbit of F.70 Ophiuchi, and on a Periodic Perturbation in the Motion of the System Arising from the Action of an Unseen Body (англ.) // The Astronomical Journal : journal. — IOP Publishing, 1896. — Vol. 16. — P. 17.

1.4. Уильям Стивен Джейкоб

Уильям Стивен Джейкоб (1813 – 1862 гг.) — английский астроном. С 1848 по 1859 год был директором Мадрасской обсерватории в Индии. Стал известен после того, как в 1855 году заявил об обнаружении экзопланеты на орбите около звезды 70 Змееносца. Это открытие до сих пор не подтверждено.



Рис. Уильям Стивен Джейкоб

Уильям Джейкоб был седьмым ребенком Стивена Лонга Джейкоба (1764 – 1851 гг.), викария Вулавингтона. Он родился 19 ноября 1813 года. В 1828 году Уильям поступил в Аддискомб-колледж в качестве кадета Ост-Индской компании, вскоре был произведен в инженеры и завершил свое военное образование в Королевском инженерном училище в Чатеме.

После прибытия в Бомбей в 1831 году Джейкоб несколько лет участвовал в Великой тригонометрической экспедиции в Северо-Западных провинциях, а в 1842 году основал частную обсерваторию в Пуне. Плохое состояние здоровья привело к тому, что он взял отпуск по болезни и отправился на мыс Доброй Надежды. Там он стал ассистентом Эндрю Скотта Во, но снова заболел. В 1843 году он вернулся в Англию, женился в 1844 году и вернулся в Индию только в 1845 году, но вынужден был оставить службу в компании в звании капитана бомбейских инженеров.

Джейкоб сосредоточился на науке и в декабре 1848 года был назначен директором Мадрасской обсерватории. Из-за слабого здоровья он брал отпуск по болезни в 1854-5 годах, а затем снова в 1858-9 годах. 13 октября 1859 года окончательно покинул обсерваторию, уйдя в отставку.

Во время солнечного затмения 18 июля 1860 года Джейкоб присоединился к официальной экспедиции в Испанию на борту парохода «Гималаи». Его проект возведения горной обсерватории в Пуне был профинансирован парламентом в 1862 году. Однако по прибытии в Пуну Джейкоб умер 16 августа 1862 года в возрасте 48 лет. В 1849 году он был избран членом Королевского астрономического общества.

Научные работы Уильяма Джейкоба

В 1848 году Джейкоб представил Королевскому астрономическому обществу каталог из 244 двойных звезд, наблюдавшихся в Пуне с помощью 5-футового экваториального телескопа Доллонда. Он вычислил орбиты нескольких известных двойных звезд и в 1847 году обнаружил, что Pi Scorpii является тройной звездой.

По результатам работ в Мадрасской обсерватории за 1848 – 52 гг. Джейкоб опубликовал «Дополнительный каталог» из 1440 звезд, выбранных из каталога Британской ассоциации. Его повторное наблюдение за 317 звездами из той же выборки в 1853 – 1857 годах показало, что им ошибочно приписывались большие

собственные движения. Там же содержалось 998 измерений 250 двойных звезд, которые он проделал с помощью телескопа, изготовленного в 1850 году.

Джейкоб попытался определить звездный параллакс Альфы Геркулеса, но его результат $0''.06$ далек от правильного ($0''.009$).

Из своих измерений систем Сатурна и Юпитера, напечатанных за счет индийского правительства, Джейкоб вывел элементы для спутников Сатурна и скорректированную массу для Юпитера; в 1852 году он заметил, почти одновременно с Уильямом Ласселлом, прозрачность «темного кольца» Сатурна.

В 1854 году Джейкоб опубликовал свои результаты магнитных наблюдений в Мадрасе (1846 — 1850 гг.). А результаты, сделанные под его руководством в 1851 — 1855 годах, опубликованы Н.Р. Погсоном в 1884 году.

В 1855 году, находясь в Англии, Джейкоб написал статью «Еще несколько слов о множественности миров», в которой он предположил существование жизни на других планетах («вероятно, что некоторые из известных планет обитаемы, не очень невероятно, что все они обитаемы»), и описал свои вычисления звездных орбит для Королевского астрономического Общества. Джейкоб предположил, что очевидные орбитальные аномалии в двойной звезде 70 Змееносцев могут быть вызваны экзопланетой. Хотя в настоящее время считается, что эти аномалии имеют другие причины, это было первое серьезное заявление астронома об обнаружении экзопланеты с использованием научных методов за 100 лет до того, как существование первой экзопланеты было окончательно подтверждено. Профессор Дэвид Киппинг отметил, что это «утверждение по-настоящему удивительно, поскольку Джейкоб проводил свои тонкие измерения (80 миллисекунд или 22 миллионные доли градуса) невооруженным глазом в то время, когда он даже не был уверен, действует ли закон всемирного тяготения Ньютона в отдаленных частях галактики. Хотя Джейкобу... в конечном счете было доказано, что он ошибался, у него хватило смелости попытаться».

1.5. Томас Джефферсон Джексон Си

Томас Джефферсон Джексон Си (19 февраля 1866 — 4 июля 1962 г.) — американский астроном. Его научное наследие связано с астрометрией, а также космологией.

В истории науки известен, в основном, благодаря своему неуживчивому характеру и бурному темпераменту. Из-за ряда теоретических расхождений вошёл в конфликт с мировым научным сообществом. Архив учёного хранится в Библиотеке Конгресса США.

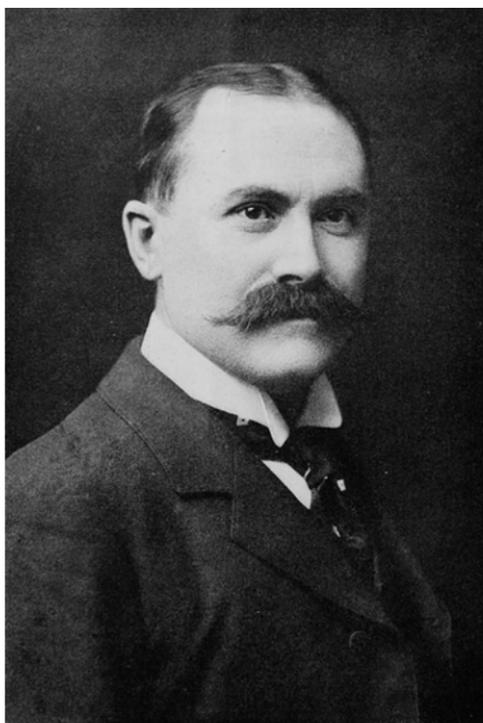


Рис. Томас Джефферсон Джексон Си

Томас Си родился в Монтгомери Сити, Миссури, США.

В 1889 году он окончил университет Миссури без предоставления учёной степени, продолжил образование в Берлинском университете, где в 1892 году удостоился докторской степени по математике. Специализировался на исследовании двойных звёздных систем и вычислении их орбит. После возвращения из Европы Томас Си работал ассистентом Джорджа Хейла в Чикагском университете, в 1896 году, не получив повышения, покинул университет.

До 1898 года работал в Обсерватории Лоуэлла, откуда был уволен за высокомерное отношение к сотрудникам. В 1898 году вошёл в штат Военно-морской обсерватории США в Вашингтоне.

Первый конфликт, связанный с работами Томаса Си, возник в 1895 году в связи с исследованиями двойной звёздной системы 70 Змееносца. Си обнаружил расхождение между наблюдавшимся и предсказанным движением компонентов двойной звезды относительно друг друга, что позволило предположить, что у этих двух звезд есть третий невидимый спутник (впервые это предположение было озвучено капитаном У. Джейкобом в Мадрасской обсерватории в 1855 году).

Результаты исследований были опубликованы в *Astronomical Journal*. Однако в 1899 году Форест Моултон (1872 — 1952 гг.) убедительно доказал несостоятельность теории Томаса Си: тройная система была бы слишком неустойчивой. В ответ Си написал в редакцию журнала оскорбительное письмо. Даже опубликованное в сокращённом виде, оно повредило репутации астронома. Его работы больше не принимались в *Astronomical Journal*.

В 1902 году, поссорившись с коллегами, был вынужден покинуть Военно-морскую обсерваторию, и в течение одного семестра преподавал в Академии ВМФ. Позднее перевёлся на военную базу Mare Island NSY в Калифорнии, где работал в чине капитана в службе времени до самой отставки в 1930 году.

Астрономические исследования

В 1909 году Томас Си предложил свою гипотезу происхождения Луны. По его мнению, Луна сформировалась как независимая планета где-то в Солнечной системе, а затем в результате неких пертурбаций перешла на эллиптическую орбиту, пересекающуюся с орбитой Земли. При очередном сближении с Землей, Луна была захвачена гравитацией Земли и стала её спутником. Эта гипотеза была весьма популярна на протяжении XX века.

В 1910 году опубликовал второй том монографии «Исследование эволюции звёздных систем». 700-страничный труд был посвящён опровержению «неправильных» по мнению Томаса Си астрономических теорий. Репутации учёного сильно повредила публикация его биографии в 1913 году, где его теории были значительно вульгаризированы. Книга была написана в апологетическом тоне журналистом и астрономом-любителем Уильямом Ларкиным Уэббом. Журнал Nation опубликовал уничтожающую рецензию, окончательно подорвавшую репутацию Томаса Си.

Работая в Калифорнии, Си опубликовал ряд работ о происхождении Солнечной системы, причинах землетрясений и периодичности солнечных пятен. Пытался определить размеры Млечного Пути.

Си был последовательным сторонником эфирной теории и пытался создать общую теорию всего, в которой все известные силы сводились бы к эфирным волнам (опубликована в 1922 году в Германии). Он весьма энергично критиковал теорию относительности Эйнштейна, но тон его критики был таков, что и сам Эйнштейн, и мировое научное сообщество аргументы Томаса Си проигнорировали.

В 1930 году Томас Си участвовал в голосовании по наименованию вновь открытой планеты Плутон, предложив название «Кронос». Репутация учёного привела к игнорированию его предложения.

1.6. Звезда Ван Маанена

Звезда была открыта в 1917 году американским астрономом Адрианом ван Мааненом, который заметил её большое (2,98" в год) собственное движение, сравнивая фотографии неба в созвездии Рыб 1914 и 1917 годов. Звезда Ван Маанена является третьим ближайшим белым карликом после Сириуса В и Проксиона В.



Рис. Адриан ван Манен

Звезда Ван Маанена находится на расстоянии 14 световых лет от Солнца, но, несмотря на близость, не видна невооружённым глазом, так как её визуальная звёздная величина составляет 12,4m. Являясь белым карликом спектрального класса DZ7, звезда содержит в спектре линии металлов. Возраст звезды оценивается в 10 миллиардов лет или старше. Так как белые карлики не имеют собственного источника энергии и светят остаточным тепловым излучением после окончания термоядерных реакций, в силу большого возраста звезды Ван Маанена температура её поверхности составляет всего около 4 000 К.

1.7. Звезда Барнарда

Звезда Барнарда — одиночная звезда в созвездии Змееносца. Красный карлик спектрального класса M4,0V C, видимая звёздная величина — 9,57m, светимость — 1/2300 солнечной. Масса звезды Барнарда оценивается в 17% массы Солнца, а радиус в 15—20% от радиуса Солнца. Предполагаемый осевой период вращения — 130,4 дня. Звезда проявляет некоторую активность (обнаружены пятна, вспышки).

Находится на расстоянии 1,828 парсек (5,96 светового года) от Солнца, то есть это одна из ближайших звезд к Солнечной системе (ближе только три звезды, составляющие систему Альфа Центавра).

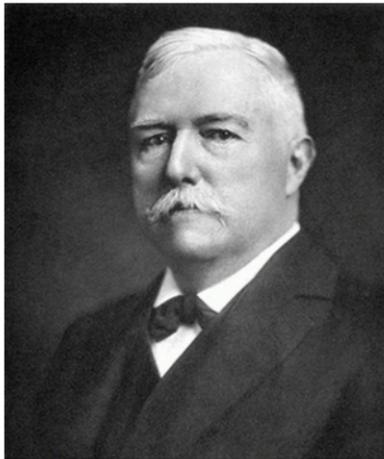


Рис. Эдвард Эмерсон Барнард

Открыта в 1916 году Эдвардом Барнардом, впервые измерившим её собственное движение, и названа в его честь. Звезду Барнарда часто называют «Летающей» или «Беглянкой», поскольку она обладает самой большой (кроме Солнца, проходящего большой круг на небесной сфере за год) скоростью углового перемещения по

небесной сфере среди известных звёзд (10,358 угловой секунды в год). Перпендикулярная компонента скорости «Летающей Барнарда» к лучу зрения земного наблюдателя составляет 90 км/с. Радиальная (лучевая) скорость по измерениям доплеровского сдвига спектральных линий в спектре звезды равна 106,8 км/с, то есть звезда приближается к нам. За 174 года звезда смещается по небесной сфере на $0,5^\circ$ (видимые угловые размеры Солнца и Луны).

В 11800 году минимальное расстояние звезды от Солнца составит 3,8 светового года (1,2 пк); за несколько столетий до этого момента она станет нашей ближайшей звёздной соседкой, если не будут открыты другие близкие, пока неизвестные тусклые звёзды. Имеет блеск 9,6 звёздной величины, поэтому невооружённым глазом не видна и не станет видна в момент максимального сближения при звёздной величине 8,6.

В конце 1960-х годов американский астроном П. Ван де Камп утверждал, что звезда Барнарда имеет невидимые спутники с массами 1,26, 0,63 и 0,89 массы Юпитера (периоды обращения — 6,1, 12,4 и 24,8 года соответственно).

В настоящее время эти выводы считаются ошибочными. В 2003 году опубликованы продолжавшиеся 2,5 года наблюдения лучевой скорости звезды, в результате которых установлены строгие ограничения на массы и периоды обращения возможных планет вблизи звезды Барнарда. В частности, исключено наличие планет с массой больше 0,86 массы Юпитера с радиусом орбиты от 0,017 до 0,98 астрономической единицы (а. е.). В зоне обитаемости, то есть на расстоянии 0,034 — 0,082 а. е. от звезды, где гипотетическая планета получала бы достаточно света для существования на её поверхности жидкой воды, исключено наличие любой планеты с массой больше трех масс Нептуна (планета на таком расстоянии имела бы орбитальный период от 6 до 22 дней). Если считать, что луч зрения земного наблюдателя лежит в плоскости орбиты гипотетической планеты (самая благоприятная ориентация для открытия планеты

методом лучевых скоростей), то верхнее ограничение на её наблюдаемую массу составляет 7,5 массы Земли.

С 1987 года звезду Барнарда исследует группа астрономов из Калифорнии. Они измеряли лучевую скорость звезды инструментами обсерваторий Лика и Кека. Вначале среднеквадратическая ошибка их измерений лучевой скорости составляла около 20 м/с, а потом (примерно с 2004 года) они повысили точность измерений до около 2 м/с. Всего было сделано 248 измерений. Согласно полученным данным, у звезды Барнарда нет планет с массой больше 2 масс Земли и орбитальными периодами обращения короче 10 суток.

Также не подтверждается существование планет с минимальной массой больше 10 масс Земли и с периодом обращения менее двух лет. Из-за низкой светимости этой звезды гипотетическая планета, получавшая бы столько же тепла от звезды на единицу площади, как Земля от Солнца, если бы обращалась вокруг «Летящей Барнарда» на расстоянии 0,0676 а. е. (~10 млн км). А орбитальный период был бы равен 15,64 земных суток.

В ноябре 2018 года международная команда астрономов, после двадцати лет наблюдений, объявила об обнаружении на расстоянии 0,404 а. е. от звезды Барнарда сверхземли массой не менее 3,2 масс Земли. Было рассчитано, что планета, получившая название Звезда Барнарда b или GJ 699 b совершает один виток вокруг неё за 233 дня. Планета находится в 2,5 раза ближе к звезде Барнарда, чем Земля к Солнцу, но получает от красного карлика только 2,03 % от той энергии, которую Земля получает от Солнца. Температура на поверхности планеты не превышает —170 К. Возможно, у звезды Барнарда на более далёкой орбите находится ещё одна планета, делающая оборот за 6600 дней.

В 2021 году существование планеты Barnard b было поставлено под сомнение, так как сигнал радиальной скорости с планетным орбитальным периодом исчез в новых данных, полученных в ближнем инфракрасном диапазоне доплеровским спектрографом Habitable-Zone Planet Finder (HPF) телескопа Хобби — Эберли.

1.8. Телескоп Хобби — Эберли

Телескоп Хобби — Эберли (англ. Hobby-Eberly Telescope) — телескоп с диаметром главного зеркала 9,2 метра (30 футов), расположенный в обсерватории Мак-Доналд на высоте 2026 метров. Назван в честь вице-губернатора Техаса Билла Хобби (англ. Bill Hobby) и Роберта Эберли (Robert E. Eberly), филантропа из штата Пенсильвания. Наблюдения проводятся в диапазоне 350 нм – 1800 нм. Первое наблюдение было проведено 10 декабря 1996 года.



Рис. Телескоп Хобби — Эберли

Телескоп отличает большое количество нововведений. Он не двигается; вместо этого инструменты, которые находятся в фокусе, двигаются вдоль лицевой стороны неподвижного главного зеркала, позволяя небесному объекту находиться под наблюдением до двух часов.

1.9. Первая открытая экзопланета Гамма Цефея A b

В конце 1980-х годов многие группы астрономов начали систематическое измерение скоростей ближайших к Солнцу звёзд, ведя специальный поиск экзопланет с помощью высокоточных спектрометров.

Впервые внесолнечная планета была найдена у звезды Гамма Цефея A канадскими астрономами Кэмпбеллом (Bruce Campbell), Уолкером (Gordon Walker) и Янгом (Stephenson Yang) в 1988 году. В 1989 году о существовании планеты Гамма Цефея A b также объявили Э. Лаутон (Anthony Lawton) и П. Райт (P. Wright). Однако, в 1992 году открытие экзопланеты было поставлено под сомнение из-за недостаточной точности измерений, проводившихся в то время.

24 сентября 2003 года существование экзопланеты Гамма Цефея A b было подтверждено Вильямом Кохраном (William D. Cochran), Арти Хатцесом (Artie P. Hatzes) и другими астрономами Обсерватории Макдональда (McDonald Observatory, штат Техас). Ее минимальную массу оценили как 1,59 масс Юпитера.

В 2006 году, после измерений проведённых спутником Hipparcos, было доказано, что Гамма Цефея A b действительно планета, а не коричневый карлик. Ее максимальную массу признали меньше 13 масс Юпитера с точностью 95% и меньше 16,9 масс Юпитера с точностью 99,73 %.

Гамма Цефея A b находится на расстоянии 45 световых лет от Солнца. Оборот вокруг своей звезды, она совершает по слегка вытянутой орбите (эксцентриситет — 0,115) почти за два с половиной года (903 дня). Расстояние до материнской звезды — 2,044 а. е. (1,81 а. е. — 2,28 а. е.), то есть дальше, чем Марс от Солнца. Гамма Цефея A b является газовым гигантом. Оцениваемая минимальная масса этой планеты минимум в полтора раза больше массы Юпитера.

1.10. Первое подтвержденное обнаружение системы экзопланет у пульсара PSR 1257+12

PSR 1257+12 (Лич) — пульсар, планетная система которого была первой из обнаруженных за пределами Солнечной системы.

В 1991 году польский радиоастроном Александр Вольщан, изучая открытый им в 1990 году в обсерватории Аресибо пульсар PSR 1257+12, заметил периодическое изменение частоты прихода импульсов. Канадский астроном Дейл Фрейл подтвердил это открытие наблюдениями на другом радиотелескопе. В 1992 году они совместно опубликовали результаты исследований, в которых, обнаруженные периодические изменения частоты, объяснялись влиянием двух планет с массой в четыре раза больше земной. Позже была обнаружена ещё одна планета с массой вдвое больше массы Луны.

По соотношению периодов планеты напоминают Меркурий, Венеру и Землю. Не ясно их происхождение. Внутренние планеты не смогли бы пережить взрыв сверхновой. Возможно, они сформировались после взрыва из вещества, перетекавшего на пульсар из второго компонента системы, позже утерянного. Системы подобного типа у других пульсаров обнаружены не были.

Физические характеристики экзопланет

Планета b (Драугр). Период обращения 25,262 суток, большая полуось орбиты 0,19 а.е., орбита круговая (эксцентриситет 0,0). Масса 0,025 земной.

Планета c (Полтергейст). Период обращения 66,5419 суток, большая полуось орбиты 0,36 а.е., орбита круговая (эксцентриситет 0,0186). Масса 4,3 земной.

Планета d (Фобетор). Период обращения 98,2114 суток, большая полуось орбиты 0,46 а.е., орбита круговая (эксцентриситет 0,0252). Масса $3,9 \pm 0,2$ земной.

1.11. Александр Вольщан

Александр Вольщан (польск. Aleksander Wolszczan, 29 апреля 1946 г.) — польский астроном.

Сразу после рождения Александра семья Вольщанов переселилась в Щецин, где он провёл своё детство. Свою научную карьеру начал в Польше, где в Университете Николая Коперника в Торуне получил в 1969 степень магистра, а в 1975 — степень доктора философии.

В 1982 году он переезжает в США, где работает в Корнеллском и Принстонском университетах. Позднее он получает должность профессора Пенсильванского университета в Калифорнии. Одновременно он продолжал работать и профессором университета в Торуне. Осенью 2008 года Вольщан покинул университет. Является членом Польской академии наук.

В 1990 году проводя астрономические наблюдения в обсерватории Аресибо, он обнаружил пульсар PSR 1257+12. Анализ полученных данных показал, что вокруг пульсара обращаются 2 планеты массой в 3,4 и 2,8 земных (PSR B1257+12 c и PSR B1257 +12 b). Эти данные были подтверждены на другом радиотелескопе канадским астрономом Дейлом Фрейлом. Таким образом было доказано существование внесолнечной планетной системы.

Учёные опубликовали результаты своих исследований в 1992 и 1994 годах соответственно, в настоящее время их открытие признано научным сообществом.

Награды

1992 — Премия Фонда польской науки.

1996 — Премия Беатрис Тинслей от Американского астрономического общества.



Рис. Александр Вольщан



Рис. Дейл А. Фрейл

1.12. Дейл Фрейл

Дейл А. Фрейл — канадский астроном, работающий в Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO) в Сокорро, Нью-Мексико.

Родился в Канаде, большую часть детства провел в Европе, а его профессиональная карьера проходила в США.

Фрейл получил университетское образование в Канаде: сначала степень бакалавра по физике в Университете Акадия в Новой Шотландии, затем получил степени магистра и доктора философии по астрофизике в Университете Торонто. В 1989 году он переехал в Соединенные Штаты в качестве аспиранта NSERC. После окончания престижной аспирантуры Янски в 1993 году он присоединился к исследовательскому персоналу Национальной радиоастрономической обсерватории, где остается по сей день.

Фрейл автор более 250 рецензируемых научных работ, в том числе более 30 статей в престижном журнале Nature. Он внес вклад в многочисленные области астрофизики, включая изучение многоволновых электромагнитных аналогов гравитационно-волновых событий, гамма-всплесков, экзопланет, мягкого гамма-излучения, межзвездной среды, пульсаров, мазеров и остатков сверхновых. Широкой публике он наиболее известен открытиями в области экзопланет и гамма-всплесков. В 2010 году он был удостоен стипендии Гуггенхайма. С августа 2011 года по сентябрь 2015 года был помощником директора NRAO по очень большому массиву Карла Дж. Янски и очень длинному базовому массиву, а также директором сайта по операциям в Нью-Мексико. В 2016 году он получил степень почетного доктора наук в Университете Акадия.

В начале 1992 года Фрейл и польский астроном Александр Вольщан объявили о своем открытии существования двух планет и возможной третьей вокруг

пульсара PSR B1257+12. Их открытие было подтверждено в середине 1992 года. Помимо того, что это первое подтвержденное открытие планет у пульсаров, находка также обычно считается первым подтвержденным открытием внесолнечных планет любого типа.

Начиная с 1997 года, Фрейл входил в команду Caltech-NRAO, которая помогла разгадать давнюю тайну происхождения гамма-всплесков. Они использовали оптический спектр, снятый телескопом Кека в направлении оптического послесвечения GRB 970508, чтобы установить, что гамма-всплески происходили на космологических расстояниях. Затем они использовали обнаружение радиотелескопом Very Large Array послесвечения излучения от этого же всплеска, чтобы измерить размер объекта и сделать вывод, что источник расширяется релятивистски. Эти два наблюдения остались краеугольными камнями в космологической модели шаровой молнии для гамма-всплесков. В 2009 году Thomson ISI включил Фрейла в список третьих наиболее цитируемых исследователей в области гамма-всплесков за период с 1999 по февраль 2009 года.

Публикации

Вольщан, А.; Фрейл, Д. А. (1992). "Планетная система вокруг миллисекундного пульсара PSR1257+12". *Nature*. 355 (6356): 145–147.

Мецгер, М. Р.; Джорговски, С. Г.; Кулкарни, С. Р.; Стейдель, К. С.; Адельбергер, К. Л.; Фрейл, Д. А.; Коста, Э.; Фронтера, Ф. (1997). "Спектральные ограничения на красное смещение оптического аналога гамма-всплеска 8 мая 1997 года". *Nature*. 387 (6636): 878–880.

Фрейл, Д.А.; Кулкарни, С. Р.; Никастро, Л.; Ферочи, М.; Тейлор, Г. Б. (1997). "Радио-послесвечение от гамма-всплеска 8 мая 1997 года". *Nature*. 389 (6648): 261–263.

1.13. Экзопланета 51 Пегаса b

51 Пегаса b (51 Pegasi b / 51 Peg b, Димидий) — первая экзопланета, обнаруженная у звезды 51 Пегаса. Материнская звезда — жёлтый карлик главной последовательности, похожий на Солнце.

Физические характеристики

51 Пегаса b совершает оборот по круговой орбите вокруг своей звезды за 4,23 суток на расстоянии 0,0527 а. е. (то есть в 19 раз ближе, чем Земля, и в 6 раз ближе, чем Меркурий). Высказывались предположения, что 51 Пегаса b — твёрдая землеподобная планета, но теперь считается, что она является газовым гигантом с атмосферой, разогретой, по оценкам, до 1000 К — то есть представляет собой так называемый «горячий юпитер». Вполне возможно, что планета из-за приливного воздействия близкой материнской звезды повернута к ней всегда одной стороной. Оцениваемая масса планеты составляет приблизительно половину массы Юпитера (0,468 MJ), но радиус экзопланеты, вероятно, должен быть больше радиуса Юпитера из-за значительного нагрева.

История открытия

51 Пегаса b была открыта в 1995 году астрономами Мишелем Майором (Michel Mayor) и Дидье Кело (Didier Queloz) в Обсерватории Верхнего Прованса. Это была первая обнаруженная экзопланета, обращающаяся вокруг солнцеподобной звезды. За это открытие Майор и Кело в 2019 году были удостоены Нобелевской премии по физике.

С помощью оптического спектрометра ELODIE, измеряющего доплеровское смещение линий, Майор и Кело в 1994 году начали регулярное измерение лучевых скоростей у 142 солнцеподобных звёзд, относительно близких к Солнцу. Довольно быстро были обнаружены

«покачивания» звезды 51 Пегаса, происходившие с периодом 4,23 суток, вызванные влиянием на звезду обращающейся вокруг неё планеты. Сравнительно большая масса планеты и малый радиус орбиты (в Солнечной системе она располагалась бы значительно ближе к Солнцу, чем Меркурий) облегчили её обнаружение. Вскоре это открытие было подтверждено американскими астрономами Джеффри Марси (Geoffrey Marcy) и Полом Батлером (Paul Butler) из Калифорнийского университета в Беркли.

Интересно, что в начале 1997 года открытие было подвергнуто сомнению. Было высказано предположение, что планета не существует, а периодические изменения в спектре 51 Пегаса вызваны её пульсацией. Однако следы такой пульсации обнаружить не удалось (если бы звезда пульсировала, то форма спектральных линий была бы переменной, но за всё время наблюдений она оставалась неизменной). Таким образом, существование 51 Пегаса b было окончательно подтверждено.

В 2015 году при помощи спектрографа HARPS был получен прямой спектр оптического излучения, отражённого от поверхности 51 Пегаса b. Это было первое в истории подобное наблюдение.

Название

Официальное название экзопланеты — 51 Пегаса b (51 Pegasi b, или 51 Peg b для краткости), однако для неё также было предложено неофициальное «прозвище» — «Беллерофонт», в честь Беллерофонта, греческого героя — укротителя Пегаса, как ссылка на созвездие Пегаса, в котором расположена материнская звезда этой планеты. В 2015 году в результате конкурса, объявленного Международным астрономическим союзом, планета получила имя Димидий (Dimidium) от латинского слова, означающего «половина», что соотносится с массой планеты, примерно равной половине массы Юпитера.

1.14. Мишель Майор

Мишель Майор (фр. Michel Mayor; род. 12 января 1942, Лозанна, Во, Швейцария) — швейцарский астрофизик, почётный профессор Университета Женевы (кафедра астрономии). Майор официально ушёл в отставку в 2007 году, но остаётся активным исследователем в Женевской обсерватории.



Рис. Мишель Майор

В 1966 году получил степень магистра в области физики в Университете Лозанны, в 1971 — докторскую степень в области астрономии в Женевской обсерватории. Его диссертация содержит исследование кинематических свойств звёзд в окрестностях Солнца в возможной связи со спиральной структурой Галактики. Непродолжительное время работал в Институте астрономии Кембриджского университета (1971). Работая в Университете Женевы, провёл несколько творческих отпусков длительностью в

семестр в Европейской южной обсерватории (ESO) в Чили и в Институте астрономии Гавайского университета.

С 1989 по 1992 годы он возглавлял Консультативный совет Европейской южной обсерватории, с 1990 по 1993 Президент Швейцарского общества по астрофизике и астрономии (Swiss Society of Astrophysics and Astronomy). Активный член и бывший председатель нескольких комиссий Международного астрономического союза.

В 1995 году совместно с Дидье Кело открыл 51 Пегаса b, первую экзопланету, обращающуюся вокруг солнцеподобной звезды (51 Пегаса). В 2019 году Майор и Кело получили за это открытие Нобелевскую премию (1/4) по физике.

Другие награды

1998 — Премия Жюль Жансена

1998 — Marcel Benoist Prize

2000 — Премия Бальцана

2004 — Медаль Альберта Эйнштейна

2004 — Кавалер ордена Почётного легиона

2005 — Премия Шао, «За открытие и определение орбит и масс первых планет, обращающихся вокруг других звёзд, революционизирующие наше понимание процессов формирования планет и планетных систем»

2010 — Международная научная премия имени Виктора Амбарцумяна, «За их важный вклад в изучении связи между планетными системами и окружающими их звёздами»

2010 — Медаль Карла Шварцшильда

2015 — Золотая медаль Королевского астрономического общества, «For his discoveries of planets orbiting other stars, and the development of instrumentation designed to find them»

2015 — Премия Киото

2017 — Премия Вольфа по физике, «За открытие первой экзопланеты, обращающейся вокруг похожей на Солнце звезды»



Рис. Мишель Майор и Дидье Кело

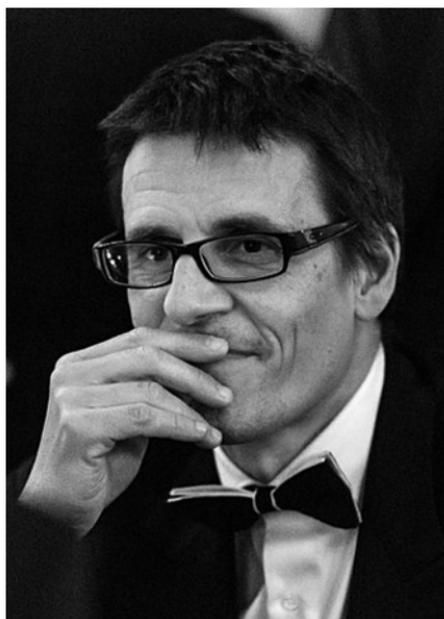


Рис. Дидье Кело

1.15. Дидье Кело

Дидье Кело (фр. Didier Queloz; род. 23 февраля 1966, Лозанна) — швейцарский астроном. Лауреат Нобелевской премии по физике (2019, совместно с Мишелем Майором и Джимом Пиблсом).

Дидье Кело получил образование в Женевском университете, где впоследствии получил степень магистра физики в 1990 году, степень DEA в области астрономии и астрофизики в 1992 году и степень доктора философии в 1995 году. Его научным руководителем был швейцарский астрофизик Мишель Майор.

Кело стоит у истоков «экзопланетной революции» в астрофизике. В 1995 году совместно с Мишелем Майором открыл 51 Пегаса b, первую экзопланету, обращающуюся вокруг звезды главной последовательности.

Планета была обнаружена путем измерения небольших периодических изменений радиальной скорости звезды, производимых вращающейся планетой. Обнаружение этой небольшой изменчивости с помощью эффекта Доплера стало возможным благодаря разработке спектрографа нового типа, установленного в обсерватории Верхнего Прованса. За это достижение Майор и Кело были удостоены Нобелевской премии по физике 2019 года «за вклад в наше понимание эволюции Вселенной и места Земли в космосе».

Это эпохальное открытие произвело революцию в астрономии и положило начало исследованиям экзопланет. В течение следующих 25 лет основной научный вклад Дидье Кело, по сути, был направлен на расширение наших возможностей обнаружения и измерения этих систем для получения информации об их физической структуре. Цели исследований состояли в том, чтобы лучше понять их формирование и эволюцию по сравнению с Солнечной системой. Кело участвовал в разработке нового астрономического оборудования, новых подходов к наблюдению и алгоритмов обнаружения новых экзопланет.

После объявления об обнаружении первой транзитной планеты (в 1999 году) исследовательский интерес Дидье Келоза расширился с целью объединить возможности, предлагаемые транзитными планетами, и последующие измерения с помощью доплеровской спектроскопии. В 2000 году он добился первого спектроскопического обнаружения транзита экзопланеты, используя так называемый эффект Росситера-Маклафлина. Этот тип измерения, по сути, сообщает нам о прогнозируемом угле между вектором углового момента звезды и вектором орбитального углового момента планеты.

Особая геометрия транзитных планет в сочетании с точными доплеровскими спектроскопическими наблюдениями позволяют нам измерять массу и радиус планет и вычислять их объемную плотность, чтобы получить представление об их физической структуре. В 2003 году Дидье Келоз, недавно назначенный на должность преподавателя, со своей исследовательской группой сумел применить комбинацию этих методов, впервые измерив плотность планет. Они также искали транзитные возможности на известных планетах с лучевой скоростью и обнаружили первую транзитную планету размером с Нептун Gliese 436 b.

Позднее Дидье Келоз перешел в Кембриджский университет, он, по сути, сосредоточил свою деятельность на организации комплексной исследовательской деятельности, направленной на обнаружение планет, похожих на Землю, и жизни во Вселенной.

С помощью своих коллег из IoA и DAMTP Келоз основал Кембриджский центр исследования экзопланет.

Награды и признание

2011 — BBVA Foundation Frontiers of Knowledge Award

2013 — Thomson Reuters Citation Laureate (по физике)

2017 — Премия Вольфа по физике

2019 — Нобелевская премия по физике

2020 — член Лондонского королевского общества

В его честь назван астероид (177415) Queloz.

1.16. Экзопланета 47 Большой Медведицы b

47 Большой Медведицы b (47 UMa b) или Тафао Тонг — экзопланета, находящаяся на расстоянии около 46 световых лет от Земли в созвездии Большой Медведицы. Планета была обнаружена на долгопериодической орбите вокруг звезды 47 Большой Медведицы в январе 1996 года и с 2011 года является самой внутренней из трёх известных планет в этой планетарной системе. Она имеет массу по меньшей мере в 2,53 раза больше, чем Юпитер. Как и большинство первых обнаруженных внесолнечных планет, 47 Большой Медведицы b была обнаружена с помощью изменений в радиальной скорости её звезды, когда гравитация планеты притягивает звёзды к себе, заставляя её колебаться. Это было достигнуто путём наблюдения доплеровского смещения спектра 47 Большой Медведицы.

После открытия первой экзопланеты в системе солнцеподобной звезды 51 Пегаса, астрономы Джеффри Марси и Пол Батлер занялись проверкой уже накопленных наблюдательных данных с целью открытия новых экзопланет. Учёные уточняли колебания радиальных скоростей звёзд по данным 13-летних измерений доплеровского смещения в Ликской обсерватории Калифорнийского университета в Беркли. Довольно скоро они обнаружили сразу две экзопланеты, 47 Большой Медведицы b и 70 Девы b.

47 Большой Медведицы b — газовый гигант (холодный юпитер) в 2,5 раза массивней Юпитера, его расстояние до звезды существенно превосходит аналогичные расстояния похожих на него экзопланет. Орбита почти круговая, что похоже на орбиты планет-гигантов в Солнечной системе.

Комментарий

Возле 70 Девы был обнаружен пылевой диск, нагретый до температуры 156 К, расположенный на расстоянии примерно 3,4 астрономических единицы от звезды.

1.17. Джеффри Марси

Джеффри Марси (англ. Geoffrey William Marcy; род. 29 сентября 1954) — американский астроном, рекордсмен по числу открытых экзопланет. Профессор Калифорнийского университета в Беркли (до октября 2015 года), член Национальной АН США (2002 - 2021). Совместно с Полом Батлером и Деброй Фишер открыл 70 из первых ста найденных экзопланет.

В 1972 году окончил среднюю школу в Гранада Хиллс в Калифорнии. В 1976 году с отличием окончил Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе по специальностям физика и астрономия. В 1982 году стал доктором философии по астрономии в Калифорнийском университете в Санта-Крузе, работая в Ликской обсерватории.

С 1982 по 1984 год занимался преподаванием и научно-исследовательской деятельностью в Институте Карнеги (Вашингтон). С 1984 по 1996 год — доцент кафедры физики и астрономии, и с 1997 по 1999 год — заслуженный профессор Университета штата в Сан-Франциско. Впоследствии адъюнкт-профессор физики и астрономии этого же университета, профессор астрономии Калифорнийского университета в Беркли и руководитель Центра комплексной планетологии.

В октябре 2015 года покинул Калифорнийский университет в Беркли — из-за скандала о домогательстве к студенткам и аспиранткам в период с 2001 по 2010 год. В мае 2021 года был исключён из Национальной АН США.

В начале 1980-х годов занимался магнитными полями звёзд, не добившись существенных результатов.

Марси подтвердил открытие первой экзопланеты у солнцеподобной звезды (звезды главной последовательности) — 51 Пегаса b, сделанное Мишелем Майором и Дидье Квелоцем в 1995 году. После этого он открыл первую многопланетную систему у

солнцеподобной звезды (Ипсилон Андромеды), первую экзопланету транзитным методом — HD 209458 b, первую экзопланету, удалённую от своей звезды далее 5 а. е. (расстояние от Солнца до Юпитера) — 55 Рака d и такие известные экзопланеты, как Глизе 436 b и 55 Рака e. С 8 июня 2012 года является заведующим первой академической кафедры SETI Калифорнийского университета в Беркли, учреждённой Уотсоном и Мэрлин Альбертс, бывшими выпускниками университета.

Комментарий

Знаменитый планетолог Джеффри Марси, которому прочили Нобелевскую премию за открытие экзопланет, был вынужден подать в отставку и покинуть университет Калифорнии в Беркли после скандала о сексуальных домогательствах, пишет интернет-издание Space.com.

В глобальную сеть, через интернет-издание BuzzFeed, «утекли» отчеты о внутреннем расследовании в университете Калифорнии в Беркли (UCB). В них Марси обвинялся в «ряде действий сексуального характера — поцелуях, щипании и массаже», что произошло в промежутке между 2001 и 2010 годами.

Марси не стал отрицать того, что он совершал домогательства, и опубликовал на сайте университета открытое письмо с извинениями и просьбой о прощении. Публика очень бурно отреагировала на эти раскрытия — поток обвинений и гневных реплик обрушился не только на самого астронома, но и на университет, который, как считает известный австралийский астрофизик Кэйти Мэк (Kathy Mask) и многие другие астрономы-феминисты, решил замаять скандал и не наказывать Марси, просто предупредив его о недопустимости подобных деяний.

Поднятая ими кампания в социальных сетях заставила университет поменять свое мнение и лишить Марси всех прав. В результате ученый сначала покинул пост ведущего ученого в инициативе Breakthrough Listen, открытой для поиска инопланетян, и покинул свою кафедру в Беркли.



Рис. Джеффри Марси

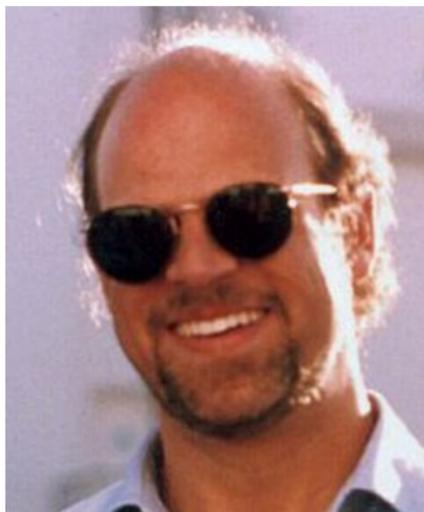


Рис. Роберт Пол Батлер

1.18. Роберт Батлер

Роберт Пол Батлер (родился в 1960 году) — астроном и штатный научный сотрудник Научного института Карнеги в Вашингтоне, округ Колумбия, который занимается поиском внесолнечных планет. По состоянию на ноябрь 2020 года он и его команда обнаружили более половины известных планет, вращающихся вокруг близлежащих звезд. Он известен своей новаторской работой в области доплеровской спектроскопии, метода, используемого для обнаружения звезд, имеющих планеты, с помощью измерения «колебания», вызванного гравитационными силами между звездой и ее планетами.

Батлер родился в апреле 1960 года в Сан-Диего, штат Калифорния. Он с детства интересовался астрономией. Когда ему было 14 лет, он построил 8-дюймовый телескоп-рефлектор и начал изучать планеты и звезды.

Батлер получил степень бакалавра (физика, 1985), бакалавра (химия, 1986) и магистра (физика, 1989) в Университете штата Сан-Франциско, защитив магистерскую диссертацию под руководством Джеффри Марси. В это время он, вместе с Марси, начал работу над конструкцией чувствительного спектрографа, с помощью которого можно было бы обнаруживать внесолнечные планеты, изучая лучевую скорость их родительских звезд.

В 1993 году Батлер получил степень доктора философии по астрономии в Колледже компьютерных, математических и естественных наук Университета Мэриленда в Колледж-Парке. После чего вернулся в Государственный университет Сан-Франциско, чтобы работать с Марси. В 1993-1997 годах Батлер был приглашенным научным сотрудником Калифорнийского университета в Беркли.

В 1995 году Марси и Батлер использовали свой спектрограф для подтверждения открытия М. Майора и Д. Келоза первой экзопланеты, вращающейся вокруг звезды главной последовательности 51 Пегаса b.

В 1996 году Марси и Батлер стали первыми американцами, открывшими новую планетную систему — планету, вращающуюся вокруг 70 Девы. Планета была обнаружена с помощью измерений радиальной скорости, сделанных с помощью телескопа К. Дональда Шейна в обсерватории Лик. Им принадлежит открытие 70 из первых 100 открытых экзопланет.

В 1997 году Батлер стал штатным астрономом Англо-Австралийской обсерватории в Сиднее, Австралия.

С 1999 года Батлер стал штатным научным сотрудником Научного института Карнеги в Вашингтоне, округ Колумбия. По состоянию на 2001 год его заявленной целью было «обследовать все 2000 солнцеподобных звезд на расстоянии 150 световых лет».

Награды

Марси и Батлер разделили ряд наград, включая первую медаль Международного астрономического союза по биоастрономии в 1997 году. В 2001 году Батлер и Марси были награждены медалью Генри Дрейпера Национальной академии наук «за их новаторские исследования планет, вращающихся вокруг других звезд с помощью высокоточных лучевые скорости». Поисковая группа планет Карнеги, состоящая из Марси, Батлера, Стивена Вогт и Дебры Фишер получили премию Карла Сагана от Американского астронавтического общества и Планетарного общества в 2002 году. В 2002 году Батлер вместе с Марси и Вогтом получил премию Беатрис Тинсли Американского астрономического общества. Марси и Батлер были названы лауреатами журнала Discover. Они же признаны «Космическими учеными года» в 2003 году. В 2011 году Батлер был избран членом Американской академии искусств и наук за его работу по разработке метода точной доплеровской скорости, «самого точного на сегодняшний день метода» для наблюдения планет и за его многочисленные открытия таких звезд. Батлеру приписывали «центральную роль» в изменении «того, как мы смотрим на наше место во Вселенной».

1.19. Экзопланета Глизе 876 b

Глизе 876 b — экзопланета, обращающаяся вокруг красного карлика Глизе 876, расположенного в созвездии Водолея. Полный оборот планеты вокруг звезды составляет приблизительно 61 день. Открытая в июне 1998 года, Глизе 876 b стала первой планетой, открытой у красного карлика.

Глизе 876 b была открыта двумя независимыми группами. Одну из них возглавлял Джеффри Марси (на основе данных Обсерватории Кек и Ликской обсерватории), а другую Ксавье Дельфоссе (Женевская обсерватория). Как и большинство известных экзопланет, Глизе 876 b была открыта при помощи метода измерения радиальных скоростей.



Рис. Система Глизе 876

Глизе 876 b находится в резонансе 1:2:4 с внутренней планетой Глизе 876 c и внешней — Глизе 876 e: времени, которое требуется планете e, чтобы завершить один

оборот, достаточно, чтобы завершить 2 и 4 оборота планетам b и c соответственно. Это второй известный случай соответствующего орбитального резонанса (резонанс Лапласа) после спутников Юпитера: Ио, Европы и Ганимеда. Это приводит к сильным гравитационным взаимодействиям между планетами. В результате, элементы орбиты планеты изменяются довольно быстро, как и прецессия орбиты. Орбита планеты имеет небольшой эксцентриситет, что характерно также для планет Солнечной системы. Большая полуось орбиты составляет всего лишь 0,208 а. е., это меньше, чем у Меркурия, тем не менее, Глизе 876 является настолько тусклой звездой, что планета находится в обитаемой зоне.

Ограничения метода радиальных скоростей, который был использован для обнаружения Глизе 876 b, позволяют определить только нижний предел массы планеты. Он оценивается как равный приблизительно 1,93 массы Юпитера. Определение истинной массы зависит от наклона орбиты, который точно неизвестен. Однако в случае с Глизе 876 b моделирование орбитального резонанса позволяет предположить, что масса равна 2,2756 масс Юпитера.

Учитывая массу планеты, можно предположить, что Глизе 876 b является газовым гигантом и не имеет твёрдой поверхности. Так как планета была открыта косвенным методом, то такие характеристики как радиус, состав и температура точно неизвестны. Если состав планеты подобен составу Юпитера, среда близка к химическому равновесию, то можно ожидать, что её атмосфере нет облаков, хотя в более прохладных областях планеты условия могут способствовать их образованию из водяного пара.

Глизе 876 b расположена в обитаемой зоне её звезды, что позволяет планете, обладающей массой, близкой к массе Земли, иметь на поверхности жидкую воду. Хотя неизвестно, может ли существовать какая-то форма жизни на газовых гигантах, достаточно крупные спутники могут быть обитаемыми в том случае, если условия на них являются подходящими.

1.20. Система Ипсилон Андромеды (HD 9826)

Ипсилон Андромеды (υ Andromedae), 50 Андромеды (50 Andromedae), HD 9826 — двойная звёздная система в созвездии Андромеды на расстоянии приблизительно 43,7 световых лет (13,4 парсеков) от Солнца. Видимая звёздная величина звезды +4,152m. Возраст около 3,12 млрд лет.

Первая звезда главной последовательности, у которой была обнаружена многопланетная система. Вокруг звезды обращается, как минимум, четыре планеты.

Система является физически двойной и оптически четырёхкратной.

Первый компонент (HD 9826Aa) — жёлто-белая звезда спектрального класса F9V. Масса — около 1,27 солнечной, радиус — около 1,48 солнечного, светимость — около 3,57 солнечных. Эффективная температура — около 6193 K.

Второй компонент (UCAC4 657-006214) — красный карлик спектрального класса M4,5V. Видимая звёздная величина звезды +13,6m. Масса — около 0,2 солнечной. Удалён от главной звезды минимум на 750 а.е..

Ранее считалось, что в систему входят ещё две звезды: UCAC3 263-13722, жёлтый карлик спектрального класса G-F с видимой звёздной величиной +12,6m, радиусом около 1,16 солнечного, и четвёртый компонент — TYC 2822-2067-1, жёлто-белая звезда спектрального класса F2 с видимой звёздной величиной +10,365m, радиусом около 3,41 солнечных. Однако после измерений их параллаксов в 2020 году с помощью телескопа Gaia стало известно, что расстояние от Солнца до первой из них около 560 пк, до второй около 510 пк, то есть они находятся в десятки раз дальше, чем Ипсилон Андромеды. Таким образом, они лишь случайно проецируются на небесную сферу вблизи Ипсилона Андромеды и не составляют с этой звездой и друг с другом физическую систему звёзд.

Планета b

Открыта в 1996 году Дж. Марси и П. Батлером методом доплеровской спектроскопии. Период обращения — 4,617 суток, большая полуось орбиты — 0,059 а. е., орбита круговая (эксцентриситет 0,012). Минимальная масса — 0,69 масс Юпитера.

Планета c

Открыта в 1999 году методом доплеровской спектроскопии. Период обращения — 241,5 суток, большая полуось орбиты — 0,829 а. е., орбита вытянута (эксцентриситет 0,28). Минимальная масса — 1,19 масс Юпитера.

Планета d

Открыта в 1999 году методом доплеровской спектроскопии. Период обращения — 1284 суток (3,5 года), большая полуось орбиты — 2,53 а. е., орбита вытянута (эксцентриситет 0,27). Минимальная масса — 3,75 масс Юпитера. Астрометрические наблюдения дают верхний предел в 10 масс Юпитера и максимальный угол наклона орбиты к лучу зрения $155,5^\circ$.

Ипсилон Андромеды d — газовый гигант класса II, у которого возможно образование водных облаков. Пока неизвестно есть ли у газовых гигантов массивные луны, способные удержать достаточно плотную атмосферу.

Планета e

После более чем тысячи сеансов наблюдений команда астрономов во главе с Барбарой Макартур (Barbara McArthur) пришла к выводу, что в системе имеется и четвёртая планета (e), орбита которой дальше от звезды, чем у остальных. Кроме того, им удалось уточнить массу двух из трёх ранее известных планет (c и d). Их орбиты отклонены друг относительно друга на 30 градусов.

1.21. Мафусаил или PSR B1620–26 b

PSR B1620–26 b, или по-другому Мафусаил, обращается вокруг экзотической пары звёзд. Одна из них — пульсар — делает почти 100 оборотов в секунду вокруг своей оси. Вторая — белый карлик, имеющий массу 0,34 солнечных масс. Звёзды обращаются вокруг общего центра масс на расстоянии 1 астрономической единицы друг от друга. Полный оборот происходит каждые 6 месяцев. Официальные названия пульсар и белый карлик получили соответственно PSR B1620–26 A и PSR B1620–26 B. Открытый в начале 1990-х годов третий объект, оказавшийся планетой, получил название PSR B1620–26 b. Планета имеет массу 2,5 масс Юпитера и совершает полный оборот вокруг звёзд за 100 лет. Расстояние планеты от PSR B1620 - 26 A и PSR B1620 - 26 B составляет около 23 а. е. (около 3,4 миллиарда километров) — это немного больше расстояния между Ураном и Солнцем.

Система находится в шаровом скоплении M4. Возраст скопления оценивается в 12,7 миллиарда лет. Поскольку все объекты скопления сформировались примерно в одно время, то и возраст юпитероподобной планеты PSR B1620 - 26 b примерно равен возрасту скопления.

Планета была открыта с помощью эффекта Доплера. В начале 1990-х группа астрономов под руководством Дональда Бэйкера изучала объект, который, как тогда считалось, был двойным пульсаром. Они обнаружили, что в системе должен быть ещё третий объект, присутствие которого влияет на периодичность частоты излучения пульсара. Через несколько лет были вычислены гравитационные возмущения орбит пульсара и белого карлика. Это дало основание предположить, что третий объект слишком мал, чтобы быть звездой. В 1993 году Стивен Торсетт (англ. Stephen Thorsett) с коллегами опубликовал доклад, в котором обосновал планетарный статус PSR B1620 - 26 b.

Происхождение пульсарных планет всё ещё не ясно, но, похоже, что такие планеты не являются родными для систем с материнской звездой-пульсаром. Астрономы предполагают, что PSR B1620 - 26 b образовалась, скорее всего, возле звезды, превратившейся затем в белый карлик PSR B1620 - 26 B, а позже эта система была вовлечена в поле тяготения пульсара PSR B1620 - 26 A. Подобные объединения систем редко происходят в плоскости нашей Галактики, но в шаровых скоплениях встречаются часто.

Согласно разработанной модели, 10 миллиардов лет назад пульсар захватил в поле своего тяготения звезду с планетой, потеряв при этом свой второй возможный компонент. Около полумиллиарда лет назад захваченная звезда перешла на стадию красного гиганта.

Обычно период вращения молодых пульсаров вокруг своей оси не превышает одной секунды, и с течением времени скорость снижается, постепенно уменьшая частоту. Более короткая периодичность характерна для так называемых миллисекундных пульсаров, скорость вращения которых поддерживается перетеканием вещества с соседней звезды. Период вращения пульсара PSR B1620 - 26 A составляет несколько миллисекунд, что может быть объяснена именно перетеканием аккреционного вещества. Поэтому исследователи предположили, что теперешний белый карлик PSR B1620 - 26 B до вовлечения в орбиту пульсара был звездой, которая, став красным гигантом, заполнила полость Роша, и её вещество стало перетекать на пульсар, разогнав его вращение до теперешней скорости. На протяжении следующих сотен миллионов лет аккрецирующее вещество порождало множество рентгеновских вспышек колоссальной мощности, ускоряя пульсар всё больше и больше. Когда красный гигант достиг стадии нестабильности, верхние слои звёздного вещества были сброшены, а оставшееся ядро сжалось в белый карлик.

Система PSR B1620 - 26 медленно дрейфует к центру скопления M4, где плотность звёзд очень высока. Поэтому судьба планеты PSR B1620 - 26 b остаётся неизвестной.

1.22. Экзопланета HD 209458 b (Осирис)

HD 209458 b или Осирис — экзопланета у звезды HD 209458 в созвездии Пегаса. Находится на расстоянии 153 св. лет от Солнца. Расстояние от планеты Осирис до материнской звезды — 0,047 а.е.. Это одна из самых изученных экзопланет, обнаруженных за пределами Солнечной системы. Типичный «горячий юпитер».

Первыми о существовании экзопланеты HD 209458 b сообщили Дэвид Латам и Мишель Майор в августе 1999 года. А уже 9 и 16 сентября 1999 года Дэвид Шарбонно (Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики) и Тимоти Браун (Национальный центр атмосферных исследований) наблюдали прохождение (транзит) планеты по диску звезды с помощью телескопа STARE, установленном на Канарском острове Тенерифе. Независимо от них 5 ноября наличие планеты с орбитальным периодом 3,52 дней установил Пол Батлер по данным спектрометра HIRES. А 8 ноября наблюдения за прохождением проводил Грегори Генри с помощью телескопа обсерватории Фэрборна на горе Холкинса. Наблюдения позволили уточнить параметры планеты: её радиус оказался в 1,4 раза больше радиуса Юпитера.

В ходе последующих наблюдений с помощью космического телескопа Хаббл в октябре – ноябре 2003 года удалось зафиксировать следы атмосферы Осириса. Так как небольшая часть света от звезды доходит до нас, проходя через плотную нижнюю атмосферу планеты, оказалось возможным увидеть в спектре линии поглощения натрия.

Неофициальное название экзопланета получила в честь древнеегипетского бога. Существует миф, в котором бог Сет разрубил тело своего брата Осириса на части, чтобы тот не мог вернуться к жизни (считается, что HD 209458 b тоже теряет свое вещество).

1.23. Атмосферные явления на HD 209458 b

На первый взгляд, атмосфера планеты должна быть стабильна: по оценкам, температура нижних слоёв атмосферы составляет 1300 К, что не позволяет молекулам и атомам преодолевать силу тяжести и «вырываться на свободу». Однако температура может сильно меняться с высотой: так, температура очень разрежённых верхних слоёв атмосферы Земли близка к 1000 К. Причина высокой температуры самых верхних слоёв атмосферы планеты — разогрев коротковолновым ультрафиолетовым излучением звезды. Для Осириса, находящегося гораздо ближе к своему светилу, чем Земля к Солнцу, разогрев излучением далёкого ультрафиолетового диапазона должен идти гораздо более интенсивно.

Недавние дополнительные наблюдения за планетой в ультрафиолетовом диапазоне с помощью того же Хаббла показали, что в линии Лайман-альфа Осирис затмевает свою звезду гораздо сильнее — яркость звезды падает на 15 %, что соответствует размеру окружающего планету водородного облака примерно в 4,3 радиуса Юпитера. Поскольку размер полости Роша (зоны, в пределах которой вещество удерживается притяжением планеты) для Осириса равен 3,6 радиуса Юпитера, то результаты наблюдений можно, предположив, что планета непрерывно теряет вещество. Об этом же свидетельствует и ширина линий поглощения — их анализ показывает, что атомы движутся со скоростями 130 км/с, что на Осирисе превышает вторую космическую скорость (43 км/с).

Сверхмощный шторм

Группа астрономов из разных университетов, работавшая под руководством Игнаса Снеллена (Ignas Snellen) из Лейденского университета, Голландия, открыла шторм на планете. Как считают учёные, там дует ветер из угарного газа (CO). Скорость ветра составляет

примерно 2 км/с, или 7000 км/ч (с возможными вариациями от 5 до 10 тысяч км/ч). Это означает, что звезда довольно сильно подогревает экзопланету, расположенную от неё на расстоянии всего 1/8 расстояния между Меркурием и Солнцем, и температура её обращённой к светилу поверхности доходит до 1000 °С. Другая сторона, никогда не поворачивающаяся к звезде, значительно холоднее. Большая разница температур и вызывает сильные ветра.

Дальнейшие исследования

В октябре — ноябре 2003 года были выполнены ещё более детальные наблюдения за спектром звезды при прохождении планеты по её диску. В ультрафиолетовом диапазоне были идентифицированы линии поглощения, вызванные атомам и ионам углерода и кислорода.

Таким образом, можно сказать, что началась эра изучения химического состава внесолнечных планет. Развитие методик позволяет надеяться, что в ближайшее время можно будет делать выводы о пригодности атмосферы той или иной внесолнечной планеты для поддержания жизни.

По сообщениям нескольких астрономов в 2007 году, в атмосфере планеты обнаружена вода. В 2013 году астрономам при помощи космического телескопа «Хаббл» вновь удалось найти в атмосфере планеты признаки водяного пара.

Кометный хвост

В 2010 году учёным удалось установить, что планета представляет собой планету-комету, то есть от неё постоянно идёт сильный поток газов, которые сдувает с планеты излучение звезды. Изучение шлейфа показало, что планета испаряется целиком; её покидают и лёгкие, и тяжёлые элементы. При этом на саму планету это заметно не влияет: при текущей скорости испарения она полностью будет уничтожена через триллион лет.

Часть 2. Исследования 2000 – 2014 годов

- 2.1. Хроника открытий экзопланет
- 2.2. Звезда 2M1207 и экзопланета 2M1207 b
- 2.3. Система HR 8799
- 2.4. Система Фомальгаута
- 2.5. Атмосферы экзопланет
- 2.6. Экзопланета HD 189733 A b
- 2.7. Астрономы нашли сверхзвуковые ветра на экзопланете
- 2.8. Ученые показали облака на экзопланете Kepler-7b
- 2.9. Астрофизики определили состав облаков экзопланеты Kepler-7b
- 2.10. Астрономы смоделировали облака на экзопланетах
- 2.11. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

2.1. Хроника открытий экзопланет

В августе 2004 года в системе звезды (мю Жертвенника) была обнаружена первая экзопланета типа «горячий нептун». Планета обращается вокруг светила за 9,55 суток на расстоянии 0,09 а.е. Температура на поверхности планеты ~ 900 К ($+627$ °С), масса планеты ~ 14 масс Земли.

В 2004 году было получено первое изображение (в инфракрасных лучах) кандидата в экзопланеты у коричневого карлика 2M1207.

Первая экзопланета типа «суперземля», обращающаяся вокруг нормальной звезды (а не пульсара), была обнаружена в 2005 году около звезды Глизе 876. Её масса — 7,5 масс Земли.

13 ноября 2008 года впервые удалось получить изображение сразу целой планетной системы — снимок трёх планет, обращающихся вокруг звезды HR 8799 в созвездии Пегаса. Это первая планетная система, открытая у горячей белой звезды раннего спектрального класса A5. Все открытые ранее планетные системы (за исключением планет у пульсаров) были обнаружены вокруг звёзд более поздних классов (F-M).

13 ноября 2008 года также впервые удалось обнаружить планету Фомальгаут b, вращающуюся вокруг звезды Фомальгаут, путём прямых наблюдений.

В 2011 году Дэвид Беннетт из Университета Нотр-Дам (Индиана, США) объявил, что на основе наблюдений 2006—2007 годов, проделанных на 1,8-метровом телескопе Университетской обсерватории Маунт-Джон в Новой Зеландии, открыл с помощью метода микролинзирования десять одиночных юпитероподобных экзопланет.

В сентябре 2011 года было объявлено об открытии двух экзопланет КIC 10905746 b и КIC 6185331 b любителями астрономии в рамках проекта «Planet Hunters» по анализу данных, собранных телескопом «Кеплер». При этом упоминалось о 10 кандидатах в планеты, но на тот момент только два из них с достаточной степенью уверенности определялись учёными как экзопланеты. Планеты были найдены добровольными участниками проекта среди данных, которые профессиональные астрономы отсеяли, и если бы не помощь добровольцев, то эти планеты, вероятно, остались бы не открытыми.

5 декабря 2011 года телескопом «Кеплер» была обнаружена первая экзопланета типа «суперземля» в обитаемой зоне — Kepler-22 b.

20 декабря 2011 года телескопом «Кеплер» у звезды Кеплер-20 были обнаружены первые экзопланеты размером с Землю и меньше — Kepler-20 e (радиусом 0,87 земного и массой от 0,39 до 1,67 масс Земли) и Kepler-20 f (0,045 массы Юпитера и 1,03 радиуса Земли).

В 2009 году учёные из Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики открыли первую экзопланету типа «суперземля», расположенную от Земли на расстоянии 40 световых лет и предположительно являющуюся планетой-океаном — GJ 1214 b. Последние данные транзитных проходов позволяют судить о наличии у GJ 1214 b протяжённой водородно-гелиевой атмосферы, низком уровне метана и слое облаков на уровне давления 0,5 бар, что не соответствует свойствам атмосферы с устойчивым доминированием водяных паров. Период обращения планеты вокруг звезды — красного карлика — 38 часов, расстояние составляет около 2 миллионов километров. Температура на поверхности планеты составляет примерно 230 °C.

В 2015 году была обнаружена экзопланета 51 Эридана b, похожая на молодой Юпитер.

2.2. Звезда 2M1207 и экзопланета 2M1207 b

2M1207 — ультрахолодный карлик-сверхпланета в созвездии Центавра, вокруг которого обращается экзопланета или спутник сверхпланеты, подобно тому, как возле планет вращаются спутники.

В апреле 2004 года группа европейских и американских астрономов обнаружила очень тусклый объект рядом с молодым коричневым карликом 2M1207. По инфракрасному спектру, содержащему следы молекул воды, массу объекта оценили в 4 массы Юпитера, что ниже порога горения дейтерия, отделяющего планеты от коричневых карликов. Учитывая соотношение масс компонентов (1:5), маловероятно, что планета сформировалась из протопланетного диска (его остатки были обнаружены как у 2M1207, так и позже у 2M1207 b). Скорее, система образовалась как очень маломассивная двойная звезда. Хотя ещё более того она похожа на тяжёлую планету с очень крупным спутником, и образование планеты схоже с образованием Луны или WASP-12 b 1.

Звезда/сверхпланета

Коричневый карлик типа M8, находится на расстоянии $170,8 \pm 4$ световых лет от Солнца в звёздной ассоциации TW Гидры. Масса $0,024$ солнечной. Возраст ~ 8 млн лет.

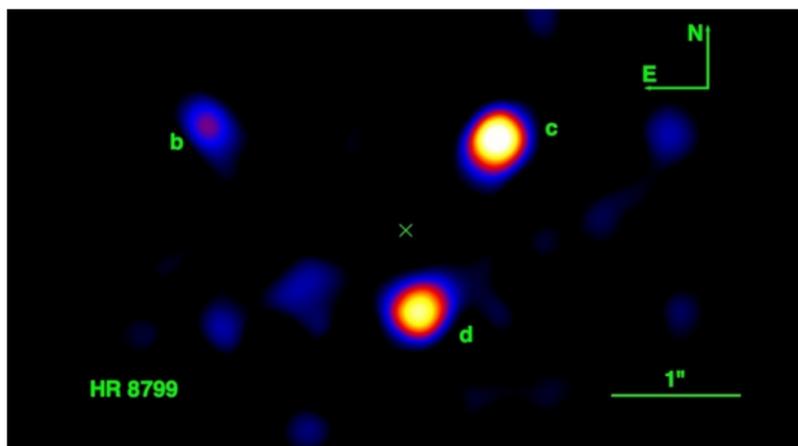
Планета b/спутник сверхпланеты 1

Масса 2M1207 b/2M1207 1 в 4 раза превышает массу Юпитера, расстояние от звезды (в проекции на небесную сферу) 46 ± 5 а. е. Период обращения неизвестен, но должен превышать 2450 лет.

Возможно, что в ближайшем времени статус 2M1207b будет заменён с планеты на планемо.



*Рис. Коричневый карлик 2M1207 и планета
(инфракрасные лучи)*



*Рис. Изображение планет HR 8799 b, HR 8799 c и
HR 8799 d, полученное телескопом Хейла*

2.3. Система HR 8799

HR 8799 — переменная звезда в созвездии Пегаса. HR 8799 относится к звездам типа λ Волопаса, группе пекулярных звезд с чрезвычайно высокой концентрацией тяжёлых элементов в верхних слоях атмосферы. Звезда является также переменной, поэтому относится к классу переменных типа γ Золотой Рыбы. Находится на расстоянии 129 световых лет (39 парсек) от Солнца.

В ноябре 2008 года команда учёных Герцбергского института астрофизики методом наблюдений в инфракрасном диапазоне обнаружила три планеты, обращающиеся вокруг этой звезды. Орбиты дальних планет системы находятся непосредственно в пределах пылевого диска, наподобие пояса Койпера. Это один из самых массивных дисков, открытых вокруг звезды, находящейся в пределах 300 св. лет от Солнца.

В 2010 году удалось зарегистрировать спектр экзопланеты HR 8799 c — первое подобное событие в истории планетологии. Снимок был получен с помощью телескопа VLT, находящегося в Чили и принадлежащего Европейской южной обсерватории. HR 8799 c представляет собой планету-гигант «теплый юпитер». Период вращения ~ 190 лет. Радиус ~ 1.3 радиуса Юпитера. Масса ~ 10 масс Юпитера. Температура на поверхности планеты ~ 1090 К. Благодаря полученному спектру удалось определить состав атмосферы, и оказалось, что он отличается от теоретически предсказанного.

В 2010 году было объявлено об открытии четвёртой планеты в системе, HR 8799 e, которая обращается на расстоянии около 14,5 а.е. от родительской звезды. Масса планеты составляет приблизительно 9 масс Юпитера.

В 2015 году с помощью интерферометра LBT обсерватории Маунт-Грэм в Аризоне (США) удалось сфотографировать одновременно все 4 планеты. В 2016

году изображение трёх планет получено спектрографом CHARIS телескопа Субару.

Прямые наблюдения с помощью интерферометра VLT Европейской южной обсерватории (ESO) с приёмником GRAVITY методом оптической интерферометрии показали, что атмосфера HR8799 е содержит гораздо больше окиси углерода, чем метана. Также в атмосфере нашли облака из железа и силикатную пыль, что в сочетании с избытком окиси углерода свидетельствует о том, что атмосфера HR8799 е охвачена гигантской бурей.

Околзвёздный диск

В январе 2009 космический телескоп «Спитцер» получил изображение околзвёздного диска у HR 8799. Были выделены три компонента диска:

тёплая пыль (с температурой около 150 кельвинов) внутри орбиты планеты (e). Внутренние и внешние границы этого пылевого пояса находятся в близком орбитальном резонансе 4:1 и 2:1 с планетой;

широкая зона из холодной пыли (с температурой около 45 кельвинов) с резко очерченной внутренней границей сразу за орбитой планеты (b). Внутренний край этого пояса находится в орбитальном резонансе 3:2 с указанной планетой, примерно как Нептун и пояс Койпера;

впечатляющее гало из небольших пылинок, происходящих из холодного пылевого пояса.

Гало выглядит необычно, что подразумевает высокий уровень динамической активности, вызванной гравитационным воздействием массивных планет. Команда «Спитцера» сообщает, что столкновения происходят скорее всего между объектами, аналогичными объектам пояса Койпера в нашей системе. Предполагается также, что по крайней мере 3 планеты в системе ещё не находятся на стабильных и окончательных орбитах.

Околзвёздный диск настолько огромен, что угрожает стабильности молодой системы.

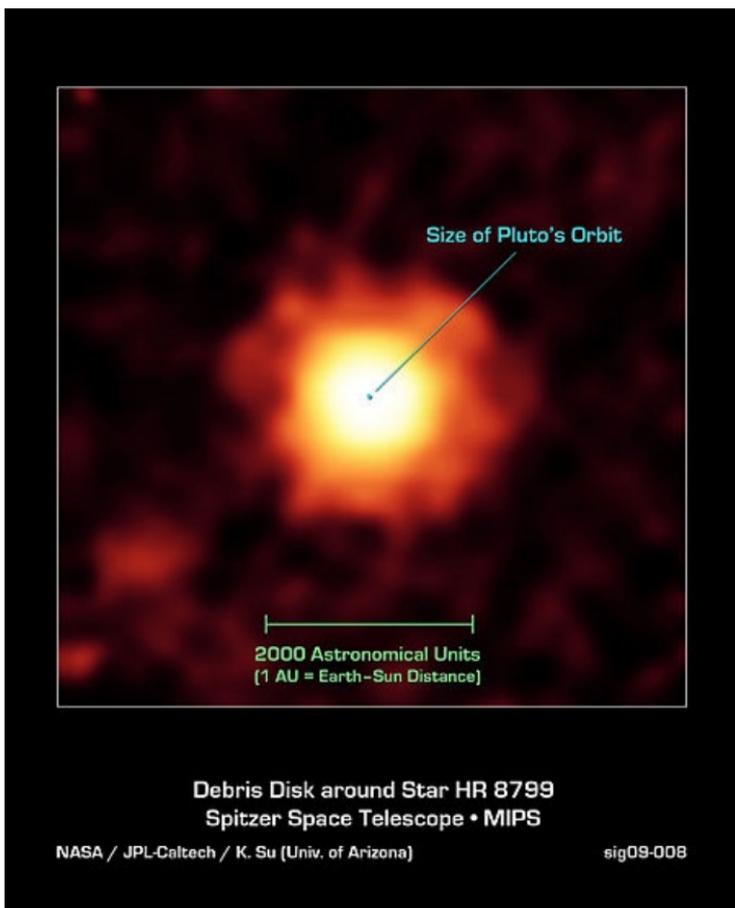


Рис. Околзвёздный диск HR 8799.

На фотографии, сделанной в ИК диапазоне 70 мкм на телескопе «Спитцер», видны яркие (в условных цветах бело-жёлтые) участки пылевого облака, которые исходят из холодного пояса пыли. Огромное, протяжённое гало из пыли, показанное в оранжево-красном цвете, обладает диаметром в ≈ 2000 а.е. Для сравнения в центре показана орбита Плутона (её диаметр ≈ 80 а.е.)

2.4. Система Фомальгаута

Фомальгаут (альфа Южной Рыбы / α PsA) — самая яркая звезда в созвездии Южной Рыбы и одна из самых ярких звёзд на ночном небе. Название звезды означает «рот южной рыбы» в переводе с арабского.

Это звезда главной последовательности спектрального класса A3, расположенная на расстоянии всего 25 световых лет (7,7 парсека) от Земли. Фомальгаут считается относительно молодой звездой, её возраст составляет от 200 до 300 миллионов лет, предполагаемая продолжительность жизни — миллиард лет. Температура на поверхности звезды — около 8500 Кельвин. Фомальгаут в 2,3 раза тяжелее Солнца, светимость больше в 16 раз, а радиус — в 1,85 раза.

Фомальгаут входит в состав широкой тройной звёздной системы. Компаньоном главной звезды Фомальгаут А является оранжевый карлик TW Южной Рыбы (Фомальгаут В), отстоящий на 0,9 светового года от него. Третья звезда в системе — красный карлик LP 876-10 (Фомальгаут С). Он отстоит от Фомальгаут А на 2,5 светового года и имеет собственный кометный пояс.

Протопланетный диск

Фомальгаут окружён диском космической пыли тороидальной формы с хорошо различимой внутренней границей на радиальном расстоянии 133 а.е., наклонённом под углом в 24 градуса. Эта космическая пыль расположена как пояс и имеет ширину 25 а.е. Геометрический центр этого пылевого пояса располагается на расстоянии приблизительно в 15 а.е. от самого Фомальгаута. Этот пылевой диск также иногда называют «Поясом Койпера Фомальгаута». Диск вокруг Фомальгаута принято считать протопланетным, испускающим инфракрасное излучение.

Согласно расчётам, пылевой диск должен быть гораздо больше из-за солнечного ветра Фомальгаута, который

отталкивает частицы диска наружу. В настоящее время на основании данных обсерватории Гершель принята гипотеза, что диск имеет такие небольшие размеры по той причине, что он постоянно обновляется осколками от очень частых, до тысяч в сутки, столкновений ледяных комет с более крупными телами на орбите звезды. Такое количество соударений требует наличия в кометном поясе от 10^{11} до 10^{14} комет, что аналогично тому, какое их количество предполагается для Облака Оорта в нашей Солнечной системе.

Планетная система

Орбита планеты, называемой Фомальгаут b (Дагон), была вычислена при анализе распределения космической пыли вокруг Фомальгаута в 1998 году. 13 ноября 2008 года NASA опубликовала пресс-релиз, в котором сообщила, что в результате сравнения снимков, сделанных в 2004 и 2006 годах, было визуально доказано наличие планеты, обращающейся вокруг звезды. Масса этой планеты составляет около 3 масс Юпитера, однако со временем она может стать более тяжёлой, вобрав вещество из диска. Позже существование планеты было поставлено под сомнение.

В 2011 и 2012 году астрофизики из Флоридского университета (США) и учёные проекта Atacama Large Millimeter Array доказали существование Дагона и предположили существование у Фомальгаута ещё как минимум двух планет: Фомальгаут c и Фомальгаут d. Масса обеих планет лежит в интервале от массы Марса до нескольких масс Земли.

Однако в 2020 году было объявлено что открытие планеты Дагон (Фомальгаут b) скорее всего является наблюдательной ошибкой — за планету приняли облако пыли от столкновения двух астероидов или планетезималей.

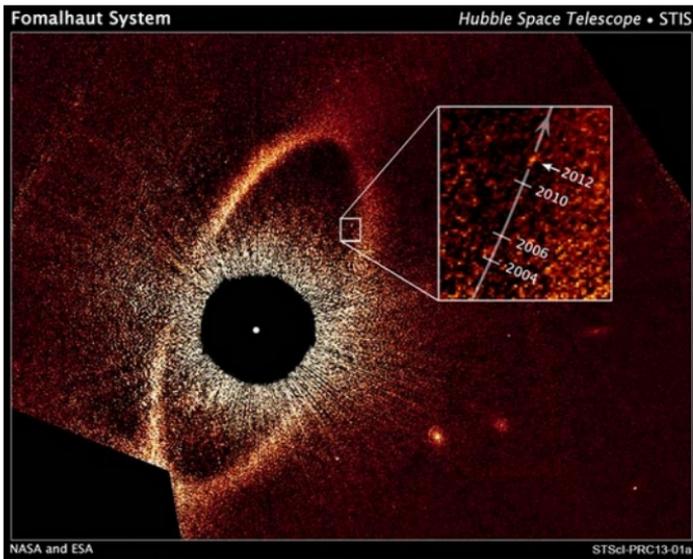


Рис. Фотография системы Фомальгаута с протопланетным диском и планетой b. Снимок сделан коронографом телескопа Хаббл (NASA)

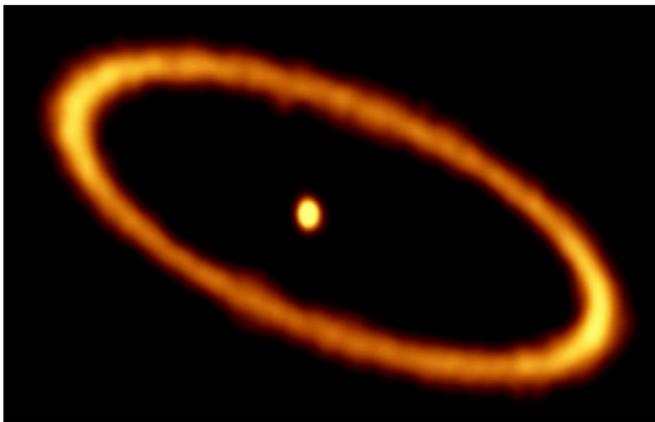


Рис. Остаточный диск на орбите звезды Фомальгаут.
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO);

2.5. Атмосферы экзопланет

Обнаружить и изучить атмосферу экзопланеты можно несколькими способами. При наблюдении транзитных планет, когда планета проходит между нами и звездой, немного затмевая диск, мы открываем их по падению блеска звезды. Но, естественно, обращаясь вокруг звезды, планета проходит и за звездой. Два этих процесса позволяют многое узнать об атмосфере экзопланеты. Вначале планета проходит перед звездой, и звезда как бы просвечивает экзопланету. Если есть мощная газовая оболочка, то она будет по-разному взаимодействовать с излучением разной длины волны. Это особенно заметно в инфракрасном диапазоне, поэтому для наблюдения используют космические телескопы.

Во многих случаях можно восстановить структуру внешних слоев газовой оболочки планеты, наблюдая ее на просвет. Таким способом в основном изучают горячие юпитеры — большие газовые планеты, которые находятся совсем рядом со своими звездами, находясь на расстояниях примерно как Меркурий от Солнца и ближе.

Кроме того, прямое излучение атмосферы планеты может быть обнаружено путем сопоставления света звезды плюс планеты, полученного на протяжении большей части орбиты планеты, со светом только звезды во время вторичного затмения (когда экзопланета находится позади своей звезды).

Другой тип планет, который выделяется для другого типа наблюдений, — это молодые объекты, молодые планеты с возрастом менее 100 миллионов лет. Они еще находятся на стадии формирования, они еще оседают, падают сами на себя. И это приводит к выделению энергии, планета сама себя греет. И тогда мы можем проводить прямые измерения внешних слоев планеты и непосредственно изучать ее спектр. Обнаружение газообразных соединений указывает на состав атмосферы экзопланеты.

В некоторых случаях требуется научиться правильно анализировать наблюдательные данные. Например, если удалось исследовать спектр одной из сверхземель, то есть относительно небольшой планеты, которая по своим параметрам находится примерно между Землей и Нептуном, и в нем не обнаружилось никаких деталей, это не означает, что ничего нельзя сказать об ее атмосфере. На самом деле важно понять, почему нет деталей. Детали формируются в самой атмосфере, то есть луч света должен был от звезды уйти, войти в атмосферу планеты, проделать какой-то путь, отразиться, пойти обратно, попасть в наш детектор. Если мы никаких деталей не видим, это значит, что луч, отразившись от самых внешних слоев, не вошел в атмосферу. И тот факт, что для данной сферы земли мы не видим никаких деталей в спектре, однозначно говорит о том, что эта планета покрыта очень плотным слоем облаков, то есть приносит довольно интересную информацию о свойствах атмосфер таких объектов. Эффект мерцания, вызванный отражением света от кристаллов льда в атмосфере Земли, наблюдался со спутников.

Первое наблюдение атмосферы внесолнечной планеты было сделано в 2001 году. Во время серии из четырех транзитов планеты HD 209458 b через ее звезду в атмосфере планеты был обнаружен натрий. Более поздние наблюдения с помощью космического телескопа «Хаббл» показали огромную эллипсоидальную оболочку из водорода, углерода и кислорода вокруг планеты. Температура этой оболочки достигает 10 000 К.

Этот тип потери атмосферы может быть общим для всех планет, вращающихся вокруг солнцеподобных звезд ближе, чем около 0,1 а.е. В дополнение к водороду, углероду и кислороду, считается, что HD 209458 b содержит в своей атмосфере водяной пар. Натрий и водяной пар также наблюдались в атмосфере HD 189733 b, другой планеты-гиганта с горячим газом.

В октябре 2013 года было объявлено об обнаружении облаков в атмосфере Kepler-7b, а в декабре 2013 года также в атмосферах Gliese 436 b и Gliese 1214 b.

2.6. Экзопланета HD 189733 A b

HD 189733 A b — экзопланета, ярко-голубой газовый гигант в созвездии Лисички, по размерам сопоставим с Юпитером, обращается вокруг оранжевого карлика HD 189733 A на расстоянии 63 световых года от Солнца. Это ближайший к Земле транзитный «горячий юпитер». Планета была открыта 5 октября 2005 года, когда астрономы во Франции наблюдали, как планета движется по диску звезды. Масса HD 189733 A b на 13 % выше, чем у Юпитера, период вращения 2,2 дня.

В 2006 году группа, возглавляемая Дрейком Демингом, объявила об обнаружении сильного инфракрасного теплового излучения от экзопланеты. Из-за близости к родительской звезде на HD 189733 A b поддерживается температура до 930 °C на светлой стороне, и не опускается ниже 425 °C на тёмной.

В 2007 году, пользуясь данными телескопа «Хаббл», учёные обнаружили, что у HD 189733 A b есть туманная атмосфера. Когда планета находится между земным наблюдателем и звездой, её атмосфера приобретает красноватый оттенок. Причина этого — в дымке, находящейся в атмосфере. Что именно составляет этот туман — пока точно не известно, но, по предварительным оценкам, это должны быть крошечные пылинки (диаметром менее 1 мкм) — частички железа, силикатов, оксида алюминия.

В конце 2007 года группа астрономов под руководством Светланы Бердюгиной из Цюрихского технологического университета смогла напрямую увидеть поляризованный свет, отражённый от этой планеты. Изучение характера поляризации показало, что размер атмосферы, которая отражает свет, более чем на 30 % превышает диаметр самой планеты.

Для HD 189733 A b впервые в истории исследования экзопланет удалось составить карту температур на поверхности. По инфракрасным наблюдениям

космического телескопа «Спитцер» температура атмосферы планеты варьируется от 425 до 930 °С. При этом самое горячее место на поверхности HD 189733 A b находится не в точке, указывающей точно на звезду, а смещено на 30 градусов восточнее. Это смещение говорит о постоянно дуящем с запада на восток урагане в атмосфере этой планеты. Он и переносит тепловую энергию. Ветры, состоящие из частиц силиката, дуют со скоростью 8700 км/ч.

В 2008 году установили видимый цвет планеты с помощью поляриметрии, что было первым таким успехом. Оказалось, что альbedo планеты значительно больше в синем свете, чем в красном. Синий цвет планеты был впоследствии подтверждён в 2013 году, что сделало HD 189733 A b первой экзопланетой, чей общий цвет был определён двумя различными методами.

Изначально существовала гипотеза, что в атмосфере планеты должно быть много воды, однако цвета планеты обусловлены наличием в её атмосфере частичек силикатов, рассеивающих видимый свет в синей части спектра. При наблюдении за этой планетой также обнаружено, что на этой планете идут дожди из расплавленного стекла.

Наблюдения с использованием космического телескопа Хаббл подтверждают присутствие водяного пара, нейтрального кислорода, а также органического соединения метана. При этом планета не может считаться обитаемой из-за слишком высокой температуры (в среднем 727 °С). Однако существование воды на HD 189733 A b показывает возможность обнаружения воды и на других планетах. Позже наблюдения VLT также обнаружили присутствие угарного газа на дневной стороне планеты.

С помощью наземных телескопов в атмосфере были найдены следы метана, находящегося в особом «флуоресцентном» состоянии, излучающимся в ИК-диапазоне. Это состояние метана говорит о наличии в атмосфере HD 189733 A b какой-то активности, но её природу астрономам ещё предстоит установить.

2.7. Астрономы нашли сверхзвуковые ветра на экзопланете

Ноябрь 2015, *Astrophysical Journal Letters*, nplus1.ru

Астрономы из Уорикского университета впервые получили метеокарту объекта за пределами Солнечной системы. Анализ спектра экзопланеты HD189733b, показал огромную скорость ветров, движущихся в ее атмосфере. Исследование опубликовано в *Astrophysical Journal Letters*.

Авторы использовали в своей работе спектрометр HARPS, расположенный в обсерватории Ла Силья (Чили). С его помощью астрономы наблюдали за атмосферой планеты во время транзита по диску центральной звезды системы. Благодаря высокому угловому разрешению прибора ученым удалось отдельно проанализировать спектры разных частей атмосферы планеты. Оказалось, что ее передняя (с которой начинается транзит планеты) и задняя части обладают различными доплеровскими смещениями линий поглощения натрия, что можно объяснить большой скоростью ветров в верхних слоях ее атмосферы. У передней части атмосферы зафиксировано красное смещение, то есть она удаляется от нас со скоростью 2,3 километра в секунду. У задней части отмечено фиолетовое смещение, то есть она приближается к нам со скоростью 5,3 километра в секунду. Эти результаты хорошо согласуются с ранними работами, предсказывавшими скорости ветров вплоть до 8 километров в секунду.

Оранжевый карлик HD 189733 A находится в созвездии Лисички в 63 световых годах от Солнечной системы. Экзопланета HD 189733b относится к классу «горячих юпитеров» — она приблизительно на десять процентов больше Юпитера по размеру, но расположена в 180 раз ближе к своей звезде, из-за чего температура на светлой стороне планеты достигает 930°C, а на теневой 425°C.

2.8. Ученые показали облака на экзопланете

Октябрь 2013, Astrophysical Journal Letters, lenta.ru

Международная группа астрономов опубликовала первую карту экзопланеты. На газовом гиганте Kepler-7b, относящемся к числу «горячих юпитеров», обнаружено большое облачное пятно. Высокая температура газовой оболочки планеты привела к тому, что эти облака состоят не из водяного пара, а соединений кремния. Подробности со ссылкой на статью исследователей для журнала Astrophysical Journal Letters (препринт доступен на сайте MIT) приводит официальный сайт Лабораторий реактивного движения NASA.

Открытие сделано учеными из Бельгии, США, Франции и Швейцарии при помощи инфракрасного телескопа «Спитцер». Наблюдая с его помощью ранее открытую орбитальной обсерваторией «Кеплер» экзопланету, ученые обнаружили, что одна из сторон этого небесного тела лучше отражает падающее на нее инфракрасное излучение с длинами волны 3,6 и 4,5 микрометров. Эти данные подтвердили подозрения, появившиеся у исследователей после анализа обычных оптических снимков и позволили составить первую карту газового гиганта.

Планета, впервые обнаруженная в январе 2010 года, обращается вокруг звезды, которая видна с Земли только в телескоп (ее звездная величина всего 13,9) в созвездии Лиры. Диаметр звезды Kepler-7 на 86 процентов, а масса примерно на треть больше солнечных, и из-за этого температура звезды тоже несколько выше. Планета, орбита которой в шесть раз меньше по радиусу орбиты Меркурия, нагрета примерно до 1200 – 1300 градусов Цельсия. При такой температуре, как пишут исследователи, облака могут состоять из силикатных соединений, среди которых может быть и расплавленный оксид кремния, существующий на Земле в виде песка и кварца. Они отражают свет и тепло, благодаря чему

планета кажется намного более яркой, чем многие аналогичные «горячие Юпитеры»; облачное пятно расположено не прямо посередине освещенного звездой полушария, а немного смещено к западу от наиболее близкой к Kepler-7 точки (планета обращена одной стороной к звезде).

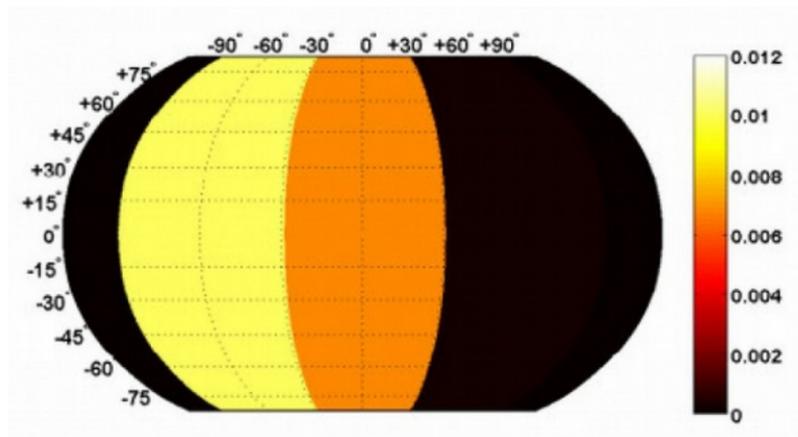


Рис. Карта Kepler-7b. Изображение: Demory et.al, 2013

Интересной особенностью Kepler-7b является то, что на этом газовом гиганте должна быть очень малая сила тяжести. Масса небесного тела составляет всего около 43 процентов массы Юпитера, а радиус при этом больше юпитерианского почти в полтора раза: в результате ускорение свободного падения на планете меньше земного. Этот эффект должен сказываться на поведении попавших в атмосферу твердых частиц и капель сконденсированного вещества, все взвеси на Kepler-7b будут медленнее опускаться вниз по сравнению с другими планетами. Ученые рассчитывают в ближайшее время получить аналогичные карты других экзопланет и с их помощью проверить правильность своих представлений о формировании облаков в условиях, которые не имеют аналогов внутри Солнечной системы.

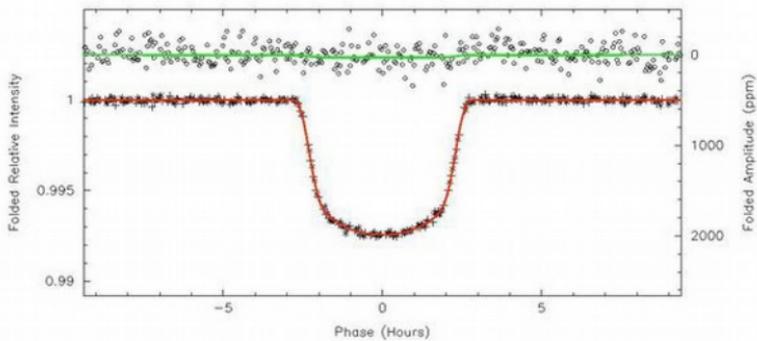


Рис. График кривой блеска звезды Kepler-7, полученный «Кеплером». Провал на графике соответствует «затмению» звезды планетой, проходящей на её фоне.

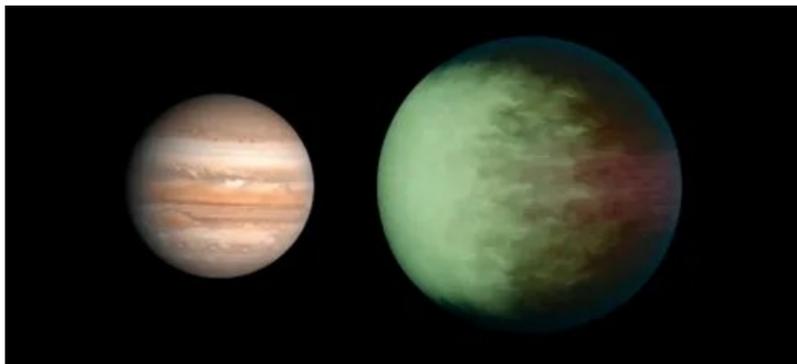


Рис. Юпитер и Kepler-7b

2.9. Астрофизики определили состав облаков экзопланеты Kepler-7b

Март 2015, Astrophysical Journal, lenta.ru

Астрофизики из Массачусетского технологического института определили наиболее вероятный химический состав облаков на экзопланете Кеплер-7b. Основными компонентами этих облаков оказались магний и силикаты, что согласуется с высокой температурой этого «горячего юпитера». Исследование принято к публикации в Astrophysical Journal.

Установить химический состав облаков экзопланеты удалось благодаря «обратному моделированию»: ученые составили около 1000 версий климата, который мог бы существовать на Кеплере-7b и сравнили их предсказанные спектры атмосферы с наблюдательными данными. Модели учитывали массу, радиус планеты, расстояние от звезды, объем поглощаемой и отражаемой энергии и другие имеющиеся данные (хотя химический состав планеты был ученым неизвестен).

Модели затем ранжировали по тому параметру, насколько хорошо они предсказывают характер изменения спектра звезды во время прохождения экзопланеты по ее диску. Наиболее близкими оказались данные той модели, согласно которой облака на Кеплере-7b преимущественно состоят из силикатов и магния. То есть, фактически, представляют собой «испаренный энстатит» – минерал, который существует и на Земле.

Кеплер-7b стал первой планетой вне Солнечной системы, на поверхности которой были обнаружены облака. Предположения о том, что эти облака могут состоять из силикатов, высказывались еще во время их обнаружения, однако на тот момент эта гипотеза не была подтверждена моделированием. Подобный новый можно применить не только к горячим юпитерам, но и к планетам земного типа.

2.10. Астрономы смоделировали облака на экзопланетах

Октябрь 2015, *Astrophysical Journal Letters*, nplus1.ru

Группа американских и канадских ученых смоделировала предположительный состав атмосферы экзопланеты Глизе 1214 b. Исследователи проработали две выдвинутые ранее теории, описывающие наблюдаемый спектр поглощения атмосферы, одна из которых — наличие высоких облаков в атмосфере, а другая — наличие органической дымки (как на Титане или Плуtone). Результаты работы авторы опубликовали в *Astrophysical Journal Letters*.

Глизе 1214 b — экзопланета у звезды GJ 1214 в созвездии Змееносца. Первая обнаруженная сверхземля у красного карлика. Период обращения планеты вокруг звезды составляет всего 36 часов, ее масса составляет приблизительно 6,55 масс Земли, а диаметр превышает земной приблизительно в 2,5 раза. Планета расположена приблизительно в 40 световых годах от Земли.

Согласно исследованиям, проведенным в 2014 году с помощью космического телескопа «Хаббл», спектр поглощения атмосферы экзопланеты «плоский», т.е. в нем нет ярко выраженных линий поглощения, которые могли бы указывать на состав атмосферы. Считается, что это указывает на существование облаков.

Моделирование атмосферной циркуляции показало, что она достаточно сильна для переноса микронных частиц в верхние слои атмосферы с образованием облаков, при этом наиболее тонкие облаков расположены на экваторе планеты.

Согласно пониманию природы подобных экзопланет, облака должны состоять из частиц сульфида цинка и хлорида калия размером около пятисот нанометров. Моделирование теории органической дымки, образование которой ранее показано для Титана и Плутона, дает такой же спектр поглощения атмосферы.

2.11. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

Ноябрь 2015, The Astrophysical Journal, nplu1.ru

Международная группа астрофизиков впервые разглядела вариации в излучении планеты-сироты PSO J318.5-22, вызванные облаками. Это первый случай в истории наблюдения погоды на экзопланете — раньше погоду находили только у коричневых карликов. Статья ученых появилась в журнале The Astrophysical Journal. Препринт работы выложен на arXiv.org.

Планета PSO J318.5-22 — уникальный объект, открытый в 2013 году, представляет собой газовый гигант массой примерно 6,5 масс Юпитера. Он находится на расстоянии 80 световых лет от Земли, относится к движущейся группы звезд Беты Живописца, однако собственной звезды у него нет.

Ученые наблюдали за гигантом в инфракрасном диапазоне. В отсутствие звезды им удалось зафиксировать у объекта колебания яркости в несколько процентов. Причиной этих колебаний, по мнению ученых, являются облака. Моделирование показало, что лучше всего экспериментальные данные объясняются наличием сразу нескольких типов облаков — поплотнее внизу и разреженных в верхних слоях атмосферы планеты.

Наблюдения проведены с помощью телескопа NTT в Чили, в частности, с помощью работающего на этом телескопе спектрографа SoFi. Они стали частью большой программы по изучению коричневых карликов и планет-сирот, к классу которых относится PSO J318.5-22. На настоящий момент помимо этой планеты известно еще две сироты: CFBDSIR 2149-0403 и WISE 0855-0714. Впрочем, из-за большой массы эти тела следует называть субкоричневыми карликами. Похожие на обнаруженные колебания можно рассмотреть и у планет, вращающихся вокруг звезд. То есть можно разработать технологию наблюдения погоды уже у настоящих экзопланет.

Часть 3. Определения и методы наблюдений

- 3.1. Определение термина «планета»
- 3.2. Методы поиска экзопланет
 - Метод Доплера
 - Транзитный метод
 - Метод гравитационного микролинзирования
 - Астрометрический метод
 - Радионаблюдение пульсаров
 - Прямые наблюдения
 - Переменная частота пульсаций звезд
 - Модуляции отражения/излучения
 - Релятивистское излучение
 - Эллипсоидальные вариации
 - Поляриметрия
- 3.3. Проект HATNet
- 3.4. Телескоп SuperWASP
 - Открытия команды SuperWASP
- 3.5. Дифракционная решетка. Справка
- 3.6. Решетка Эшелле. Справка
- 3.7. Высокоточный эшелле спектрограф HARPS
- 3.8. Эшелле спектрограф ESPRESSO
- 3.9. Космический телескоп COROT
- 3.10. Проект SWEEPS
- 3.11. Космический телескоп «Кеплер»
- 3.12. Космический телескоп Gaia
- 3.13. Научные результаты миссии Gaia
- 3.14. Космический телескоп TESS
- 3.15. Энциклопедия внесолнечных планет
- 3.16. Жан Шнайдер
- 3.17. NASA Exoplanet Archive
- 3.18. На Паранале появилась система телескопов для поиска экзопланет

3.1. Определение термина «планета»

Открытие первых экзопланет потребовало понятного определения самого термина — планета.

Рабочая группа МАС по внесолнечным планетам опубликовала в 2001 году заявление, содержащее рабочее определение «планеты», которое было изменено в 2003 году.

Экзопланета определялась по следующим критериям:

Объекты с истинной массой ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия (в настоящее время 13 масс Юпитера для объектов солнечной металличности), которые вращаются вокруг звезд или звездных остатков, являются «планетами» (независимо от того, как они образовались). Минимальная масса / размер, необходимые для того, чтобы внесолнечный объект считался планетой, должны быть такими же, как в Солнечной системе;

Субзвездные объекты с истинными массами, превышающими предельную массу для термоядерного синтеза дейтерия, являются «коричневыми карликами», независимо от того, как они образовались или где они расположены;

Свободно плавающие объекты в молодых звездных скоплениях с массами ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия не являются «планетами», а являются «суббурыми карликами» (или могут быть названы любым другим наиболее подходящим названием: плането или планетами-сиротами).

В августе 2018 года это рабочее определение было изменено Комиссией МАС F2: экзопланеты и Солнечная система. Официальное рабочее определение экзопланеты в настоящее время выглядит следующим образом:

Объекты с истинными массами ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия (в настоящее время рассчитывается как 13 масс Юпитера для объектов солнечной металличности), которые вращаются вокруг звезд, коричневых карликов или остатков звезд и которые

имеют отношение масс к центральному объекту ниже неустойчивости, являются «планетами» (независимо от того, как они образовались);

Минимальная масса / размер, необходимые для того, чтобы внесолнечный объект считался планетой, должны быть такими же, как в нашей Солнечной системе.

МАС отметил, что можно ожидать, что это определение будет развиваться по мере совершенствования знаний.

Альтернативные мнения

Рабочее определение МАС используется не всегда. Одно из альтернативных предположений состоит в том, что планеты следует отличать от коричневых карликов на основе образования. Широко распространено мнение, что планеты-гиганты образуются в результате аккреции ядра, которая иногда может привести к образованию планет с массами, превышающими порог слияния дейтерия. Массивные планеты такого рода, возможно, уже наблюдались. Коричневые карлики образуются как звезды в результате прямого гравитационного коллапса газовых облаков, и этот механизм образования также создает объекты, которые находятся ниже предела в 13 масс Юпитеров и могут достигать 1 массы Юпитера. Объекты в этом диапазоне масс, которые вращаются вокруг своих звезд, вероятно, сформировались как коричневые карлики; их атмосферы, вероятно, будут иметь состав, более похожий на их звезду-хозяина, чем планеты, образованные аккрецией, которые будут содержать повышенное содержание более тяжелых элементов.

Кроме того, ограничение 13 массами Юпитера не имеет точного физического значения. Слияние дейтерия может происходить в объектах с массой ниже этой границы, что в некоторой степени зависит от состава объекта. По состоянию на 2011 год в энциклопедию внесолнечных планет включены объекты массой до 25 масс Юпитера. По состоянию на 2016 год этот предел был увеличен до 60 масс Юпитера. База данных «Exoplanet Data Explorer» (создан Джейсоном Т. Райтом, Джеффом

Марси и Калифорнийским консорциумом по исследованию планет) включает объекты массой до 24 масс Юпитера с объяснением: «Предел в 13 масс Юпитера физически немотивирован для планет со скалистыми ядрами и проблематичен для наблюдений из-за неопределенности наклона орбиты». «Архив экзопланет НАСА» включает объекты с массой (или минимальная масса), равная или меньшая, чем 30 масс Юпитера.

Другим критерием для разделения планет и коричневых карликов, а не слияния дейтерия, процесса образования или местоположения, является то, преобладает ли в давлении ядра кулоновское давление или давление вырождения электронов с разделительной линией около 5 масс Юпитера.

Комментарий

В августе 2006 года Международный астрономический союз (МАС) отдельно определил, что в Солнечной системе планета — это небесное тело, которое:

находится на орбите вокруг Солнца;

имеет достаточную массу, чтобы принять гидростатическое равновесие (почти круглую форму);

«очистил окрестности» вокруг своей орбиты.

Неспутниковое тело, удовлетворяющее только первым двум критериям (например, Плутон), классифицируется как карликовая планета. Согласно МАС, «карликовые планеты» не являются планетами. Тело, не являющееся спутником, удовлетворяющее только первому критерию, называется малым телом Солнечной системы (SSSB).

Источники

[*"Working Group on Extrasolar Planets: Definition of a "Planet"". IAU position statement. 28 February 2003.*](#)

[*"IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes". 2006.*](#)

Brit, R. R. (2006). [*"Why Planets Will Never Be Defined". Space.com.*](#)

3.2. Методы поиска экзопланет

Метод Доплера

Спектрометрическое измерение радиальной скорости звезды позволяет обнаруживать планеты с массой не меньше нескольких масс Земли, расположенные в непосредственной близости от звезды, и планеты-гиганты с периодами обращения до 10 лет. Планета, обращаясь вокруг звезды, как бы раскачивает её, и мы можем наблюдать доплеровское смещение спектра звезды. Метод позволяет определять амплитуду колебаний радиальной скорости для пары «звезда — одиночная планета», массу планеты, период обращения, эксцентриситет и нижнюю границу значения массы экзопланеты.

Был предложен в 1952 году американским астрономом русского происхождения Отто Струве. Это самый распространённый метод обнаружения экзопланет.

Именно этим способом была обнаружена в 1992 году первая подтверждённая экзопланета у нейтронной звезды PSR 1257+12 (Александр Вольщан, Д. Фрейл).

На ноябрь 2011 года с помощью этого метода обнаружено 647 планет.

Транзитный метод

Метод основан на наблюдении уменьшения светимости звезды при прохождении планеты на её фоне. Позволяет определить размеры планеты, а в сочетании с методом Доплера — плотность планеты. Даёт информацию о наличии атмосферы и её составе. Следует отметить, что этим методом можно обнаружить лишь те планеты, орбита которых лежит в одной плоскости с точкой наблюдения.

На ноябрь 2011 года с помощью этого метода обнаружено 185 планет.

Метод гравитационного микролинзирования

Если между наблюдаемым объектом (галактикой или звездой) и наблюдателем на Земле наблюдается другая звезда, она выступает в роли линзы и фокусирует 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 с помощью этого метода было открыто 13 планет.

Астрометрический метод

Этот 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.

Радионаблюдение пульсаров

Если вокруг пульсара вращаются планеты, излучаемый пульсаром сигнал имеет осциллирующий характер. Мощные направленные пучки излучения пульсара 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 (3+2).

Прямые наблюдения

С помощью метода получения прямых изображений экзопланет получено изображение четырёх планет системы HR 8799. Метод даёт наилучшие результаты для планет, удалённых от звезды на ~ 10 — 100 а.е. и горячих из-за тепла, оставшегося после их образования, метод применяется для поиска планет около молодых звёзд.

Переменная частота пульсаций звезд

Подобно пульсарам, существуют и некоторые другие типы звезд, которые проявляют периодическую активность. Отклонения от периодичности иногда могут быть вызваны вращающейся вокруг нее планетой. По состоянию на 2013 год с помощью этого метода было открыто несколько планет.

Модуляции отражения/излучения

Когда планета подходит очень близко к звезде, она улавливает значительное количество звездного света. При вращении вокруг звезды, количество света меняется из-за того, что планеты имеют фазы с точки зрения Земли, или планета светится больше с одной стороны, чем с другой, из-за разницы температур.

Релятивистское излучение

Релятивистское излучение изменяет наблюдаемый поток от звезды, обусловленный ее движением. Яркость звезды меняется по мере того, как планета приближается или удаляется от своей звезды-хозяина.

Эллипсоидальные вариации

Массивные планеты, расположенные близко к своим звездам-хозяевам, могут слегка деформировать форму звезды. Это приводит к тому, что яркость звезды немного отклоняется в зависимости от ее вращения относительно Земли.

Поляриметрия

Поляризованный свет, отраженный от планеты, отделяется от неполяризованного света, излучаемого звездой. С помощью метода было подтверждено существование нескольких уже открытых планет.

3.3. Проект HATNet

HATNet (Hungarian Automated Telescope Network, «Венгерская сеть автоматических телескопов») — сеть из шести небольших полностью автоматических телескопов «НАТ». Цель проекта — поиск и исследование экзопланет транзитным методом, а также поиск и исследование переменных звёзд. Сеть обслуживается Гарвард-Смитсоновским центром астрофизики.

Телескоп «НАТ» (Hungarian-made Automated Telescope, Венгерский автоматический телескоп), был разработан астрономами Венгерской астрономической ассоциации. Проект был начат в 1999 году, а в полную силу вошёл в мае 2001 года.

НАТ-1 был изготовлен в университете Лоранда Этвеша при участии обсерватории Конкоя (Будапешт) под руководством доктора Гезы Ковача (Géza Kovács). При разработке также играли важную роль Йожеф Лазар, Иштван Папп и Пал Сари. Использовали телеобъектив Nikon с фокусным расстоянием 180 мм и апертурой 65 мм.

Телескопы, построенные позже — полностью автоматические инструменты с ПЗС-сенсорами на 2000×2000 пикселей. Один из телескопов НАТ работает в обсерватории Вайза, Израиль. Есть пункты в Австралии, Намибии и Чили.

В рамках проекта HATNet по состоянию на 13 июля 2015 года было открыто 55 экзопланет. Все они представляют собой горячие газовые гиганты, то есть имеют массу, близкую к массе Юпитера, и обращаются очень близко к родительской звезде. Отметим, что планеты WASP-11b/НАТ-P-10b и WASP-49b/НАТ-P-27b были обнаружены практически одновременно с их параллельным открытием в обсерватории SuperWASP, и открытия были опубликованы одновременно. Все планеты были открыты транзитным методом (благодаря прохождению по диску своей звезды).



Рис. HATNet



Рис. SuperWASP

3.4. Телескоп SuperWASP

SuperWASP (англ. Wide Angle Search for Planets, Поиск планет в широком секторе) — телескоп, предназначенный для обнаружения экзопланет транзитным методом.

Проект SuperWASP курируется восемью научно-исследовательскими институтами: Канарским институтом астрофизики (исп. Instituto de Astrofísica de Canarias), Группой телескопов им. Исаака Ньютона (англ. Isaac Newton Group of Telescopes), Килским университетом (англ. Keele University), Университетом Лестера (англ. University of Leicester), Открытым университетом (англ. The Open University), Королевским университетом в Белфасте (англ. Queen's University Belfast) и Сент-Эндрюсским университетом (англ. University of St Andrews).

Телескоп состоит из двух роботизированных обсерваторий: SuperWASP-North в обсерватории Роке-делос-Мучачос на острове Пальма (Канарские острова) и SuperWASP-South, находящейся в Южноафриканской астрономической обсерватории. Каждая обсерватория состоит из набора восьми объективов Canon 200mm f/1.8 с апертурой 111 мм, оснащённых панорамными ПЗС-матрицами. Поле обзора каждого из 8 телескопов 7.8x7.8 градусов. Большое поле обзора обеих обсерваторий позволяет покрывать значительную область неба, что упрощает способ обнаружения объектов. Телескоп непрерывно следит за небом, делая сессию снимков приблизительно раз в минуту; общий объём данных достигает 100 гигабайт за ночь. Определяя блеск звёзд на каждом снимке, можно зарегистрировать небольшое потускнение той или иной звезды, что может означать прохождение («транзит») объекта размером примерно с Юпитер по диску звезды. За ночь телескопы определяют яркость около 100 тысяч звезд на площади 450 квадратных градусов. Этим методом команда астрономов

по состоянию на апрель 2011 года открыла свыше 40 экзопланет. На данный момент SuperWASP — самый успешный из наземных транзитных обзоров.

Открытия команды SuperWASP

26 сентября 2006 года команда SuperWASP сообщила о первом открытии экзопланет — WASP-1 b, вращающейся на расстоянии 6 миллионов километров от материнской звезды каждые 2.5 дня, и WASP-2 b, вращающейся на расстоянии 4.5 миллионов километров от материнской звезды каждые 2 дня.

1 апреля 2008 года команда анонсировала открытие сразу десяти экзопланет.

11 августа 2009 года командой астрономов было анонсировано открытие первой планеты (WASP-17 b), которая движется по орбите с попятным движением, то есть вращается вокруг звезды в направлении, противоположном вращению самой звезды.

В августе 2009 года с помощью телескопа была открыта планета WASP-18 b, близкая к разрушению: приблизительно через 1 миллион лет она будет поглощена родительской звездой.

Наблюдения за планетой WASP-127 b, открытой с помощью телескопа SuperWASP, показали, что она имеет атмосферу, которая почти полностью лишена облаков.

В 2015 году была открыта уникальная кратная система 1SWASP J093010.78+533859.5, состоящая из пяти звёзд. Массы всех звёзд в ней не превосходят массы Солнца. Учитывая, что плоскости вращения компонент совпадают, можно предположить, вся система сформировалась из одного газо-пылевого диска.

3.5. Дифракционная решетка. Справка

В оптике дифракционная решетка представляет собой оптический компонент с периодической структурой, который рассеивает свет на несколько лучей, движущихся под разными углами дифракции.

Джеймс Грегори (1638 – 1675 гг.) наблюдал дифракционные картины, вызванные птичьим пером, что фактически стало первой дифракционной решеткой (в естественной форме), открытой примерно через год после экспериментов Исаака Ньютона с призмой.

Первая искусственная дифракционная решетка была изготовлена около 1785 года изобретателем из Филадельфии Дэвидом Риттенхаусом, который нанизал волоски между двумя винтами с тонкой резьбой. Это было похоже на проволочную дифракционную решетку известного немецкого физика Йозефа фон Фраунгофера, созданную в 1821 году.

Принципы дифракции были открыты Томасом Янгом и Огюстеном-Жаном Френелем. Первым, кто использовал дифракционную решетку для получения линейных спектров, и первым, кто измерил длины волн спектральных линий с помощью дифракционной решетки, стал Фраунгофер.

Решетки с наименьшим расстоянием между линиями (d) были созданы в 1860-х годах Фридрихом Адольфом Нобертом (1806 – 1881 гг.) в Грайфсвальде, затем двумя американцами Льюисом Моррисом Резерфурдом (1816 – 1892 гг.) и Уильямом Б. Роджерсом (1804 – 1882 гг.). К концу 19-го века вогнутые решетки Генри Огастеса Роуланда (1848 – 1901 гг.) стали лучшими из доступных.

Источник

Письмо Джеймса Грегори Джону Коллинзу, датированное 13 мая 1673 года. Перепечатано в: Риго, Стивен Джордан, ред. (1841). Переписка ученых мужей семнадцатого века.... Том. 2. Издательство Оксфордского университета. стр. 251-5. особенно стр. 254

3.6. Решетка Эшелле. Справка

Эшеллеватая решетка (от французского *échelle*, что означает «лестница») — это тип дифракционной решетки, характеризующийся относительно низкой плотностью канавок, форма которых оптимизирована для использования при больших углах падения и, следовательно, при высоких порядках дифракции. Более высокие порядки дифракции позволяют увеличить дисперсию (расстояние) спектральных признаков на детекторе, что позволяет повысить дифференциацию этих признаков. Решетки Эшелле, как и другие типы дифракционных решеток, используются в кросс-дисперсных спектрографах высокого разрешения HARPS, PARAS и других астрономических инструментах.

Концепция решетки с грубыми линейками, используемой под углом наклона, была открыта Альбертом Майкельсоном в 1898 году, где он назвал ее «эшелоном». Однако только в 1923 году спектрометры Эшелле начали приобретать свою характерную форму, в которой решетка с высоким разрешением используется в тандеме со скрещенной решеткой с низкой дисперсией. Эта конфигурация была обнаружена Нагаокой и Мисимой и с тех пор используется в аналогичной компоновке.

Комментарий

PRL Advanced Radial-Speed Abu-sky Search, сокращенно ПАРАС, наземный телескоп с апертурой 1,2 метра, расположенный в Маунт-Абу, Индия. Проект финансируется Лабораторией физических исследований, Индия. Оснащен эшелле-спектрографом. Используется для поиска экзопланет. ПАРАС способен обнаруживать потенциально пригодные для жизни планеты в обитаемой зоне около звезд М-типа.

3.7. Высокоточный эшелле-спектрограф HARPS

High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (HARPS) — высокоточный эшелле-спектрограф, установленный в 2002 году на 3,6-метровом телескопе в обсерватории Ла-Силья в Чили. «Первый свет» был получен в феврале 2003 года. Это спектрограф второго поколения, предназначенный для измерения лучевых скоростей и поиска экзопланет.

Точность лучевых скоростей при измерении HARPS достигает 0,97 м/с (3,5 км/ч). Это один из двух инструментов в мире действующих с такой точностью. Высокая точность достигается благодаря тому, что свет от звезды и торий-аргонной калибровочной лампы наблюдаются одновременно с использованием двух пучков оптоволокну. Беспрецедентной точности также способствуют высокая механическая и температурная стабильность спектрографа. Для этого спектрограф помещён в вакуумную камеру, температура в которой сохраняется с точностью до 0,01 °С. Кроме того, для уменьшения ошибок гидрирования используется двухуровневый световой смеситель.

Инструмент достиг такого уровня точности определения лучевых скоростей, что для некоторых типов звезд возможности поиска планетных систем ограничены звездными пульсациями, а не недостатками самого спектрографа.

Главный разработчик HARPS — Мишель Майор, который является первооткрывателем планет у звёзд солнечного типа. С помощью HARPS была открыта система Gliese 581, которая включает наименьшую известную экзопланету Gliese 581 e и две суперземли, орбиты которых лежат в обитаемой зоне.

На начало 2010 года с помощью HARPS были открыты 75 экзопланет (из 420 известных) в 30 системах.



Рис. Обсерватории Ла-Силья в Чили.

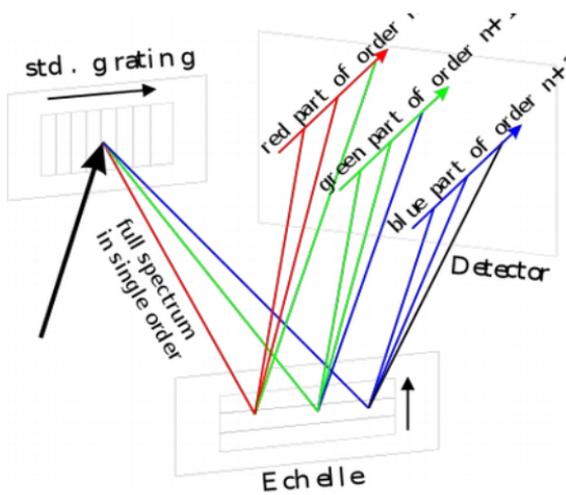


Рис. Решетка Эшелле

3.8. Эшелле спектрограф ESPRESSO

Эшелле спектрограф для скалистых экзопланет и стабильных спектральных наблюдений (англ. Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations) — обладающий высоким разрешением, волоконно-объединённый и кросс-дисперсионный эшелле спектрограф для видимого диапазона длин волн, способный работать в 1-UT режиме (с использованием одного из четырёх телескопов) и в 4-UT режиме (с использованием всех четырёх), для поиска скалистых внесолнечных планет в обитаемой зоне своих звёзд.



Рис. Спектрограф ESPRESSO

Главное достоинство ESPRESSO — спектроскопическая стабильность и точность лучевых скоростей. Технические требования — достичь 10 см/с, но желаемая задача состоит в том, чтобы получить уровень точности в несколько см/с. 27 ноября 2017 года начались тестовые наблюдения ESPRESSO в составе VLT. В декабре 2018 года ожидается ввод инструмента в строй.

3.9. Космический телескоп COROT

COROT (англ. COncvection ROtation and planetary Transits) — космический телескоп, созданный усилиями Национального центра космических исследований Франции (CNES), при участии Европейского Космического Агентства, Австрии, Испании, Германии, Бельгии и Бразилии. Основными задачами телескопа являются поиск экзопланет, в том числе и планет земного типа и изучение внутреннего строения звёзд. Оснащен афокальным телескопом состоящим из двух параболических зеркал с фокусным расстоянием 1,1 м (диаметр входного зрачка 27 см).

27 декабря 2006 года COROT был выведен на орбиту с космодрома Байконур ракетой-носителем «Союз 2-1Б».

20 июня 2013 года миссия была официально объявлена завершённой, 17 июня 2014 года спутник был выключен.

COROT наблюдал за изменением светимости звезды, регулярно возникающим при прохождении перед ней планеты (транзитный метод). Чувствительность прибора оказалась достаточно высока для того, чтобы регистрировать не только «горячие юпитеры», но и каменные планеты, в несколько раз большие Земли.

COROT занимался астросейсмологией, регистрировал изменения яркости света, вызываемые акустическими волнами, прошедшими через поверхность звёзд. Эти измерения позволяют вычислить массу звезды, её возраст и химический состав. Такой метод уже применялся на аппарате SOHO для изучения условий внутри Солнца.

3 мая 2007 COROT начал с открытия планеты COROT-1b. Планета была отнесена к классу «горячих юпитеров». Радиус COROT-1b в 1,78 раз превышает радиус Юпитера. Планета обращается вокруг жёлтого карлика, с периодом примерно 1,5 земных суток. Звёздная система удалена на 1 500 св. лет. Была зарегистрирована астросейсмическая активность родительской звезды планеты. Параметры звёздной системы были определены с ранее недоступной точностью. Всего было открыто 25 экзопланет.

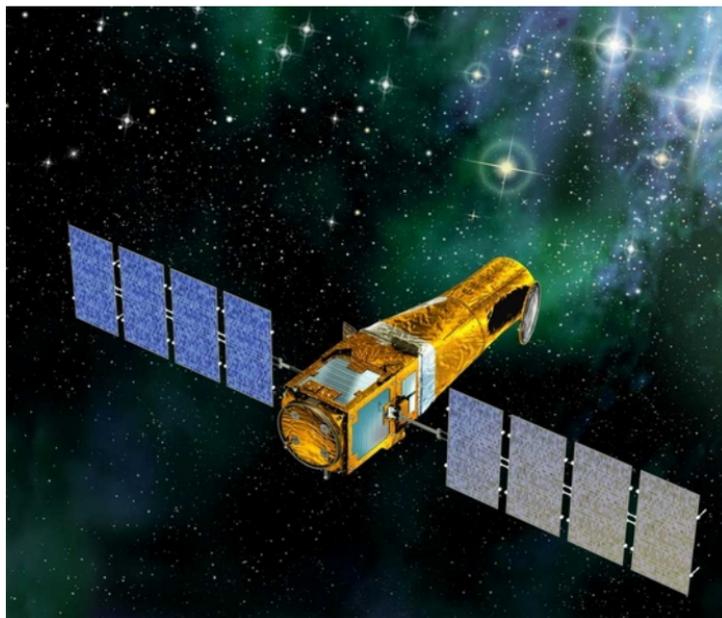


Рис. Космический телескоп COROT



Рис. Космический телескоп «Хаббл»

3.10. Проект SWEEPS

SWEEPS (англ. Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search) — астрономический проект 2006 года по обнаружению экзопланет транзитным методом в центральных областях Млечного Пути.

Большинство звёзд центра Галактики закрыто тёмными туманностями и не могут наблюдаться в видимом диапазоне, только в радиодиапазоне, инфракрасных, рентгеновских и гамма-лучах. Однако, некоторые звезды можно все-таки наблюдать в редких прозрачных зонах. В проекте SWEEPS была выбрана зона, называемая Окном Стрелец-I.

В течение семи дней при помощи телескопа Хаббла проводилась съёмка 180000 звёзд, находящихся на расстоянии примерно в 27 000 световых лет от Земли.

В ходе наблюдений было обнаружено 16 кандидатов с орбитальными периодами от 0,6 до 4,2 суток. Ранее не обнаруживались планеты с периодом менее 1,2 суток, и поисковая команда назвала их «короткопериодические горячие юпитеры». Подобные планеты обнаруживались только у маломассивных звёзд. Из этого следует, что массивные звезды уничтожают близкорасположенные планеты, либо что планеты у небольших звёзд не могут мигрировать столь же далеко как у больших звёзд.

К двум экзопланетам — «горячим юпитерам» SWEEPS-04 и SWEEPS-11 — удалось применить метод радиальных скоростей (получить доплеровский сдвиг в спектре звезды) и получить из него оценку масс планет. Это самые далекие из обнаруженных экзопланет.

Параметры экзопланет

	SWEEPS-04	SWEEPS-11
Период обращения (дни)	4,2 дня	1.796 дней
Масса (масса Юпитера)	<3,8	9.7±5.6
Радиус (радиус Юпитера)	0,81	1.13±0.21

3.11. Космический телескоп «Кеплер»

«Кеплер» — космическая обсерватория НАСА, орбитальный телескоп со сверхчувствительным фотометром, специально предназначенный для поиска экзопланет (планет вне Солнечной системы — у других звёзд), подобных Земле. Это первый космический аппарат, созданный с такой целью. Он назван в честь немецкого математика и астронома Иоганна Кеплера, открывшего законы движения планет. Обсерватория могла одновременно наблюдать более чем 100 тысяч звёзд. Наличие планеты у звезды определяется по периодическим изменениям яркости последней, вызываемым прохождением планеты перед звездой (транзитный метод).

Запуск состоялся 6 марта 2009 года. Созданием и вводом в эксплуатацию управляла «Лаборатория реактивного движения» НАСА, а первичный подрядчик, «Ball Aerospace», был ответственным за разработку систем полета «Кеплера». С декабря 2009 года ответственность за управление миссией легла на Исследовательский центр Эймса, который также проводит анализ научных данных от телескопа.

Принципы работы «Кеплера» отличаются от «Хаббла», запущенного на низкую околоземную орбиту, который можно по команде из центра поворачивать в любую сторону. «Кеплер» вращается вокруг Солнца и нацелен на определенный участок неба — вдоль касательной к нашему рукаву Галактики, примерно перпендикулярно направлению к её центру, но чуть выше плоскости Галактики. Телескоп непрерывно отслеживает этот участок, находя экзопланеты по изменениям интенсивности звезды.

Диаметр «Кеплера» около 2,7 метров и длина около 4,7 метров. Общая масса — 1052,4 килограммов.

Основная программа была рассчитана на 3,5 года. Однако о завершении миссии космической обсерватории

«Кеплер» официальный представитель NASA Пол Херц объявил только 30 октября 2018 года.

Уже 8 апреля 2009 года «Кеплер» передал первый снимок, сделанный неоткалиброванной камерой фотометра. На нём находится около 4,5 миллионов звёзд созвездий Лебедя и Лиры. Несмотря на нечёткое изображение, на фотографии хорошо видны звезда TrES-2 (она имеет, как минимум, одну планету) и рассеянное скопление NGC 6791. До окончания калибровки «Кеплер» также обнаружил атмосферу у планеты — газового гиганта, демонстрируя, таким образом, великолепный потенциал новой обсерватории.

Британские учёные установили, что орбитальный телескоп «Кеплер» способен обнаруживать не только удалённые экзопланеты, но и их спутники. Расчёты показывают, что «Кеплер» теоретически может обнаруживать спутники экзопланет, с массами, превосходящими 0,2 земных.

По состоянию на июль 2015 года подтверждена природа более 1000 планет из около 4700 кандидатов, открытых телескопом. Среди всех кандидатов 49 % имеют размеры меньше, чем 2 размера Земли. Примерно 40 % кандидатов входят в состав многопланетных систем. Кроме кандидатов в планеты, обнаруженных группой учёных Кеплера, некоторые были открыты участниками проекта «Planet Hunters», куда входят также и любители астрономии.

24 июля 2015 года NASA объявило об открытии Kepler-452 b, подтверждённой экзопланеты, имеющей размер с Землю и вращающейся в обитаемой зоне звезды, похожей на наше Солнце. Был выпущен седьмой каталог планет-кандидатов «Кеплера», содержащий 4696 кандидатов, увеличив число кандидатов на 521 относительно предыдущего каталога, выпущенного в январе 2015 года

В частности, «Кеплером» были открыты:

девять многопланетных систем;

две планеты в системах тесных двойных звёзд;

восемь планет в зоне обитаемости;

несколько объектов, которые были признаны звёздами.

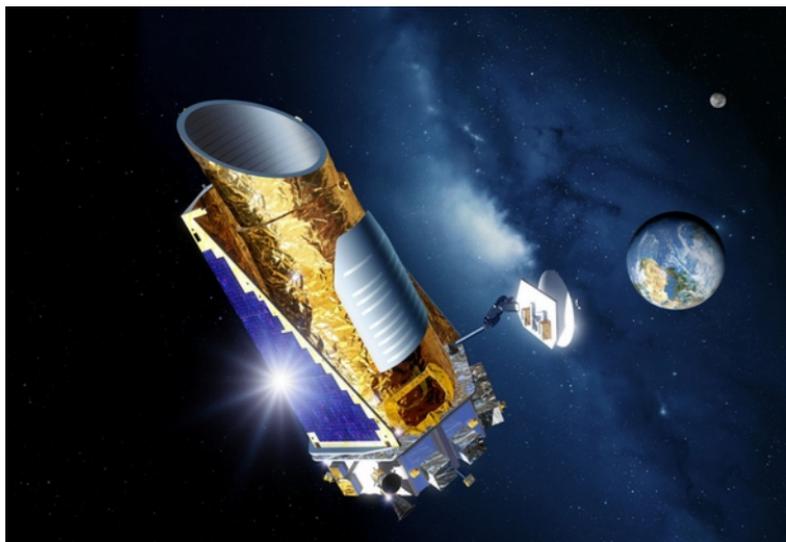


Рис. Космический телескоп «Кеплер»

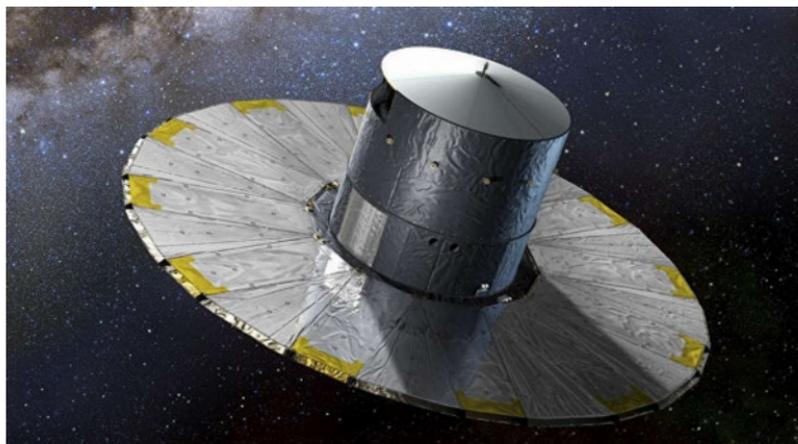


Рис. Космический телескоп Gaia

3.12. Космический телескоп Gaia

Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics; в русской транскрипции Гайя или Гея) — космический телескоп оптического диапазона Европейского космического агентства (ЕКА), преемник проекта «Hipparcos». Главная задача телескопа — составить подробную карту распределения звёзд нашей Галактики.

Разработка миссии Gaia заняла 13 лет и обошлась в 740 миллионов евро. Данные Gaia позволили составить трёхмерную карту части нашей Галактики с указанием координат, направления движения и спектрального класса более чем миллиарда звёзд.

Он был выведен на орбиту ИСЗ 19 декабря 2013 года с космодрома Куру во французской Гвиане, посредством ракеты-носителя «Союз». Менее чем через месяц после запуска он достиг гало-орбиты, расположенной в 1,5 миллионов километров от Земли, около точки Лагранжа L2 системы Земля – Солнце. Миссия Gaia рассчитана на пять лет. На октябрь 2020 года миссия была продлена до конца 2022 года, с возможным продлением до 2025 года.

Важнейшая научная задача экспедиции Gaia заключается в том, чтобы при помощи обследования звёзд прояснить возникновение и развитие нашей Галактики. Собранные Gaia данные позволят астрономам лучше понять, как возникают звёзды и каким образом они насыщают материей пространство вокруг себя когда умирают. Прежде недостижимая точность измерений параллакса, а также собственной и радиальной скорости для одного миллиарда звёзд (это 0,5 % нашей Галактики) даст астрономам более чёткую картину развития и структуры Млечного Пути.

Вторая задача телескопа — открытие экзопланет. Количество возможных кандидатов оценивают в 10 тыс. тел, что в несколько раз больше, чем у телескопа «Кеплера».

3.13. Научные результаты миссии Gaia

Каталог ближайших звезд Gaia (GCNS), является подкаталогом Gaia EDR3 и идентифицирует 331312 объектов в пределах 100 парсеков или 326 световых лет от Солнца. Каталог GCNS удвоил количество объектов, ранее обнаруженных Hipparcos и наземными телескопами, в пределах 25 парсеков, и увеличил в десять раз количество известных звезд в пределах 100 парсеков.

В сентябре 2016 года научной командой Gaia опубликован первый набор данных, составленный по результатам наблюдений за 14 месяцев с июля 2014 по сентябрь 2015 года. В данном наборе опубликованы координаты (с точностью около 10 mas) и яркость 1,1 миллиарда звёзд, а также рассчитаны подробные параметры для более чем 2 миллионов звёзд, общих для Gaia и каталога Tycho-2 (TGAS — Tycho-Gaia Astrometric Solution), с точностью позиций в $0,3 \pm 0,3$ mas и точностью определения собственного движения 1 mas в год. В составе набора DR1 также зафиксированы кривые блеска около 3 тыс. цефеид и звёзд типа RR Лиры.

25 апреля 2018 года Европейское космическое агентство на своём сайте сообщило о создании самой детализированной в истории человечества трёхмерной карты нашей галактики, содержащей информацию о точном расположении и передвижении почти 1,7 млрд звёзд, а также о 14 тыс. астероидах Солнечной системы. Второй набор данных (англ. Data Release 2, Gaia DR2) проходил в период с 25.07.2014 по 23.05.2016. Планируется, что Gaia будет передавать информацию на Землю до 2020 года для улучшения трёхмерной карты.

19 сентября 2018 года астрономы объявили об открытии подструктур в Млечном Пути, вызванных гравитационным возмущением, которое произошло 300—900 миллионов лет назад. Гравитационное возмущение произошло в результате столкновения Млечного Пути с галактикой в Стрельце.

20 сентября 2018 года была опубликована работа на основе данных телескопа Gaia, в которой объявлено об открытии звёзд, прибывших в Млечный Путь извне.

В ноябре 2018 года был открыт новый спутник Млечного Пути — галактика Насос 2. По размеру она схожа с Большим Магеллановым Облаком, хотя в десять тысяч раз более тусклая. Она в 100 раз более рассеянная, чем так называемые ультрадиффузные галактики.

К августу 2019 года учёные из Санкт-Петербургского государственного университета проанализировали информацию, полученную от европейского космического телескопа Gaia, и уточнили данные о движении и точном местоположении нескольких миллионов звёзд.

В декабре 2019 года было обнаружено звёздное скопление Прайс-Уилан 1. Возраст вновь открытого скопления составляет 117 миллионов лет и оно находится на окраине Млечного пути, вблизи Магелланового газового потока, соединяющего Млечный путь с Большим и Малым Магеллановыми Облаками. Учёные смогли уточнить расстояние до Магелланова потока, которое до сих пор было трудно оценить. Согласно этим новым данным, расстояние до края Магелланова потока составляет около 90 тысяч св. лет — что примерно вдвое меньше, по сравнению с предыдущими оценками.

В январе 2020 года обнаружена «волна Рэдклиффа» — мощный поток из газа и новорождённых звёзд.

3 декабря 2020 года был опубликован третий набор данных Gaia EDR3, составленных по результатам наблюдений за 34 месяца с 25 июля 2014 года по 28 мая 2017 года. Данный набор содержит информацию о точном расположении и передвижении 1,8 миллиард звёзд.

Около сорока карликовых галактик, обнаруженных с помощью космического телескопа Gaia в пределах 1,4 миллиона св. лет от Млечного Пути, движутся намного быстрее, чем другие галактики. Скорости этих галактик говорят о том, что они приблизились к Млечному Пути около 2 миллиардов лет назад.

13 июня 2022 года опубликован второй набор данных третьего каталога (Data Release 3, Gaia DR3).

3.14. Космический телескоп TESS

TESS (англ. Transiting Exoplanet Survey Satellite) — космический телескоп, предназначенный для открытия экзопланет транзитным методом, разработан Массачусетским технологическим институтом в рамках Малой исследовательской программы НАСА.

Телескоп был запущен 18 апреля 2018 года на ракетеносителе Falcon 9 и будет проводить, в течение двух лет, всесезонные исследования с целью более подробного изучения ранее открытых и обнаружения ранее неизвестных экзопланет на орбитах вокруг ярких звёзд.

Стоимость проекта 378 миллионов долларов.

Основная цель миссии состоит в нахождении каменных экзопланет, попадающих в обитаемую зону и удалённых от Земли не более чем на 200 световых лет. Телескоп «Кеплер» проводил исследования объектов на удалении до 3000 световых лет, вследствие чего тусклость большинства открытых им миров не позволяет даже самым современным наземным телескопам измерить их радиальную скорость.

Предполагается, что TESS откроет более 20 тысяч транзитных экзопланет, из которых 500-1000 будут планетами земного и суперземного типов с орбитальными периодами до 10 месяцев. Для этого будут исследованы ближайшие к Земле 500 тысяч звёзд спектральных классов G, K и M ярче 12 величины и около 1000 ближайших красных карликов, разбросанных по всему звёздному небу. В отличие от «Кеплера», исследования которого были ограничены небольшой областью небесной сферы, площадь покрытия увеличится более чем в 400 раз.

Предполагается, что TESS откроет 70 планет в обитаемой зоне, все из которых будут вращаться вокруг красных карликов, а 11 из этих 70 будут иметь радиус не более 2 радиусов Земли. Хотя космический телескоп откроет не только экзопланеты земного типа, но и газовые гиганты.



Рис. Космический телескоп TESS

3.15. Энциклопедия внесолнечных планет

The Extrasolar Planets Encyclopaedia (Энциклопедия внесолнечных планет) — сайт, основанный Жаном Шнайдером в Мёдонской обсерватории (Париж, Франция) в феврале 1995 года, который поддерживает базу данных всех известных в настоящее время экзопланет и кандидатов в экзопланеты, с отдельными страницами для каждой планеты и интерактивным табличным каталогом. База данных постоянно обновляется с учётом новых сведений из рецензируемых публикаций и конференций.

На страницах каталога планеты перечисляются вместе с их основными свойствами, такими как год открытия планеты, масса, радиус, сидерический период, большая полуось, эксцентриситет, наклонение, долгота восходящего узла, включая диапазоны ошибок.

Отдельные страницы о планетах содержат данные о родительской звезде, такие как название, расстояние (пк), спектральный класс, эффективная температура, видимая звёздная величина V , масса, радиус, возраст, прямое восхождение, склонение. Даже когда они известны, не все эти цифры приведены в таблице интерактивного каталога. И многие отсутствующие цифры планеты, которые просто требуют применения третьего закона Кеплера, остаются пустыми. В частности, на всех страницах отсутствует светимость звезды.

В интерактивном каталоге, где данные перечислены в виде электронной таблицы, не указаны диапазоны значений ошибок. За точным значением данных и спектра ошибок следует обращаться к отдельным страницам.

Например, планета GQ Lup b указана как объект в 21,5 массы Юпитера, в то время как ошибка составляет $\pm 20,5$, а масса объекта лежит между 1 и 42 масс Юпитера.

3.16. Жан Шнайдер

Жан Шнайдер — французский астрофизик, работающий в Парижской обсерватории. Известен своими теоретическими и наблюдательными работами, связанными с исследованиями экзопланет. Создатель Энциклопедии внесолнечных планет.

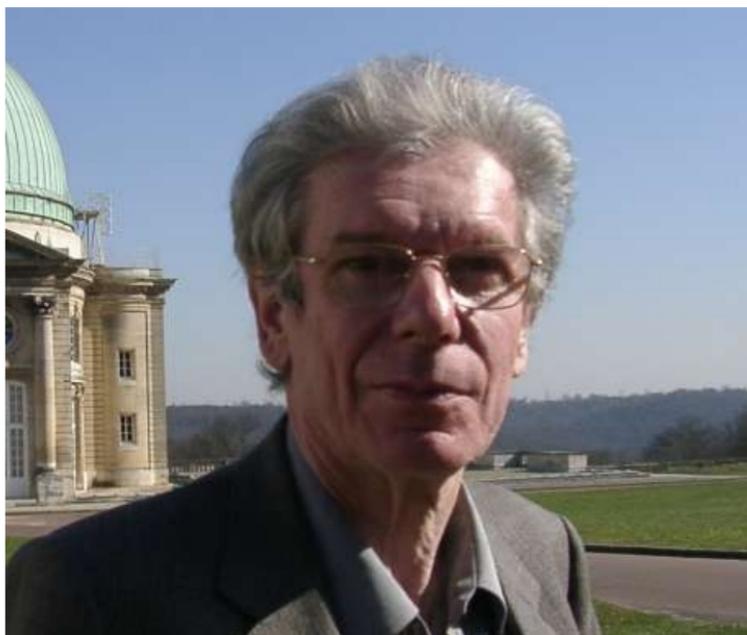


Рис. Жан Шнайдер

Родился 7 мая 1941 года. С 1966 по 1971 год он работал в CNRS и CERN, занимаясь физикой высоких энергий и релятивистской астрофизикой, в частности, космологией и пульсарами. С 1988 года Шнайдер занимается

эпистемологией — вопросами философии времени и языка и основаниями квантовой физики. Кроме того, его заинтересовала экзобиология. В конце 1980-х годов, работая в Laboratoire Univers et Théories (Лют, Париж), он специализировался на изучении экзопланет в то время, когда «в отсутствие ощутимых ключей большинство астрономов пришли к выводу, что они просто не существуют». В 1988 году Шнайдер первым — одновременно с американским астрофизиком Уильямом Боруки — предложил применять метод транзитов для обнаружения экзопланет.

Он писал: «Я предполагаю, что планета, проходящая перед своей звездой, вызовет изменение блеска этой звезды, и это будет периодически повторяться каждый раз, когда планета проходит перед своей звездой. Кроме того, сосредоточившись на части космоса, скажем, на поле, состоящем из тысячи звезд, мы смогли бы идентифицировать эти вариации и, следовательно, возможные экзопланеты».

Именно с помощью этого метода, Мишель Майор и его сотрудник Дидье Кело открыли первую экзопланету 51 Pegasi b. Шнайдер первым додумался использовать французский спутник CoRoT для обнаружения экзопланет, что позволило открыть около тридцати из них.

С 1999 года Шнайдер применяет свои теории к поиску спутников, вращающихся вокруг экзопланет. Некоторые из них могут оказаться такими же или даже более пригодными для жизни, чем экзопланеты. Он разработал методы обнаружения колец вокруг планет и анализа атмосфер небесных тел.

В 1995 году Шнайдер создал Энциклопедию внесолнечных планет, в которой перечислены все идентифицированные экзопланеты по критериям обитаемости. Эта международная база данных позволяет исследователям проверять некоторые из своих теорий.

3.17. NASA Exoplanet Archive

NASA Exoplanet Archive — база данных экзопланет NASA, доступная на сайте Института NASA по изучению экзопланет на базе Калифорнийского Технологического института — проект онлайн-каталога экзопланет, запущенный в 2011 году.

Исполнительный директор проекта — Чарльз Байчман (Charles A. Beichman).

По данным на октябрь 2020 года база содержит данные о более, чем 4280 подтверждённых внесолнечных планетах.

Каталог данных, представленный в виде таблицы, содержит несколько групп параметров.

Первая группа включает в себя параметры, выводимые по умолчанию для посетителя сайта. Среди этих параметров: идентификатор родительской звезды, метод открытия планеты, число планет в планетной системе данной звезды, орбитальный период планеты, размер её большой полуоси орбиты, эксцентриситет, наклонение, масса планеты или нижняя оценка массы, радиус планеты, её средняя плотность; далее — экваториальные координаты родительской звезды, расстояние до звезды, звёздная величина в оптическом диапазоне (с уточнением, в какой именно полосе данная величина получена); здесь же — эффективная температура звезды, масса звезды, радиус звезды и дата последнего обновления данных о планете.

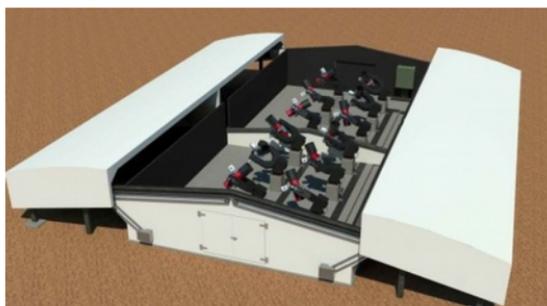
Другие группы параметров содержат более детальную информацию о планете и данных по её обнаружению.

Кроме каталога подтверждённых планет на сайте NASA Exoplanet Archive доступны различные данные миссии Kepler, а также других транзитных миссий (CoRoT, KELT, SuperWASP, HATNet).

3.18. На Паранале появилась система телескопов для поиска экзопланет

Январь 2015, пресс-релиз ESO Паранал,
Сайт «Солнечная система. Секция Совета РАН по космосу»

В обсерватории ESO Паранал, Чили, проведены тестовые наблюдения с помощью комплекса NGTS (Next-Generation Transit Survey), состоящего из 12 широкоугольных телескопов с апертурой 20 сантиметров.



NGTS разработан международным консорциумом для наблюдения транзитов (перемещений) экзопланет, не превышающих размерами Нептун, по дискам своих звезд.

В Консорциум NGTS входят Уорвикский университет, Королевский университет в Белфасте, Лестерский университет, Кембриджский университет (все — Великобритания), Женевский университет (Швейцария) и Аэрокосмический центр DLR (Берлин, Германия).

Комплекс NGTS спроектирован для работы в полностью автоматическом режиме. Предполагается, что точность измерения блеска звезд составит одну тысячную долю звездной величины — такой точности некогда еще не удавалось достичь с наземными широкоугольными инструментами. У космического телескопа «Кеплер» более высокая точность измерений яркости звезд, но меньшее поле зрения, поскольку «Кеплер» ориентирован на регистрацию транзитов планет размера Земли, то есть меньших, чем предполагается обнаруживать с NGTS.

Часть 4. Классификация экзопланет по Сударскому

4.1. Классификация экзопланет по Сударскому

Планетарные классы

виды экзопланет

4.2. Класс I. Аммиачные облака

Экзопланета 47 Большой Медведицы с

4.3. Класс II. Водные облака

4.4. Экзопланета HD 28185 b

4.5. Класс III. Безоблачные

4.6. Класс IV. Планеты с сильными линиями спектров щелочных металлов

4.7. Класс V. Кремниевые облака

4.1. Классификация экзопланет по Сударскому

Классификация экзопланет по Сударскому — система классификации внешнего вида экзопланет-гигантов в зависимости от температуры их внешних слоев. Описание экзопланеты базируется на теоретической модели поведения атмосферы газового гиганта и данных о её химическом составе. Учитываются также альbedo и известные спектры отражения экзопланет-гигантов.

В рамках данной классификации газовые гиганты делятся на пять классов в зависимости от степени разогрева, и обозначаются римскими цифрами. Система была предложена Давидом Сударским (с соавторами из Аризонского университета) в работе 2000 года «Albedo and Reflection Spectra of Extrasolar Giant Planets». И развита в работе 2003 года «Theoretical Spectra and Atmospheres of Extrasolar Giant Planets».

Планетарные классы

Класс I. Аммиачные облака

Класс II. Водные облака

Класс III. Безоблачные

Класс IV. Планеты с сильными линиями спектров щелочных металлов

Класс V. Кремниевые облака

Выделяют следующие виды экзопланет:

Газовые экзопланеты:

холодный юпитер;

горячий юпитер;

рыхлая планета;

холодный нептун;

горячий нептун;

гелиевая планета;
водный гигант;
ледяной гигант;
супер-юпитер;
эксцентрический юпитер;
планета-сирота (газовая).

Экзопланеты земного типа:

суперземля;
мегаземля;
миниземля;
планета-океан;
хтоническая планета;
безъядерная планета;
железная планета;
углеродная планета;
планета, покрытая лавой;
пустынная планета.
планета-сирота (скалистая)
супер-Ио
супер-Венера

Аналогия с газовыми гигантами Солнечной системы подходит далеко не для всех экзопланет-гигантов, поскольку большинство известных экзопланет не похожи на Юпитер или Сатурн, и относятся преимущественно к классу «горячий юпитер». Как указано выше, свойства некоторых экзопланет были изучены напрямую благодаря их прохождению (транзиту) на фоне диска звезды. Изучение одной из таких планет, HD 189733 b, показало, что она синего цвета с альбедо больше 0,14.

В Солнечной системе класс I имеют Юпитер и Сатурн. Классификация Сударского не распространяется на ледяные планеты (такие как Уран или Нептун, имеющие соответственно 14 и 17 земных масс), «сверхземли» и другие каменные планеты (примерами служат Земля и OGLE-2005-BLG-390L b, масса которой 5,5 земных масс).

4.2. Класс I. Аммиачные облака

У планет этого класса доминируют аммиачные облака, и эти планеты находятся во внешних регионах своей звёздной системы. Условием существования для этого класса планет является температура ниже -120 °С. Расчётное альbedo для планет класса I вокруг звезды-аналога Солнца составляет 0,57. Это заметно выше альbedo Юпитера или Сатурна (соответственно 0,343 и 0,342). Разница объясняется наличием фосфорных соединений в атмосферах газовых гигантов в Солнечной системе, которые не учитываются в расчётах.

Температуры, при которых могут образовываться планеты этого класса, определяются или слабой звездой (красным карликом), или большим расстоянием до более яркой звезды, не менее 5 а. е.. Впрочем, если масса планеты достаточно велика, она может самостоятельно разогреваться и перейти в другой класс.

В 2000 году не было известно ни одной планеты класса I кроме Юпитера и Сатурна. Позднее были обнаружены экзопланеты, которые могут соответствовать классу I. Это 47 Большой Медведицы с, Мю Жертвенника е, HD 154345 b и многие другие.

Комментарий

47 Большой Медведицы с, или Тафао Кае, — экзопланета, вращающаяся вокруг жёлтого карлика 47 UMa, на расстоянии примерно в 45,9 световых лет от Солнечной системы. Об открытии в системе 47 UMa второй планеты гиганта было объявлено в 2001 году.

Минимальная масса экзопланеты 0,76 массы Юпитера. Она обладает почти круговой орбитой (эксцентриситет менее 0,1). Период обращения 2594 суток (7,1 года), большая полуось орбиты 3,73 а. е.. Планета принадлежит к классу «холодных юпитеров».

4.3. Класс II. Водные облака

Поскольку для формирования аммиачных облаков температура газовых гигантов II класса слишком высокая, то для них характерны водные облака. Температура этих планет должна быть примерно -20°C . Водные облака очень хорошо отражают свет, и альbedo водного гиганта может превышать 0,81. Облака на этих экзопланетах во многом похожи на земные, но кроме них в атмосфере много водорода и метана, что принципиально отличает их атмосферу от земной. Планеты этого типа — это газовые гиганты, расстояние которых до звезды или равно расстоянию от Земли до Солнца или немного больше. В Солнечной системе водный гигант должен был бы располагаться на расстоянии примерно 1,2 а.е. от Солнца. Планеты этого типа в Солнечной системе отсутствуют, а среди экзопланет во II класс включают 47 Большой Медведицы b (см. 1.16) и Иpsilon Андромеды d (см. 1.20). Впрочем, последняя в перигелии находится на расстоянии от светила, соответствующем III классу. К классу II относят планету HD 28185 b, поскольку орбита этой планеты находится в центре «зоны жизни».



Рис. Экзопланета 47 Большой Медведицы b

4.4. Экзопланета HD 28185 b

HD 28185 b — экзопланета, расположенная на расстоянии 128,6 св. лет от Земли в южном созвездии Эридана.

Планета была открыта возле солнцеподобной звезды HD 28185 в апреле 2001 года в рамках исследования спектрографа CORALIE для поиска внесолнечных планет в Южном полушарии. Ее существование было независимо подтверждено в рамках Программы поиска планет с помощью Магеллановых телескопов в 2008 году. HD 28185 b вращается вокруг своего солнца по круговой орбите, которая находится на внутренней границе зоны обитаемости звезды.

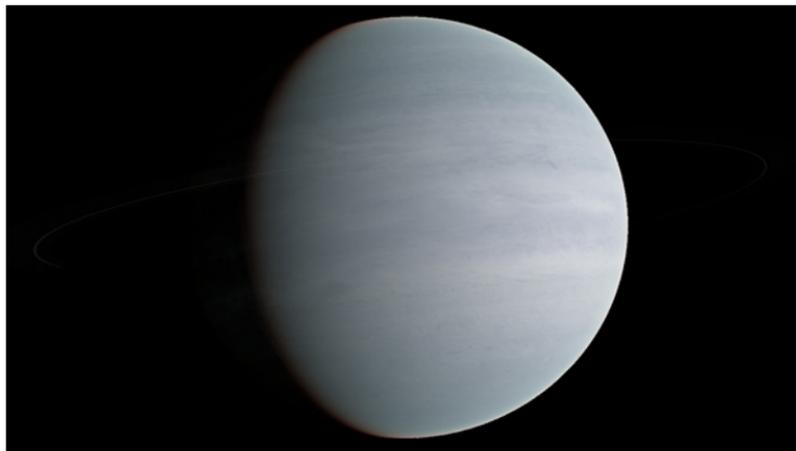


Рис. Экзопланета 28185 b

HD 28185 b была открыта путём обнаружения небольших периодических изменений лучевой скорости её материнской звезды, вызванных гравитационным притяжением планеты. Это было достигнуто путём измерения доплеровского сдвига спектра звезды. В 2001

году было объявлено, что HD 28185 демонстрирует колебание вдоль линии видимости с периодом 383 дня и амплитудой, указывающей на минимальную массу, в 5,72 раз превышающей массу Юпитера.

HD 28185 b требуется 1,04 года, чтобы совершить полный оборот вокруг своей звезды. В отличие от большинства известных планет с большим периодом, орбита HD 28185 b имеет низкий эксцентриситет, сравнимый с эксцентриситетом Марса в Солнечной системе. Орбита полностью находится в зоне обитаемости.

Метод лучевых скоростей даёт только минимальное значение для массы планеты, в зависимости от наклона орбиты к лучу зрения. Следовательно, истинная масса планеты может быть намного больше, чем этот нижний предел.

Учитывая большую массу, эта планета, скорее всего, газовый гигант без твёрдой поверхности. Поскольку планета была обнаружена только косвенно, посредством наблюдений за звездой, такие её свойства, как радиус, состав и температура неизвестны.

После того, как стало понятно, что HD 28185 b вращается в обитаемой зоне, некоторые ученые размышляют о возможности жизни в мирах в системе HD 28185. Вероятно, сама планета является газовым гигантом II-го типа по Сударскому с облачным покровом из водяного льда и потенциально способна иметь массивные обитаемые спутники.

Моделирование приливных взаимодействий позволяет предположить, что вокруг HD 28185 b могут уже несколько миллиардов лет иметь спутники с массами равными массе Земли. Такие спутники экзопланеты, если они действительно существуют, могут быть в состоянии обеспечить среду, подходящую для возникновения жизни.

Планеты с меньшей массой, расположенные в точках Лагранжа газового гиганта, будут стабильными в течение длительных периодов. Такие сценарии становятся более вероятными, если масса HD 28185 b окажется более шести масс Юпитера.

4.5. Класс III. Безоблачные

Планеты, температура поверхности которых варьирует от 80 °С до примерно 530 °С, лишены облачного покрова, поскольку для образования водных облаков там слишком тепло, и облакам просто не из чего образовываться. Вид этих планет голубо-синий, безликий, похожий на Уран или Нептун. Синий цвет обусловлен наличием метана и рэлеевского рассеяния в атмосфере этих планет.

Таким экзопланетам присуще сравнительно небольшое альbedo — около 0,12%. В Солнечной системе газовый гигант этого типа должен был бы располагаться примерно на месте Меркурия.

В верхней температурной зоне экзопланет III класса (выше 430 °С) в атмосфере появляются тонкие перистые облака, состоящие из хлоридов и сульфатов. Типичным представителем этого типа в настоящий момент считается 79 Кита b. Вероятно, планетами этого класса являются Глизе 876 b и Ипсилон Андромеды c.

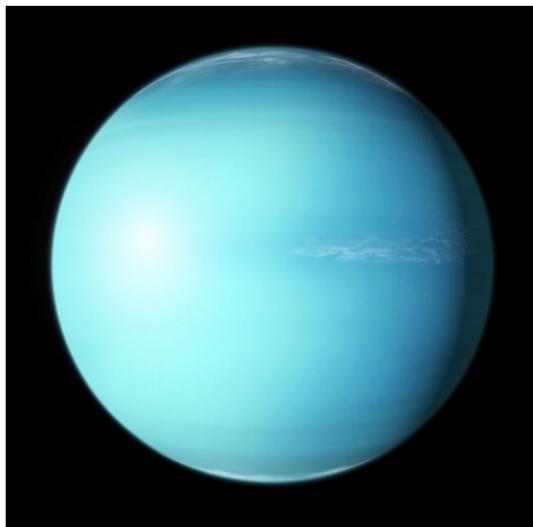


Рис. Экзопланета 79 Кита b

4.6. Класс IV. Планеты с сильными линиями спектров щелочных металлов

При повышении температуры газового гиганта свыше 630 °С доминирующим газом в атмосфере становится диоксид углерода (а не метан). Помимо диоксида углерода, атмосфера этих планет состоит во многом из паров щелочных металлов, которые при таких температурах испаряются, что объясняет наличие их сильных спектральных линий в атмосфере.

Облаков в атмосфере этого типа не очень много, и в основном они состоят из паров железа и силикатов, хотя на спектральные линии это заметно не влияет. Альbedo этих планет очень низкое, и составляет около 0,03%. Рекордсменом является экзопланета TrES-2 b, альbedo этой экзопланеты составляет менее одного процента, а по наиболее вероятной модели и вовсе лишь 0,04% (для сравнения, альbedo сажи составляет 1%). Оно объясняется сильным поглощением света щелочными металлами в атмосфере.

Цвет экзопланет IV класса обычно серый, с небольшим оттенком розового. Поскольку температура планеты достаточно высока, чтобы она светила. Планеты этого класса весьма близки к своим светилам и, как правило, относятся к «горячим юпитерам»; так, в солнечной системе, газовый гигант должен был бы находиться значительно ближе к Солнцу нежели Меркурий (на расстоянии около 0,1 а. е.).

Типичным представителем планет IV класса является 55 Рака b. Также к IV классу относятся многие известные «горячие юпитеры», например HD 209458 b (Осирис), и другая известная планета этого класса — HD 189733 A b (первая планета, для которой была составлена карта температуры поверхности). Верхняя температурная граница для планет этого класса составляет примерно тысячу градусов по Цельсию.

4.7. Класс V. Кремниевые облака

Очень горячие газовые гиганты, температура которых превышает 1100 °С, или же менее массивные и менее плотные планеты при несколько меньших температурах. Планеты класса «Кремниевые облака» имеют сплошные облака, состоящие из паров железа и силикатов. Благодаря наличию таких облаков альbedo планет достаточно высоко, и составляет 0,55%. К V классу относятся известные короткопериодические «горячие юпитеры». Такие планеты столь близки к своим звёздам, что не только интенсивно отражают свет звезды, но и сами светятся красно-оранжевым светом. Они могут быть найдены с помощью земных телескопов, и теоретически могли бы визуальнo наблюдаться, если звезда, содержащая такую планету, имеет видимый блеск ниже +4,5m. Однако на практике они видны не будут, так как их свет будет подавляться блеском материнской звезды. Цвет таких планет зеленовато-серый. Планет такого класса известно довольно много, так как их проще обнаружить. В Солнечной системе планета этого класса должна была бы находиться на расстоянии примерно 0,04 а. е. от Солнца. Самой известной планетой (и первой обнаруженной у обычных, «нормальных» звёзд) этого класса является 51 Пегаса b.

Комментарий

В 2013 году впервые смогли определить цвет экзопланеты. Наиболее точные измерения альbedo HD 189733b показывают, что она темно-синего цвета. Позже, в том же году, были определены цвета нескольких других экзопланет, в том числе GJ 504 b, которая визуальнo оказалась пурпурной, и Карра Andromedae b, которая при ближайшем рассмотрении будет казаться красноватой. Ожидается, что гелиевые планеты будут белыми или серыми по внешнему виду.

Часть 5. Современная классификация экзопланет

- 5.1. Холодные юпитеры
- 5.2. Экзопланета Эпсилон Эридана b или Эгир
- 5.3. Горячие юпитеры
- 5.4. Короткопериодические горячие юпитеры
- 5.5. Экзопланета KELT-9 b
- 5.6. Рыхлая планета
- 5.7. Холодные нептуны (или ледяные гиганты)
- 5.8. Гелиевые экзопланеты
- 5.9. Гиганты с облаками из водяного пара
- 5.10. Супер-юпитеры
- 5.11. Эксцентрические юпитеры
- 5.12. Планеты-сироты
- 5.13. Супер-Ио
- 5.14. Экзопланета CoRoT-7 b
- 5.15. Экзопланета Глизе 876 d
- 5.16. Супер-Венеры
- 5.17. Экзопланета Глизе 832 c
- 5.18. Экзопланета Kepler-69 c

5.1. «Холодные юпитеры»

«Холодный юпитер» — класс экзопланет-гигантов с массой около массы Юпитера и находящихся на таком расстоянии от своей звезды, что большую часть тепла планета получает в результате внутренних процессов, а не от звезды. Орбита такой планеты находится на большом расстоянии от звезды. Иногда этот класс экзопланет называют двойниками Юпитера.

Типичными представителями планет являются Юпитер и Сатурн в Солнечной системе, поэтому их считают эталонными образцами. По классификации Сударского, к этому классу относятся планеты класса I. Известных внесолнечных планет этого класса немного, так как большое расстояние до звезды (или малая светимость звезды) делает трудным их обнаружение.

Примерами холодных юпитеров считаются:

47 Большой Медведицы b (см. 1.16);

47 Большой Медведицы c (см. 4.2);

47 Большой Медведицы d — экзопланета, которая обращается вокруг жёлтого карлика 47UMa, находящегося примерно в 49 световых годах от Солнечной системы.

В марте 2010 года была открыта третья планета возле звезды 47 Большой Медведицы — «холодный юпитер» на широкой орбите с минимальной массой 1,6 масс Юпитера. Период обращения 14002 суток (38,4 года), большая полуось орбиты 11,6 а. е.

Доказательства существования этой планеты были обнаружены с помощью байесовской периодограммы Кеплера в марте 2010 года.

HD 190360 c (Глизе 777 c) — вторая открытая экзопланета в планетной системе звезды HD 190360, расположена в 52 световых годах в созвездии Лебедя.

Была обнаружена в июне 2005 года методом Доплера. Минимальная масса в 18 раз больше Земли, планета относится к классу «холодных юпитеров».

HD 204941 b — экзопланета у звезды HD 204941, находится на расстоянии 88 световых лет в созвездии Козерога. Родительская звезда является оранжевым карликом спектрального класса K2V.

Планета HD 204941 b имеет массу 0,266 массы Юпитера. Была открыта в 2011 году группой астрономов, работающих со спектрографом HARPS методом Доплера.

5.2. Экзопланета Эпсилон Эридана b или Эгир

Эпсилон Эридана b или Эгир — экзопланета, обнаруженная у подобной Солнцу звезды Эпсилон Эридана, находящейся на расстоянии примерно 10,5 световых лет от Солнечной системы в созвездии Эридан.

Впервые существование экзопланеты возле звезды Эпсилон Эридана предсказали ещё в начале девяностых Брюс Кэмпбел и Гордон Уокер, но их наблюдения не позволяли сделать твёрдых выводов об орбите и свойствах планеты.

В 2000 году об обнаружении юпитероподобной планеты Эпсилон Эридана b с массой $1,2 \pm 0,33$ массы Юпитера, вращающейся вокруг звезды на среднем расстоянии 3,3 а. е. по сильно вытянутой орбите заявила команда Арти Хатзеса. Однако другие наблюдатели, включая Джеффри Марси, считали, что для такого вывода требуется больше информации о поведении доплеровского шума звезды, создаваемого её сильным переменным магнитным полем. Так что существование планеты долгое время оставалось лишь предположением.

Существование экзопланеты подтвердили наблюдения космического телескопа Хаббл.

Предполагаемая масса экзопланеты Эпсилон Эридана b оценивается в $1,55 \pm 0,24$ массы Юпитера, наклонение орбиты $30,1 \pm 3,8^\circ$, эксцентриситет $0,702 \pm 0,039$, большая полуось по уточнённым данным $3,39 \pm 0,36$ а. е., период обращения около 2500 земных дней. Плоскость орбиты планеты параллельна плоскости пылевого диска звезды.

5.3. «Горячие юпитеры»

«Горячие юпитеры» — класс экзопланет с массой порядка массы Юпитера. В отличие от Юпитера, который находится на расстоянии 5 а.е. от Солнца, типичный «горячий юпитер» находится на расстоянии порядка 0,05 а.е. от своей звезды, то есть на порядок ближе, чем Меркурий от Солнца и на два порядка ближе, чем Юпитер. Температура поверхности «горячего юпитера» порядка 1000—1500 К (а иногда и почти до 3000 К), что обусловлено близким расположением к звезде. Высокая температура вызывает дополнительное тепловое расширение, так что радиусы подобных планет больше, чем у аналогичных, но расположенных дальше от родительской звезды газовых гигантов.

Считается, что возле звезды недостаточно материала для образования подобных массивных планет. Возможно, они образовались во внешней части системы, а потом мигрировали к центру из-за торможения в газопылевом диске.

Большую часть первоначально открытых экзопланет были «горячими юпитерами», поскольку их проще всего обнаружить: они вносят заметные короткопериодические возмущения в движение звезды, которые могут быть обнаружены по смещению линий спектра. Кроме того, довольно велика вероятность прохождения планеты перед диском звезды, что позволяет оценить размер планеты по уменьшению светимости звезды. Согласно системе Сударского, «горячие юпитеры» относятся к IV—V классам.

Примерами «горячих юпитеров» считаются:

HD 209458 b (см. 1.22, 1.23).

НАТ-Р-49 b — транзитный «горячий юпитер». Масса планеты оценивается в 1,73 масс Юпитера, а радиус в 1,41 радиуса Юпитера, что приводит к средней плотности 0,75 г/куб.см. Температура планеты более 2000 К.



Рис. «Горячий юпитер»



Рис. Звезда (вид с горячего юпитера)

BD-10°3166 — звезда спектрального класса G в созвездии Чаши, удалена от Солнечной системы на 218 световых лет. Эта звезда насыщена элементами тяжелее водорода и гелия, её металличность в три раза превосходит значение для Солнца. Наличие планет вокруг таких звёзд весьма вероятно, и BD-10°3166 не исключение — в 2000 году исследовательская команда университетов Калифорнии и Карнеги открыла планету, обращающуюся вокруг этой звезды. Обнаруженная у звезды планета по своему типу относится к «горячим юпитерам» и имеет нижнюю оценку массы менее половины юпитерианской (0,458). Период обращения планеты вокруг BD-10°3166 составляет всего 3,49 земных дня. Большая полуось её орбиты составляет $0,0452 \pm 0,0026$ а.е., эксцентриситет — $0,019 \pm 0,023$.

5.4. Короткопериодические горячие юпитеры

Существует подкласс горячих юпитеров, именуемый «короткопериодическими горячими юпитерами». Их еще называют «горячими-горячими юпитерами», то есть наиболее близкие к звёздам «горячие юпитеры». Период вращения таких планет вокруг звезды составляет 1—2 дня, а температура может часто достигать 2000 °C (при этом температура поверхности самой звезды часто лишь в 2—3 раза больше температуры поверхности планеты). Наиболее горячим короткопериодическим горячим юпитером (а также самой горячей известной экзопланетой) с периодом обращения 1,48 суток до недавнего времени считалась планета KELT-9 b, открытая в 2016 году, однако в 2021 году сотрудникам Массачусетского технологического института удалось обнаружить «горячий юпитер» TOI-2109b с периодом обращения всего 16 часов. Этой планете осталось существовать всего несколько миллионов лет, прежде чем приливное торможение вызовет её исчезновение в недрах светила.

5.5. Экзопланета KELT-9 b

KELT-9 b — экзопланета у звезды KELT-9 (HD 195689) в созвездии Лебедя.

Это самая горячая известная экзопланета, «горячий юпитер», температура на её дневной стороне может достигать 4600 К (ок. 4300 ° C), что делает её горячее звёзд спектрального класса M, и даже некоторых звёзд спектрального класса K. Экзопланета KELT-9 b была обнаружена в 2016 году обсерваторией «Kilodegree Extremely Little Telescope».

Экзопланета вращается по орбите вокруг звезды главной последовательности спектрального класса A KELT-9 (HD 195689), находящейся в созвездии Лебедя на расстоянии около 620 световых лет (190 пк) от Солнца.

Орбита экзопланеты находится на расстоянии 0,03 астрономической единицы (4,5 млн км) от родительской звезды, один год (период обращения) составляет 1,48 суток. KELT-9 b примерно в 2,88 раза тяжелее Юпитера.

Температура родительской звезды KELT-9 — 10170 К, что примечательно, поскольку крайне редко удаётся обнаруживать экзопланеты транзитным методом у столь горячих звёзд. До открытия экзопланеты у звезды KELT-9 было известно только шесть звёзд спектрального класса A, имеющих планеты, причём предыдущая звезда-рекордсмен по температуре WASP-33 была почти на 3 тысячи градусов холоднее (всего 7430 К). Используя спектрограф HARPS-North (HARPS-N), установленный на 3,58-метровом итальянском Национальном телескопе Галилео (Galileo National Telescope) в обсерватории Роке-де-лос-Мучачос на острове Пальма (Канарские острова), астрономы обнаружили спектральные линии, соответствующие ионизированным атомам железа (Fe и Fe+) и ионизированному титану (Ti+). На ночной стороне ионизированные атомы железа и титана могут конденсироваться в облака, из которых выпадают металлические дожди.

5.6. Рыхлые планеты

«Горячие юпитеры», вращающиеся вблизи звезд, расширяются под действием энергии, излучаемой их звездой. В особенности это относится к так называемым «короткопериодическим горячим юпитерам». Если масса планеты меньше 2 масс Юпитера и разогрев достаточно велик, то планета не в состоянии силой своей гравитации удерживать не только атмосферу, но и нижележащие свои слои от расширения. Диаметр планеты значительно увеличивается и планету окутывает большое облако газа и пыли. Типичными представителями «рыхлых» планет являются HAT-P-1 b, CoRoT-1 b, TrES-4 A b, и WASP-17 b. Эти планеты были открыты транзитным методом.

Комментарии

HAT-P-1 b — экзопланета на орбите жёлтого карлика ADS 16402 B, находится на расстоянии 450 св. лет от Земли в созвездии Ящерицы. На момент публикации открытия (14 сентября 2006) эта планета имела самый большой радиус и наименьшую плотность среди известных экзопланет.

Планета HAT-P-1 b была обнаружена по незначительному (0,6 %) уменьшению светимости звезды при прохождении планеты по звёздному диску. Позже было измерено изменение радиальной скорости звезды, что позволило оценить массу планеты. Открытие было сделано в рамках проекта HATnet.

HAT-P-1 b состоит из водорода и гелия и относится к классу рыхлых планет. Её период обращения 4,465 дней. Масса оценивается как 0,59 массы Юпитера, а диаметр 1,36 диаметра Юпитера, таким образом, её плотность всего 290 кг/м^3 , в три раза меньше плотности воды.

WASP-17 b. Самым разреженным известным представителем класса «рыхлых планет» считается планета WASP-17 b с массой около половины массы Бпитера, но диаметром почти вдвое больше диаметра Юпитера. Средняя плотность планеты равна $0,1 \text{ г/см}^3$ (порядка 10 % плотности воды), что в 13 раз меньше плотности Юпитера и более чем в 6 раз меньше плотности Сатурна, наименее плотной планеты Солнечной системы.

Об открытии WASP-17 b было объявлено 11 августа 2009 года. Команда исследователей во главе с Дэвидом Андерсоном из Килского университета обнаружила экзопланету транзитным методом с помощью телескопов Южноафриканской астрономической обсерватории в рамках британской программы SuperWASP. Своё название WASP-17 b получила, так как оказалась 17-й по счёту открытой экзопланетой в этой программе.

В 2013 году астрономам при помощи космического телескопа «Хабл» удалось найти в атмосфере планеты признаки водяного пара.

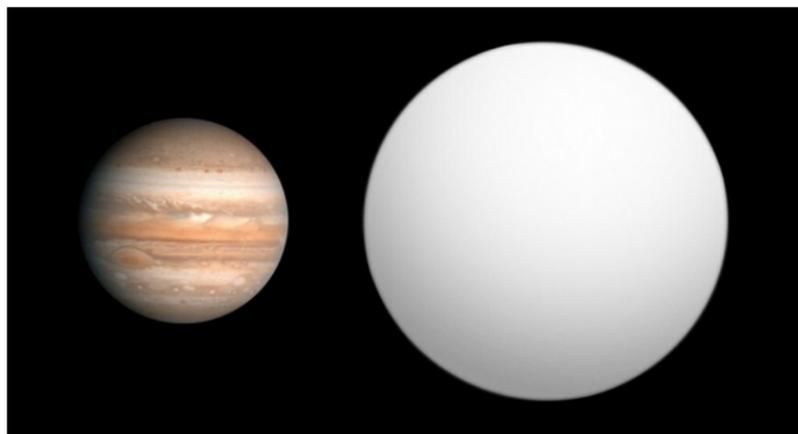


Рис. Сравнение экзопланеты WASP-17 b и Юпитера

COROT-1b (GSC 04804-02268b) — рыхлая экзопланета в 1560 световых лет от Земли в созвездии Единорог. Ее радиус в 1,49 раз больше радиуса Юпитера, а масса больше массы Юпитера приблизительно в 1,03 раза. Большой размер экзопланеты обусловлен низкой плотностью и тем, что родительская звезда сильно ее нагревает, заставляя раздуваться внешние слои атмосферы.

Температура на поверхности планеты не ниже 1500 °С, а период обращения планеты вокруг звезды составляет примерно 1,5 дня. Расстояние до звезды — 0,025 а. е., что делает планету одной из самых близких к своей звезде.

Наклонение орбиты COROT-1b составляет 77 градусов, таким образом, планета вращается почти перпендикулярно экватору звезды.

В мае 2009 года COROT-1b стала первой экзопланетой, для которой были объявлены результаты оптических наблюдений фаз. Эти наблюдения предполагают, что не существует значительного переноса тепла между ночной и дневной сторонами планеты.

TrES-4 A b — рыхлая экзопланета. Редкая планета в двойной системе TrES 4 AB, которая удалена от Земли на 1600 световых лет. Открыта в рамках программы «Trans-Atlantic Exoplanet» (TrES) транзитным методом в 2006 году, об открытии было объявлено год спустя в 2007 году.

Масса экзопланеты 0,917 масс Юпитера при радиусе в 1,706 радиуса Юпитера. Период обращения 3,5 дня. Одна из самых больших из известных экзопланет.

При плотности около 0,33 грамма на кубический сантиметр, TrES-4 A b является типичной рыхлой планетой. Это вызвано крайне высокой температурой (около 1728 К), вызванной близким расположением планеты к своей родительской звезде (0,05 а. е.).

Из-за низкой массы и высокого разогрева экзопланета расширяется и ее окутывает облако газа и пыли. Она не в состоянии удерживать атмосферу, которая, испаряясь, образует хвост, подобный кометному.

5.7. «Холодные Нептуны» (или «ледяные гиганты»)

«Ледяной гигант» — класс планет-гигантов, которые в основном состоят из элементов тяжелее водорода и гелия. В Солнечной системе известны два «ледяных гиганта»: Уран и Нептун.

В астрофизике вещества с температурами замерзания выше или порядка 100 К, в частности воду, метан и аммиак, называют «льдами». По этой причине и за планетами закрепилось название «ледяных гигантов», несмотря на то, что там эти элементы находятся в состоянии сверхкритической жидкости.

Происхождение планет земной группы объясняется аккрецией планетезималей в протопланетном диске, а газовых гигантов — тем же процессом с образованием ядра массой в 10 масс Земли, после которого происходит аккреция окружающего газа.

С «ледяными гигантами» солнечной системы ситуация обстоит гораздо сложнее: подобным процессом объяснить их формирование не получается, в частности, из-за удалённости от Солнца и влияния Юпитера. Так, по одной из гипотез, Уран и Нептун зародились между орбитами Юпитера и Сатурна, после чего были выброшены их гравитацией на более удалённые орбиты. Согласно другой теории протопланетный диск изначально был неоднородным, и на больших расстояниях от Солнца происходила не аккреция, а гравитационный коллапс более плотных сгустков вещества.

«Ледяные гиганты» меньше размером и менее массивны, чем газовые гиганты. Температура на их поверхности не превышает -200 °С. Массовая доля водорода и гелия составляет 15—20%, в то время как у Юпитера и Сатурна (газовых гигантов) — более 90%. У «ледяных гигантов» мантия состоит преимущественно из метана и аммиака. Внутри планет давление достигает сотен гигапаскалей, а температура — нескольких тысяч кельвинов.

Фиксируются магнитные поля. Их напряжённость меньше, чем у магнитных полей газовых гигантов, и все же поля Урана и Нептуна сильнее земного в 50 и 25 раз соответственно. Считается, что магнитные поля таких планет вызываются конвективным движением вещества в мантии.

Внешние слои у «ледяных гигантов» и газовых гигантов имеют много общего. Наблюдаются долгоживущие сильные ветры на экваторе, полярные ячейки и другие явления. Например, на Нептуне наиболее заметным атмосферным явлением было Большое Тёмное Пятно.

Пример «холодного нептона» OGLE-2008-BLG-092L b

OGLE-2008-BLG-092L b — экзопланета у звезды OGLE-2008-BLG-092L в созвездии Стрельца. Планета удалена от Земли на расстоянии 22800 световых лет (7000 парсек).

Родительская звезда является красным карликом спектрального класса M.

Планета OGLE-2008-BLG-092L b — «холодный нептун». Ее масса 46 масс Земли. Она находится очень далеко от звезды, на расстоянии 13 а. е. Эксцентриситет орбиты неизвестен. Планета была открыта в 2014 году методом гравитационного микролинзирования.

«Горячие нептоны»

«Горячий нептун» — класс экзопланет, к которому относятся планеты с массой около массы Урана или Нептуна, которые расположены близко к своей звезде (всегда на расстоянии меньше 1 а.е.). Масса «горячего нептона» состоит из ядра и окружающей плотной атмосферы, которая занимает большую часть размера планеты.

К 2014 году открыто почти 2000 экзопланет, из которых большая часть является «горячими нептонами» и суперземлями.

5.8. Гелиевые экзопланеты

Гелиевая планета — теоретическая разновидность планет, которая образуется из маломассивного белого карлика при потере им массы. Обычные газовые гиганты, такие как Юпитер и Сатурн, состоят в основном из водорода (гелий является лишь вторичной составляющей). В гелиевой же планете водорода нет, поскольку она формируется из звезды, которая переработала весь свой водород в гелий.

Гелиевая планета, по результатам моделирования, должна иметь приблизительно такой же диаметр, как и водородно-гелиевая планета сопоставимой массы. Но гелиевые планеты по своей массе могут превышать Юпитер в 13 раз и не превращаться в коричневые карлики по причине того, что у них нет дейтерия (следовательно, ядерный синтез невозможен).

Комментарий

GD 66 b — экзопланета, обращающаяся вокруг белого карлика GD 66, расположенного в созвездии Возничего. Вероятно, относится к классу гелиевых планет. Открыта методом тайминга звёздных пульсаций в 2007 году.

Материнская звезда удалена от Солнца на 51 пк, её спектральный класс DA, температура поверхности оценивается в 12 тыс. К. С поверхности GD 66 b выглядит, как яркая звезда $-17,8$ звездной величины, то есть примерно в 100 раз ярче полной Луны. Из-за низкой светимости белого карлика на планете царит вечный сумрак. Причина низкой светимости — в большой компактности белого карлика. Его радиус приблизительно равен 0,00825 радиусам Солнца или 0,9 радиусам Земли. Масса белого карлика оценивается в 0,64 массы Солнца. По-видимому, температура внешних слоев планеты низка и определяется в основном внутренним источником энергии.

5.9. Гиганты с облаками из водяного пара

Гигант с облаками из водяного пара (прохладный или водный гигант) — класс экзопланет. Это газовый гигант, обращающийся по эффективной земной орбите или несколько дальше (с радиусом 1-2 а.е.). Соответствует классу II в классификации экзопланет по Сударскому.

Атмосфера водного гиганта состоит в основном из водорода, также присутствует гелий и метан. Атмосфера также может содержать инертные газы, кислород, воду и органические вещества. В атмосфере вероятны облака из водяного льда. Вероятен слой с давлением 1 атм и комфортной температурой. Температура верхнего облачного слоя не превосходит 250 К.

По своему строению водные гиганты, как и другие газовые гиганты, похожи на Юпитер и Сатурн — они в основном состоят из водорода и гелия. Однако гиганты, находящиеся в обитаемой зоне, в отличие от холодных планет-гигантов, скорее всего, окутаны облаками из водяного льда. При обилии воды в составе атмосферы таких планет облачность может быть сплошной, делая планету ярко-белой. При дефиците воды облака из водяного льда будут формироваться только в зонах апвеллинга, при подъёме воздушных масс из глубины. В местах опускания воздушных масс атмосфера будет слишком теплой и сухой для появления облаков, и рэлеевское рассеяние света в прозрачной атмосфере окрасит эти области в голубой цвет. В результате такая планета примет характерный полосатый вид подобно полосатому виду Юпитера, только цвет полос будет белым и голубым.

Существование жизни на газовых гигантах представляется маловероятной. Но если у них есть крупные спутники, по массе близкой к Земле, или планета обладает постоянно облачной атмосферой, то эти спутники и облака потенциально могут быть пригодными для жизни.

5.10. Супер-юпитеры

Супер-юпитер — класс объектов на порядок массивнее Юпитера. Например, звёздные компаньоны, по массе находящиеся на границе между планетами и коричневыми карликами.

На 2011 год науке известно около 180 объектов класса супер-Юпитеров, с различной температурой. Объекты этого класса почти всегда примерно того же размера, что и Юпитер, при этом масса может колебаться от 10 до 80 масс Юпитера. Иногда супер-юпитерами называют объекты и меньшей массы, от 5 до 10 масс Юпитера. Некоторые супер-Юпитеры способны поддерживать реакции термоядерного синтеза с участием дейтерия, и их можно классифицировать как коричневые карлики. Сила тяжести на поверхности и плотность при этом возрастают прямо пропорционально массе. С увеличением массы объект сжимается под воздействием собственной гравитации, что предотвращает его дальнейшее увеличение.

Комментарий

Kepler-419 с (также известна как KOI-1474.02) — экзопланета, обращающаяся вокруг звезды Kepler-419, одна из двух планет у этой звезды, открытых телескопом Кеплер. Расположена в 2544 световых годах от Земли в созвездии Лебеда. Открыта транзитным методом.

Экзопланета Kepler-419 с является супер-Юпитером (она намного больше и массивнее планеты Юпитер). Её равновесная температура составляет 250 К, несколько холоднее, чем равновесная температура Земли. Он имеет массу около 7,2 массы Юпитера, и её вероятный радиус составляет 1,05 радиуса Юпитера.

Планета вращается в зоне обитаемости вокруг жёлто-белого карлика спектрального класса F с температурой поверхности 6430 К, его возраст — 2,8 млрд лет.

5.11. «Эксцентрисические юпитеры»

«Эксцентрисический юпитер» (англ. Eccentric Jupiter) — разновидность газовых гигантов, вращающихся вокруг звезды по сильно вытянутой орбите, имеющей большой эксцентриситет. Примерно такой же эксцентриситет имеют кометы.

Существование каких-либо землеподобных планет в пределах орбиты такого юпитера невозможно вследствие его мощной гравитации, так как она разрушила бы их орбиты. Вокруг самой же планеты могут вращаться спутники, наличие среди них крупных и землеподобных не исключено. Распространённость планет этого класса достаточно высока — 7 % от всех звёзд имеют планету подобного класса. Распространённость горячих юпитеров значительно ниже. Также известны высокоэксцентрисические юпитеры, эксцентриситет которых более 0,6. Из 200 обнаруженных в 2006 году таких планет было 15.

Практически любая планета-гигант с орбитальным периодом свыше 5 дней (то есть не «горячий юпитер») имеет средний эксцентриситет примерно 0,23.

Самую вытянутую орбиту имеет планета HD 80606 b, эксцентриситет которой около 0,933, а год на планете длится 111 дней. Расстояние до своей звезды HD 80606 (жёлтый карлик немного слабее Солнца) варьирует от 0,84 до всего 0,03 а. е. В перигелии планета относится к «горячим юпитерам», в афелии планета лежит в «зоне жизни». В перигелии гипотетическому наблюдателю на планете звезда бы имела угловые размеры в 30 раз больше солнечных. Многие подобные планеты проходят через «зону жизни».

Примером могут служить планеты-гиганты HD 3651b, HD 37605b, HD 45350b, HD 80606b, HD 89744b, 16 Лебеда Bb. Любая жизнь на них (в известных нами формах) существовать не может из-за большого перепада температур, так как в перигелии планета может получать в сотни раз больше тепла, чем в афелии.

5.12. Планеты-сироты

Планета-сирота (другие возможные названия — планета-бродяга, планемо, планета-странник, межзвёздная планета, свободно плавающая планета, свободнолетающая планета, квазипланета или одиночная планета) — межзвёздный объект, имеющий массу, сопоставимую с планетарной, и шарообразную форму и являющийся по сути планетой, но не привязанный гравитационно ни к какой звезде, коричневому карлику или другой планете (хотя может иметь спутники). Если такая планета находится в галактике, она обращается непосредственно вокруг галактического ядра (период обращения обычно очень велик). В противном случае речь идёт о межгалактической планете, и планета не обращается вокруг чего-либо.

Такие планеты могут появляться путём схода с орбиты вокруг звезды в результате какого-либо катаклизма. В возможность формирования таких планет вне связи со звёздами большинство специалистов не верят. Если всё же подобный объект сформировался без материнской звезды, его, по мнению некоторых астрономов, не следует называть планетой: согласно этой позиции, к планетам надо относить лишь те объекты, которые образовались в газопылевом диске вокруг звезды.

Международный астрономический союз предложил относить эти планеты к субкоричневым карликам. Другие астрономы считают, что нужно такие планеты отнести к классу планетар как подвид планеты.

К примеру, газовый гигант с массой меньше коричневого карлика, не имеющий звезды, вокруг которой он вращается, должен определяться не как планета, а как субкоричневый карлик (это класс звёзд, а не планет, хотя в субкоричневых карликах не протекают термоядерные реакции), поскольку механизм формирования таких объектов аналогичен формированию звёзд.

Некоторые астрономы говорят о случаях обнаружения таких планет (например, Хамелеон 110913-773444), но такие случаи не подтверждены. Массы PSO J318.5-22, CFBDSIR 2149-0403 и WISE 0855-0714 подтверждены, и они могут считаться планетами-сиротами, если не классифицировать их как субкоричневые карлики.

Учёные, проанализировавшие более 2,6 тысячи наблюдений странствующих планет, обнаруженных с 2010 по 2015 год в рамках четвёртого этапа проекта OGLE, пришли к выводу, что планеты-сироты, как правило, являются суперземлями.

В 2011 году на основе десяти событий микролинзирования учёные пришли к выводу, что в галактике Млечный путь имеется около 200 млрд планет-сирот. В 2017 году их число сократили вдвое, так как большая часть событий микролинзирования вызывается не планетами-сиротами, а экзопланетами, входящими в состав звёздных систем.

В публикации 2021 года команда астрономов сообщила об открытии в нашей Галактике в созвездиях Скорпиона и Змееносца при помощи нескольких наземных и космических обсерваторий (VLT, VISTA, VST, MPG/ESO и др.) от 70 до 170 (в зависимости от предполагаемого возраста) новых планет-сирот, сравнимых по массе с Юпитером. Эти планеты, скорее всего, сформировались вокруг звезд, но затем были выброшены из своей системы. В Млечном Пути может оказаться несколько миллиардов свободно блуждающих гигантских планет-сирот.

Некоторые экзопланеты, такие как планетоид 2M1207 b (см. 2.2), которое вращается вокруг коричневого карлика, имеют обширное пылевое облако из мелких частиц. Если достаточно большие экзопланеты сформируются вне звезды, то вокруг них могут впоследствии сформироваться спутники поменьше, в том числе планеты земного типа. Такие спутники-планеты не могут быть однозначно причислены как к сиротам, так и полноценным планетам (экзолунам), поскольку материнский объект сам является планетой-сиротой, но механизм формирования не отличается от формирования Солнечной системы.



Рис. Планета-сирота



Рис. Экзопланета CoRoT-7 b

5.13. «Супер-ио»

«Супер-ио» — предполагаемый класс землеподобных экзопланет с повышенной вулканической активностью. Поверхность этих планет непрерывно меняется из-за выбрасываемого вулканами вещества, что напоминает один из четырёх галилеевских спутников Юпитера — Ио, благодаря большому количеству серы на поверхности, что связано с непрерывным активным вулканизмом. За эту схожесть класс экзопланет и получил своё название.

К этому классу могут принадлежать многие планеты, покрытые лавой, но предположены и опубликованы только два кандидата: CoRoT-7 b и Глизе 876 d.

5.14. Экзопланета CoRoT-7 b

CoRoT-7 b (ранее называлась COROT-Ехо-7 b) — экзопланета (суперземля), которая обращается вокруг звезды COROT-7 и находится в созвездии Единорога. Была обнаружена в начале 2009 года космическим аппаратом «COROT». На то время она была самой маленькой из известных экзопланет, её радиус составляет $1,58 \pm 0,1$ земных радиусов. Масса планеты согласно исследованиям равна $7,42 \pm 1,21$ земных масс. Таким образом, средняя плотность планеты оценивается в $10,4 \pm 1,8$ г/см³. Планета расположена очень близко к светилу (0,017 а. е.) и обращается вокруг него за 20 часов, что делает год на этой планете одним из самых коротких из всех известных.

Впоследствии было установлено, что на планете (на её освещённой стороне) находится обширный лавовый океан, который образуется при температуре около +2500—2600 °С. Это выше температуры плавления большинства известных минералов. Атмосфера планеты состоит главным образом из испарившейся породы, и выпадает на тёмную и освещённую сторону каменными осадками. Планета, вероятно, повёрнута к звезде постоянно одной стороной. Условия на освещённой и неосвещённой стороне планеты очень сильно отличаются. В то время как

освещённая сторона представляет собой бурлящий океан, находящийся в непрерывной конвекции, неосвещённая, вероятно, находится на коре застывшей лавы и, возможно, покрыта огромным слоем обычного водяного льда.

5.15. Экзопланета Глизе 876 d

Глизе 876 d — экзопланета, находящаяся на расстоянии 15 световых лет в созвездии Водолея. Это была третья по счёту планета, открытая у красного карлика Глизе 876. На момент открытия это была самая лёгкая из известных экзопланет, если не считать планеты, обращающейся вокруг пульсара PSR B1257+12. Именно благодаря этому её можно классифицировать как суперземлю. Скорее всего, на поверхности Глизе 876 d наблюдается сильная вулканическая активность, вызванная гравитационными приливными волнами, деформирующими и нагревающими планету, которая усиливается в дневное время.

Глизе 876 d движется по орбите, большая полуось которой составляет всего лишь 0.0208 а. е. (3,11 миллионов км.). Учитывая это можно предположить, что за счёт приливных сил планета имеет синхронизированный период обращения (1:1) и всегда повёрнута к звезде одной и той же стороной.

Метод Доплера, с помощью которого была открыта планета, позволяет определить лишь нижний предел её массы. Пользуясь данным методом при оценке массы, необходимо учитывать наклон орбиты, который точно не известен. Однако модели, учитывающие гравитационные взаимодействия между внешними планетами (b и c), находящимися в орбитальном резонансе, позволяют определить наклон их орбит. Расчёты показывают, что внешние планеты являются практически компланарными с наклоном орбиты приблизительно 31° относительно луча зрения. Если предположить, что Глизе 876 d вращается в той же плоскости, что и другие планеты, то её масса может быть оценена в 6,83 земных масс.

5.16. «Супер-венеры»

«Супер-венера» — предполагаемый класс землеподобных экзопланет с плотной парниковой атмосферой, неспособных поддерживать жизнь, сходную с земной.

Планета земной группы становится «супер-венерой», если:

1. Она имеет слабое магнитное поле. При этом водяной пар (расщеплённый солнечным излучением на отдельные химические элементы) уносится солнечным ветром в межпланетное пространство. Установлено, что атмосфера планеты Венеры и сейчас теряет водород и кислород. В отсутствие большого количества воды на планете её атмосфера становится насыщенной углекислым газом.

2. На ней никогда не зарождалась жизнь. Миллионы лет назад атмосфера Земли также была в изобилии насыщена углекислым газом, выделявшимся из земных недр при вулканических извержениях. Но с появлением на Земле растений углекислота все больше и больше связывалась, так как шла на образование растительной массы (и затем сохранялась в форме угля и известняка). Большое содержание свободной углекислоты в атмосфере Венеры, по-видимому, свидетельствует о том, что там никогда не было органической жизни, подобной земной.

3. Она имеет очень большую массу. Планеты земной группы, которые тяжелее Земли более чем в 10 раз, будут иметь достаточное количество парниковых газов для поддержания мощного парникового эффекта.

«Супер-венеры», как и суперземли — классы экзопланет, преимущественно силикатных, но с массой значительно превышающих массу Земли. Разница между ними в том, что суперземля, — просто тяжёлая планета с плотной атмосферой. А «Супер-венеры» из-за высокого парникового эффекта, даже находящиеся в «обитаемой зоне» рискуют перегреться и утратить гидросферу, а значит и жизнепригодность.

5.17. Экзопланета Глизе 832 с

Глизе 832 с — экзопланета в созвездии Журавля, обращающаяся вокруг красного карлика Глизе 832. Находится на расстоянии примерно 16 световых лет от Солнца. Планета имеет индекс подобия Земле 0,81 — один из самых высоких таковых показателей среди всех известных экзопланет.

Масса Глизе 832 с примерно в 5,4 раза больше, чем масса Земли. Орбита планеты имеет относительно высокий эксцентриситет. Период обращения вокруг материнской звезды составляет примерно 36 дней. Её температура, по прогнозам, довольно похожа на земную, но подвержена значительным колебаниям по мере её вращения вокруг своей звезды.

Глизе 832 — суперземля, вращающаяся в зоне обитаемости. Хотя планета находится гораздо ближе к своей звезде, чем Земля от Солнца, она получает примерно столько же энергии от красного карлика, сколько Земля получает от жёлтого карлика. Средняя температура планеты, по прогнозам, составляет 253 К (−20° С). Тем не менее, она может иметь плотную атмосферу, которая могла бы сделать климат на ней намного жарче, а её саму — похожей на Венеру.

Глизе 832 с была обнаружена международной командой астрономов во главе с Робертом А. Виттенмейером. Это одна из самых близких к Земле потенциально обитаемых экзопланет.

Комментарий

Индекс подобия Земле (англ. Earth Similarity Index, ESI) — индекс пригодности планеты или спутника для жизни. При его вычислении учитываются несколько факторов физического сходства с Землёй: размер, масса, плотность, расстояние от звезды и температура на планете.



Рис. Сравнение Глизе 832 с и Земли



Рис. Экзопланета Кеплер-69 с

5.18. Экзопланета Kepler-69 c

Kepler-69 c (также известная под обозначением KOI-172.02) — подтверждённая суперземля, вращающаяся вокруг аналога Солнца Kepler-69. Экзопланета расположена примерно в 2430 световых лет (746 парсек) от Земли. Радиус и масса Kepler-69 c больше, чем у Земли, но меньше, чем у Урана и Нептуна. Планета имеет температуру поверхности 548 К (275 °C; 527 °F). Её предполагаемая масса составляет около 6 масс Земли, а радиус — 1,71 радиусов Земли. Период обращения составляет 242 дня на расстоянии в 0,64 а. е.. Эти характеристики делают его аналогом Венеры, но более массивным, поэтому его называют «супер-венерой».

Kepler-69 c вращается вокруг жёлтого карлика по имени Kepler-69. Звезда имеет массу 0,81 масс Солнца и радиус 0,93 радиусов Солнца. Ее температура 5638 К, а предполагаемый возраст около 400 миллионов лет. Для сравнения, Солнцу около 4,6 миллиардов лет и температура поверхности 5778 К.

Kepler-69 c, наряду с экзопланетами Kepler-62 e и Kepler-62 f, считалась находящейся в «обитаемой зоне» звезды, где на поверхности планеты могла существовать жидкая вода.

Kepler-69 c находится слишком близко к звезде, чтобы быть пригодной для жизни. Неточности измерения допускают возможность того, что планета может все-таки находиться в самой внутренней области обитаемой зоны, однако даже при самой низкой погрешности измерений, излучение звезды будет в 1,35 раз больше земного. И окажется достаточно высоким, чтобы испарить любой океан.

Дальнейший анализ показал, что планета, скорее всего, более похожа на Венеру, которая, как известно, является одним из самых негостеприимных мест для жизни в Солнечной системе, и, следовательно, весьма маловероятно, что она пригодна для обитания.

Часть 6. «Газовые гиганты». 2016 – 2019 года

- 6.1. «Горячие юпитеры». Справка
- 6.2. Астрономы разгадали загадку «потерянной» воды на горячих юпитерах
- 6.3. Облака скрыли воду на горячих юпитерах
- 6.4. На экзопланете нашли облака из рубинов и сапфиров
- 6.5. «Горячий юпитер» KELT-16 b открывает перспективы для новых исследований
- 6.6. Экзопланета-рекордсмен оказалась горячее большинства звезд
- 6.7. Астрономы измерили магнитное поле самой горячей планеты в нашей Галактике
- 6.8. У экзопланеты впервые нашли стратосферу
- 6.9. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид титана
- 6.10. На горячем юпитере выпал снег из оксида титана
- 6.11. Ветер на горячем юпитере подул в «неправильную» сторону
- 6.12. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид алюминия
- 6.13. Оптическая интерферометрия прояснила состав атмосферы экзопланеты
- 6.14. В атмосфере ультрагорячего юпитера впервые нашли пары иттрия и хрома
- 6.15. Астрономы впервые провели расчеты магнитной активности «горячих юпитеров»
- 6.16. «Хаббл» увидел железные испарения с разрушающейся экзопланеты
- 6.17. В атмосфере горячего юпитера впервые нашли калий
- 6.18. Гигантские «горячие юпитеры» могут становиться ещё крупнее с годами

- 6.19. «Холодные юпитеры». Справка
- 6.20. Астрономы впервые увидели легкую экзопланету
- 6.21. Астрономы открывают новую экзопланету-газового гиганта
- 6.22. «Горячие сатурны» или «рыхлые планеты». Справка
- 6.23. Атмосфера горячего сатурна оказалась богата водяным паром
- 6.24. Астрономы нашли безоблачный горячий Сатурн
- 6.25. Астросейсмология помогла узнать свойства «горячего сатурна»

6.1. «Горячие юпитеры». Справка

«Горячие юпитеры» — класс экзопланет с массой порядка массы Юпитера. В отличие от Юпитера, который находится на расстоянии 5 а.е. от Солнца, типичный «горячий юпитер» находится на расстоянии порядка 0,05 а.е. от своей звезды, то есть на порядок ближе, чем Меркурий от Солнца и на два порядка ближе, чем Юпитер. Температура поверхности «горячего юпитера» порядка 1000—1500 К (а иногда и почти до 3000 К), что обусловлено близким расположением к звезде. Высокая температура вызывает дополнительное тепловое расширение, так что радиусы подобных планет больше, чем у аналогичных, но расположенных дальше от родительской звезды газовых гигантов.

Считается, что возле звезды недостаточно материала для образования подобных массивных планет. Возможно, они образовались во внешней части системы, а потом мигрировали к центру из-за торможения в газопылевом диске.

Большую часть первоначально открытых экзопланет были «горячими юпитерами», поскольку их проще всего обнаружить: они вносят заметные короткопериодические возмущения в движение звезды, которые могут быть обнаружены по смещению линий спектра. Кроме того, довольно велика вероятность прохождения планеты перед диском звезды, что позволяет оценить размер планеты по уменьшению светимости звезды. Согласно системе Сударского, «горячие юпитеры» относятся к IV—V классам.

Существует подкласс горячих юпитеров, именуемый «короткопериодическими горячими юпитерами». Их еще называют «горячими-горячими юпитерами», то есть наиболее близкие к звёздам «горячие юпитеры». Период вращения таких планет вокруг звезды составляет 1—2 дня, а температура может часто достигать 2000 °С (при этом температура поверхности самой звезды часто лишь в 2—3 раза больше температуры поверхности планеты).

6.2. Астрономы разгадали загадку «потерянной» воды на горячих юпитерах

Декабрь 2015, Nature, nplus1.ru

Группа астрономов из Великобритании, Германии, США и Франции решила проблему «потерянной» воды на горячих юпитерах. Ранее было установлено, что в спектре некоторых горячих юпитеров инфракрасное поглощение, соответствующее поглощению молекулами воды, меньше, чем предполагалось. Объясняли это недостатком воды в области формирования аккреционного диска.

В новом исследовании, проведенном с помощью телескопов «Хаббл» и «Спитцер», были изучены транзитные спектры десяти экзопланет. Выяснилось, что поглощение в атмосфере облачных экзопланет меньше, из-за того, что облака и туман из частиц пыли попросту экранируют наличие воды.

6.3. Облака скрыли воду на горячих юпитерах

Июнь 2016, Astrophysical Journal, nplus1.ru

Специалисты из NASA рассмотрели 19 экзопланет, данные о которых были получены с помощью телескопа «Хаббл». В атмосфере десяти планет был обнаружен водяной пар, а у девяти его не оказалось. Ученые сравнили спектры пропускания экзопланет с моделями спектров планет с безоблачной атмосферой и с моделями планет, у которых имеются облака разной толщины.

Оказалось, что облака или дымка, не позволяют наблюдать почти половину атмосферы. Объяснить природу этих облаков астрономы пока не могут, но они предполагают, что подобные атмосферные явления могут быть характерны для горячих юпитеров. Данная работа поможет выяснить, сформировались ли экзопланеты на таком расстоянии от звезды изначально или она «подтянула» их к себе.

6.4. На экзопланете нашли облака из рубинов и сапфиров

Декабрь 2016, Nature Astronomy, nplus1.ru

Ученые с помощью телескопа «Кеплер» обнаружили газовый гигант НАТ-Р-7 b, на которой могут присутствовать облака из перовскита или корунда — минерала, разновидностью которого являются рубин и сапфир. Опубликовано в журнале Nature Astronomy.

Исследователи наблюдали за планетой НАТ-Р-7 b, которая на 40 процентов больше Юпитера и прогревается до равновесной температуры 2200 кельвинов. Отчасти это происходит из-за того, что планета расположена очень близко к материнской звезде: период ее вращения составляет всего два дня. Кроме того, НАТ-Р-7 b приливно захвачена, то есть всегда обращена «лицом» к светилу, а это значит, что дневная сторона планеты разогревается до очень высоких температур (ее яркостная температура — 2800 кельвинов), в то время как ночная остается относительно холодной.

С помощью «Кеплера» исследователи в течение четырех лет следили в оптическом диапазоне за светом, отраженным от атмосферы НАТ-Р-7 b. Также ученые изучали планету в инфракрасном диапазоне, используя космическую обсерваторию Spitzer. Они заметили, что яркость планеты меняется с периодом от нескольких десятков до нескольких сотен дней. По мнению исследователей, это может указывать на то, что в газовой оболочке небесного тела присутствуют облака, которые движутся под воздействием сильного ветра. Однако они совсем не похожи на те, что мы видим на Земле.

Модели, построенные для планет типа НАТ-Р-7 b, показывают, что облака на газовом гиганте вероятно состоят из частиц корунда (разновидность оксида алюминия) или перовскита (разновидность титаната кальция). Они прилетают из ночной части планеты в дневную, где со временем испаряются.

6.5. «Горячий юпитер» KELT-16 b открывает перспективы для новых исследований

Март 2017, *Astronomical Journal*, astronews.ru

Большая международная группа ученых продолжила исследование «горячего юпитера» KELT-16 b. Наблюдения показали, что экзопланета движется вокруг родительской звезды по орбите радиусом в три звездных радиуса. Период обращения всего лишь 0,97 суток, что является довольно редким для планеты набором параметров – до настоящего времени ученые обнаружили методом транзитов лишь пять экзопланет кроме этой, обращающихся вокруг родительских звезд по орбите с периодом менее одних суток.

Кроме того, было обнаружено, что масса планеты KELT-16 b составляет примерно 2,75 массы Юпитера, а ее равновесная температура примерно 2453 Кельвина.

Такой короткий орбитальный период, отмечают ученые в своей работе, позволит наблюдать и регистрировать транзит планеты по диску звезды каждый день, что, в свою очередь, даст редкую возможность получить ценные сведения об атмосфере экзопланеты в больших объемах. Дело в том, что при прохождении планеты перед родительской звездой свет звезды проходит сквозь атмосферу планеты у края её диска, поэтому линии поглощения звездного света дают информацию о составе атмосферы планеты.

Родительская звезда планеты под названием KELT-16 находится на расстоянии примерно 1300 световых лет от Земли, а её масса составляет примерно 1,2 массы Солнца. Звезда представляет собой двойную систему, включающую, помимо основной компоненты, также звезду-компаньона, красного карлика.

Исследование появилось в журнале *Astronomical Journal*.

6.6. Экзопланета-рекордсмен оказалась горячее большинства звезд

Июнь 2017, Nature, nplus1.ru

Международная группа астрономов под руководством Скотта Гауди из Университета Огайо обнаружила первую экзопланету, обращающуюся вокруг бело-голубой звезды KELT-9, с температурой немного выше 10 тысяч градусов. Система расположена примерно в 650 световых годах от Земли. Исследование опубликовано в журнале Nature.

Открытие удалось сделать с помощью транзитного метода. Астрономы наблюдали за звездой с помощью одного из телескопов системы Kilodegree Extremely Little Telescope и заметили ее кратковременное потускнение. Оказалось, что такие потускнения происходят раз в полтора дня — что указывает на их происхождение.

KELT-9 b представляет собой газовый гигант в 2,8 раза массивнее Юпитера и в два раза более разреженный. Она делает один оборот вокруг светила за полтора дня и из-за приливного захвата постоянно обращена к звезде одной и той же стороной. Дневная температура на планете 4600 кельвинов. Этого достаточно для плавления вольфрама — самого тугоплавкого металла.

До открытия KELT-9 b самой горячей считалась экзопланета WASP-33b. Ее температура поверхности примерно равна 3500 кельвинов. То есть KELT-9b получает в 700 раз больше ультрафиолетового излучения, чем WASP-33b.

Атмосфера KELT-9 b непохожа на атмосферы других газовых планет — к примеру, в ней не смогут образоваться молекулы воды, метана или углекислого газа. Из-за постоянного облучения ультрафиолетом экзопланета испаряется, на что указывает газовый хвост, аналогичный кометным. Да и сама бело-голубая звезда в скором времени станет красным гигантом. Возможно, она при этом поглотит экзопланету еще до того, как та полностью испарится.

6.7. Астрономы измерили магнитное поле самой горячей планеты в нашей Галактике

Июнь 2017, Nature Astronomy, astronews.ru

Доктор Тамара Роджерс (Tamara Rogers) из Ньюкаслского университета изучала необычное поведение ветров, дующих в атмосфере «горячего юпитера» НАТ-Р-7 б. Экзопланета относится к классу короткопериодических горячих юпитеров.

Характеристики звезды НАТ-Р-7

Спектральный класс	F8
Расстояние	1044 световых года

Характеристики экзопланеты НАТ-Р-7 б

Открыта	6 марта 2008
Масса (М Юпитера)	1,776
Радиус (R Юпитера)	1,64
Плотность (кг/м ³)	540
Период обращения (дней)	2.2047299
Большая полуось орбиты(а. е.)	0.0377 ± 0.0005
Эксцентриситет орбиты	0
Температура (К)	2730

Оказалось, что ветра на планете НАТ-Р-7б, вместо того, чтобы дуть в восточном направлении, как предполагали ученые, на самом деле изменяли направление движения, двигаясь то в восточном, то в западном направлении.

Роджерс считает, что экстремальная температура на поверхности НАТ-Р-7 б приводит к ионизации лития, натрия и калия. Наличие движущихся заряженных частиц в атмосфере, обладающих магнитными свойствами, обеспечивает связь между магнитным полем планеты и дующими в её атмосфере ветрами. Это позволяет оценить силу магнитного поля планеты.

6.8. У экзопланеты впервые нашли стратосферу

Август 2017, Nature, nplus1.ru,

Международная группа астрономов с помощью телескопа «Хаббл» обнаружила стратосферу у экзопланеты WASP-121b и доказали наличие в ней горячего водяного пара. За пределами Солнечной системы это первая достоверно зафиксированная стратосфера. Интересно, что находка указывает на существование у WASP-121b аналога озонового слоя, который, по предположению авторов, может содержать пары оксида ванадия и титана. Исследование опубликовано в журнале Nature.

Стратосфера — не уникальное земное явление. Стратосфера Юпитера (верхняя граница тропосферы) разогревается от 110 до 200 кельвин, а у Урана — от 50 до 800 кельвин. Роль озона здесь выполняет метан. Также стратосфера присутствует в атмосферах Сатурна и Нептуна. Два года назад астрономы сообщили о намеках на наличие стратосферы у экзопланеты WASP-33b, но эти данные нельзя было назвать однозначными.

Атмосферу Земли делят на несколько слоев. В тропосфере, поднимающейся на 10-18 километров над поверхностью Земли, температура с высотой падает на 6,5 градусов с каждым километром высоты. В стратосфере, поднимающейся до 50 километров, наблюдается обратная зависимость: температура медленно поднимается от минус 50 градусов Цельсия до нуля.

Самый надежный способ доказать существование стратосферы — исследовать свечение экзопланеты в инфракрасном диапазоне. Если стратосфера есть, то нижний слой окажется холоднее верхнего. Если же нет, то нижний слой в целом теплее верхнего. Тогда его тепловое излучение будет поглощаться верхними слоями, что также отразится на спектре.

В новой работе астрономы наблюдали с помощью камеры WFC3 телескопа «Хаббл» за экзопланетой WASP-121b. Она располагается примерно в 900 световых годах

от Земли и относится к классу горячих Юпитеров. Ее масса на 20 процентов больше, чем у Юпитера, а диаметр в два раза превышает юпитерианский. Экзопланета находится очень близко к центральному светилу системы — год на ней длится около 1,3 дня. Следствие такой близости — огромная температура верхних слоев атмосферы, достигающая 2,5 тысяч кельвин.



Рис. Экзопланета WASP-121 b

Наблюдение позволило обнаружить ясные следы теплового излучения воды в атмосфере WASP-121 b — четкий пик на длине волны 1,4 микрометра. Отсутствие стратосферы ученые ожидали увидеть в виде провала в той же области спектра. По оценкам авторов величина разогрева стратосферы достигает 1000 градусов, гораздо больше, чем у любой другой из известных стратосфер.

Некоторые особенности спектра можно объяснить наличием в атмосфере паров оксида ванадия — кандидата на роль озона в экзопланетном озоновом слое. Как и озон, оксид ванадия хорошо поглощает ультрафиолет и в больших концентрациях может вызывать температурную инверсию (и, соответственно, образование стратосферы). Однако указания на следы оксида ванадия в атмосфере не настолько надежны, как на воду, поэтому точно говорить о «виновнике» возникновения стратосферы рано.

6.9. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид титана

Сентябрь 2017, Nature, nplus1.ru

Международная группа астрономов при помощи телескопа VLT впервые обнаружила оксид титана в атмосфере экзопланеты WASP-19 b типа «горячий юпитер». Результаты наблюдений позволят точнее моделировать атмосферы экзопланет и больше узнать об их происхождении и эволюции. Научная статья опубликована в журнале Nature.

«Горячий Юпитер» WASP-19 b находится в системе желтого карлика, расположенного на расстоянии 815 световых лет от Земли в созвездии Паруса, и имеет самый короткий известный на сегодняшний день орбитальный период — она совершает полный оборот вокруг своей звезды всего за 19 часов. Эффективная температура атмосферы планеты оценивается в 2000 градусов Кельвина, из-за близости к звезде она обладает раздутыми внешними слоями.

Астрономы при помощи спектрографа FORS2, установленном на одном из телескопов комплекса VLT (Very Large Telescope), пронаблюдали три события транзита планеты по диску звезды и получили точные широкополосные спектры пропускания.

В результате исследователям удалось обнаружить в атмосфере WASP-19 b следы воды, натрия и оксида титана TiO, а также определить параметры и структуру планеты. Выяснилось, что оксид титана ответственен за образование дымки в атмосфере, делающей ее непрозрачной. Если молекул TiO достаточно много, то это приводит к тепловой инверсии, при которой температура верхних слоев атмосферы оказывается выше, чем нижележащих, и окажет существенное влияние на процессы циркуляции воздушных масс. Результаты позволили проверить теоретические модели строения атмосфер экзопланет.

6.10. На горячем юпитере выпал снег из оксида титана

Октябрь 2017, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Астрономы пришли к выводу, что на планете Kepler-13A b в 1730 световых годах от Земли идет снег из оксида титана и оксида ванадия. Статья вышла в журнале The Astronomical Journal.

Планета Kepler-13A b в созвездии Лиры была открыта учеными в 2011 году. Она относится к классу горячих юпитеров, и ее масса почти в три тысячи раз больше, чем у Земли. Из-за того, что планета находится слишком близко к своей материнской звезде, она всегда обращена к ней одной стороной. Так что дневная сторона планеты разогревается до очень высоких температур, порядка 2,75 тысяч кельвинов. А ночная сторона Kepler-13A b всегда остается холодной, и там, как выяснили ученые, идет оксид-титановый снег.

Считается, что в газовой оболочке горячих юпитеров присутствует оксид титана и оксид ванадия (II), которые поглощают свет от материнской звезды, а затем переизлучают его, нагревая окружающее пространство. Однако выяснилось, что атмосфера Kepler-13A b остывает однородно — это нетипично для данного класса экзопланет.

Исследователи построили модель, которая объясняет поведение атмосферы планеты. Выяснилось, что оксид титана, вероятнее всего, находится в холодной ловушке на ночной стороне. Сильные ветры на Kepler-13A b переносят газообразное вещество из одной части планеты в другую. Попадая на ночную сторону, оксид титана и оксид ванадия кристаллизуются и собираются в облака. Мощная гравитация небесного тела заставляя их опускаться в нижние слои атмосферы. Там он попадает в холодную ловушку, которая удерживает его на темной половине планеты.

6.11. Ветер на горячем юпитере подул в «неправильную» сторону

Январь 2018, Nature, nplus1.ru

Ученые выяснили, что на горячем юпитере CoRoT-2 b ветер дует в «неправильную» сторону, из-за чего самая раскаленная точка планеты находится не там, где предсказывают теории, сообщается в статье в Nature.

По теории самая раскаленная точка «горячего юпитера» должна быть ближе всего к светилу, но в реальности эта зона обычно оказывается смещена к востоку: объясняется это движением экваториальных ветров. Современные модели говорят о том, что они ветры должны дуть в восточном направлении, заставляя смещаться самую горячую точку к востоку. В случае с планетой CoRoT-2 b все оказалось иначе. Изучая данные, полученные с помощью космического телескопа «Спитцер» ученые из Университета Макгилл заметили, что самая теплая точка планеты смещена на запад.

Система CoRoT-2 интересна по нескольким причинам: во-первых, ее главное светило, желтый карлик, очень активно, во-вторых — есть гравитационно-связанный компаньон, звезда 2MASS J19270636+0122577, а в-третьих, экзопланета CoRoT-2 b — очень раздута и обладает необычным спектром излучения.

Характеристики экзопланеты CoRoT-2 b

Открыта	декабрь 2007 миссия COROT
Масса (М Юпитера)	3,3
Радиус (R Юпитера)	1,43
Плотность (кг/м ³)	1310
Период обращения (дней)	1,743
Большая полуось орбиты(а. е.)	0,0281
Эксцентриситет орбиты	0
Температура (K)	1537 ± 35

Эффективная температура поверхности CoRoT-2 b близка к температуре HD 209458 b — типичного «горячего юпитера» из другой системы. Несмотря на это, у HD 209458 b самая горячая область смещена на восток, а у CoRoT-2 b — на запад на 23 градуса. По мнению авторов работы, у аномалии может быть три объяснения. С одной стороны, экзопланета может вращаться вокруг своей оси медленнее, чем вокруг звезды — симуляции показывают, что в таком случае экваториальные ветра будут дуть, наоборот, на запад. С другой стороны, атмосфера CoRoT-2 b может взаимодействовать с ее магнитным полем, что влияет на движение ветров. Кроме того, плотные облака, покрывающие восточную сторону планеты, могут заставлять ее выглядеть «темнее», чем она есть на самом деле (в инфракрасном диапазоне) — но такое объяснение не полностью соответствует текущим моделям атмосферной циркуляции на горячих юпитерах.

Комментарий

В 2011 году обнаружено, что COROT-2 b быстро теряет массу, ее разрушает рентгеновское излучение своей звезды. Рентгеновский спектр COROT-2 показал, что звезда проявляет высокую активность в этом диапазоне. Когда экзопланета приближается к светилу на 0,03 а.е., поток рентгеновского излучения на пять порядков превосходит значение, характерное для Земли. Если астрономы не ошибаются в своих оценках, ионизирующее излучение будет сильно влиять на эволюцию и структуру атмосферы COROT-2 b и способствовать постепенному «испарению» её вещества.

По словам руководителя научной группы Себастьяна Шрётера (Sebastian Schröter), масса COROT-2 b должна ежесекундно уменьшаться на 4,5 миллиона тонн.

6.12. В атмосфере экзопланеты впервые нашли оксид алюминия

Ноябрь 2018, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Международная группа астрономов с помощью Большого Канарского телескопа пронаблюдали два события транзита экзопланеты по диску звезды WASP-33 и получили широкополосные спектры пропускания. Впервые в атмосфере ультра горячего юпитера WASP-33b был обнаружен оксид алюминия. Причем оказалось, что его содержится гораздо больше, чем предсказывали теоретические модели. Существенных доказательств наличия других химических соединений найдено не было. Однако были получены оценки верхних границ содержания оксидов титана и ванадия. Статья опубликована в журнале Astronomy & Astrophysics.

Горячие юпитеры обладают атмосферами с необычным составом и сложной динамикой атмосферных процессов, вызванных приливным захватом и мощными потоками излучения от звезды. Считается, что некоторые ультра горячие юпитеры, имеющие равновесные температуры более 2500 Кельвинов, похожи на красные карлики M-типа, в атмосфере которых присутствуют молекулы оксидов титана или ванадия. Наличие подобных соединений может привести к температурной инверсии в атмосфере экзопланеты, у которой нет облаков. Ранее было подтверждено существование оксида титана в атмосфере горячих юпитеров WASP-19 b и WASP-121 b.

Ультра горячий юпитер WASP-33 b находится в системе переменной звезды типа Дельты Щита в 378 световых годах от Земли в созвездии Андромеды. Период обращения планеты всего за 29 часов. Температура на дневной стороне около 3398 градусов Кельвина, ее масса равна 2,1 масс Юпитера, а радиус около 1,6 радиуса Юпитера. Орбита планеты почти перпендикулярна экваториальной плоскости звезды.

6.13. Оптическая интерферометрия прояснила состав атмосферы экзопланеты

Март 2019, Astronomy & Astrophysics, nplu1.ru

Для выяснения физических условий на планетах и истории их формирования необходимо точное определение масс и спектров излучения.

На сегодняшний день существует только два метода, которые позволяют оценить состав и свойства внешней поверхности экзопланет — транзитная спектроскопия и спектроскопия теплового излучения. Первая анализирует прошедший сквозь атмосферы планет свет звезд во время затмения и подходит для объектов на близких к светилам орбитах с раздутыми от нагрева газовыми оболочками. Второй способ можно использовать для определения параметров расположенных вдали от звезд молодых планет, не успевших остыть и потому все еще излучающих собственный свет.

Для наблюдения планетной системы звезды HR 8799, расположенной на расстоянии 39 парсек астрономы из Национального центра научных исследований Франции (CNRS) под руководством Сильвестра Лакура (Sylvestre Lasour) использовали в качестве интерферометра четыре восьмиметровых телескопа VLT. Ученым удалось оценить параметры орбиты и состав атмосферы HR 8799e. Результаты опубликованы в Astronomy & Astrophysics.

С помощью приемника ближнего инфракрасного излучения GRAVITY астрономам удалось разделить потоки звезды и планеты. Это позволило не только с высокой точностью определить параметры орбиты экзопланеты HR 8799 e (большая полуось $16,4 \pm 1,5$ астрономических единицы, эксцентриситет $0,15 \pm 0,08$), но и оценить угол наклона орбиты (25 ± 8 градусов), что не получается сделать другими методами. Знание угла наклона позволяет точнее вычислить физические параметры экзопланеты.

6.14. В атмосфере ультрагорячего юпитера впервые нашли пары иттрия и хрома

Май 2019, arxiv.org, nplus1.ru

Горячие юпитеры — класс газовых экзопланет с размерами, подобными Юпитеру, но с более короткими орбитальными периодами, чем у него. Такие экзопланеты обладают расширенными атмосферами с необычным составом и сложной динамикой атмосферных процессов, вызванных приливным захватом и мощными потоками излучения от звезды. Изучение химического состава горячих юпитеров позволяет наложить ограничения на модели процессов их формирования и эволюции.

Астрономы, с помощью спектрографа HARPS-North, установленном на телескопе TNG (Telescopio Nazionale Galileo), пронаблюдали транзит ультрагорячего юпитера KELT-9 b (см. 4.12) по диску звезды и получили спектры пропускания.

KELT-9 b находится в системе звезды спектрального класса A, расположенной на расстоянии 650 световых лет от Земли в созвездии Лебедя. Это одна из самых горячих из известных экзопланет, ее равновесная температура составляет 4050 кельвин, что сравнимо с температурой фотосферы некоторых карликовых звезд. Планета находится на расстоянии 0,03 а.е. от звезды и совершает полный оборот за 1,48 дней. Масса ее оценивается в 2,44 масс Юпитера, а радиус — в 1,78 радиуса Юпитера.

В результате астрономы в полученных спектрах впервые нашли признаки наличия паров натрия, иттрия, скандия и хрома, а также подтвердили существование линий поглощения Mg I, Fe I, Fe II и Ti II, Ca I, Cr I, Co I, Sr II. Считается, что в атмосфере KELT-9 b действуют процессы переноса воздушных масс из более глубоких слоев атмосферы в верхние, где формируется плотная область, прозрачность которой невелика, так объясняется отличие модели атмосферы экзопланеты с наблюдениями.

6.15. Астрономы впервые провели расчеты магнитной активности «горячих юпитеров»

Июль 2019, Nature Astronomy, astronews.ru

Газовые гиганты, обращающиеся вблизи родительских звезд, имеют мощные магнитные поля, согласно новому исследованию, проведенному командой астрофизиков. Впервые мощность этих магнитных полей была рассчитана на основе наблюдательных данных.

Команда исследователей, возглавляемая Уилсоном Коли (Wilson Cauley) из Колорадского университета, США, обратила внимание на один из наиболее распространенных во Вселенной типов экзопланет — «горячие юпитеры». Эти гигантские газовые планеты обращаются в непосредственной близости от родительских звезд, а потому лежат внутри магнитного поля звезды и тесно взаимодействуют с ним через собственное магнитное поле.

Преыдущие наблюдения позволили наложить верхние ограничения на мощность магнитных полей экзопланет, используя, например, наблюдения в радиодиапазоне или исходя из одних лишь теоретических соображений.

На этот раз ученые объединили результаты измерений интенсивности излучения звезды вследствие магнитного взаимодействия между звездой и планетой с физическими теориями, чтобы рассчитать мощность магнитного поля для четырех «горячих юпитеров».

Оказалось, что индукции магнитных полей изученных экзопланет находятся в интервале от 20 до 120 гаусс. Для сравнения, мощность магнитного поля Юпитера составляет 4,3 гаусса, а магнитного поля Земли — всего лишь 0,5 гаусса, хотя этой мощности оказывается достаточно для отклонения стрелки компаса по всей поверхности планеты.

Исследование опубликовано в журнале Nature Astronomy.

6.16. «Хаббл» увидел железные испарения с разрушающейся экзопланеты

Август 2018, The Astronomical Journal, nplus1.ru

С помощью космического телескопа «Хаббл» астрономы обнаружили состоящие из тяжелых металлов испарения с экзопланеты WASP-121 b, деформированной от близкого расположения к звезде. Описанное явление стало первым известным случаем истечения столь тугоплавких веществ с астрономического тела, пишут ученые на страницах The Astronomical Journal.

Наиболее удобными для обнаружения являются экзопланеты класса «горячих юпитеров» — крупные тела на очень близких к светилам орбитах. Одним из экстремальных примеров такого объекта является WASP-121 b — планета тяжелее Юпитера в 1,18 раз, которая делает один оборот вокруг звезды за 1,27 дней. Она находится так близко к светилу, что температура на ее поверхности должна превышать 2500 градусов Цельсия, а ее форма искривлена приливным взаимодействием так сильно, что ученые прогнозируют ее скорое разрушение.

В новой работе, посвященной WASP-121 b, астрономы детально исследовали планету при помощи космического телескопа «Хаббл». Авторы обнаружили сильные линии поглощения магния и железа, расположенные в ближнем ультрафиолетовом диапазоне. При этом оказалось, что на этих длинах волн транзит планеты по диску звезды длился заметно дольше, чем в видимом диапазоне.

Объяснить это можно, если с раскаленной экзопланеты происходят крупномасштабные истечения газообразной фракции с высоким содержанием тяжелых металлов. При этом пары металлов поднимаются так высоко, что преодолевают притяжение планеты и попадают в область гравитационного доминирования звезды. Но сказать, что происходит с данным веществом далее пока нельзя: оно может либо частично рассеиваться и захватываться звездой, либо удерживаться магнитным полем планеты.

6.17. В атмосфере горячего юпитера впервые нашли калий

Сентябрь 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, nplus1.ru

Существование атомарного натрия и калия в атмосферах горячих юпитеров, расположенных близко к своим звездам, было теоретически предсказано около 20 лет назад. Оба этих элемента могут давать четкие полосы поглощения в оптических спектрах, полученных при помощи абсорбционной спектроскопии в ходе транзита планеты по диску своей звезды.

Ранее уже были опубликованы работы по экзопланетам HD189733 b и HD209458 b, в атмосферах которых был найден натрий, однако на сегодняшний день не было случаев достоверной регистрации атомарного калия в атмосферах этих горячих юпитеров.

Группа астрономов во главе с Энжином Келесом (Engin Keles) сообщает о результатах исследований атмосфер горячих юпитеров HD189733 b и HD209458 b при помощи метода абсорбционной спектроскопии. Наблюдения проводились в октябре 2017 года при помощи инструмента PEPSI (Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument), установленного на наземном телескопе LBT (Large Binocular Telescope).

Астрономам удалось обнаружить с большой точностью атомарный калий в верхних слоях атмосфер этих экзопланет, причем его содержание в атмосфере HD209458 b меньше, чем в атмосфере HD189733 b, у которой оказалось еще и в два раза больше атомарного натрия. Предполагается, что подобное различие не связано с процессами формирования самих планет, а возникает в результате процессов конденсации паров металлов в более глубоких слоях атмосфер и/или процессов фотоионизации в верхних слоях атмосфер.

Статья опубликована в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters.

6.18. Гигантские «горячие юпитеры» могут становиться ещё крупнее с годами

Январь 2017, *Astronomical Journal*, astronews.ru

Многие «горячие юпитеры» сильно раздуты, причем степень этой раздутости коррелирует с их эффективной температурой. До недавнего времени было неясно, связана ли эта раздутость с формированием «горячего юпитера», или же изначально компактная планета раздувается при увеличении уровня излучения родительских звезд.

Астрономы под руководством Джоэля Хартмана (Joel Hartman), сотрудника Принстонского университета, США, изучили два недавно обнаруженных горячих юпитера в рамках обзора HATNet. Были использованы четыре телескопа, расположенные в обсерватории им. Фреда Лоуренса Уипла (FLWO) в Аризоне, и два на крыше ангара субмиллиметрового телескопа на горе Мауна-Кеа, Гавайи.

В декабре 2016 года в *The Astronomical Journal* была опубликована статья, в которой авторы показали, что радиусы горячих юпитеров коррелируют с их эволюционным возрастом (т.е. отношением реального возраста к полному времени жизни). Это почти однозначно свидетельствует в пользу гипотезы, что планеты-гиганты раздуваются при увеличении уровня излучения родительских звезд.

HAT-P-65 b. Масса 0.53 масс Юпитера, радиус 1.89 радиусов Юпитера, средняя плотность всего 0.096 г/куб.см (в 10 раз меньше плотности воды!) Среднее расстояние от звезды 0.0395 а.е. (~4.57 звездных радиусов) и делает один оборот за 2.60546 земных суток. Эффективная температура планеты достигает $1930 \pm 45\text{K}$.

HAT-P-66 b. Масса 0.78 масс Юпитера, радиус 1.59 радиусов Юпитера, средняя плотность 0.242 г/куб.см. Среднее расстояние от звезды 0.0436 а.е. (~5 звездных радиусов) и делает один оборот за 2.97209 земных суток. Эффективная температура планеты оценивается в 1896 К.

6.19. «Холодные юпитеры». Справка

«Холодный юпитер» — класс экзопланет-гигантов с массой около массы Юпитера и находящихся на таком расстоянии от своей звезды, что большую часть тепла планета получает в результате внутренних процессов, а не от звезды. Орбита такой планеты находится на большом расстоянии от звезды. Иногда этот класс экзопланет называют двойниками Юпитера.

Типичными представителями планет являются Юпитер и Сатурн в Солнечной системе, поэтому их считают эталонными образцами. По классификации Сударского, к этому классу относятся планеты класса I. Известных внесолнечных планет этого класса немного, так как большое расстояние до звезды (или малая светимость звезды) делает трудным их обнаружение.

6.20. Астрономы впервые увидели легкую экзопланету

Август 2015, Science, nplus1.ru

Астрономам обсерватории Gemini впервые удалось напрямую получить изображение экзопланеты, похожей на одну из планет Солнечной системы. 51 Eri b представляет собой молодой «юпитер», обращающийся на расстоянии двух миллиардов километров от светила системы. Работа опубликована в журнале Science, кратко об этом сообщает пресс-релиз обсерватории.

Для поиска экзопланет астрономы использовали GPI (Gemini Planet Imager), смонтированный на 8,2-метровом телескопе в южной обсерватории Gemini. Планета была обнаружена около молодой звезды 51 Эридана A — ее возраст, по оценкам ученых, составляет 20 ± 6 миллионов лет. Именно тот факт, что система еще довольно молода, помог ученым напрямую увидеть планету: она все еще находится в процессе образования и соударения

«слипающихся» частиц нагревают ее. Это тепловое излучение и фиксируется прибором.

Радиус орбиты экзопланеты 51 Эридана b — 13 а.е. сопоставляя ее положение с Солнечной системой, находится за орбитой Сатурна. На основании светимости небесного тела ученым удалось установить его массу — оно примерно в два раза тяжелее, чем Юпитер. Точное значение зависит от механизма образования экзопланеты, однако максимальные оценки не превышают 12 масс Юпитера. Эти результаты были получены компьютерным моделированием в предположении о наличии на планете плотной атмосферы.

Спектральные характеристики позволяют определить радиус и состав атмосферы планеты 51 Эридана b почти совпадает по радиусу с Юпитером, и поглощает излучение в тех же областях спектра, что и метан и вода, что может свидетельствовать об их наличие в атмосфере. Удалось оценить и температуру поверхности — 700 кельвинов.



Рис. 51 Эридана b

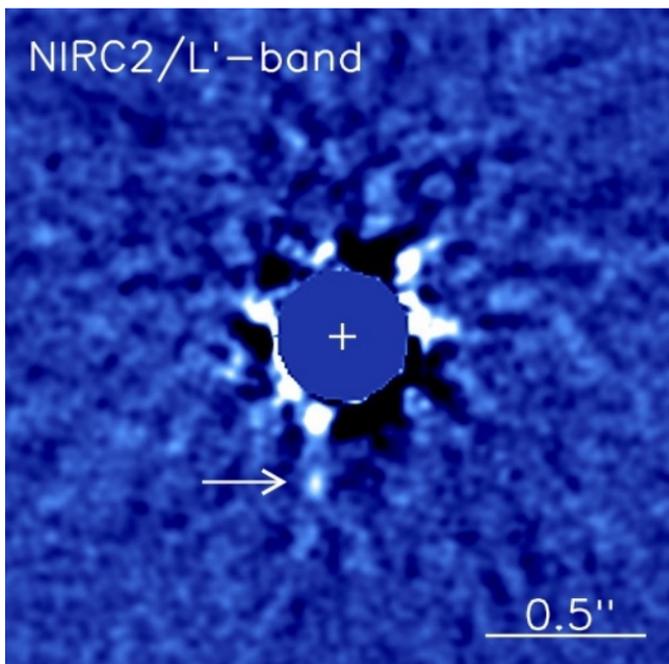


Рис. Изображение 51 Эрида́на b

Изображение легкой планеты впервые было получено напрямую. Ранее все снимки экзопланет соответствовали объектам, больше похожим на холодные звезды.

51 Эрида́на — звезда, находящаяся в 96 световых годах от Солнца, во многом именно поэтому она была выбрана для исследования проектом GPI. Она примерно в 7 раз ярче нашего светила и в 1,75 раза массивнее.

Поиск планет с помощью GPI предполагает исследование 600 звезд. В проекте, реализуемом в обсерватории Gemini планеты наблюдают напрямую с помощью сложной системы, включающей в свой состав адаптивную оптику, компенсирующую колебания атмосферы. На данный момент изучено чуть больше 20 процентов от запланированного количества. Все они находятся в пределах 300 световых лет от Земли.

6.21. Астрономы открывают новую экзопланету-газового гиганта

15 декабря 2016, astronews.ru
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

На декабрь 2016 года методом гравитационного микролинзирования было обнаружено 47 экзопланет. Международная команда астрономов во главе с Н. Дж. Ратенбери (N. J. Rattenbury) открыла в апреле 2014 года при помощи польского астрономического проекта Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) новый «холодный юпитер» — OGLE-2014-BLG-0676L b.



Рис. «Холодный юпитер» — OGLE-2014-BLG-0676L b.

Родительская звезда этой планеты оказалась примерно на 38 процентов менее массивной, чем Солнце, и была классифицирована как карлик спектрального класса K. Расстояние от Земли до линзирующей системы составляет 7200 световых лет.

Вновь открытая планета имеет массу примерно в 3,1 массы Юпитера и обращается вокруг родительской звезды на расстоянии 4,4 а.е..

6.22. «Горячие сатурны» или «рыхлые планеты». Справка

Рыхлая планета (англ. puffy planet) или горячий сатурн — класс планет, газовых гигантов, с очень низкой плотностью.

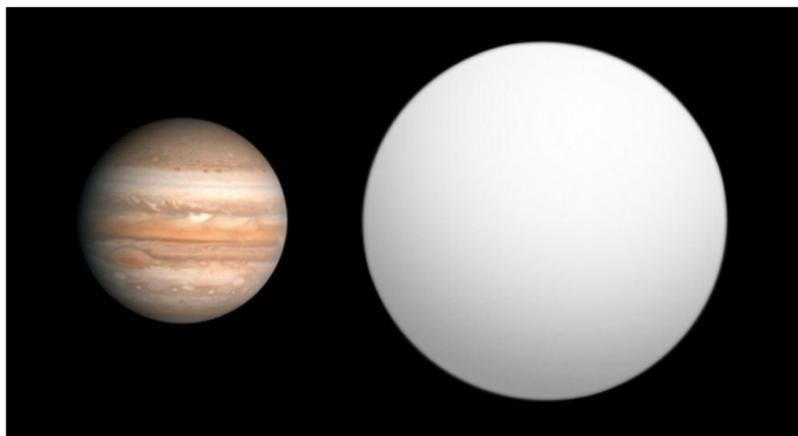


Рис. Сравнение Юпитера с «рыхлой планетой» WASP-17 b.

Планеты, которые являются представителями класса «горячие юпитеры», расширяются под действием энергии, излучаемой их звездой, при значительной близости к ней. В особенности это относится к так называемым короткопериодическим горячим юпитерам. Если масса планеты меньше 2 масс Юпитера и разогрев достаточно велик, то планета не в состоянии силой своей гравитации удерживать не только атмосферу, но и нижележащие слои себя самой от расширения, и диаметр планеты значительно увеличивается и планету окутывает большое облако газа и пыли.

6.23. Атмосфера горячего сатурна оказалась богата водяным паром

Март 2018, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Астрономы при помощи наземных и космических телескопов подробно изучили химический состав атмосферы экзопланеты WASP-39b типа горячий сатурн и выяснили, что она содержит гораздо больше водяного пара, чем ожидалось. Не исключено, что планета образовалась достаточно далеко от звезды и в дальнейшем мигрировала на свою текущую орбиту. Опубликовано в статье в журнале The Astronomical Journal.

Горячий сатурн WASP-39b находится в системе желтого карлика, расположенного на расстоянии 700 световых лет от Земли в созвездии Девы. Масса планеты 0,28 масс Юпитера, радиус 1,27 радиусов Юпитера, она совершает оборот вокруг звезды за четыре дня. Это вторая по наименьшей плотности (всего 0,18 грамм на кубический сантиметр) планета, известная на сегодняшний день (первое место принадлежит WASP-17b), эффективная температура ее атмосферы оценивается в 1030 градусов Кельвина.

Модель атмосферы планеты, указывает на свободную от высотных облаков атмосферу, в спектре поглощения которой нет следов метана, но есть признаки присутствия углекислого и угарного газа и других веществ. Данные наблюдений показывают достаточно большое содержание водяных паров в атмосфере WASP-39b, которое в три раза выше, чем у Сатурна, что дает значение атмосферной металличности в 151 раз больше солнечной. Это необычно и говорит о том, что экзопланета образовалась за пределами снеговой линии, где она, вероятно, накопила в себе большое количество льдов и планетезималей, богатых элементами тяжелее водорода и гелия, а затем мигрировала на более близкую к звезде орбиту.

6.24. Астрономы нашли безоблачный горячий Сатурн

Май 2018, Nature, nplus1.ru

Долгое время ученые предполагали, что в атмосферах горячих газовых гигантов может существовать натрий (Na), и его спектральный профиль при отсутствии облаков будет по форме похож на тент. Однако до сих пор исследователям удавалось обнаружить только очень узкий пик. Считается, что «боковые крылья» спектра щелочных металлов в атмосферах газовых гигантов скрывают облака или плотная дымка в районе терминатора (граница дня и ночи на поверхности планет).

Ученые под руководством Николая Николова (Nikolay Nikolov) из Эксетерского университета, Великобритания, впервые зарегистрировали полный спектральный профиль натрия в атмосфере горячего сатурна WASP-96b, что указало на отсутствие облаков. Наблюдения проводили с помощью телескопа VLT, Паранальская обсерватория, Чили. Газовый гигант вращается вокруг солнцеподобной звезды в созвездии Феникс в 980 световых годах от Земли. Масса планеты близка к массе Сатурна, в то время как ее радиус превышает радиус Юпитера на 20 процентов. Равновесная температура WASP-96b составляет порядка 1300 кельвинов.

Опубликовано в журнале Nature.

Комментарий

Согласно первоначальным данным, планета должна была быть безоблачной, практически не содержащей водяного пара. Однако повторный, более точный анализ аппаратом «Джеймс Уэбб» в 2022 году полностью перевернул представление о планете. Согласно новым данным, WASP-96b окутан густыми слоями облаков, имеет плотную атмосферу. Также были обнаружены доказательства наличия воды на экзопланете.

6.25. Астросейсмология помогла узнать свойства «горячего сатурна»

Март 2019, arXiv.org, nplus1.ru

Сейсмические волны, распространяющиеся в недрах звезд, приводят к колебаниям яркости, которые способны фиксировать космические телескопы, такие как CoRoT и «Кеплер». Методы астросейсмологии не только позволяют с большой точностью определять параметры звезд, такие как возраст, масса или радиус, но и открывать экзопланеты вблизи них и накладывать ограничения на их свойства.

Так с помощью космического телескопа TESS был открыт «горячий сатурн» на орбите вокруг красного гиганта. Это говорит о том, что изучение колебаний звезды сильно увеличивает вероятность определения свойств экзопланеты, обращающейся вокруг нее. Препринт работы доступен на портале arXiv.org.

Новооткрытая экзопланета TOI 197.01 находится на орбите звезды TOI-197 — это красный гигант, возраст которого сравним с возрастом Солнца. Его радиус в 2,9 раза больше радиуса Солнца, а масса в 1,2 раза превышает солнечную.

Помимо телескопа TESS в наблюдениях за звездой участвовал ряд наземных телескопов, таких как обсерватория Кека, Тейде, Сайдинг-Спринг, Ла-Силья и обсерватория имени Уиппла.

Анализ наблюдений позволил определить, что радиус TOI-197.01 составляет 0,83 радиуса Юпитера, а масса — 0,1 массы Юпитера. Средняя плотность планеты в 13 раз меньше плотности Земли, она принадлежит к классу горячих сатурнов — газовых гигантов, расположенных очень близко к своей звезде, и обладающих распухшей под действием излучения звезды атмосферой.

Период обращения TOI-197.01 — 14 дней.

Часть 7. Экзонептуны

- 7.1. Большинство далеких экзопланет оказались холодными нептунами
- 7.2. Австралийские астрономы подтвердили существование планеты-переростка
- 7.3. Обнаружена планета с кометным хвостом
- 7.4. На нептуноподобной экзопланете нашли воду
- 7.5. Вокруг «теплого нептуна» открыта примитивная атмосфера
- 7.6. В атмосфере экзопланеты впервые нашли гелий
- 7.7. Гелий раздул атмосферу горячего Нептуна
- 7.8. «Хаббл» разглядел стремительно исчезающий горячий Нептун
- 7.9. Астрономы нашли «запрещенную» экзопланету
- 7.10. Астрономы заподозрили существование ледяного гиганта у белого карлика

7.1. Большинство далеких экзопланет оказались холодными нептонами

17 декабря 2016, The Astrophysical Journal, nplus1.ru

К настоящему времени астрономам удалось открыть более тысячи экзопланет, а также множество объектов, которые могут ими оказаться. Однако основные методы их обнаружения — транзитный метод и метод Доплера — позволяют, в основном, увидеть те планеты, которые находятся близко к своим светилам. Искать небесные тела, которые расположены за снеговой линией, тем более, если они имеют небольшую массу, такими способами довольно сложно.

Однако авторы новой работы смогли заглянуть в дальние уголки планетных систем с помощью микролинзирования. Исследователи проанализировали результаты обзора, который в течение шести лет вел новозеландский телескоп MOA-II. Используя эффект микролинзирования, прибор искал вокруг звезд экзопланеты, находящиеся за снеговой линией, — то есть за той границей в планетной системе, где во время ее формирования мог образовываться водный лед.

Эффект микролинзирования наблюдался около полутора тысяч раз. При этом в 22 случаях фоновым объектом оказывалась планета. Ученые сопоставили эти данные с данными другого обзора (OGLE) и выяснили, какие небесные тела чаще всего встречаются за снеговой линией.

Оказалось, что вокруг звезд с массой примерно 0,6 масс Солнца чаще всего можно найти планеты, по размеру похожие на Нептун. Ученые предполагают, что это ледяные миры, которые в среднем примерно в 20 раз тяжелее Земли. И что холодные нептоны за снеговой линией встречаются примерно в 10 раз чаще, чем планеты, похожие на Юпитер.

Об этом сообщается в статье, опубликованной в журнале The Astrophysical Journal.

7.2. Австралийские астрономы подтвердили существование планеты-переростка

Май 2015, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Австралийские астрономы подтвердили существование у звезды НАТ-6 так называемого «теплого сатурна». Статья опубликована в журнале The Astronomical Journal.

Впервые экзопланета НАТ-6b была зарегистрирована в 2014 году. У кривой блеска звезды были обнаружены характерные периодические колебания, которые ученые интерпретировали, как наблюдение транзита планеты по диску звезды. Анализ спектра позволил определить, что масса планеты составляет 0,32 массы Юпитера, а радиус близок к радиусу Юпитера. Период обращения планеты составляет 3,3 земных дня.

Открытие потребовало проверки: формирование планет у небольших звезд (НАТ-6 — это М-карлик в созвездии Зайца) изучено плохо. Теперь, наблюдая за звездой с помощью телескопов в Чили и Австралии, существование планеты уверенно подтверждается.

7.3. Обнаружена планета с кометным хвостом

Июнь 2015, Nature, nplus1.ru

Астрономы во главе с Давидом Эренрейхом (David Ehrenreich) из Университета Женевы обнаружили у планеты Глизе 436 b, расположенной на расстоянии 33 световых лет от Земли, кометный хвост. Соответствующая работа опубликована в Nature.

Ученые использовали наблюдения ультрафиолетового спектрографа космического телескопа «Хаббл» за 2010-2014 годы и сравнили их со снимками той же планеты в оптическом диапазоне. Выяснилось, что, проходя через диск своей звезды, «теплый нептун» Глизе 436 b поглощает лишь 0,69% от общего излучения светила в видимом диапазоне, почти не снижая ее яркость для

наблюдателя. Зато в ультрафиолетовом диапазоне прохождение планеты приводило к поглощению 56,3% звездного излучения, а светимость звезды начинала ослабевать за два часа до транзита, и не возвращалась к нормальной еще три часа. Планета отстоит от звезды на 4,35 миллиона километров, что вдесятеро ближе, чем удаление Меркурия от Солнца. При массе в 22,2 земных и радиусе в 4,3 земных, температура нижних слоев атмосферы близка к венерианской. Планета состоит из экзотической формы водного льда, образующейся при высокой температуре и большом давлении.

По данным спектрографии скорость атомов водорода в атмосфере Глизе 436 b достигает 40 – 120 километров в секунду, в то время как для покидания планеты достаточно превысить ее вторую космическую скорость (для Глизе — 436 b 26 километров в секунду). Иными словами, излучение звезды вынуждает планету-гиганта терять необычайно большое количество водорода, который покидает ее атмосферу. Судя по данным наблюдений, поток атомов водорода несимметричен и по мере транзита меняет свою ориентацию относительно земного наблюдателя. Излучение звезды «выдавливает» его во внешние области этой системы, образуя огромный хвост кометного типа, тянущийся за Глизе 436 b.

Определить его точные размеры затруднительно, однако по своему сечению «хвост» должен в десятки раз превосходить размеры самой планеты. Ученые отмечают, что, судя по наблюдавшей интенсивности поглощения УФ-лучей, гигантская планета теряет 100 — 1000 тонн водорода в секунду. С учетом ее значительной массы это означает потерю не более 0,2% атмосферы за миллиард лет. Этот хвост кометного типа является не только самым большим из известных, но и еще и весьма долгоживущим. Возраст системы Глизе 436 оценивается как минимум в шесть миллиардов лет, и потеря водорода Глизе 436 b должна была происходить все это время.

Как отмечают авторы работы, в первый миллиард лет своего существования красный карлик системы излучал в УФ и рентгеновском диапазонах намного больше, чем

сегодня. А значит, терял значительно больше водорода. В те времена кометоподобный хвост должен был быть намного более масштабным, а всего за первый миллиард лет планета потеряла до 10% от своей первоначальной атмосферы.

Интенсивная потеря легких газов наблюдалась и в прошлом Земли и Марса, а также многих экзопланет. Облака газов, теряемых планетой, были выявлены вокруг ряда других гигантских планет за пределами Солнечной системы. Однако ни разу эти облака не достигали таких размеров. По всей видимости, Глизе 436 b находится близко к внутренней границе орбит, совместимых с ее нынешним обликом. Будь планета ближе к светилу — она давно бы потеряла основную часть своей атмосферы, оставив лишь обнаженное плотное скалистое ядро.

Подобную эволюцию претерпел ряд экзопланет типа Kepler-10c. По размерам они уступают газовым гигантам — тот же Kepler-10c почти вдвое меньше Глизе 436 b — однако по массе близки ним. То есть плотность Kepler-10c на треть превосходит земную. Бывший газовый гигант был слишком близко расположен к звезде и потерял свою газовую оболочку в период молодости светила.

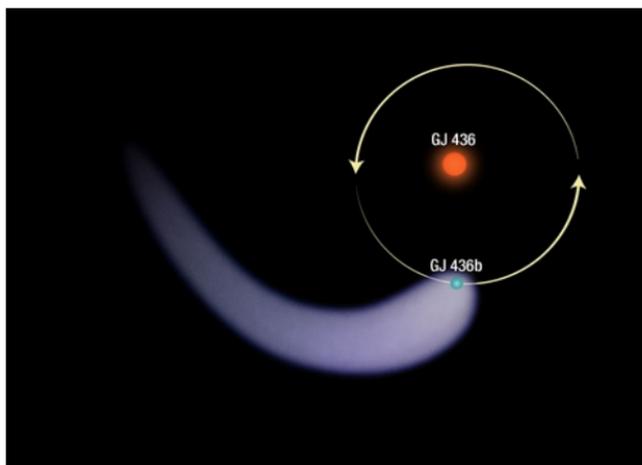


Рис. Глизе 436 b

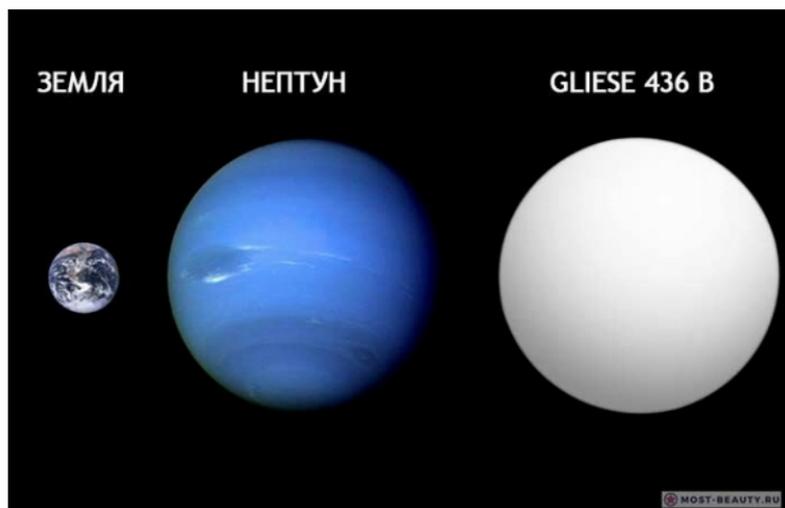


Рис. Сравнение Земли Нептуна и Глизе 436 b

7.4. На нептуноподобной экзопланете нашли воду

Январь 2016, arxiv.org, nplus1.ru

Планета НАТ-Р-26 b (газовый гигант) с массой близкой массе Нептуна была открыта в 2010 году группой астрономов под руководством Джоэля Хартмана (Hartman, Joel), работающих в рамках проекта НАТNet с помощью телескопов, расположенных на Гавайях и в Аризоне, транзитным методом.

Звезда НАТ-Р-26 находится в созвездии Девы на расстоянии около 437 световых лет от нас. Это оранжевый карлик с массой и радиусом, равными 81 % и 78 % солнечных соответственно. Температура её поверхности составляет около 5079 К. Светимость — всего лишь 38% солнечной. Это довольно старая звезда; её возраст оценивается приблизительно в 9 миллиардов лет.

В 2016 году группой астрономов под руководством Кельвина Б. Стивенсона с помощью спектрографа LDSS-

ЗС в чилийской обсерватории Лас-Кампанас было проведено пятичасовое наблюдение транзита планеты НАТ-Р-26 b по диску звезды. Кроме того, благодаря космический телескоп «Спитцер» которому астрономам удалось наблюдать два транзита экзопланеты в апреле и сентябре 2013 года. Было получено несколько тысяч кадров с 20-ти секундным и 2-х секундным интервалом. Спектральные данные использовались не только для моделирования свойств планетарной атмосферы, но также и для уточнения орбиты экзопланеты.

На основе спектральных характеристик транзита планеты Стивенсон и его коллеги пришли к выводу, что в атмосфере НАТ-Р-26b присутствуют водяные пары, а также отсутствует калий. Кроме того, сравнение результатов с другими экзопланетами с похожей температурой и силой притяжения у поверхности позволяет предположить, что планета, по меньшей мере, имеет облака в нижних слоях атмосферы, а ее содержание металлов близко к солнечной атмосфере.

Параметры НАТ-Р-26 b

Масса (М Юпитера)	0,059±0,007
Радиус (R Юпитера)	0,565±0,07
Период обращения (дней)	4,235
Большая полуось орбиты(а. е.)	0,048
Эксцентриситет орбиты	0,124±0,06
Температура (К)	563±55

7.5. Вокруг «теплого нептона» открыта примитивная атмосфера

Май 2017, Science, astronews.ru

Новое исследование, в котором наблюдалась «примитивная атмосфера», окружающая далекую планету, может стать поворотным моментом в изучении процессов формирования и эволюции планет в далеких галактиках.

Международная команда исследователей, совместно возглавляемая Ханной Уэйкфорд (Hannah Wakeford) из НАСА и профессором Дэвидом Сингом (David Sing) из Эксетерского университета, провела подробное исследование «теплого нептона» — экзопланеты HAT-P-26b, близкой по размеру к нашему Нептуну, но обращающейся намного ближе к своей звезде.

Было обнаружено, что экзопланета HAT-P-26b, расположенная на расстоянии примерно 430 световых лет от Земли, имеет атмосферу, почти целиком состоящую из водорода и гелия, с относительно безоблачным небом.

Такая примитивная атмосфера указывает на то, что планета, скорее всего, сформировалась, находясь ближе к родительской звезде, чем сейчас, или в более поздний период эволюции планетной системы, по сравнению с ледяными гигантами Солнечной системы Нептуном и Ураном. Ученые использовали данные по четырем транзитах, полученные при помощи космических телескопов НАСА «Хаббл» и «Спитцер» (Spitzer).

7.6. В атмосфере экзопланеты впервые нашли гелий

Май 2018, nplus1.ru, []

Гелий является вторым по распространенности химическим элементом во Вселенной после водорода и одним из основных компонентов в составе Солнца и газовых гигантов в Солнечной системе. Многие теоретические модели предсказывают, что гелий должен входить в состав атмосфер крупных экзопланет и быть легко обнаруживаемым, особенно во их внешних слоях или у планет с «распухшими» атмосферами, однако до настоящего времени не было случаев достоверной регистрации гелия в атмосферах других планет.

Экзопланета WASP-107 b, принадлежащая к классу супернептунов, находится в системе оранжевого карлика WASP-107, расположенного на расстоянии 208 световых

лет от Земли в созвездии Девы. Планета находится на расстоянии 0,05 астрономических единицы от звезды и совершает один оборот вокруг нее за почти шесть дней. Экзопланета имеет массу 0,12 массы Юпитера и радиус около 0,94 радиуса Юпитера, что делает ее планетой с одной из самых малых известных значений средней плотности. В конце августа 2017 года космический телескоп «Хаббл» пронаблюдал событие транзита планеты по диску звезды и получил широкополосные спектры пропускания в инфракрасном диапазоне — когда планета оказывается между земным наблюдателем и диском звезды, часть света звезды проходит сквозь атмосферу и поглощается различными химическими элементами, что отражается в спектрах и позволяет понять химический состав атмосферы.

Анализ показал, что во внешних слоях атмосферы WASP-107b, где давление колеблется от уровня микробар до нанобар, содержится гелий в метастабильном состоянии. Модель, хорошо описывающая полученные спектры, предполагает наличие у планеты «распухшей» атмосферы, которую она активно теряет под действием ультрафиолетового излучения от звезды. Скорость потери примерно 0,1-4% от общей массы за миллиард лет, при этом у планеты образуется вытянутый газовый хвост.

Потеря атмосферы может существенно изменить объемный состав планеты. Например, есть теория, что этот процесс ответственен за малое количество обнаруженных экзопланет типа суперземель и субнептунов с радиусами от 1,6 до 2 радиусов Земли. Чтобы проверить теории образования подобных планет и оценить, наличие у них газовых оболочек из водорода и гелия, необходимо понять, как процесс потери газов из атмосферы планеты влияет на ее последующую эволюцию, в этом случае ограничения на модели, полученные для WASP-107b, важны для дальнейшей работы.

7.7. Гелий раздул атмосферу горячего Нептуна

Декабрь 2018, Science, nplus1.ru

Европейские астрономы обнаружили гелий в атмосфере горячего нептона HAT-P-11 b. Сообщается, что из-за радиации звезды атмосфера HAT-P-11 b раздувается, напоминая воздушный шар. Открытие сделали с помощью спектрографа CARMENES, установленного на телескопе в испанской обсерватории Калар-Альто. Статья в журнале Science.

Долгое время предполагалось, что гелий должен присутствовать в атмосферах крупных экзопланет, но впервые его удалось найти только в 2018 году: в спектре супернептона WASP-107b.

На этот раз астрономы под руководством Ромэна Алларта (Romain Allart) из Женевского университета обнаружили гелий в атмосфере горячего нептона HAT-P-11 b, вращающегося вокруг оранжевого карлика HAT-P-11, расположенного в 124 световых годах от Земли в созвездии Лебеда. Эта планета была открыта в рамках проекта HATNet в январе 2009 года.

7.8. «Хаббл» разглядел стремительно исчезающий горячий Нептун

Декабрь 2018, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

С помощью телескопа «Хаббл» ученые подтвердили гипотезу о быстротечности жизни жарких экзопланет среднего размера. Группа исследователей (руководитель исследования Винсент Бурье) обнаружила экзопланету размером с Нептун, которая невероятно быстро теряет свою массу. Опубликовано в Astronomy & Astrophysics.

Ученые обнаружили, что экзопланеты, вращающиеся в непосредственной близости от своей звезды, имеют странный разброс по размерам. Это либо планеты размером с Юпитер, либо суперземли, радиус которых не

превышал 1,5 земного. Планеты же среднего размера, нептуноподобные, встречаются только на относительном удалении от светила. Это позволяет предполагать, что такие планеты существовали, в разных системах, но уже по каким-то причинам исчезли. Одной из задач в области изучения экзопланет до недавнего времени было доказательство или опровержение этого предположения.

Несколько лет назад астрономы при помощи телескопа «Хаббл» зафиксировали, что один из самых теплых из известных нептунов (GJ 436b) теряет свою атмосферу. Однако это происходит не с той скоростью, чтобы в короткие по астрономическим меркам планета исчезла (срок ее жизни оценивается в 400 миллионов лет). Теперь же ученые обнаружили и исследовали другой горячий нептун, GJ 3470b, который теряет массу со скоростью в 100 раз большей, чем его предшественник GJ 436b. Обе планеты находятся очень близко к своим звездам, на расстоянии около шести миллионов — это одна десятая расстояния между Меркурием и Солнцем.

Как и в случае GJ 436b, интенсивное излучение звезды нагревает атмосферу планеты GJ 3470b до точки, в которой она преодолевает гравитационное притяжение, атмосфера раздувается и «стекает» с планеты. Вследствие этого вокруг планеты образуется гигантское каплевидное облако, которое со временем рассеивается в космосе. Одна из причин, по которой GJ 3470b испаряется в разы быстрее, чем GJ 436b, заключается в том, что его плотность значительно меньше, поэтому его атмосфера гравитационно гораздо менее стабильна.

Звезде, в системе которой находится GJ 3470b, всего два миллиарда лет, в отличие от звезды, вокруг которой вращается планета GJ 436b — ей, по разным оценкам, от четырех до восьми миллиардов лет. Молодая звезда более активна, ее радиация сильнее влияет на экзопланету. И когда та сближается со звездой, ее оболочка начинает растягиваться, формируется шлейф длиной в несколько миллионов километров. За время существования планета потеряла 35% вещества. Если планета продолжит также быстро терять массу, она сократится до мининептуна.

7.9. Астрономы нашли «запрещенную» экзопланету

Май 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Если внимательно изучить свойства экзопланет, можно заметить дефицит короткопериодных (менее 2-4 дней) планет размером с Нептун и массой около одной десятой массы Юпитера. Это явление получило название «пустыня нептонов» и пока не имеет хорошего обоснования. Предполагается, что наблюдения транзитов таких планет по диску их звезд могут быть затруднены для наземных обзоров, которые открыли множество короткопериодных планет-гигантов, или же за формирование «пустыни нептонов» отвечают различные физические механизмы, такие как испарение атмосферы планеты из-за излучения звезды, остановка миграции планет в системе, убыль плотности внутри аккреционного диска на этапе формирования планетной системы или потеря планетой части своей массы из-за переполнения полости Роша.

Группа астрономов во главе с Ричардом Уэстом (Richard West) сообщила об обнаружении экзопланеты NGTS-4b, которая по своим параметрам попадает в «пустыню нептонов». Она находится в системе К-карлика, расположенного на расстоянии 282,6 парсек от Солнца, светимость которого составляет 0,44 светимости Солнца. Открытие было сделано в период с августа 2016 года по май 2017 года, в ходе наблюдательной кампании на системе NGTS (The Next-Generation Transit Survey), состоящей из двенадцати роботизированных широкоугольных 20-сантиметровых телескопов, установленных в Чили. Это самое мелкое транзитное событие из всех, увиденных с Земли. Фотометрические и спектроскопические исследования проводились на телескопах Европейской Южной обсерватории, Южноафриканской астрономической обсерватории и сети LCO (Las Cumbres Observatory).

Планета совершает один оборот вокруг звезды за 1,33 земных дня и находится на расстоянии 0,019 астрономических единиц от нее. Ее радиус оценивается в 3,18 радиусов Земли, а масса — в 20,6 масс Земли. Это дает значение средней плотности планеты 3,45 грамм на кубический сантиметр, что соответствует модели строения, включающей в себя каменное ядро, водяную оболочку и обширную атмосферу из легких газов. Эффективная температура планеты оценивается в 1650 кельвин.

Предполагается, что NGTS-4b могла оказаться в «пустыне непутонов» из-за миграции с другой орбиты в течение последнего миллиона лет, после завершения эпохи максимальной активности звезды-хозяина, либо ранее она была гораздо массивнее, и ее атмосфера до сих пор испаряется под действием излучения звезды.

Статья опубликована в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

7.10. Астрономы заподозрили существование ледяного гиганта у белого карлика

Декабрь 2019, *Nature*, [nplus1.ru](https://www.nature.com/news)

Астрономы не знают точно, что происходит с планетной системой после превращения родительской звезды в белого карлика. С одной стороны, расширение и сброс оболочки должно вызвать катастрофические последствия, уничтожая планеты или сводя их с устойчивых орбит. Однако уже получены отдельные наблюдательные указания на наличие планет на близких орбитах у белых карликов. Впрочем, не исключено, что это вторичные планеты, образовавшиеся из сброшенного вещества, а не из исходного протопланетного диска.

Европейские астрономы под руководством Бориса Гензикке (Boris Gänsicke) из Уорикского университета в Великобритании обнаружили новый пример необычного белого карлика. В спектре звезды WD J0914+1914 ученые

нашли указания на аккрецию вещества из окружающего светила диска, который состоит из водорода, кислорода и серы. Такое сочетание элементов делает ситуацию исключительной, так как подобного около белых карликов никогда ранее не наблюдали.

Объект был найден при исследовании около семи тысяч белых карликов, попавших в обзор SDSS. Так как WD J0914+1914 отличался от всех других случаев, то его решили детально изучить при помощи восьмиметрового телескопа VLT в Чили. Это позволило исключить вероятность существования тусклой звезды-компаньона в системе, с которой могло перетекать вещество.

Единственным объяснением называют испарения под действием интенсивного ультрафиолетового излучения светила с близкой планеты, подобной Нептуну. В таком случае часть улетающего вещества формирует диск, который постепенно поглощается звездой, а сероводород и вода считаются основными компонентами глубоких слоев планет из класса ледяных гигантов, к которому относятся Нептун и Уран. А вот разрушение каменной землеподобной планеты привело бы к появлению излучения магния, кальция и железа, которых в данном случае не наблюдается.

Если интерпретация авторов верна, то экзопланета у белого карлика движется по орбите с периодом всего около 10 дней, а диск ее испарений простирается до относительно небольших расстояний порядка десяти радиусов Солнца. На таком близком расстоянии от звезды планета точно не могла пережить этап красного гиганта, так как вся эта область находилась внутри поверхности в то время. Астрономы считают, что текущая траектория планеты может объясняться гравитационным взаимодействием с другими крупными планетными телами на окраинах данной системы, в результате которых объект переместился близко к светилу уже после стадии красного гиганта.

Часть 8. Экзопланеты земного типа 2015 – 2019 гг.

- 8.1. «Кеплер» помог измерить массу одной из самых маленьких экзопланет
- 8.2. Астрономы подтвердили существование ближайшей экзопланеты-суперземли
- 8.3. Небольшие звезды помогут своим планетам формировать магнитное поле
- 8.4. В суперземлях предсказали существование запрещенных веществ
- 8.5. Облака заставили маленькие экзопланеты казаться больше
- 8.6. Двойника Солнца уличили в поедании собственных планет
- 8.7. У экзопланеты земного типа впервые нашли атмосферу
- 8.8. У ближайшего «близнеца» Солнца нашли четыре экзопланеты
- 8.9. Массу проглоченных Кроносом планет оценили в 15 Земель
- 8.10. «Кеплер» нашел «сестру» Солнечной системы
- 8.11. Астрономы нашли самую плотную суперземлю
- 8.12. Астрономы нашли «старшего брата» Меркурия размером с Землю
- 8.13. Астрономы определили массу «планеты-младенца» из системы Беты Живописца
- 8.14. Астрономы обнаружили разрушающуюся экзопланету
- 8.15. У экзопланет в системах молодых звезд «нет шансов» сохранить атмосферу
- 8.16. Астрономы нашли у звезды Тигардена две землеподобные планеты
- 8.17. Бонnard Джон Тигарден
- 8.18. Телескоп TESS открыл свою самую маленькую экзопланету
- 8.19. «Спитцер» не нашел атмосферы у близкой экзопланеты земного типа
- 8.20. Лаура Крейдберг
- 8.21. Обнаружены тысячи планет за пределами Млечного Пути
- 8.22. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

8.1. «Кеплер» помог измерить массу одной из самых маленьких экзопланет

Июнь 2015, Nature, nplus1.ru

Система Kepler 138 состоит из трех подтвержденных экзопланет (внутренняя b, средняя c и внешняя d), вращающихся вокруг звезды, которая в 2,5 раза меньше Солнца и холоднее его.

Американские астрофизики измерили массу экзопланеты Kepler 138 b. Она оказалась одной из самых маленьких у обнаруженных экзопланет. Ее диаметр меньше диаметра Земли примерно в два раза, масса в 15 раз меньше массы Земли, а период обращения примерно 10,3 дней. Статья опубликована в журнале Nature.

В новом исследовании авторы обратили внимание на изменение периодов обращения планет системы. Эти эффекты вызваны взаимным гравитационным влиянием планет друг на друга, которое определяется их массами. Подобные эффекты известны и в Солнечной системе — это так называемый орбитальный резонанс, приводящий к тому, что периоды обращения некоторых планет и их спутников относятся как целые числа. Например, Юпитер и Сатурн имеют резонанс 5:2, то есть за пять юпитерианских лет Сатурн делает ровно два оборота вокруг Солнца.

Ученым удалось установить, что 138b находится почти в резонансе со средней планетой системы, их периоды обращения близки к отношению 3:4. Но период ее обращения периодически меняется с амплитудой в 34 минуты. Математическое моделирование показало, что такая амплитуда соответствует массе экзопланеты в 2,9-12,5 процентов массы Земли, а ее рассчитанная плотность — от 1,1 до 5 грамм на кубический сантиметр. Для примера, плотность Земли — 5,5 грамм на сантиметр кубический. Это делает Kepler 138b очень похожим на Марс, масса которого составляет всего 10,7% земной.

8.2. Астрономы подтвердили существование ближайшей экзопланеты-суперземли

Июль 2015, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Астрономы обсерватория Женева, под руководством Ати Моталбети, с помощью космического телескопа «Спитцер» подтвердили существование самой близкой на данный момент экзопланеты земного типа. Расстояние до HD 219134b составляет 21 световой год, но она находится вне зоны обитаемости. Об этом сообщает пресс-центр NASA, статья принята к публикации в журнал Astronomy & Astrophysics.

На существование HD 219134b первоначально указали данные спектрографа HARPS-North, установленного на 3,58-метровом телескопе в обсерватории острова Ла Пальма. Прибор измеряет изменение радиальной скорости звезды под влиянием гравитации массивных экзопланет, обращающихся вокруг нее.

Космический телескоп «Спитцер» позволил пронаблюдать транзиты экзопланеты в системе звезды HD 219134 — периодические снижения яркости, связанные с прохождением объекта перед диском светила. Благодаря этому астрономы смогли уточнить размеры планеты, а также сделать ряд предположений о ее составе. Новые данные показали, что диаметр планеты составляет 1,6 земного. Масса экзопланеты примерно в 4,5 раза тяжелее Земли, а период ее обращения составляет трое суток. На основании данных о ее массе ученым удалось определить ее плотность — она составила 5,89 грамм на сантиметр кубический, что сопоставимо со средней плотностью Земли. Эти данные показывают, что экзопланета HD 219134b относится к земному типу. Астрономы предполагают, что новый мир обладает очень высокой температурой поверхности, поэтому, скорее всего, часть пород находится в расплавленном состоянии. Кроме того, экзопланета может обладать геологической активностью и вулканизмом.

8.3. Небольшие звезды помогут своим планетам формировать магнитное поле

Сентябрь 2015, Astrobiology, nplus1.ru

Астрофизики из Университета Вашингтона выяснили, что звезды с массами до половины солнечной могут помогать своим планетам формировать магнитные поля. Такие поля чрезвычайно важны для существования жизни на планетах, защищая поверхность небесного тела от заряженных частиц звездного ветра. Исследование опубликовано в журнале Astrobiology.

Авторы работы провели компьютерное моделирование приливных сил, которые действуют на планеты, обращающиеся вблизи небольших звезд (от 0,1 до 0,6 массы Солнца). Эти силы приводят к тому, что со временем планеты разворачиваются к звезде одной своей стороной. Но, кроме того, они же разогревают внутренности планет, что, в частности, хорошо видно на примере спутника Юпитера Ио — в нем приливные силы вызывают вулканическую активность.

Анализируя результаты моделирования ученые выяснили, что разогрев и увеличение подвижности мантии гипотетических планет неожиданно приведет к тому, что от их ядра будет более эффективно отводиться тепло. По словам физиков, это охлаждение является ключевым в процессе формирования магнитного поля. Причем наибольшим эффектом оно обладает для планет, находящихся в обитаемой зоне небольших звезд.

Подтвердить такие результаты удастся лишь в будущем, когда появятся достаточно мощные приборы, способные измерять магнитные поля экзопланет. На современном же этапе развития ученым удастся лишь определять магнитные поля ближайших звезд. Для этого исследователи анализируют поляризацию света, излучаемого объектами.

8.4. В суперземлях предсказали существование запрещенных веществ

Декабрь 2015, Scientific Reports, nplus1.ru

Российские ученые из Московского физико-технического института провели моделирование с использованием алгоритма USPEX, разработанного одним из руководителей исследования Артемом Огановым и установили, что в недрах суперземель могут находиться химические вещества, не встречающиеся на Земле. Работа опубликована в Scientific Reports.

Землеподобные планеты состоят из кремниевой оболочки, силикатно-оксидной мантии (достигающей около 7/8 объема Земли) и железного ядра. По сути, магний, кислород и кремний служат химическим «базисом» как на Земле, так и на суперземлях.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что давление внутри таких планет обеспечивает стабильность невозможных на Земле соединений магния, кремния и кислорода: $MgSi_3O_{12}$ и $MgSiO_6$, а также оксидов кремния SiO_3 и SiO . Характерные для Земли соединения выглядят как $MgSiO_3$ (метасиликат магния, встречающийся в природе под видом минерала клиноэнстатита) и широко распространенный оксид кремния SiO_2 .

При этом $MgSi_3O_{12}$ представляет собой оксид металла и является проводником, в то время как другие вещества, содержащие Mg-Si-O атомы являются диэлектриками или полупроводниками. Это оказывает существенное влияние на магнитное поле суперземель — по предположению ученых, оно должно значительно превышать магнитное поле Земли. А более сильное магнитное поле это более надежная защита от космической радиации и, следовательно, более пригодные для существования жизни условия.

8.5. Облака заставили маленькие экзопланеты казаться больше

Июнь 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Облака и дымка в атмосфере экзопланет могут заставлять их казаться больше, чем они есть на самом деле. К такому выводу пришли ученые из Австралийской академии наук в своей статье, опубликованной в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. В 2014 году команда исследователей во главе с Хельмутом Ламмером (Helmut Lammer) с помощью космического телескопа CoRoT изучала верхний слой атмосферы двух экзопланет, которые регулярно проходят перед общей материнской звездой.

Обе экзопланеты имеют достаточно небольшую массу: CoRoT-24c по своей массе сопоставима с массой Нептуна (28 масс Земли), а масса CoRoT-24b составляет всего 6 масс Земли. При этом экзопланеты почти одинакового размера — пять и шесть радиусов Земли (полярный радиус — 6,4 тысячи километров) соответственно, что позволяет предположить, что CoRoT-24b имеет гораздо меньшую плотность.

Короткий период вращения планет — 12 и 5 дней соответственно — подразумевает, что они достаточно сильно нагреваются звездой. Расчеты показали, что из-за высоких температур CoRoT-24c, которую окружает облако водородного газа, потеряла бы свою атмосферу уже через сто миллионов лет. Однако возраст материнской звезды насчитывает миллиарды лет, то есть атмосферы уже давно не должно было бы быть.

Тогда ученые предположили, что на самом деле планета в два раза меньше, чем ранее предполагалось. Гидродинамическое моделирование показало, что CoRoT-24c — небольшая экзопланета, окруженная не очень плотной атмосферой, которая, тем не менее, искажает результаты наблюдений.

8.6. Двойника Солнца уличили в поедании собственных планет

Декабрь 2016, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Астрономы обнаружили систему, в которой звезда-близнец Солнца вероятно поглотила вращающиеся вокруг нее экзопланеты. Статья, рассказывающая об открытии, принята к публикации в журнале Astronomy & Astrophysics, препринт доступен на сайте ArXiv.org.

Обнаруженная исследователями звезда HIP 68468 находится от нас на расстоянии 300 световых лет. Ее масса составляет 1,05 масс Солнца, возраст — 5,9 миллиарда лет, и она, как и главная звезда Солнечной системы, относится к спектральному классу G. Вокруг HIP 68468 вращаются две планеты: одна из них супернептун HIP 68468c, который находится к звезде ближе, чем Венера к Солнцу, а другая, вероятно, является суперземлей с массой 2,9 масс Земли. Вторая планета расположена всего в 0,03 астрономических единиц от HIP 68468 и совершает полный оборот за три дня.

Существующие теории говорят о том, что оба небесных тела, скорее всего, сформировались в более удаленных уголках планетной системы, после чего они постепенно мигрировали на свои текущие орбиты. Исследователи предполагают, что в ходе этого процесса планеты своим гравитационным полем могли «вытолкнуть» другие, более близкие к главной звезде объекты, которые затем оказались поглощены HIP 68468.

В пользу этой гипотезы свидетельствует и анализ спектра «близнеца Солнца». Он показывает, что звезда содержит слишком много для своего возраста лития (примерно в четыре раза больше) и тугоплавких металлов, которые встречаются на каменистых планетах. Согласно расчетам исследователей, такой избыток веществ мог возникнуть, если бы HIP 68468 поглотила планету или несколько планет с совокупной массой примерно шесть масс Земли.

8.7. У экзопланеты земного типа впервые нашли атмосферу

Апрель 2017, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Астрономы из Великобритании, Швеции, Германии и Италии впервые обнаружили следы атмосферы у экзопланеты земного типа. Хотя установить ее состав точно не удастся, ее спектральные характеристики хорошо описываются смесью воды и метана. Ранее астрономы наблюдали атмосферы лишь у значительно более крупных объектов — горячих юпитеров. GJ 1132b обладает массой в 1,6 раз больше земной, а ее радиус превышает радиус Земли в 1,4 раза. Исследование опубликовано в The Astronomical Journal.

GJ 1132b — транзитная экзопланета земного типа, расположенная в 39 световых годах от Земли. Планета была открыта в 2015 году и, по мнению астрономов, может обладать атмосферой. Вместе с тем, равновесная температура ее поверхности составляет 600 кельвинов, поэтому она не пригодна для жизни.

С помощью 2,2-метрового телескопа в Южной европейской обсерватории (Чили) были проведены наблюдения девяти транзитов экзопланеты перед диском звезды. Каждый транзит астрономы анализировали в семи различных спектральных диапазонах: четырех оптических и трех инфракрасных. Для каждого диапазона исследователи оценили видимый диаметр экзопланеты.

Оказалось, что видимый диаметр в одном из инфракрасных диапазонов со статистической значимостью четыре сигма превышает диаметр, полученный из оптических наблюдений. По словам авторов, это говорит об уверенном обнаружении атмосферы экзопланеты. Астрономы отмечают, что непрозрачность атмосферы для инфракрасного излучения может объясняться наличием в ней воды, метана или других веществ.

8.8. У ближайшего «близнеца» Солнца нашли четыре экзопланеты

Август 2017, *Astrophysical Journal*, nplus1.ru

Группа ученых из Великобритании и США обнаружила четыре планеты у Тау Кита, ближайшей к нам звезды солнечного типа. Две из них находятся в зоне обитаемости — то есть там, где условия подходят для существования жидкой воды. Работа исследователей принята к публикации в журнале *Astrophysical Journal*.

Тау Кита находится в 12 световых годах от Земли и по размеру лишь немного уступает нашему светилу: ее масса и радиус составляют 0,783 и 0,79 солнечных соответственно. Благодаря тому, что звезда отличается стабильностью, она давно привлекла внимание ученых. В декабре 2012 года группа астрономов измерила ее лучевую скорость и пришла к выводу, что вокруг «близнеца» Солнца вероятно вращаются пять экзопланет с массами от 2 до 6,6 земных. Небесные тела, получившие название Тау Кита b, c, d, e, f, находятся на стабильных, почти круговых орбитах. Год на самой близкой к светилу экзопланете длится 13,9 дней, на самой далекой — 640 дней. Изначально предполагалось, что два объекта, Тау Кита e и f, попадают в потенциально обитаемую зону звезды, однако последующее моделирование показало, что в лучшем случае они находятся на самом ее краю.

Команда ученых во главе с Фабио Фенгом из университета Хартфордшира провели с помощью спектрографа HARPS, принадлежащего Европейской космической обсерватории, и обсерватории Кека дополнительные исследования системы Тау Кита. Анализ данных указал на существование, как минимум, четырех экзопланет. Все они находятся далеко от зоны обитаемости, но Тау Кита e довольно близка к ним. Тем не менее, звезду окружает много обломков, которые должны постоянно бомбардировать поверхность небесных тел, что не способствует зарождению и поддержанию жизни.

8.9. Массу проглоченных Кроносом планет оценили в 15 Земель

Октябрь 2017, ArXiv.org, nplus1.ru

Астрономы из Принстонского университета обнаружили звезду, которая, вероятно, поглотила несколько планет с суммарной массой, соответствующей пятнадцати Землям. Публикация на сайте ArXiv.org.

Звезда солнечного типа HD 240430, получившая название Кронос (в честь Кроноса — греческого бога, который съел своих детей), входит в состав двойной звездной системы. Вместе со своим компаньоном, звездой HD 240429 или Криос (так звали брата Кроноса), она находится на удалении 350 световых лет от Земли и совершает один оборот вокруг него за 10 тысяч лет. Возраст небесных тел составляет примерно четыре миллиарда лет.

Наблюдения вели с помощью космического телескопа Gaia и спектрометра High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) в обсерватории Кека. Анализ спектра звезд показал, что Кронос содержит большое количество веществ, которые плавятся при высоких температурах (свыше 1200 кельвинов) и часто входят в состав каменных планет. Это магний, алюминий, кремний, железо, хром и иттрий. А доля летучих молекул: кислорода, углерод или азот, в составе звезды была относительно низкой.

Предположение, что Кронос поглотил крупный газовый гигант отпадает, в таком случае количество летучих элементов было бы выше. Скорее всего, Кронос поглотил несколько каменных планет общей массой 15 масс Земли.

Не исключено, что Кронос и Криос сформировались в разных газовой-пылевой облаках, кроме того, Кронос мог поглотить не сами планеты, а материю из протопланетного диска, содержащую металлические элементы.

8.10. «Кеплер» нашел «сестру» Солнечной системы

Декабрь 2017, nplus1.ru

Астрономы обнаружили восьмую планету в планетной системе звезды Kepler-90 — она стала первой известной системой с таким же числом планет, как и в Солнечной системе.

Открытие стало возможным благодаря использованию технологий машинного обучения Google для анализа данных космического телескопа «Кеплер», заявили ученые на пресс-конференции в NASA. Научная статья об открытии выложена здесь.

Астрономы из Техасского университета в Остине под руководством Эндрю Вандербурга (Andrew Vanderburg) и Кристофера Шэлю (Christopher Shallue) применили новый подход к поиску экзопланет. Они использовали глубокое обучение для анализа кривой блеска Kepler-90, звезды спектрального класса G, масса и радиус которой всего в 1,2 раза больше, чем у Солнца. Она находится в 2,5 тысячи световых лет от Земли в созвездии Дракона.

Ранее ученым уже было известно о семи экзопланетах рядом с Kepler-90. Самая крупная из них, Kepler-90 h, по размеру сравнима с Юпитером и совершает один оборот вокруг светила за 331 день. Теперь же ученым удалось обнаружить восьмую, самую маленькую планету — Kepler-90 i, радиус которой всего на 30 процентов больше земного.

Чтобы поймать слабый сигнал от небольшой планеты, исследователи натренировали нейронную сеть на выборке из 15 тысяч ранее уже проверенных «вручную» сигналов в каталоге экзопланет «Кеплера». В итоге компьютер научился распознавать «следы» экзопланет в кривых блеска звезд с точностью до 96 процентов. Алгоритм применили для анализа света 670 звезд с собственными планетными системами.

8.11. Астрономы нашли самую плотную суперземлю

Февраль 2018, arxiv.org, nplus1.ru

Группа астрономов во главе с Джоанной Теске (Johanna Teske) изучила три планеты, открытые «Кеплером» в системе оранжевого карлика GJ 9827, который расположен в 100 световых годах от Земли в созвездии Рыб. Препринт опубликован на портале ArXiv.org. Чтобы понять структуру и состав экзопланет, ученым необходимо с большой точностью знать значения плотности планет, на основе которых строятся модели, описывающие их внутреннюю структуру и тип атмосферы.

Для нахождения плотности необходимо знать размеры и массу планеты. Значения массы планет удалось определить с помощью спектрографа PFS (Planet Finding Spectrograph), установленного на 6,5-метровом Магеллановом телескопе II, при помощи метода радиальных скоростей и пакетов обработки данных SYSTEMIC и RADVEL, размер экзопланет оценивался на основе метода транзитной фотометрии во время транзита планет на фоне диска звезды.

Было определено, что массы планет GJ 9827b, GJ 9827c и GJ 9827d составляют 7,6, 2,65 и 4,67 масс Земли соответственно. Учитывая, что их радиусы примерно равны 1,64, 1,29 и 2,08 радиусам Земли, астрономы пришли к выводу, что экзопланета GJ 9827d может иметь обширную газообразную оболочку с высоким относительным содержанием водяного пара, водорода и гелия. Тот факт, что планета получает в 30 раз меньше излучения от звезды, чем в случае нашей Земли, позволяет утверждать, что оболочка планеты мало подвержена фотоиспарению. Экзопланета GJ 9827c может содержать до 50 процентов железа и до 50 процентов воды по массе, а экзопланета GJ 9827b оказалась самой массивной и плотной, содержащей более 50 процентов железа по массе.

8.12. Астрономы нашли «старшего брата» Меркурия размером с Землю

Март 2018, Nature Astronomy, nplus1.ru

Астрономы обнаружили экзопланету, которая по внутреннему строению схожа с Меркурием, по размеру она близка к Земле и вращается вокруг оранжевого карлика. Впервые удалось открыть экзопланету, в которой относительное содержание веществ сильно отличается от того, что наблюдается в материнской звезде.

Опубликовано в журнале Nature Astronomy,

Астрономы под руководством Александра Сантерна (Alexandre Santerne) из Университета Экс-Марсель изучили данные телескопа «Кеплер» об оранжевом карлике EPIC 228801451. Анализ кривой блеска показал, что вокруг звезды вращаются три планеты — K2-229 b, c и d. Две из них более чем в 20 раз крупнее Земли, в то время как другая, самая близкая к EPIC 228801451 планета, имеет массу лишь 2,5 земных. Она вращается вокруг материнской звезды с периодом 14 часов, а ее радиус почти равен радиусу нашей планеты.

Сравнение K2-229 b с другими небесными телами показало, что по внутреннему строению планета близка к Меркурию, который отличается от остальных планет земной группы тем, что обладает необычайно крупным жидким железно-никелевое ядром радиусом 1800 – 1900 километров, которое содержит основную часть массы планеты и составляет 3/4 его диаметра, что сопоставимо с размером Луны, и концентрация железа в нем выше, чем у любой другой планеты. Меркурий фактически лишен мантии, что некоторые астрономы объясняют возможным столкновением с другим небесным телом, которое лишило Меркурий «внешнего покрова». Однако, чтобы подтвердить достоверность этой теории, необходимо найти другие примеры подобных планет.

8.13. Астрономы определили массу «планеты-младенца» из системы Беты Живописца

Август 2018, Nature Astronomy, nplus1.ru

Астрономы Игнас Снеллен (Ignas Snellen) и Энтони Браун (Anthony Brown) из Лейденского университета использовали альтернативный метод, чтобы определить параметры Беты Живописца b. Для этого они использовали данные космического телескопа Hipparcos, который был запущен в 1989 году для выполнения астрометрических наблюдений (измерения координат, расстояний и собственных движений светил), и телескопа Gaia, собравшего информацию о положении на небе и яркости 1,7 миллиарда звезд. Статья опубликовано в журнале Nature Astronomy.

Система Беты Живописца очень молода. По оценкам исследователей, ее возраст составляет всего 20 миллионов лет. Изучение ее — это редкая возможность увидеть, как эволюционирует звезда, которая сформировалась совсем недавно по космическим меркам.

Кроме того, возле звезды была обнаружена экзопланета Бета Живописца b, которая находится на расстоянии примерно 9 а. е.. Определить массу этой экзопланеты астрономы смогли, совместив данные телескопа Hipparcos, который наблюдал Бету Живописца 111 раз между 1990 и 1993 годом, а также 32 наблюдения звезды телескопом Gaia в 2014-2016 году. Таким образом, ученые смогли посмотреть на движение небесного тела с разницей в 24 года.

Выяснилось, что масса планеты Беты Живописца b в 11 ± 2 раз больше, чем у Юпитера. Ее период вращения вокруг собственной оси предположительно равен 22,2 года. Это согласуется со сценариями, в которых планета формируется в системе с высокой энтропией вокруг горячей звезды. Полученный результат представляет собой важный шаг к лучшему пониманию процессов, связанных с эволюцией планет.

8.14. Астрономы обнаружили разрушающуюся экзопланету

Январь 2019, *Astronomical Journal*, universemagazine.com

Группа исследователей из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра во главе с Николь Д. Колон (Nicole D. Colón) опубликовала статью в журнале *Astronomical Journal*, посвященную результатам фотометрических наблюдений экзопланеты K2-22b. Ученые пришли к выводу, что данное тело находится в процессе разрушения.

K2-22b была открыта в 2015 году при помощи телескопа «Кеплер» в рамках расширенной миссии K2. Экзопланета вращается вокруг красного карлика, расположенного на расстоянии около 800 световых лет от Солнца в созвездии Льва. Ее орбита проходит на расстоянии 0.009 а. е. (1.3 миллиона км) от родительской звезды. Экзопланета совершает один оборот вокруг красного карлика всего за 9 часов. Из-за того, что глубина транзитов K2-22b постоянно меняется, астрономы пока что не могут вычислить примерный размер тела. На данный момент точно известно, что он не превышает 2.5 радиуса Земли. Впрочем, ученые считают, что, скорее всего, экзопланета по размеру сопоставима с Марсом.

Выяснилось, что вызываемые транзитами изменения кривой блеска звезды имеют ассиметричную форму. Это свидетельствует о том, что K2-22b окружена пылевыми облаками и/или имеет кометоподобный хвост.

В период с декабря 2016 по май 2017 года астрономы провели дополнительные наблюдения системы. Их результаты подтвердили предположение о наличии у K-22b хвоста. Его отличительной особенностью является то, что он не только тянется за экзопланетой, но и также опережает ее при орбитальном движении. Был сделан вывод, что хвост K-22b состоит из пыли, появившейся в результате постепенного разрушения экзопланеты под действием приливных сил со стороны звезды.

8.15. У экзопланет в системах молодых звезд «нет шансов» сохранить атмосферу

Апрель 2019, Astronomy and Astrophysics, astronews.ru

Недавно проведенные обзоры неба показывают, что в системах звезд могут существовать тысячи землеподобных планет, которые еще не открыты учеными. Поэтому большое сожаление вызывают новые результаты, согласно которым атмосферы экзопланет практически полностью уничтожаются родительскими звездами.

Этот неутешительный вывод был сделан командой европейских исследователей под руководством К.П. Джонстона (C.P. Johnstone), которая производила моделирование формирования атмосфер землеподобных планет, обращающихся вокруг горячих, молодых звезд. Поскольку молодые звезды излучают экстремально большое количество энергии в форме рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, это приводит к уничтожению атмосфер планет в течение первого миллиона лет с момента завершения формирования планеты.

В случае карликов спектрального класса М активность звезды может снижаться до уровня, сравнимого с уровнем активности Солнца, на протяжении нескольких миллиардов лет. В течение этого времени любая экзопланта, движущаяся по орбите в обитаемой зоне звезды, получает настолько большое количество излучения, что у ее атмосферы почти не останется шанса сохраниться в течение первых 100000 лет.

В результате большинство экзопланет, расположенных на орбитах вокруг карликов спектрального класса М в близлежащих планетных системах, вероятно, имеют очень тонкие атмосферы или не имеют их вовсе. Это означает, что потенциальная обитаемость даже наиболее многообещающих землеподобных экзопланет следует оценивать ниже, чем считалось ранее.

Опубликовано в журнале Astronomy and Astrophysics.

8.16. Астрономы нашли у звезды Тигардена две землеподобные планеты

Июнь 2019, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Звезда Тигардена находится в 12,5 световых годах от Земли в созвездии Овна, она представляет собой старый (возраст более 8 миллиардов лет) красный карлик спектрального типа M7. Ее эффективная температура составляет 2904 кельвин, масса — 0,089 массы Солнца, а радиус — 0,107 радиуса Солнца. Звезда крайне тусклая, из-за чего ее открыли лишь в 2003 году. Астрономам известны лишь две планетные системы, эффективные температуры звезд в которых ниже трех тысяч кельвин. Это Проксима Центавра и TRAPPIST-1.

Интересной особенностью звезды Тигардена является то, что она находится очень близко к плоскости орбиты Земли вокруг Солнца и гипотетический наблюдатель в этой системе сможет наблюдать прохождения по Солнцу в период с 2044 по 2496 год Земли, Меркурия и Марса.

Группа астрономов из проекта CARMENES, который нацелен на поиск небольших экзопланет у маломассивных и близко расположенных к Земле звезд, сообщает об обнаружении двух планет, расположенных на орбитах вокруг звезды Тигардена. Наблюдения за звездой велись около трех лет, в них участвовали несколько наземных обсерваторий, сами планеты были открыты при помощи метода лучевых скоростей.

Оценки масс планет Teegarden's Star b и c равны, соответственно, 1,25 и 1,33 масс Земли, а периоды обращения вокруг звезды составляют 4,91 и 11,4 земных дня. Они находятся в зоне обитаемости и чуть больше Земли. Предполагается, что они могут быть каменистыми, иметь железное ядро или покрыты океаном. Эти две экзопланеты относятся к числу с наименьшей массой, обнаруженных планет на сегодняшний день и представляют собой очень интересные цели для будущих исследований.

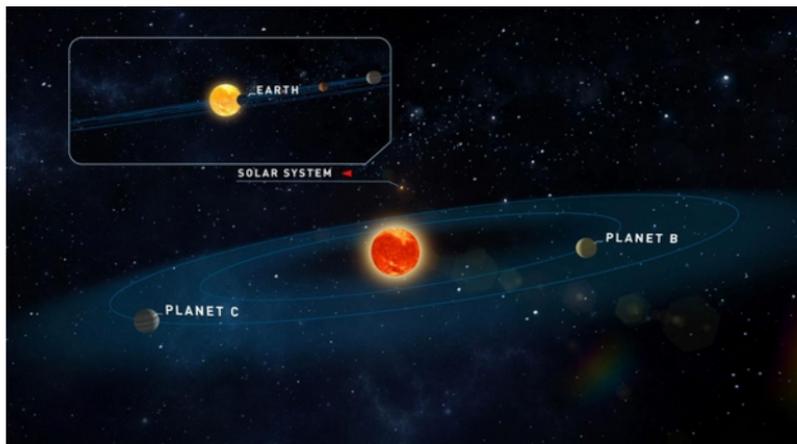


Рис. Звезда Тигардена

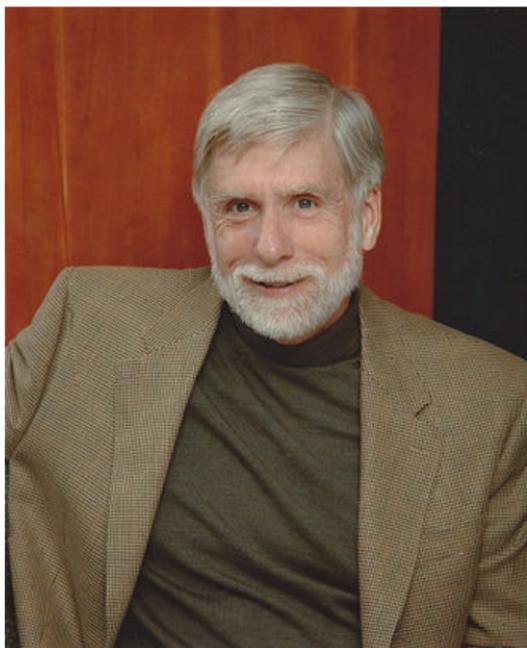


Рис. Боннард Джон Тигарден

8.17. Боннард Джон Тигарден

Боннард Джон Тигарден (родился 23 августа 1940 года) — американский астрофизик, ранее работавший в Центре космических полетов им. Годдарда НАСА, ныне на пенсии. Он провел большую часть своей карьеры, изучая космические гамма-лучи, и наиболее известен общественности тем, что возглавлял команду, которая открыла звезду Тигардена в 2003 году.

Тигарден вырос в Фэр-Хейвене, штат Нью-Джерси, и окончил региональную среднюю школу Рамсон-Фэр-Хейвен в Рамсоне в 1958 году. Он получил степень бакалавра наук в Массачусетском технологическом институте в 1962 году и степень доктора философии в Университете Мэриленда в 1967 году. Его диссертацией было «Исследование галактических космических лучей низкой энергии».

Открытие звезды Тигардена стало несколько неожиданным, поскольку на протяжении многих десятилетий не было обнаружено ни одной близкой звезды. Команда Тигардена обнаружила эту звезду в данных, полученных годами ранее не связанной с ней программой поиска околоземных астероидов. Принятое расстояние в настоящее время составляет более двенадцати световых лет.

Основные работы Тигардена связаны с исследованием космических лучей. Тигарден принимал участие в экспериментах с космическими лучами миссии станции «Пионер-10», а позже исследователем в космических экспериментах INTEGRAL (космический телескоп для наблюдения за гамма-лучами) и BATSE (поиск гамма-всплесков). Он участвовал в исследованиях звездного нуклеосинтеза. Опубликовал около 200 статей.

После ухода из НАСА Тигарден и его жена переехали в Аннаполис, штат Мэриленд. Теперь он работает по дереву и ходит под парусами. Он разработал специальное программное обеспечение для изготовления декоративных деревянных мисок.

8.18. Телескоп TESS открыл свою самую маленькую экзопланету

Июнь 2019, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Веселин Костов (Veselin Kostov) из Космического центра имени Годдарда и его коллеги по итогам анализа данных с TESS и нескольких наземных обсерваторий сообщили об открытии трех экзопланет в системе яркого карлика L 98-59 спектрального класса M, масса которого составляет 0,31 массы Солнца, а радиус — 0,31 солнечного. Звезда находится на расстоянии около 35 световых лет от Солнца в созвездии Летучей Рыбы, ее эффективная температура оценивается в 3367 кельвинов, а светимость в тысячу раз меньше солнечной.

Радиус самой близкой к звезде экзопланеты L 98-59b составляет 0,8 радиуса Земли. Это самая маленькая планета, открытая TESS, однако телескоп «Кеплер» обнаруживал экзопланеты в два раза меньше Земли. Ее средняя масса оценивается примерно в 0,5 массы Земли, но она получает в 22 раза больше излучения от звезды, чем Земля от Солнца. L 98-59c, лежащая чуть дальше от звезды, совершает один оборот вокруг нее за 3,7 дня, ее масса составляет 2,4 массы Земли, радиус — 1,35 радиуса Земли, а поток получаемого ей излучения от звезды в 11 раз больше, чем получаемый Землей от Солнца. Год на самой дальней от звезды планете L 98-59d длится 7,5 дней, ее масса составляет 3,4 массы Земли, а радиус — 1,59 радиуса Земли, она получает в 4 раза больше излучения от звезды, чем Земля от Солнца.

Ни одна из этих экзопланет не находится в «зоне обитаемости», где на их поверхности может существовать жидкая вода. Однако все они находятся в «зоне Венеры», где планеты, обладающие плотной атмосферой, будут находиться под влиянием безусловного парникового эффекта. С этой точки зрения L 98-59d может представлять собой каменистую планету, похожую на Венеру, или мини-Нептун, обладающий твердым ядром.

8.19. «Спитцер» не нашел атмосферы у близкой экзопланеты земного типа

Август 2019, Nature, nplus1.ru

Один из методов определения наличия плотной атмосферы у небольшой экзопланеты заключается в поиске признаков перераспределения тепла при исследовании фазовой кривой.

Астрономы во главе с Лаурой Крейдберг (Laura Kreidberg) рассказали о результатах наблюдений инфракрасного космического телескопа «Спитцер» за экзопланетой LHS 3844b, которая была открыта в прошлом году при помощи телескопа TESS. Она находится в системе карликовой звезды спектрального класса M, в 48,6 световых лет от Солнца, и имеет радиус в 1,3 раза больше земного. LHS 3844b совершает один оборот вокруг своей звезды всего за 11 часов, что означает, что она находится в приливном захвате и на одной ее стороне всегда день, а на другой ночь.

Дневная сторона экзопланеты может нагреваться до 1040 кельвин, что позволило вести за ней наблюдения в инфракрасном диапазоне и получить кривую блеска, которая использовалась для построения температурной карты экзопланеты и различных моделей атмосфер. В результате наблюдений ученые пришли к выводу, что перераспределения тепла на LHS 3844b не происходит, у экзопланеты точно нет атмосферы с давлением в десять бар у поверхности планеты, и крайне маловероятна ситуация наличия атмосферы с давлением у поверхности планеты от одного до десяти бар. Любая тонкая газовая оболочка у LHS 3844b будет активно улетучиваться под действием интенсивного излучения звезды.

Альbedo планеты дает возможность предполагать, что она представляет собой каменистую планету, наподобие Меркурия, покрытую темными вулканическими породами типа базальтов. Таким образом, LHS 3844b стала первой экзопланетой, у которой доказано отсутствие атмосферы.

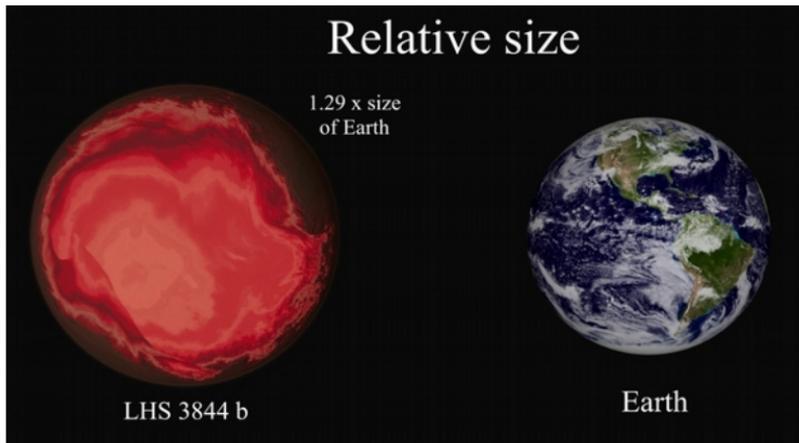


Рис. Сравнение экзопланеты LHS 3844b с Землей



Рис. Лаура Крейдберг

8.20. Лаура Крейдберг

Лора Крейдберг — американский астроном, которая занимается изучением экзопланет. С 2020 года она является директором Института астрономии Макса Планка (MPIA) в Гейдельберге, где возглавляет отдел физики атмосферы экзопланет (APEX).

Крейдберг изучала физику и астрономию в Йельском университете, где в 2011 году получила степень бакалавра наук. В 2016 году она получила степень доктора философии в области астрономии и астрофизики в Чикагском университете. Работала младшим научным сотрудником Общества стипендиатов Гарвардского университета с 2016 года. С 2019 по 2020 год она была научным сотрудником Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики. С 2020 года она является директором MPI по астрономии.

Областью деятельности Крейдберга является физика атмосфер экзопланет. Одним из направлений является наблюдение за «горячими юпитерами» и каменистыми планетами с помощью спектроскопии транзитных, как правило, экзопланет. Она является руководителем двух утвержденных программ наблюдений с помощью космического телескопа Джеймса Уэбба.

Почести и премии

Премия Энни Джамп Кэннон, Американское астрономическое общество 2021.

Пол Хертеленди, преподаватель, Гарвард–Смитсоновский центр астрофизики 2018.

Премия PhD Международного астрономического союза за 2017 год в отделе F.

Мемориальная премия Питера Б. Вагнера для женщин в области атмосферных наук 2015.

Премия Джорджа Беквита за выдающиеся достижения в астрономии, Йельский астрономический факультет 2011.

8.21. Обнаружены тысячи планет за пределами Млечного Пути

Февраль 2018, *Astrophysical Journal Letters*, nplus1.ru

Астрономы обнаружили признаки существования сразу нескольких тысяч межзвездных экзопланет за пределами Млечного Пути. Все они находятся в галактике, удаленной от нас на 3,8 миллиарда световых лет. Опубликовано в журнале *Astrophysical Journal Letters*.

Исследователи Синью Дай (Xinyu Dai) и Эдуардо Геррас (Eduardo Guerras) из Университета Оклахомы изучили данные рентгеновской обсерватории Chandra о квазаре RX J1131—1231. Сверхмассивная черная дыра в его центре имеет массу $1,3 \times 10^8$ солнечных и находится в 7 миллиардах световых лет от Земли (красное смещение $z = 0,658$). Перед ней (относительно Земли) на расстоянии 3,8 миллиардов световых лет расположилась гигантская эллиптическая галактика, играющая роль гравитационной линзы.

Анализ рентгеновского излучения в трех изображениях квазара показал необычное смещение спектральных линий, которое может быть объяснено наличием большого числа межзвездных планет, не имеющих материнской звезды. Моделирование показало, что в эллиптической галактике на одну звезду главной последовательности должно приходиться около 2 тысяч экзопланет, чьи массы варьируются от массы Луны до массы Юпитера, или 200 планет с массами между Марсом и Юпитером.

Кандидатов во внегалактические планеты находили и раньше, но они не были подтверждены. В 2009 году планета была обнаружена в галактике Андромеды. Спустя год, астрономы заявили об открытии планеты HIP 13044 b в 2 тысячах световых лет от Земли. Предполагалось, что она родилась в другой галактике и впоследствии была поглощена Млечным Путем, однако последующие работы не обнаружили признаков существования небесного тела.

8.22. Астрофизики впервые разглядели погоду на планете-сироте

Ноябрь 2015, The Astrophysical Journal, nplu1.ru

Международная группа астрофизиков впервые разглядела вариации в излучении планеты-сироты PSO J318.5-22, вызванные облаками. Это первый случай в истории наблюдения погоды на экзопланете — раньше погоду находили только у коричневых карликов. Статья ученых появилась в журнале The Astrophysical Journal. Препринт работы выложен на arXiv.org.

Планета PSO J318.5-22 — уникальный объект, открытый в 2013 году, представляет собой газовый гигант массой примерно 6,5 масс Юпитера. Он находится на расстоянии 80 световых лет от Земли, относится к движущейся группы звезд Беты Живописца, однако собственной звезды у него нет.

Ученые наблюдали за гигантом в инфракрасном диапазоне. В отсутствие звезды им удалось зафиксировать у объекта колебания яркости в несколько процентов. Причиной этих колебаний, по мнению ученых, являются облака. Моделирование показало, что лучше всего экспериментальные данные объясняются наличием сразу нескольких типов облаков — поплотнее внизу и разреженных в верхних слоях атмосферы планеты.

Наблюдения проведены с помощью телескопа NTT в Чили, в частности, с помощью работающего на этом телескопе спектрографа SoFi. Они стали частью большой программы по изучению коричневых карликов и планет-сирот, к классу которых относится PSO J318.5-22. Исследователи говорят, что похожие на обнаруженные колебания можно, в принципе, рассмотреть и у планет, вращающихся вокруг звезд, правда, с некоторыми поправками. Если это так, то астрофизики смогут разработать технологию наблюдения погоды уже у настоящих экзопланет.

Часть 9. Система TRAPPIST-1

- 9.1. Астрономы нашли сразу три экзопланеты в потенциально обитаемой зоне TRAPPIST-1
- 9.2. Мишель Гиллон
- 9.3. «Хаббл» впервые изучил атмосферу землеподобной экзопланеты
- 9.4. Найдена система с семью землеподобными экзопланетами
- 9.5. Планеты системы TRAPPIST назвали малопригодными для жизни
- 9.6. Все планеты системы TRAPPIST-1 признали землеподобными

9.1. Астрономы нашли сразу три экзопланеты в потенциально обитаемой зоне TRAPPIST-1

Май 2016, nplus1.ru

Группа астрономов под руководством Мишеля Гиллона (Michaël Gillon) из Института астрофизики и геофизики Льежского университета обнаружила три экзопланеты в потенциально обитаемой зоне коричневого карлика 2MASS J23062928-0502285 (TRAPPIST-1), сообщается на сайте Европейской южной обсерватории (ESO).

Астрономы использовали бельгийский телескоп TRAPPIST, установленный в чилийской обсерватории Ла-Силья, которая входит в состав входящей ESO. При наблюдениях за TRAPPIST-1 ученые обратили внимание на периодическое падение яркости и обнаружили на орбите звезды сразу три экзопланеты. Последующие наблюдения с помощью VLT и других телескопов позволили изучить систему коричневого карлика.

Оказалось, все три планеты по размеру сопоставимы с Землей. У двух планет сидерический период составляет полтора и 2,4 суток соответственно, а у третьей, менее изученной, находится в промежутке от 4,5 до 73 дней. Как отмечает руководитель исследования, такой период обращения вокруг звезды указывает на то, что планеты в 20-100 раз ближе к звезде, чем Земля к Солнцу.

Звезда TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285) — красный карлик, находящийся на расстоянии 40 световых лет от Солнечной системы. Звезда обладает массой около восьми процентов Солнца и яркостью, равной 0,05 процента солнечной.

Ближайшие из обнаруженных в потенциально обитаемой зоне экзопланет были найдены на расстоянии в 14 световых лет у звезды Вольф 1061. Планета Вольф 1061 b (масса 1,4 массы Земли) и расположена очень близко к звезде. Вольф 1061 d находится у дальней границы обитаемой зоны и массивнее Земли в 5,2 раза.

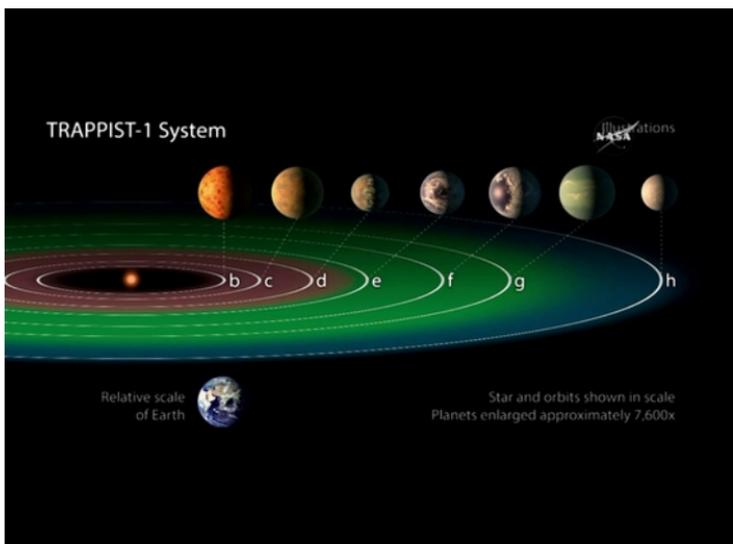


Рис. Система TRAPPIST-1

9.2. Мишель Гиллон

Мишель Гиллон (Michaël Gillon) (род. 1974) — бельгийский астроном и астрофизик. Магистр в области биохимии и астрофизики, а также доктора философии в области астрофизики. Он защитил докторскую диссертацию в Женевской обсерватории.

Гиллон занимается исследованием экзопланет. Он один из первооткрывателей многих экзопланет, в частности, WASP-18 b, и колец (10199) Харикло (астероида в Солнечной системе), он научный сотрудник Института астрофизики и геофизики департамента астрофизики, геофизики и океанографии и содиректор Исследовательского отдела астробиологии Льежского университета (Бельгия). Михаэль Гиллон стоит у истоков открытия экзопланетной системы TRAPPIST-1.



Рис. Мишель Гиллон

Мишель Гиллон начал свое высшее образование в возрасте двадцати четырех лет. После семи лет службы в бельгийской армии он поступил в Льежский университет и через пять лет получил степень по биохимии и степень бакалавра по физике. «Я закончил среднюю школу в возрасте семнадцати лет и не чувствовал себя готовым или мотивированным получить высшее образование. Впоследствии я пожалел об этом», — вспоминает он.

Увлечшись исследованиями, он стал докторантом в области астрофизики в 2003 году, после колебаний между генетикой и биохимией. В марте 2006 года он защитил докторскую диссертацию об улучшении фотометрии транзитов экзопланет в рамках проекта CoRoT. Затем он покинул Льежский университет и почти на три года остался в аспирантуре в обсерватории Женевского университета. Во время этого пребывания он участвовал в открытии горячего Юпитера WASP-18 b.

Вернувшись в Льежский университет в январе 2009 года, он продолжает свою работу по обнаружению экзопланет. Мишель Гиллон — научный руководитель проекта TRAPPIST. В 2010 году в рамках проекта было обнаружено около 30 транзитных экзопланет. Впервые было обнаружено тепловое излучение суперземли 55 Cancri e.

В 2013 году Гиллон был назначен членом научной группы CHEOPS. Он представляет там Бельгию вместе со своей коллегой Валери Ван Гроотель.

22 февраля 2017 года НАСА официально объявило об открытии семи экзопланет международной группой астрономов во главе с Михаэлем Гиллоном. Эти экзопланеты, названные TRAPPIST-1 b, c, d, e, f, g, h, были обнаружены с помощью телескопа TRAPPIST Европейской Южной обсерватории. Эти семь экзопланет, расположенных на расстоянии 39 световых лет от Солнца, вращаются вокруг карликовой звезды TRAPPIST-1. Три из этих экзопланет уже были обнаружены в 2015 году международной командой с помощью телескопа Trappist, но сотрудничество с НАСА расширило эти открытия.

Награды

Кавалер ордена «За заслуги перед Валлонией».

Входит в список 100 самых влиятельных людей по версии журнала Time за 2017 год.

11 сентября 2017 года он получает премию Бальзана в размере 750 000 швейцарских франков за поиск планет вокруг ближайших звезд, что считается "важным шагом на пути к обнаружению признаков жизни за пределами нашей солнечной системы". Премия будет официально вручена ему в Берне 17 ноября 2017 года президентом Швейцарской Конфедерации Дорис Лойтхард.

В 2021 году ему присуждается премия Франки (в области точных наук) за новаторские исследования в области экзопланетологии и астробиологии, которые привели, среди прочего, к открытию экзопланетной системы TRAPPIST-1.

9.3. «Хаббл» впервые изучил атмосферу землеподобной экзопланеты

Июль 2016, Nature, nplus1.ru

Международная группа астрономов впервые исследовала атмосферу двух экзопланет, схожих по размеру с Землей. Благодаря телескопу «Хаббл» ученые выяснили, что скорее всего газовые оболочки планет не похожи на водородно-гелиевые атмосферы планет-гигантов. Это увеличивает шансы на то, что планеты системы TRAPPIST-1 возможно обладают условиями пригодными для жизни. Исследование опубликовано в журнале Nature.

Для того, чтобы получить возможность исследовать состав атмосфер астрономы воспользовались событием двойного транзита экзопланет TRAPPIST-1b и 1c на фоне центральной звезды системы. Это произошло 4 мая 2016 года. Транзит каждой из планет длится по отдельности 36 и 42 минуты, причем планета 1c оказалась на диске звезды на 12 минут раньше, чем 1b.

Авторы сравнили изменение спектра звезды во время транзита с несколькими возможными моделями атмосферы экзопланеты. В частности, с достоверностью в 10 сигма удалось исключить гелиево-водородную атмосферу, лишенную облаков. Вместе с тем, отсутствие выраженных линий поглощения в спектре не позволяет сделать какие-то конкретные предположения о составе планеты. Так, наблюдения не исключают атмосферу из водяного пара или водородную атмосферу с плотным слоем облаков.

Система TRAPPIST-1 расположена в 40 световых годах от Земли. В ее центре находится холодная звезда, массой в 12 раз меньше Солнца. Недавно ученые обнаружили, что около нее обращаются три экзопланеты. У двух планет сидерический период составляет полтора и 2,4 суток соответственно, а у третьей, менее изученной, находится в промежутке от 4,5 до 73 дней.

9.4. Найдена система с семью землеподобными экзопланетами

Февраль 2017, Nature, nplus1.ru

Астрономы подтвердили существование семи экзопланет у звезды, которая расположена в сорока световых годах от Земли. Все объекты имеют схожий с Землей размер, а на поверхности трех из них может существовать жидкая вода. Исследователи сообщили об открытии на пресс-конференции NASA 22 февраля, статья опубликована в журнале Nature.

Подтвержденные учеными экзопланеты вращаются вокруг холодного красного карлика TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285) в созвездии Водолея. Эта звезда имеет поверхностную температуру около 2550 кельвинов, а ее масса достигает всего лишь 0,08 массы Солнца. TRAPPIST-1 относится к спектральному классу M8V, и его светимость только 0,05 процентов светимости Солнца.

Экзопланеты, получившие название TRAPPIST-1b, c, d, e, f, g и h, имеют схожие с размерами с нашей планетой — по оценкам исследователей, их радиусы варьируются от 1,19 до 0,76 земного. Самая близкая из них, TRAPPIST-1b, удалена от материнской звезды всего на 0,011 астрономических единиц и имеет период вращения всего 1,51 день. Самая дальняя планета TRAPPIST-1h, вероятно, совершает один оборот вокруг центрального светила за 20 дней и удалена на 0,06 астрономических единиц от него, однако орбитальные параметры этой планеты только предстоит подтвердить.

По оценкам исследователей, по крайней мере шесть из семи экзопланет предположительно имеют каменистый состав. Кроме того, на поверхность трех из них, TRAPPIST-1c, d и f, попадает примерно такое же количество энергии, сколько на Венеру, Землю и Марс соответственно. Планеты TRAPPIST-1b, c и d вероятно слишком горячи, и вода, скорее всего, испарится с их поверхности.

9.5. Планеты системы TRAPPIST назвали малопригодными для жизни

Апрель 2017, ArXiv.org, nplus1.ru

Астрономы выяснили, что центральная звезда системы TRAPPIST-1, у которой недавно было обнаружено семь землеподобных экзопланет, часто переживает мощные вспышки. По мнению ученых, это может негативно сказываться на атмосфере окружающих небесных тел и делать условия на них неподходящими для существования жизни, подобной земной. Работа исследователей доступна на сайте ArXiv.org.

Астрономы изучили кривую блеска красного карлика TRAPPIST-1, полученную с помощью телескопа «Кеплер». За 80-дневный период на звезде произошло 42 вспышки высокоэнергетического излучения, при этом пять из них имели сразу несколько пиков интенсивности — это значит, что мощных выбросов энергии было несколько. Среднее время между вспышками составило 28 часов.

Наиболее интенсивный «солнечный шторм» на TRAPPIST-1 был сравним с геомагнитной бурей 1859 года, известной как «Событие Кэррингтона». По всей Европе и Северной Америке отказывали телеграфные системы, а северные сияния наблюдались даже над Карибскими островами.

Солнечные вспышки не приносят значительного вреда живым организмам на Земле, поскольку их защищает магнитное поле, однако маловероятно, что у планет системы TRAPPIST-1 есть такой щит. К тому же, все они находятся значительно ближе к материнской звезде, чем Земля к Солнцу — ближайшая планета TRAPPIST-1b удалена всего лишь на 0,011 астрономических единиц, что в 35 раз ближе Меркурия к Солнцу.

Авторы статьи заключают, что подобные вспышки уменьшают пригодность планет для жизни, так как их атмосфера должна постоянно находиться в нестабильном состоянии.

9.6. Все планеты системы TRAPPIST-1 признали землеподобными

Февраль 2018, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Астрономы с помощью наземных и орбитальных телескопов смогли с большой точностью определить плотности планет, входящих в систему TRAPPIST-1, и оценить состав их атмосфер. Выяснилось, что все семь планет состоят из горных пород и могут содержать большое количество летучих веществ и воды, которая составляет до пяти процентов их массы. Результаты исследований опубликованы в журналах Nature Astronomy и Astronomy & Astrophysics.

В начале 2017 года исследователи обнаружили четыре новые планеты в системе TRAPPIST-1, расположенной в 40 световых годах от нас в созвездии Водолея. Ее главная звезда — ультрахолодный красный карлик с температурой внешних слоев 2550 Кельвинов, массой около 0,089 массы Солнца и светимостью 0,05 процентов светимости Солнца. Вокруг него вращается семь землеподобных планет, из которых три находятся в обитаемой зоне — области, где количества тепла от звезды достаточно для существования жидкой воды на поверхности. Однако в дальнейшем выяснилось, что звезда часто переживает мощные вспышки, которые могут негативно сказываться на атмосфере окружающих небесных тел и делать условия на них неподходящими для существования жизни, подобной земной, а четыре из семи экзопланет в системе могут быть непригодны для жизни из-за возможной активной вулканической деятельности и высокой температуры поверхности.

Группа астрономов под руководством Симона Гримма (Simon Grimm) проанализировали данные, полученные инструментом SPECULOOS в обсерватории Паранал и орбитальными телескопами «Спитцер» и «Кеплер», и построили компьютерные модели, в которых изменяли параметры орбиты экзопланет.

Часть 10. Система Проксима b

10.1. Проксима b (справка)

10.2. Гильем Англада

10.3. Ближайшей экзопланете Проксиме b разрешили иметь океаны

10.4. Проксима Центавра оказалась похожа на Солнце

10.5. Жизнь на Проксиме b возможна, если планета имеет толстую атмосферу

10.6. Астрономы рассказали о судьбе Земли на орбите Проксимы Центавра

10.7. Астрономы увидели у Проксимы Центавра следы двух пылевых колец

10.8. Вспышка на Проксиме Центавра увеличила яркость звезды в тысячу раз

10.1. Проксима b (справка)

Первое упоминание о существовании экзопланет возле Проксимы Центавра было сделано группой под руководством Микко Туоми в 2013 году, после анализа архивных данных о движении звезды, полученных с помощью двух спектрографов HARPS и UVES. В публикации предполагалось, что вокруг Проксимы Центавра вращаются четыре планеты с периодами обращения в 11, 31, 320 и 2000 суток. Однако это предположение не нашло подтверждения.

Поиски экзопланеты были продолжены в январе 2016 года, когда Европейская южная обсерватория запустила кампанию, получившую название «Бледно-красная точка» (Pale Red Dot).

Первое сообщение об открытии экзопланеты появилось в журнале Der Spiegel 12 августа 2016 года.

24 августа 2016 года существование Проксимы Центавра b было подтверждено группой астрономов под руководством сотрудника Лондонского университета королевы Марии Гиллема Англада-Эскуде.

В 2020 году существование планеты Проксима Центавра b было подтверждено учёными с помощью спектрографа ESPRESSO Очень Большого Телескопа (VLT). Также были уточнены её масса — не менее $1,173 \pm 0,086$ массы Земли, радиус будет равен 1,1 радиуса Земли и период обращения — $11,18427 \pm 0,00070$ дня.

Проксима Центавра b получает от своей родительской звезды примерно 65 % света, который Земля получает от Солнца. Планета имеет равновесную температуру 234 К ($-39,15$ °C)[13].

Планета вращается вокруг Проксимы Центавра, красного карлика спектрального класса M5,5Ve, входящего в тройную звёздную систему Альфа Центавра.

Масса звезды 0,12 масс Солнца, ее радиус 0,14 радиуса солнца. Возраст 4,85 миллиардов лет, температура поверхности — 3042 К.

10.2. Гильем Англада

Гильем Англада-Эскуде (родился в Улластреле, Барселона, в 1979 году) — каталонский астроном, доктор философии.

Закончил Барселонский университет.

Дипломная работа: «Эксперименты и релятивистские модели для оптической астрометрии из космоса».

В 2016 году он возглавлял команду астрономов в рамках кампании Pale Red Dot, результатом которой стало подтверждение существования Проксимы Центавра b, ближайшей потенциально к Земле звезды, пригодной для жизни внесолнечной планеты на Землю.

В 2017 году, Англада-Эскуде был назван в числе 100 самых влиятельных людей по версии Time и одним из 10 лучших ученых 2016 года по версии Nature.

Работа

Вашингтонский институт Карнеги (2008 – 2011)

Геттингенский университет (2012 – 2013)

Лондонский университет Королевы Марии (2013 – 2019)

Университет Хартфордшира (2014 – 2015)

Института наук Испании (2019 –)



Рис. Гильем Англада-Эскуде

10.3. Ближайшей экзопланете Проксиме b разрешили иметь океаны

Октябрь 2016, The Astrophysical Journal Letters, nplus1.ru

Ученые из Марсельской астрофизической обсерватории рассчитали возможный состав и строение ближайшей к Земле экзопланеты Проксима b. Расчеты допускают существование на ее поверхности океана, однако пока, в отсутствие наблюдательных данных даже о радиусе планеты, они основаны на множестве произвольных допущений. Исследование принято к публикации в The Astrophysical Journal Letters, ее препринт выложен в базе arXive.org.

Проксима Центавра b вращается вокруг ближайшей к Земле звезды и в этом смысле является уникальной экзопланетой. Она открыта с помощью спектрального метода, который подразумевает анализ периодического доплеровского смещения в излучении звезды. Далее, зная массу звезды, можно получить массу экзопланеты и ее период обращения. Для Проксимы b они составили 1,27 (1,1–1,46) массы Земли и 11,2 земных суток.

Фактически, эти две цифры — пока что все наблюдательные данные, которые есть у ученых о ближайшей экзопланете, все остальные сведения являются их интерпретацией. Например, зная энергию излучения красного карлика Проксимы Центавра, можно рассчитать зону обитаемости этой звезды. В случае Проксимы b ее орбита действительно лежит в обитаемой зоне. С высокой вероятностью на Проксиме b должна быть и вода — об этом говорят современные знания о механизме формирования планет. Однако прямых данных о существовании воды на экзопланете пока нет.

Важнейшим параметром, который в случае Проксимы остается до сих пор неизвестным, является ее радиус. Дело в том, что спектральный метод не дает возможности его измерить. Это можно сделать при наблюдении транзита, когда планета проходит по диску звезды. Зная

одновременно массу и радиус планеты, можно уже установить ее класс (каменистая это планета или газовый гигант) и приблизительно понять ее химический состав по аналогии с телами в Солнечной системе. Однако орбита Проксимы, судя по всему, сильно наклонена относительно луча зрения наблюдателя, из-за чего «поймать» ее транзит до сих пор не удалось. По существующим расчетам, геометрическая вероятность наблюдения транзита в случае Проксимы b составляет всего полтора процента. Поэтому пока для оценки состава планеты астрономам приходится прибегать к моделированию на основе сильных допущений.

В новой работе, принятой к публикации в *The Astrophysical Journal Letters*, эти допущения поняты максимально смело: авторы предполагают, что Проксима b относится к каменистым планетам земного типа и не сильно отличается от Земли по химическому составу.

В результате ученые получили диапазон радиусов, подходящих под массу Проксимы при условии ее каменистой природы. Диапазон составил от 0,94 до 1,4 радиуса Земли в зависимости от элементного состава. Минимальный радиус подразумевает сценарий, когда 65 процентов массы планеты составляет железное металлическое ядро а оставшаяся масса приходится на силикаты мантии. Верхняя граница описывает планету, наполовину состоящую из силикатов и покрытую льдами, под которыми лежит глубокий океан. И только один из рассмотренных четырех сценариев формирования планеты предполагает, что она оказывается почти сухой.

Несмотря на многие допущения, работа имеет научную ценность — она показывает важность более точных измерений химического состава самой звезды Проксима Центавра. Металличность звезды и соотношение концентраций элементов Mg/Si и Fe/Si в соответствии с моделью накладывают дополнительные ограничения на радиус Проксимы b . А значит, при невозможности наблюдения транзита эти данные могут быть косвенно использованы для расчета параметров планеты.

10.4. Проксима Центавра оказалась похожа на Солнце

Октябрь 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Звезда Проксима Центавра, рядом с которой ученые нашли ближайшую к Земле экзопланету, оказалась похожа на наше Солнце. У нее также наблюдается регулярный цикл формирования темных пятен, сообщает статья, опубликованная в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Звездные пятна, частным случаем которых являются пятна на Солнце, представляют собой потемнения на поверхности звезды, внутри которых температура в среднем ниже, чем за их пределами. Пятна появляются, когда мощные магнитные поля светила выходят в фотосферу и блокируют доступ тепла и энергии в отдельные участки его поверхности. На Солнце количество пятен считается одним из главных показателей его магнитной активности.

Оказалось, что на Проксиме Центавра наблюдается похожий цикл активности, который длится около семи лет. Обнаружить «звездный цикл» удалось благодаря Автоматизированному обзору видимого неба (All Sky Automated Survey) и наблюдениям Проксимы Центавра в рентгеновском диапазоне, проведенным с помощью телескопов Swift, Chandra и XMM-Newton.

Интенсивность цикла активности оказалась значительно выше, чем на Солнце: звездные пятна покрывают до 1/5 поверхности небесного тела.

Подобная активность может повлиять на пригодность Проксимы Центавра b для возникновения жизни. Согласно теориям, вспышки или звездный ветер, которые напрямую зависят от магнитных полей, могут оставить планету без атмосферы и, в таком случае, она будет напоминать нашу Луну, которая находится в потенциально обитаемой зоне, но не подходит для жизни.

10.5. Жизнь на Проксиме b возможна, если планета имеет толстую атмосферу

Декабрь 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, astronews.ru

Димитра Атри (Dimitra Atri), астробиолог из Института космических наук «Blue Marble», Чили, представил новую работу, описывающую компьютерное моделирование условий на поверхности планеты Проксима b, обращающейся вокруг звезды Проксимы Центавра, на поверхности которой может существовать жизнь.

Атри пришлось принять во внимание три фактора — тип и размер звездных вспышек, различные толщины атмосферы планеты и мощность её магнитного поля.

По его расчетам, жизнь на поверхности Проксимы b могла бы перенести губительное влияние звездных вспышек только в том случае, если бы экзопланета обладала атмосферой, схожей с атмосферой Земли и достаточно мощным магнитным полем.

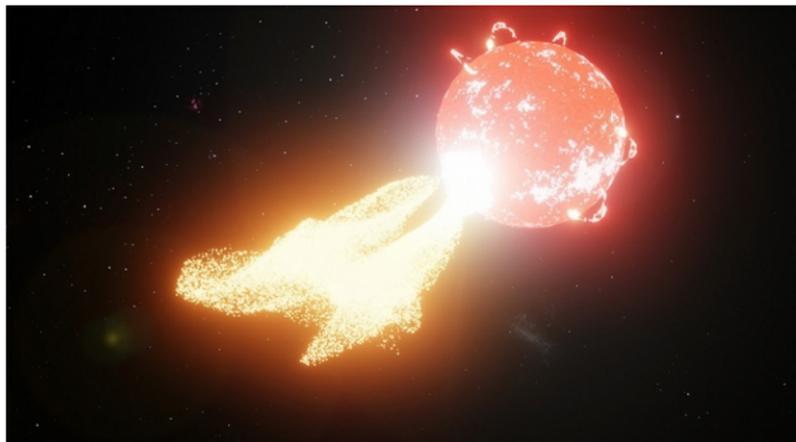


Рис. Вспышка на Проксиме b

10.6. Астрономы рассказали о судьбе Земли на орбите Проксима Центавра

Август 2017, The Astrophysical Journal Letters, nplus1.ru

Американские физики выяснили, что произошло бы с атмосферой Земли, если бы та обращалась около звезды Проксима Центавра примерно на той же орбите, что и экзопланта Проксима b. По оценкам авторов, скорость потери атмосферы в условиях сильного ультрафиолетового излучения и большой активности Проксимы окажется по меньшей мере в 10 тысяч раз больше, чем у настоящей Земли. При разных исходных данных полное исчезновение атмосферы произойдет за срок от 100 миллионов до 2 миллиардов лет, что гораздо меньше времени существования Проксимы b.

10.7. Астрономы увидели у Проксимы Центавра следы двух пылевых колец

Ноябрь 2017, nplus1.ru

Телескоп ALMA зарегистрировал присутствие холодной пыли в окрестностях Проксимы Центавра — ближайшей к Солнцу звезды. Это означает, что Проксима может обладать астероидными поясами, похожими на те, что есть в нашей планетной системе. Об этом сообщает Европейская южная обсерватория (ESO). Первый автор работы Гийем Англада (Guillem Anglada).

Температура пылевых частиц, которые являются источником сигнала, составила около 40 кельвинов. Область, в которой было зарегистрировано свечение, находится на расстоянии от одной до четырех астрономических единиц от звезды, что значительно дальше Проксимы b. Это может говорить о том, что вокруг

звезды возможно существование холодного пылевого пояса или даже многокомпонентной планетной системы.

Пылевой пояс является остатком протопланетного пылевого диска вокруг звезды. Он состоит из пыли и частиц, которые не сформировались в планету. Это очень важная находка. Первое свидетельство существования у ближайшей к Солнцу звезды многокомпонентной планетной системы, а не просто одиночной планеты.

Кроме этого, был зарегистрирован еще один сигнал на расстоянии около 30 астрономических единиц от звезды. Температура источника еще меньше, чем у первого, и составила около 10 кельвинов. Источник сигнала точно не определен, но он может говорить о существовании у звезды и второго пылевого пояса.

Возраст Проксимы Центавра такой же, как у Солнечной системы и пыль должна быть похожа по своим свойствам на пыль в поясе Койпера. Если это действительно часть пылевого пояса, то по его форме можно будет определить наклонение плоскости планетной системы Проксимы Центавра, что позволит узнать больше о Проксиме b.

10.8. Вспышка на Проксиме Центавра увеличила яркость звезды в тысячу раз

Февраль 2018, *Astrophysical Journal Letters*, nplus1.ru

Группа астрономов под руководством Мередит Макгрегор (Meredith MacGregor) из Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики обнаружила, просматривая данные радиоинтерферометра ALMA, мощную вспышку на ближайшей к Солнцу звезде, Проксиме Центавра. Событие произошло еще в марте 2017 года. Обычно вспышки на звездах ищут не в радио, а в рентгеновском диапазоне (из-за высоких энергий процесса), и поэтому ученые не сразу ее заметили. Статья принята к публикации в *Astrophysical Journal Letters*.

Яркость вспышки была в 10 раз выше, чем яркость самых мощных солнечных вспышек в аналогичном

диапазоне — она усилила яркость Проксимы Центавра в тысячу раз за 10 секунд. Ей предшествовала другая, более слабая вспышка, и всего событие длилось меньше двух минут.

«Вероятно, Проксима b получила большую дозу радиации во время этой вспышки. За миллионы лет существования экзопланеты события, подобные этому, могли лишит планету атмосферы или океана и сделать ее поверхность абсолютно безжизненной», — комментирует Макгрегор.

В ноябре 2017 года ученые, основываясь на тех же данных телескопа ALMA, пришли к выводу, что вокруг Проксимы Центавра могут существовать два пылевых кольца. Тогда радиоинтерферометр зарегистрировал свечение холодной пыли в окрестностях звезды. Однако Макгрегор отмечает, что если рассматривать светимость звезды как функцию во времени, то можно не только обнаружить яркую вспышку, но и отказаться от предположения о газопылевом кольце и других планетах вокруг Проксимы Центавра.

Часть 11. Экзопланеты в обитаемой зоне. 2015

- 11.1. Обитаемость
- 11.2. Потенциально пригодные для жизни планеты
- 11.3. Открытие древней планетной системы повышает шанс обнаружить жизнь во Вселенной
- 11.4. Наличие у звезд планет в «обитаемой зоне» оказалось обыденным явлением
- 11.5. Потенциально обитаемые планеты смогли поселиться в «неудобных» системах
- 11.6. Изобилие тория улучшило шансы экзопланет на обитаемость
- 11.7. Ученые обнаружили ближайшую к Земле планету в потенциально обитаемой зоне
- 11.8. Мини-нептуны могут переходить в разряд потенциально пригодных для жизни планет
- 11.9. Найдена первая землеподобная экзопланета в обитаемой зоне солнцеподобной звезды
- 11.10. Красный карлик лишил «двойника Земли» шансов на обитаемость
- 11.11. Астрономы находят «самозванок» среди потенциально обитаемых планет
- 11.12. Составлен список газов для поиска жизни на экзопланетах

11.1. Обитаемость

Важное направление изучения экзопланет — попытки обнаружить проявления жизни за пределами Солнечной системы. Жизнь может быть обнаружена, только если она развита в планетарном масштабе и изменяет планетарную среду таким образом, что изменения не могут быть объяснены только физико-химическими процессами. Например, если в атмосфере экзопланеты обнаруживается молекулярный кислород, который является результатом фотосинтеза растений и некоторых микроорганизмов. Хотя небольшое количество кислорода может быть произведено и не биологическими средствами. Кроме того, потенциально пригодная для жизни планета должна вращаться вокруг стабильной звезды на расстоянии, на котором объекты планетарной массы с достаточным атмосферным давлением способны поддерживать на своих поверхностях жидкую воду.

В англоязычной литературе обитаемую зону называют зоной Златовласки (англ. Goldilocks Zone). Это название представляет собой отсылку к английской сказке Goldilocks and the Three Bears, на русском языке известной под названием «Три медведя». В сказке Златовласка пытается воспользоваться несколькими наборами из трёх однородных предметов, в каждом из которых один из предметов оказывается по какому-либо параметру избыточным (большим, твёрдым, горячим и т. п.), или недостаточным (маленьким, мягким, холодным...), а третий, промежуточный между ними, предмет приходится «в самый раз». Аналогично, для того, чтобы оказаться в обитаемой зоне, планета не должна находиться ни слишком далеко от звезды, ни слишком близко к ней, а на «правильном» удалении.

Следует отметить, что тепло, производимое звездами, зависит от размера и возраста звезды, так что обитаемая зона может находиться на разных расстояниях для разных звезд. А еще на способность планеты удерживать тепло влияют атмосферные условия на планете.

11.2. Потенциально пригодные для жизни планеты

В 2015 году наилучшими кандидатами на то, чтобы быть потенциально обитаемыми, считались экзопланеты Kepler-62f, Kepler-186f и Kepler-442b.

Kepler-62 f — была открыта в 2013 году у оранжевого карлика Kepler-62 космическим телескопом «Кеплер». Она на 41 % больше, чем Земля. Ее возраст 7,5 миллиарда лет. Находится на расстоянии около 1200 световых лет от Солнца. Это одна из двух планет в этой системе, у которых климатические условия на поверхности схожи с земными. Считается, что планета сохраняет баланс температур, оптимальный для зарождения и поддержания жизни.

Kepler-186 f имеет размеры, аналогичные земным, радиус 1,2 радиуса Земли, и расположена ближе к внешнему краю обитаемой зоны вокруг красного карлика. Масса может варьироваться от 0,32 массы Земли, если планета полностью состоит из воды и льда, до 3,77 массы Земли, если состоит из железа. Если состав планеты схож с земным, то масса составит 1,44 массы Земли. Об открытии сообщалось в апреле 2014 года.

Kepler-442 b — экзопланета у оранжевого карлика Kepler-442 спектрального класса K с массой 0,111 массы Солнца, радиусом 0,59 радиуса Солнца и температурой поверхности 4129 °С. Находится на расстоянии 1194 св. года от Земли. Kepler-442 b больше Земли в 2,3 раза.

Следует отметить также Проксиму Центавра b, которая находится примерно в 4,2 световых годах от Солнца. Ее равновесная температура оценивается в -39 °С (234 °К).

В ноябре 2013 года было подсчитано, что $22 \pm 8\%$ солнцеподобных звезд в Млечном Пути могут иметь планеты размером с Землю в обитаемой зоне, то есть около 11 миллиардов потенциально пригодных для жизни планет, а с учетом красных карликов, 40 миллиардов.

11.3. Открытие древней планетной системы повышает шанс обнаружить жизнь во Вселенной

Январь 2015, arxiv.org, astronews.ru

Международная группа астрономов, используя данные, полученные космическим телескопом Кеплер, обнаружила самую древнюю систему планет в нашей галактике Млечный путь. Возраст этой системы составляет 11 млрд лет; она состоит из пяти каменных планет, меньших по размерам, чем Земля. Согласно исследователям, это открытие позволяет предположить, что планеты земных размеров формировались на протяжении всей истории Вселенной. Это открытие повышает вероятность обнаружения древних форм жизни. – и, возможно, даже развитых форм жизни – в нашей галактике.

«Факт, что эти каменные планеты уже находились на стадии формирования в нашей галактике 11 млрд лет назад, позволяет предположить, что пригодные для жизни земле подобные планеты могли существовать в течение очень длительного периода времени, значительно превышающего возраст нашей Солнечной системы», — утверждает доктор Трэвис Меткалф, главный научный сотрудник института науки о космосе.

Размеры звезды Кеплер-444 составляют примерно три четверти размера Солнца, и она находится от Земли на расстоянии 117 световых лет. Её планетная система, состоящая из пяти открытых к настоящему времени планет, является очень компактной — период обращения каждой из пяти планет вокруг звезды, не превышает 10 дней, а расстояние от планет до звезды составляет около 0,08 астрономической единицы, что соответствует одной пятой части радиуса орбиты Меркурия.

Однако планеты практически лишены атмосфер, подвергаются воздействию жестких компонентов излучения звезды, и потому непригодны для жизни.

11.4. Наличие у звезд планет в «обитаемой зоне» оказалось обыденным явлением

Март 2015, nplus1.ru,
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society []

По расчетам международной группы астрономов из австралийского Национального университета и Института Нильса Бора в Копенгагене, большинство звезд, имеющих экзопланеты, должны быть минимум одна экзопланета, находящаяся в «обитаемой зоне» — области, в пределах которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода. Использовались данные, собранные телескопом «Кеплер». Статья о работе опубликована в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Первый автор Тимоти Бовард (Timothy Bovaird) из Австралийского национального университета.

К уже открытым планетам было применено так называемое обобщенное правило Тициуса-Боде (ОПТБ), согласно которому в системе «спутников», вращающихся вокруг общего небесного тела периоды обращения первого и второго «спутника» относятся друг к другу примерно так же, как периоды второго и третьего, периоды третьего и четвертого — и так далее.

В ходе описываемой работы изучались не все экзопланеты, а только входящие в системы, где были открыты от 3 до 6 планет. Таких систем оказалось 151. В 124 случаях периоды экзопланет с удовлетворительной точностью отвечают ОПТБ.

Как показали расчеты, для большинства исследованных систем в пределах «обитаемой зоны» находилось от 1 до 3 планет. Экстраполируя этот результат на всю галактику Млечный путь, авторы сделали вывод, что в ней могут присутствовать миллиарды планет в «обитаемых зонах». Поскольку наличие жидкой воды — обязательное условие наличие жизни в любом известном нам виде, это, возможно, делает жизнь во Вселенной чуть менее редким явлением, чем считалось ранее.

11.5. Потенциально обитаемые планеты смогли поселиться в «неудобных» системах

Май 2015, arXiv.org, nplus1.ru

Астрофизики во главе с Зигфридом Эгглем (Siegfried Eggel) из Венского университета смоделировали возникновение скалистых планет в зонах обитаемости вокруг двойных звезд, которые разделены друг от друга небольшим расстоянием, и при этом имеют на орбите газовых гигантов. Несмотря на то, что в таких условиях появляются сильнейшие гравитационные возмущения, оказывается, что в ряде случаев землеподобные планеты могут возникать и в таких тяжелых условиях. Препринт представлен на arXiv.org.

Для моделирования астрономы отобрали системы Гамма Цефея (45 световых лет от Солнца), Глизе 86 (45 световых лет), HD 196885 (109 световых лет), HD 41004 (139 световых лет). Вначале ученые определили границы зон обитаемости вокруг каждой из двух звезд этих систем, а затем создали для каждой системы гравитационную модель. Модель состояла из четырех тел: пары звезд, известного гиганта (или коричневого карлика), а также гипотетической, пока не открытой планеты земного типа.

В системе HD 196885 (желтая звезда главной последовательности звезда — красный карлик) орбита уже открытого газового гиганта оказалась прямо посередине зоны обитаемости. Моделирование показало, что в такой системе планета-гигант будет оказывать слишком сильное воздействие на любую землеподобную планету в зоне. Та либо будет выброшена из зоны обитаемости, либо вообще покинет звездную систему.

Похожая ситуация сложилась в системе HD 41004 (оранжевый карлик и красный карлик, вокруг последнего при этом вращается коричневый карлик). Планета-гигант открыта на орбите, близкой к зоне обитаемости, что делает невозможным длительное пребывание любой землеподобной планеты в обитаемой зоне.

Неблагоприятной оказалась и картина для оранжевого субгиганта в системе Гамма Цефея. Моделирование показало, что землеподобные планеты выбрасывались из обитаемой зоны.

Перспективной оказалась ситуация в системе Глизе 86 (оранжевая звезда+белый карлик). Ее газовый гигант лежит далеко от зоны обитаемости, и практически при любых возможных параметрах системы вся ее обитаемая зона не затронута серьезными гравитационными возмущениями. Однако при образовании белый карлик сбросил значительную часть своих внешних слоев, что сопровождалось сильнейшим звездным ветром. А значит, все планеты вокруг оранжевой звезды в момент превращения нормальной звезды в белого карлика попали в экстремальные условия. Пока нет единого мнения о том, могут ли планеты в подобной ситуации сохранить обитаемость.

11.6. Изобилие тория улучшило шансы экзопланет на обитаемость

Май 2015, nplus1.ru

В атмосфере современной Земли время жизни углекислого газа порядка пяти лет и без вулканической активности в зонах субдукции парниковых газов в воздухе почти не было бы. По этой причине считается, что после появления кислородной биоты без тектоники плит планета была бы обречена на оледенение.

Геологи и астрономы из Университета штата Огайо (США) во главе с Кайманом Унтерборном (Cauman Unterborn) обнаружили, что большинство солнцеподобных звезд содержат больше тория, чем наше светило, и это означает, что сильные магнитные поля и тектонические движения плит у их планет могут быть более распространенным явлением, чем считалось ранее. Работа принята к публикации в *The Astrophysical Journal*, ее препринт напечатан в архиве Корнельского университета.

11.7. Ученые обнаружили ближайшую к Земле планету в потенциально обитаемой зоне

Декабрь 2015, Astrophysical Journal Letters, nplus1.ru

Австралийские ученые обнаружили, используя данные спектрографии HARPS, ближайшую к Земле экзопланету, расположенную в потенциально обитаемой зоне вокруг своей звезды. О новом претенденте на роль «второй Земли», расположенном в созвездии Змееносца на расстоянии 14 световых лет, сообщает Science Alert, материалы будут опубликованы в готовящемся номере Astrophysical Journal Letters.

Планета с массой в четыре раза превышающей массу Земли обращается вокруг красного карлика Wolf 1061, поэтому она получила название Wolf 1061c. По словам ведущего исследователя Дункана Райта (Duncan Wright), астрофизика из университета Нового Южного Уэльса (UNSW), вокруг звезды вращаются три планеты, но только одна из них находится в «зоне Златовласки» — то есть в зоне, условия которой удовлетворяют условиям, необходимым для наличия жидкой воды.

Wolf 1061 c — твердая планета, ее масса составляет 4,3 земных масс, а расстояние, на котором она обращается вокруг своего красного карлика — всего 10 процентов земной орбиты. Но так как Wolf 1061 гораздо холоднее Солнца (ее температура составляет 3300 К, Солнечная — 5800 К), температура на планете удовлетворяет условиям, необходимым для наличия жизни.

Ученые отмечают «спокойствие» звезды — обычно красные карлики испускают корональные выбросы, способные уничтожить жизнь на близлежащих планетах.

Wolf 1061 c, скорее всего, захвачена приливной силой своей звезды. Это означает, что одна часть планеты всегда обращена к звезде, а на другой царит вечная ночь. Моделирование показало, что циркуляция тепла между разными частями планеты приводит к сильным ветрам.

11.8. Мини-нептуны могут переходить в разряд потенциально пригодных для жизни планет

Январь 2015, Astrobiology, astronews.ru

В статье, опубликованной в журнале Astrobiology, докторант Родриго Лугер и его соавтор Рори Барнс утверждают, что совместное действие приливных сил и высокой звездной активности способно превращать необитаемые «мини-нептуны» — планеты с твердым ядром и толстой водородной атмосферой, лежащие на значительно удаленных от материнской звезды орбитах — в потенциально пригодные для жизни планеты, освобожденные от большей части содержавшегося в них газа, и даже сдвинуть эти планеты вглубь планетной системы звезды на более тесные орбиты вокруг нее.

11.9. Найдена первая землеподобная экзопланета в обитаемой зоне солнцеподобной звезды

Июль 2015, Nature, nplus1.ru

Телескоп «Кеплер» обнаружил первую планету земного типа, которая находится в «обитаемой зоне» звезды, похожей на наше Солнце, на поверхности которой может быть жидкая вода. Сообщение появилось в журнале Nature.

Планета получила название Kepler-452 b, она обнаружена у звезды Kepler-452, находящейся в созвездии Лебедя. Ее возраст 6 миллиардов лет (на 1,5 миллиарда лет старше Солнца). Расстояние до звезды 1400 световых лет, она несколько ярче Солнца. Диаметр экзопланеты Kepler-452b на 60 процентов больше, чем у Земли, ее масса примерно в пять раз больше массы Земли. Год на Kepler-452b длится 385 дней.

11.10. Красный карлик лишил «двойника Земли» шансов на обитаемость

Ноябрь 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Астрономы из Университета Уорика уменьшили шансы на обитаемость экзопланет, вращающихся вокруг красных карликов. Были изучены кривые светимости 13 звезд, в обитаемой зоне которых обращаются экзопланеты, максимально похожие на Землю. Среди параметров, изученных учеными, были фотометрические индексы активности, светимость в рентгеновском диапазоне, энергии вспышек и скорость потери массы звездами. Исследование принято к публикации в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

В частности были изучены условия на планете Kepler-438b, обладающей самым высоким индексом сходства с Землей. За четыре года наблюдений на красном карлике Kepler-438 удалось зафиксировать семь мощных супервспышек, энергия которых на порядок выше энергии самой сильной из солнечных вспышек.

Kepler-438b находится в непосредственной близости от звезды (в шесть раз ближе, чем Земля по отношению к Солнцу), так что эти выбросы могут сдувать атмосферу планеты, обнажая ее поверхность для ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Часть негативных эффектов может быть снята магнитосферой планеты. Однако данных о магнитосферах экзопланет у ученых пока нет.

У других звезд обзора таких мощных вспышек не обнаружено. Ряд звезд достаточно старые и обладают меньшей активностью, чем Kepler-438. К ним относится, например, Kepler-22. Температура на поверхности его планеты, «холодного нептона» Kepler-22b лежит в пределах от -11 до $+22$ °C, а его ядро может быть покрыто глобальным океаном. Именно такие звезды представляют интерес для поиска потенциально обитаемых миров.

11.11. Астрономы находят «самозванок» среди потенциально обитаемых планет

Март 2016, Astrophysical Journal, astronews.ru

Одним из важных признаков, указывающих на возможное присутствие жизни, является наличие на планете кислорода, который на Земле производится почти исключительно биогенным путем — при помощи реакций фотосинтеза, в результате которых диоксид углерода под действием энергии солнечного света преобразуется растениями и водорослями в сложные углеродсодержащие молекулы с выделением молекулярного кислорода. Однако на далеких планетах могут преобладать другие, абиогенные механизмы синтеза молекулярного кислорода, как показано в ряде работ, проведенных ранее сотрудниками лаборатории Virtual Planetary Laboratory Вашингтонского университета, США, во главе с Эдвардом Швигерманом.

Первый абиогенный механизм формирования кислорода сводится к расщеплению диоксида углерода прямо в атмосфере планеты под действием солнечного света с образованием молекул O_2 . Выявить «планеты-самозванки», в атмосферах которых реализуется именно такой механизм возникновения молекулярного кислорода, поможет повышенное содержание монооксида углерода, ещё одного продукта образующегося в качестве этого процесса.

Второй абиогенный механизм формирования свободного кислорода предполагает расщепление воды под действием солнечного света. Планету с таким механизмом формирования молекулярного кислорода можно будет отличить по повышенному содержанию в составе вещества атмосферных газов короткоживущих комплексов из двух молекул кислорода O_4 .

Исследование опубликовано в журнале Astrophysical Journal.

11.12. Составлен список газов для поиска жизни на экзопланетах

Май 2016, Astrobiology, nplus1.ru

Сотрудники Массачусетского технологического института провели поиск летучих соединений, которые могут быть результатом метаболизма живых существ, и составили список газов, по содержанию которых в атмосфере экзопланет можно заподозрить наличие на них жизни. Результаты работы опубликованы в журнале Astrobiology.

Земная жизнь производит тысячи различных газов, но многие из них — в мизерных количествах. В спектре земной атмосферы четко определяются только три биогенных газа: кислород (с озоном), метан и закись азота. В значимых количествах определяются также метилхлорид, диметилсульфид, диметилдисульфид и другие серосодержащие соединения. Из 47 газов, составляющих триллионные доли атмосферы, 42 производятся живыми существами (но не только ими), из них 10 — хлорфторуглероды, появившиеся в результате деятельности человека.

Биогенные газы на экзопланетах могут сильно отличаться от земных по качеству, концентрации и разнообразию в зависимости от химического состава планеты, ультрафиолетового излучения светила и типа метаболизма живых существ. Был составлен список потенциально летучих стабильных соединений, содержащих до шести неводородных атома (водород обладает небольшой атомарной массой и мало влияет на летучесть).

Из примерно 14 тысяч молекул около 2,5 тысячи состоят из различных комбинаций характерных для живых систем углерода, азота, кислорода, фосфора, серы и водорода (CNOPSH-молекулы); четверть из них известны как продукты жизнедеятельности земных живых существ, что делает их особенно интересными для поиска.

Часть 12. Экзопланеты в обитаемой зоне. 2017- 2019 гг.

- 12.1. Опубликован новый каталог экзопланет, лежащих в обитаемых зонах звезд
- 12.2. Лазер предложили использовать для общения с инопланетянами
- 12.3. Телескоп ALMA обнаружил «ингредиенты жизни» вблизи солнцеподобной звезды
- 12.4. Струйные течения спрятали от астрономов признаки жизни на экзопланетах
- 12.5. Внеземные цивилизации предложили искать по космическому мусору
- 12.6. Рентгеновское излучение стерилизовало гипотетические планеты звезды AD Льва
- 12.7. Искусственный интеллект предскажет обитаемость экзопланет
- 12.8. Астрономы пересмотрели шкалу значимости инопланетных сигналов
- 12.9. Климат некоторых планет-океанов оказался подходящим для жизни
- 12.10. Небольшим планетам-океанам пообещали долгую жизнь в обитаемой зоне
- 12.11. Обитаемая зона двойных звезд оказалась способна растягиваться
- 12.12. Отраженного света оказалось достаточно для фотосинтеза на экзопланетах
- 12.13. У экзопланеты в обитаемой зоне впервые нашли водяной пар в атмосфере

12.1. Опубликовано новый каталог экзопланет, лежащих в обитаемых зонах звезд

Январь 2017, *Astrophysical Journal*, www.astronews.ru

Астрономы во главе с Гильермо Торресом (Guillermo Torres) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра, США, составили полный каталог экзопланет, обнаруженных в обитаемых зонах звезд при помощи космического телескопа «Кеплера». Рассмотрев ряд критериев для определения границ обитаемой зоны, авторы сообщают о 104 планетах-кандидатах, лежащих в границах «оптимистичных» (более обширных) версий обитаемых зон звезд. И еще о двадцати экзопланетах-кандидатах, чей радиус менее двух радиусов Земли, лежащих внутри «более консервативных» (менее обширных) обитаемых зон, что делает их в значительной степени схожими с нашей планетой.

12.2. Лазер предложили использовать для общения с инопланетянами

Ноябрь 2018, *The Astrophysical Journal*, nplus1.ru

В новой работе Джеймс Кларк (James Clark) и Керри Кахой (Kerri Cahoy) из Массачусетского технологического университета предложили использовать лазеры для связи с возможными внесемными цивилизациями. По расчетам астрономов, инфракрасное излучение мощного лазера, сфокусированное с помощью оптического телескопа, может достигнуть ближайших экзопланет, причем как вращающихся вокруг ближайшей к нам Проксимы Центавра, так и планет в системе TRAPPIST-1, которые находятся на расстоянии 40 световых лет от Земли. По словам ученых, такие лучи могут быть своеобразными маяками, свет от которых способен распространяться на расстояния до 20 тысяч световых лет.

12.3. Телескоп ALMA обнаружил «ингредиенты жизни» вблизи солнцеподобной звезды

Июнь 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Две международных команды астрономов с помощью телескопа ALMA обнаружили сложную органическую молекулу метилизоцианата в протозвездной системе IRAS 16293-2422. Метилизоцианат участвует в реакциях синтеза структурных элементов белков, которые являются основой известной нам жизни. Ранее, в 2016 году в системе IRAS 16293-2422 был обнаружен простейший сахар — гликольальдегид. Работа опубликована в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Двойная протозвездная система IRAS 16293-2422 находится в молекулярном облаке ρ Змееносца и удалена от Земли примерно на 120 парсек. Небесные тела в ней имеют массу равную половине солнечной. Наблюдения проводились с помощью радиотелескопа ALMA. В плотных холодных облаках газа, окружающих молодую звезду IRAS 16293-2422 B, были обнаружены 43 эмиссионные линии метилизоцианата. Количество вещества по отношению к молекулярному водороду было сравнимо с тем, что наблюдалось вокруг двух других протозвезд в молекулярных облаках Орион KL и Стрелец B2.

Считается, что некоторые простые добиотические соединения могли образоваться в космосе и попасть в аккреционный диск Солнца, а затем и на нашу планету. В последние годы ученые делают все больше открытий, которые говорят в пользу этой гипотезы.

Ученые пытались выяснить, как метилизоцианат мог сформироваться в такой холодной и неблагоприятной среде. В протопланетном облаке должны быть крошечные зерна каменистого вещества, выступающие основой для химической реакции. Но исследователи предостерегают от поспешных выводов о том, что все молодые планеты наполнены ингредиентами для формирования жизни.

12.4. Струйные течения спрятали от астрономов признаки жизни на экзопланетах

Ноябрь 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Найти следы жизни на экзопланетах будет сложнее, чем считалось ранее: компьютерное моделирование показало, что движение воздушных потоков в атмосфере может скрывать от телескопов биомаркеры — вещества, указывающие на присутствие живых организмов, сообщается в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Даже если биомаркеры присутствуют в атмосферах планет, они могут быть гораздо лучше спрятаны, чем предполагалось ранее. Команда ученых под руководством Людмилы Кароне (Ludmila Carone) из Института астрономии имени Макса Планка выяснила, что озон может концентрироваться в районе экватора, а не вблизи полюсов, как на Земле.

Астрономы рассмотрели несколько планет, потенциально пригодных для жизни: Проксиму b, которая вращается вокруг ближайшей к Солнцу звезде — Проксимы Центавра, и TRAPPIST-1d, самую «многообещающую» планету системы TRAPPIST. Оба небесных тела вращаются очень близко к своим материнским звездам, что привело к приливному захвату. Это значит, что они всегда повернуты одной стороной к светилу, как Луна к Земле.

Кароне с командой провела моделирование движения атмосферы на таких планетах, и пришла к выводу, что существование стабильной границы дня и ночи (терминатора) должно оказывать заметное влияние на движение газов и распределение озона в верхних слоях атмосферы, которые могут определяться стоячей волной Россби — гигантским «изгибом» высотных струйных течений.

12.5. Внеземные цивилизации предложили искать по космическому мусору

Март 2018, *Astrophysical Journal*, nplus1.ru

Искать внеземные цивилизации можно не только по радиосигналам, но и по космическому мусору, окружающему их планеты, сообщается в статье, принятой к публикации в *Astrophysical Journal*. Испанский астроном Гектор Сокас-Наварро (Hector Socas-Navarro) полагает, что спутники и станции должны оставлять характерный отпечаток на кривой блеска звезды во время прохождения по диску светила, причем увидеть его возможно даже современными инструментами.

В основе проектов SETI по поиску внеземной жизни лежит предположение, что технологически развитая цивилизация так или иначе должна будет со временем прийти к созданию систем радиосвязи, включая искусственные спутники. Из этого следует, что она также, вероятно, будет заниматься и освоением космоса — постройкой космических кораблей и обитаемых станций. При этом со временем на орбите может накопиться достаточно большое количество аппаратов, в том числе и вышедших из строя (космический мусор), и они станут заметны даже для современных телескопов, изучающих другие звезды в поисках экзопланет.

Окружающие гипотетически обитаемую планету устройства (рабочие и нерабочие) автор новой работы Гектор Сокас-Наварро назвал поясом Кларка. Ученый провел несколько симуляций, в которых он выяснил, какой след будет оставлять пояс Кларка на кривой блеска материнской звезды во время транзита. В своей работе Сокас-Наварро рассмотрел несколько планет, включая Землю, Проксиму b и TRAPPIST-1 d, e, f, g. Общая масса всех искусственных объектов на орбите вокруг небесных тел варьировалась от 10^{12} до 10^{14} килограмм; в среднем, каждый аппарат или его фрагмент имел радиус около одного метра и массу 100 килограмм.

Исследователи пришли к выводу, что лучше всего пояс Кларка (при его достаточной плотности) будет видно в системе из красного карлика и планеты на тесной орбите. Согласно симуляциям, 10-метровый телескоп, работающий в ИК-диапазоне (например, один из инструментов гавайской обсерватории Мауна-Кеа) сможет зарегистрировать искусственные объекты вокруг Проксимы b. Кроме того, подобный телескоп сможет увидеть пояс Кларка вокруг большинства планет системы TRAPPIST-1 — TRAPPIST-1d, -e и -f. С планетой, похожей на Землю, ситуация несколько сложнее: увы, если она будет вращаться вокруг солнцеподобной звезды, современные инструменты не смогут разглядеть вокруг нее следы внеземной цивилизации — учитывая современный темп развития технологий. Телескопы смогут обнаружить пояс Кларка на орбите другой планеты, похожей на Землю, не ранее, чем через 200 лет.

Основная сложность, которая может возникнуть при поиске космического мусора вокруг планет, заключается в сходстве его «отпечатков» на кривой блеска с признаками существования колец. По мнению Сокас-Наварро наблюдения позволят отличить одно от другого.

Комментарий

Проект SETI (англ. SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence) — общее название проектов и мероприятий по поиску внеземных цивилизаций и возможному вступлению с ними в контакт.

Начало проекта SETI датируется 1959 годом, когда в международном научном журнале Nature была опубликована статья Дж. Коккони и Ф. Мориссона «Поиски межзвёздных сообщений». В этой статье было показано, что даже при тогдашнем уровне развития радиоастрономии (1959 год) можно было рассчитывать на обнаружение внеземных цивилизаций примерно такого же технологического уровня, как земной, при условии, что они обитают на не слишком далёких от нас планетах, в планетных системах звёзд солнечного типа.

12.6. Рентгеновское излучение стерилизовало гипотетические планеты звезды AD Льва

Апрель 2018, nplus1.ru, []

Поскольку планеты возле красных карликов находятся сравнительно недалеко от звезд, то яркие вспышки и особенно мощные корональные выбросы вещества могут представлять серьезную опасность для зарождающейся на их поверхности жизни жизни.

Чтобы прояснить последствия таких вспышек, группа ученых под руководством Эйке Гюнтера (Eike Guenther) тщательно отслеживала состояние известных красных карликов. В феврале 2018 года они действительно зарегистрировали подобную вспышку на звезде AD Льва, известной также как Глизе 388. Этот красный карлик находится на расстоянии около 16 световых лет от Земли, на расстоянии около трех миллионов километров вокруг него обращается планета массой около 45 земных масс. Теоретически, вокруг Глизе 388 могут обращаться и более далекие планеты, которые не удастся зарегистрировать и которые попадают в обитаемую зону.

Первые наблюдения показали, что вспышка на AD Льва не сопровождалась выбросами коронального вещества. Следовательно, атмосфера ближайшей к звезде планеты и более далеких потенциально обитаемых планет не должна была пострадать. Однако детальный анализ вспышки показал, что она сопровождалась мощным излучением в рентгеновском диапазоне. Из построенной учеными модели следовало, что такое излучение легко прорвалось бы через озоновый слой потенциально обитаемых планет, толщина которого сравнима с земным озоновым слоем, и уничтожила бы жизнь на ее поверхности. Более того, такое излучение могло бы разрушить большую часть озонового слоя в течение всего двух лет. Таким образом, если бы жизнь на гипотетических отдаленных планетах AD Льва действительно существовала, она никогда бы не выбралась из океанов.

12.7. Искусственный интеллект предскажет обитаемость экзопланет

Апрель 2018, nplus1.ru

Британские исследователи разработали алгоритм, который может предсказывать вероятность наличия жизни на планетах вне Солнечной системы. Алгоритм, основанный на нейросети, анализирует спектр потенциально обитаемой экзопланеты и сравнивает его со спектром атмосферы Земли. Доклад с описанием алгоритма был представлен на конференции Европейской недели астрономии и космоса (European Week of Astronomy and Space Science, EWASS), которая проходила в Ливерпуле.

Потенциально обитаемой считается планета, которая находится на таком расстоянии от материнской звезды, при котором тепла от нее достаточно для существования на планете жидкой воды. Чтобы оценить обитаемость планеты, необходимо также знать ее структуру и состав: тип небесного тела (например, каменная планета или газовый гигант) и наличие магнитного поля и атмосферы. На основании этих данных астрономы рассчитывают индекс обитаемости — параметр в диапазоне от 0 до 1: единице соответствует Земля, а, например, у каменистого спутника Сатурна Титана индекс равен 0,64.

Ученые из Плимутского университета под руководством Анджело Канджелоси (Angelo Cangelosi) предложили автоматический метод расчета индекса обитаемости. В основе их алгоритма — орбитальные и атмосферные характеристики пяти небесных тел (Земли наших дней, Земли на ранних этапах жизни, Титана, Марса и Венеры), а также рассчитанные на их основе индексы обитаемости. Алгоритм получает на вход спектр и характеристики орбиты потенциально обитаемой планеты и рассчитывает их схожесть с соответствующими характеристиками Земли, на основе чего делает вывод о степени ее возможной пригодности для жизни.

12.8. Астрономы пересмотрели шкалу значимости инопланетных сигналов

Июль 2018, nplus1.ru

Для оценки потенциальной значимости сообщения об обнаружении внеземной цивилизации в 2000 году была предложена шкала Рио. А уже в 2002 году ее стали использовать в проектах SETI по поиску внеземного разума.

Индекс Рио рассчитывается по формуле $RI = Q * \delta$, где Q — степень значимости сигнала, учитывающая три фактора — вид сигнала, информационную составляющую и расстояние до источника, δ — достоверность идентификации сигнала, как внеземного сообщения. Уровень значимости и силы возможных последствий начинается с нулевого (0 баллов) и доходит до чрезвычайного (10 баллов). При этом параметр δ (достоверность сигнала) достаточно субъективен и нуждается в постоянном уточнении.

Группа исследователей под руководством Дункана Форгана (Duncan Forgan) из Сент-Эндрюсского университета пересмотрела шкалу Рио и предложила сделать ее более развернутой, менее субъективной и подходящей для людей с разным образованием. Кроме того, новая версия шкалы Рио отражает текущие знания, например о сигнале «Wow!» или звезде Табби.

Общая формула $RI = Q * \delta$ осталась прежней. Однако теперь авторы предложили для определения параметра Q сообщать об удаленности источника, перспективах связи с ним и осведомленности отправителя о существовании людей или человеческих технологий. При вычислении параметра δ учитывается три переменных — вероятность того, что сигнал реален; вероятность того, что это не артефакт; вероятность того, что он имеет не природное и не антропогенное происхождение.

12.9. Климат некоторых планет-океанов оказался подходящим для жизни

Август 2018, *Astrophysical Journal*, nplus1.ru

Некоторые водные миры — экзопланеты, чья поверхность целиком покрыта океаном — могут быть потенциально пригодны для жизни, говорится в статье, опубликованной в журнале *Astrophysical Journal*.

Экзопланета считается потенциально пригодной для зарождения жизни, если она может поддерживать существование жидкой воды на поверхности с температурой меньше 450 кельвинов в течение 10 миллионов лет — достаточного для биологической макроэволюции времени. Возможны два механизма: поддержание климата благодаря геохимическим циклам и без него. По первому принципу работает наша планета (карбонатно-силикатный цикл). Циркулирующие в ее атмосфере газы попадают в породы, охлаждая Землю, а затем высвобождаются через вулканы, снова нагревая ее. Однако на планетах, где большая часть поверхности покрыта океаном, такой сценарий невозможен. Значит ли это, что на них не сможет зародиться жизнь?

Чтобы найти ответ на этот вопрос, астрономы Эдвин Кайт (Edwin Kite) из Чикагского университета и Эрик Форд (Eric Ford) из Университета штата Пенсильвания провели компьютерную симуляцию эволюции водных миров.

Анализ показал, что существует три важных параметра, которые позволяют небесному телу поддерживать подходящую для жизни температуру воды более миллиарда лет: изначальное количество воды на планете, соотношение атомов углерода и катионов и соотношение атомов углерода и водорода. Оказалось, что около 10 процентов водных миров способны оставаться стабильными более миллиарда лет. Полученные результаты могут быть справедливы не только для солнцеподобных звезд, но и для красных карликов.

12.10. Небольшим планетам-океанам пообещали долгую жизнь в обитаемой зоне

Июнь 2019, The Astrophysical Journal, nplus1.ru

Астрономы считают возможным существование большого количества маломассивных экзопланет, располагающих, несмотря на малую гравитацию, большими запасами воды, и при этом находящихся в зоне обитаемости своей звезды. Такими объектами могут быть экзолуны планет-гигантов. В Солнечной системе крупные планеты имеют множество спутников, причем многие из них в значительной мере состоят из водного льда.

Исследователи из Гарвардского университета и Массачусетского технологического института во главе с Константином Арншейдтом (Constantin Arnscheidt) попытались установить, возможно ли долговременное существование атмосферы и, соответственно, жидкой воды на поверхности таких тел. Для этого они рассмотрели сценарий наличия у маломассивного тела большого количества воды (40 процентов по массе) и атмосферы, целиком состоящей из водяного пара (вариант, легче всего поддающийся бесконтрольному парниковому эффекту). Затем ученые подсчитали, как будет изменяться площадь той части атмосферы, которая поглощает излучение звезды, и площадь той части газовой оболочки, которая переизлучает его в космос в инфракрасном диапазоне.

Для маломассивных и богатых водой тел из-за их низкой гравитации атмосфера в зоне обитаемости будет простирается заметно выше, чем для тел с большой гравитацией. При этом уже самые верхние слои атмосферы будут переизлучать в космос инфракрасное излучение, охлаждая планету.

То есть планеты-океаны массой от 0,1 земной до, как минимум, 0,03 земной вполне смогут оставаться обитаемыми до ста миллиардов лет.

12.11. Обитаемая зона двойных звезд оказалась способна растягиваться

Март 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Астрономы Бетани Вуттон (Bethany Wootton) и Ричард Паркер (Richard Parker) из Университета Шеффилда пришли к выводу, что обитаемая зона вокруг двойных звезд способна растянуться. В частности, это может произойти, если орбита одной из звезд в двойной системе станет более вытянутой в результате гравитационного взаимодействия с другим светилом. Предполагается, что такие события могут довольно часто происходить в густонаселенных областях активного звездообразования. Статья опубликована в Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Чтобы проверить свою гипотезу исследователи провели компьютерную симуляцию, в которой рассмотрели, как часто будут происходить сближения небесных тел, каким образом они будут взаимодействовать между собой и как это повлияет на зоны обитаемости.

Исследователи построили несколько моделей областей активного звездообразования, получив в конечном итоге 4745 двойных систем. Примерно в 20 процентах случаев орбиты звезд, находившихся на расстоянии 5-10 астрономических единиц друг от друга, менялись таким образом, что обитаемые зоны небесных тел или накладывались друг на друга, или увеличивались.

Расчеты показывают, что планеты, находящиеся внутри обитаемых зон таких систем, могут быть стабильны. С другой стороны, орбиты самих звезд, будут в дальнейшем эволюционировать, а области активного звездообразования не считаются благоприятными для зарождения жизни.

12.12. Отраженного света оказалось достаточно для фотосинтеза на экзопланетах

Август 2019, arXiv.org, nplus1.ru

Фотосинтез, то есть использование энергии солнечного излучения для получения необходимых органических веществ, является основой функционирования подавляющего большинства экосистем на Земле. Однако помимо ключевой роли для всей биосферы, фотосинтез также обладает последствиями планетарного масштаба, так как появление кислородного фотосинтеза привело к принципиальному изменению состава атмосферы и условий на поверхности Земли.

В связи с этим считается, что присутствие молекулярного кислорода в газовой оболочке экзопланеты может быть важным указанием на наличие живых форм, так как из-за высокой активности кислорода его необходимо постоянно выделять, что крайне маловероятно в неживой природе. Еще одним потенциальным маркером фотосинтезирующей жизни является красный барьер, то есть резкое повышение отражательной способности биомассы при переходе в ближний инфракрасный диапазон, хотя для наблюдения похожего эффекта жизнь на экзопланетах должна быть похожа на земную.

Американские астрофизики под руководством Абрахама Лёба (Abraham Loeb) из Гарвардского университета исследовали вопрос о теоретической возможности протекания фотосинтеза с использованием лишь отраженного света. Авторы рассмотрели несколько ситуаций, в том числе отраженный от луны свет, падающий на неосвещенную звездой сторону планеты, и отраженный от планеты-гиганта свет, падающий на ее спутник. Ученые пришли к выводу, что подходящие условия могут существовать во множестве систем, результаты представлены в препринте на arXiv.org.

12.13. У экзопланеты в обитаемой зоне впервые нашли водяной пар в атмосфере

Сентябрь 2019, Nature Astronomy, nplus1.ru

Группа астрономов во главе с Ангелосом Циарасом (Angelos Tsiaras) сообщила о результатах анализа данных спектроскопических наблюдений за экзопланетой K2-18b при помощи космического телескопа «Хаббл» в 2016 и 2017 годах. Планета была открыта в 2015 году, она находится в системе красного карлика, расположенного в 111 световых годах от Солнца в созвездии Льва, и совершает один оборот вокруг звезды за 33 дня. При этом K2-18b находится в обитаемой зоне, что означает, что на ее поверхности может существовать жидкая вода. В 2017 году другая группа астрономов выяснила, что масса экзопланеты составляет 8 масс Земли, а сама она может быть либо каменистой суперземлей, либо планетой-океаном, покрытой толстой ледяной корой. Эффективная температура экзопланеты лежит в диапазоне от 200 до 320 кельвин.

Анализ собранных «Хабблом» данных и их сравнение с различными моделями атмосфер позволил сделать вывод об обнаружении с высокой статистической значимостью в атмосфере K2-18b молекул водяного пара, а также некоторого количества водорода и гелия. Астрономы не исключают, что в атмосфере могут также находиться метан, азот и аммиак, однако обнаружить их пока не удалось, как и определить наличие в газовой оболочке экзопланеты облаков.

Тем не менее, говорить о пригодности к обитаемости K2-18b затруднительно, так как звезда-хозяин характеризуется сильной звездной активностью, из-за чего экзопланета, находящаяся относительно близко к ней, подвергается воздействию мощных потоков излучения.

Астрономы отмечают, что это первая из подобных экзопланет, в атмосфере которой обнаружены следы воды.

Часть 13. Небесная механика экзопланет. 2015 – 2019 года

Содержание

- 13.1. Обнаружены две гигантские планеты с невозможными орбитами
- 13.2. Астрономы увидели резонанс рекордного количества экзопланет
- 13.3. Астрономы нашли рекордно большую экзопланету у двойной звезды
- 13.4. Астрономы открыли новую планету с тремя солнцами
- 13.5. Гравитационное микролинзирование помогло найти планету с двумя «солнцами»
- 13.6. Невидимая соседка «опрокинула» орбиту экзопланеты GJ 436b
- 13.7. Планетные системы оказались упорядочены по размеру планет и интервалам между ними
- 13.8. Разбросанность орбит планет объяснили врожденной деформацией
- 13.9. Нерезонансные орбиты суперземель объяснили большим наклоном оси
- 13.10. Впервые найдена экзопланета с долгой и эксцентричной орбитой

13.1. Обнаружены две гигантские планеты с невозможными орбитами

Январь 2016, arXiv, nplus1.ru

Международная группа астрономов из Токийского технологического института открыла систему из звезды и двух гигантских планет. Препринт статьи был размещен на сайте arXiv.

Звезда HD 47366 является красным гигантом и почти в два раза массивнее нашего Солнца. Возраст звезды достигает примерно 1,6 миллиардов лет. HD 47366 удалена от Земли на расстояние в 260 световых лет. Наблюдения за объектом проводились с марта 2013 года по апрель 2014 года с помощью спектрографов окаямской астрофизической обсерватории в Японии, наблюдательной станции Синлун в Китае и австралийской астрономической обсерватории. Был использован метод Доплера, который заключается в спектральном измерении лучевой скорости звезд. Астрономы обнаружили, что вокруг HD 47366 вращаются две крупные планеты, скорее всего, газовые гиганты с периодами обращения в один и два года. Согласно полученным данным, внутренняя (располагающаяся ближе к звезде) и внешняя планеты имеют массу в 1,75 и 1,86 масс Юпитера, большие полуоси — в 1.214 и 1.853 а.е., а эксцентриситет кеплеровских орбит — в 0,089 и 0,278, соответственно.

Наиболее интересным в открытой планетной системе является то, что кеплеровские орбиты планет оказались неустойчивыми и могли бы просуществовать всего лишь около 1000 лет. Чтобы система просуществовала больше миллиона лет, орбиты планет должны быть круговыми или, что менее вероятно, взаимно ретроградными, то есть планеты должны вращаться в противоположных друг другу направлениях. Большой эксцентриситет внешней планеты могло бы доказать последний вариант, хотя ученые пока не знают, как подобная система могла бы возникнуть.

13.2. Астрономы увидели резонанс рекордного количества экзопланет

Май 2016, Nature, nplus1.ru

Астрономы из США и Польши уточнили орбитальные параметры четырех экзопланет, обращающихся вокруг звезды Kepler-223. Оказалось, что эти небесные тела гравитационно захвачены в точный резонанс: за то время, что внешняя из планет системы делает три оборота вокруг звезды, остальные успевают обернуться ровно четыре, шесть и восемь раз. Ученые подчеркивают важность наблюдения за такими системами и оценки их устойчивости — существует гипотеза о том, что когда-то Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун также находились в резонансе. Исследование опубликовано в Nature.

Наблюдения Kepler-223 проводились с помощью космического телескопа «Кеплер» и, независимо, с помощью спектрометра HIRES обсерватории Кека. Звезда оказалась близкой к Солнцу по размерам и массе, но при этом была на 1,5 миллиарда лет старше его.

Созданные модели позволяют утверждать, что резонансы между экзопланетами возникли в результате постепенной миграции их от внешних областей системы к центру. Авторы предполагают, что миграция и возникновение резонансов происходили постепенно — сначала две планеты, мигрировавшие сквозь диск, начали двигаться вместе, затем к ним присоединились третья и четвертая планеты.

Такие резонансы, как правило, очень хрупки и внешние возмущения — пролетевшее массивное тело, например — могут легко их разрушить. Тем не менее, система просуществовала свыше шести миллиардов лет, что, как отмечают ученые, может свидетельствовать о то, что планеты каким-то образом уклонились от всевозможных столкновений. Газовые гиганты Солнечной системы, в свою очередь, могли оказаться не столь удачливы — их резонанс нарушился.

13.3. Астрономы нашли рекордно большую экзопланету у двойной звезды

Июнь 2016, *Astrophysical Journal*, nplus1.ru

Астрономы из Годдардского центра космических полетов и Университета Сан-Диего обнаружили самую большую из известных экзопланет, обращающихся около двойных звезд. Планета под названием Kepler-1647b близка по своим размерам и массе к Юпитеру и находится в зоне обитаемости системы. Скорее всего, объект относится к газовым гигантам, и поэтому не может поддерживать жизнь. О своей находке ученые сообщили на семинаре Американского астрономического общества, кратко о докладе рассказывает пресс-релиз Университета Сан-Диего. Исследование авторов принято к публикации в журнале *Astrophysical Journal*.

Двойная система, около которой обращается Kepler-1647b, располагается в 3,7 тысячи световых лет от Земли. Она состоит из двух звезд, одна из которых немного крупнее Солнца, другая — немного меньше. Вместе звезды формируют затменно-переменную систему с периодичностью в 11 дней.

Экзопланета была исследована в рамках основного этапа миссии телескопа «Кеплер». Год на Kepler-1647b длится около 1100 суток (примерно три земных года), поэтому транзиты наблюдались лишь трижды. Дополнительные наблюдения за системой с помощью сети небольших телескопов KELT Follow-Up Network. Используя компьютерное моделирование, авторы уточнили параметры орбиты, а также размеры и массу Kepler-1647b. Радиус газового гиганта оказался близок к юпитерианскому, а масса — от 0,87 до 2,15 масс Юпитера.

Ученые отмечают, что экзопланета выбивается из числа уже обнаруженных объектов у двойных звезд. Большая часть из них обладает орбитами, близкими к светилам системы. Kepler-1647b напротив, обладает рекордно продолжительным периодом обращения.

13.4. Астрономы открыли новую планету с тремя солнцами

Июль 2016, Science, nplus1.ru

Ученые открыли юпитероподобную экзопланету в тройной системе звезд. Подобное открытие — большая редкость, так как число известных планет в подобных системах на данный момент не превышает пяти. Статья, опубликованная в журнале Science.

Планета HD 131399Ab была обнаружена с помощью спектрополяриметрического приемника высокого контраста SPHERE, который установлен на Very Large Telescope. Его основная задача заключается в поиске и определении характеристик гигантских экзопланет, вращающихся вокруг близких к нам звезд, а метод исследования состоит в получении прямых изображений планет, что является довольно трудной задачей из-за тусклости планеты по сравнению с родительской звездой.

Экзопланета находится в тройной системе звезд HD 131399, которая является частью OB-ассоциации Скорпиона-Центавра — самой близкой к Солнцу группировки гравитационно слабосвязанных молодых звезд. Звезды этой системы имеют сходную с Солнцем массу (1,82, 0,96 и 0,6 солнечных масс) и находятся от нас на расстоянии всего 320 ± 20 световых лет. Экзопланета вращается вокруг звезды HD 131399A, которая, в свою очередь, вращается вокруг общего центра масс вместе в двумя другими компонентами системы.

Открытая планета — одна из самых маломассивных (она примерно в четыре раза тяжелее Юпитера) и холодных экзопланет, открытых методом прямого получения фотографий. Температура ее поверхности достигает около 580 градусов Цельсия. Планета находится примерно в два раза дальше Плутона. Полный оборот вокруг своей звезды планета совершает за 550 земных лет и примерно половину этого времени с HD 131399Ab можно наблюдать все три звезды.

13.5. Гравитационное микролинзирование помогло найти планету с двумя «солнцами»

Сентябрь 2016, *Astronomical Journal*, nplus1.ru

Космический телескоп «Хаббл» обнаружил систему, в которой планета вращается вокруг двух звезд. Впервые ученым удалось подтвердить ее существование с помощью гравитационного микролинзирования. Статья принята к публикации в журнале *The Astronomical Journal* и доступна на сайте аэрокосмического агентства NASA.

Эффект гравитационного линзирования возникает из-за того, что астрономический объект гравитационным полем искажает и усиливает свет фонового объекта во время прохождения между ним и наблюдателем. Обычно существенно искривить направление распространения электромагнитного излучения способны массивные «линзы», вроде галактик или их скоплений. Однако и звезды тоже отклоняют лучи света. В этом случае заметно кратковременное увеличение яркости фонового объекта. Подобное явление называют микролинзированием.

Подтвержденная авторами работы система OGLE-2007-BLG-349 открыта в 2007 году. Согласно одной из гипотез, система состоит из двух планет и звезды; другая гипотеза говорила о существовании двух гравитационно связанных звезд и планеты. Определить компоненты OGLE-2007-BLG-349 удалось благодаря наблюдениям телескопа «Хаббл» и гравитационному микролинзированию.

OGLE-2007-BLG-349 находится на расстоянии 8 тысяч световых лет от Земли в созвездии Стрельца. Два красных карлика, входящие в ее состав, удалены друг от друга на 11 миллионов километров, что примерно в пять раз меньше, чем расстояние от Солнца до Меркурия. Вокруг них вращается экзопланета, получившая название OGLE-2007-BLG-349L(AB)c. Год на ней длится примерно семь земных лет. Небесное тело было отнесено к классу супернептунов, так как его масса превосходит массу нашей планеты примерно в 80 раз.

13.6. Невидимая соседка «опрокинула» орбиту экзопланеты GJ 436b

Декабрь 2017, Nature, nplus1.ru

Орбита планеты GJ 436b очень сильно наклонена по отношению к экваториальной плоскости системы GJ 436. Этот факт обнаружила группа астрономов из Швейцарии, Франции и США. Ученые предлагают объяснить необычный наклон орбиты с помощью еще одной планеты, которая возмущает траекторию GJ 436b. Статья опубликована в Nature.

Об измерении угла наклона орбиты GJ 436b сообщает в данной статье группа ученых под руководством Винсента Бурье (Vincent Bourrier). Для того чтобы определить его величину, исследователи использовали эффект Росситера-Маклафлина (Rossiter—McLaughlin effect). Заключается этот эффект в следующем: предположим, что фоновая звезда вращается, тогда свет, приходящий от разных ее частей, будет испытывать либо синее (если эта часть движется в нашу сторону), либо красное смещение (в обратном случае).

Когда планета проходит по звездному диску, она закрывает разные его части, и из-за этого нам кажется, будто красное смещение звезды то увеличивается, то уменьшается (смотри поясняющую картинку). В зависимости от угла между плоскостью орбиты и осью вращения звезды этот эффект будет выражен сильнее или слабее. Измеряя его величину, можно определить искомый угол.

Чтобы объяснить такой большой угол наклона и эксцентриситет (который был рассчитан в другой работе), ученые предположили, что в системе GJ 436 есть еще одна планета. Хотя находится она намного дальше от звезды, чем GJ 436b (так что ее нельзя увидеть при текущем уровне развития астрономии), она влияет на орбиту этой планеты.

13.7. Планетные системы оказались упорядочены по размеру планет и интервалам между ними

Январь 2018, The Astronomical Journal, nplus1.ru

Группа астрономов из США и Канады под руководством Лорен Вайс (Lauren Weiss) отобрала из собранных в рамках CKS данных 355 звезд, вокруг которых обращаются 909 планет.

Ученые заметили, что планеты из одной и той же системы, как правило, имеют одинаковый размер. В то же время, если одна из планет в выбранной паре имеет больший радиус, она находится на большем отдалении от звезды. Кроме того, радиусы планет-соседей и отношение периодов их обращения совпадают с хорошей точностью.

Найденные закономерности согласуются с наиболее распространенной теорией формирования планет, предполагающей образование и последующий рост неоднородностей в газопылевом облаке, окружающем молодую звезду. Интересно, что они не выполняются в Солнечной Системе.

13.8. Разбросанность орбит планет объяснили врожденной деформацией

Декабрь 2018, Nature, nplus1.ru

Астрономы выяснили, почему в некоторых системах орбитальные плоскости планет не всегда совпадают друг с другом или с экваториальной плоскостью звезды. Статья опубликована в журнале Nature.

Все планеты Солнечной системы вращаются примерно в одной плоскости — расхождение между наклонениями их орбит относительно плоскости эклиптики составляет не более семи градусов. Однако в последние годы

астрономы стали обнаруживать свидетельства того, что существуют и другие системы, где орбитальные плоскости планет не всегда выровнены относительно друг друга. Раньше астрономы объясняли наблюдаемый феномен воздействием звезд-компаньонов или гравитационным влиянием планет-гигантов, которые, как известно, способны выталкивать небесные тела с нормальных орбит. Теперь же они пришли к выводу, что деформация может быть врожденной и объясняться формой протозвездного диска.

Группа астрономов под руководством Нами Сакаи (Nami Sakai) из организации RIKEN Cluster for Pioneering Research проанализировала данные наблюдений комплекса ALMA за системой IRAS 04368+2557. Она состоит из не крупной протозвезды, возрастом всего около 100 тысяч лет (для сравнения, возраст Солнца составляет 4,6 миллиарда лет), и окружающего ее газопылевого диска.

Полученные ALMA снимки показывают, что некоторые области протопланетного диска отклоняются от усредненной плоскости. На расстоянии до 60 а.е. от звезды это отклонение незначительно — всего 0 - 2 а.е., однако затем оно возрастает до 10 а.е.. Переломная точка находится на расстоянии около 60 - 70 а.е..

Результаты наблюдений говорят о том, что диск системы IRAS 04368+2557 состоит, как минимум, из внутренней и внешней части, которые имеют несколько отличающиеся орбитальные плоскости, соединяющиеся на расстоянии 40-60 астрономических единиц. Иными словами, между осями, вокруг которых вращаются два компонента газопылевого диска, существует расхождение примерно в 3-5 градусов.

У системы IRAS 04368+2557 нет близости звезд-компаньонов, а планеты в ней еще не сформировались. Поэтому наблюдаемая форма протопланетного диска может быть врожденной. По мнению ученых, она может объясняться анизотропной аккрецией газа с разными осями вращения или влиянием магнитного поля.

13.9. Нерезонансные орбиты суперземель объяснили большим наклоном оси

Март 2019, Nature Astronomy, nplus1.ru

Если периоды орбит гравитирующих тел соотносятся как небольшие целые числа, то они будут воздействовать друг на друга с увеличенной силой тяготения — эта ситуация называется орбитальным резонансом. Ярким примером стабильного резонанса в Солнечной системе являются внутренние спутники Юпитера Ганимед, Европа и Ио, периоды обращения которых соотносятся как 4:2:1. Сам Юпитер и Сатурн находятся почти в точном резонансе 2:5. Для экзопланет это будет означать, что к звезде должна быть обращена только одна сторона, подобно ситуации в системе Земля—Луна.

Измерение параметров экзопланетных систем показало, что во многих случаях их орбиты близки к стабильным резонансам, но слегка от них отличаются. Это обстоятельство требовало объяснения, так как планеты должны стремиться занять стабильные резонансные орбиты.

Астрономы Сара Миллхолланд (Sarah Millholland) и Грег Лафлин (Greg Laughlin) из Йельского университета выдвинули теорию, объясняющую наблюдаемые отклонения от орбитальных резонансов в движении многих суперземель с периодом обращения менее 100 дней.

Согласно новой идее, подобные особенности небесных тел можно объяснить, если предположить, что оси их вращения значительно наклонены. Это усиливает приливы и изменяет параметры траекторий планет. Подобная конфигурация существенно влияет на климат планет и оценки их потенциальной обитаемости, пишут ученые в Nature Astronomy.

13.10. Впервые найдена экзопланета с долгой и эксцентричной орбитой

Август 2019, arXiv.org, nplus1.ru

В препринте на arXiv.org астрономы из США, Германии и Австралии под руководством Эндрю Говарда (Andrew Howard) из Калифорнийского технологического института сообщают о редком открытии методом лучевых скоростей планеты с долгим периодом обращения. Это первый известный случай массивной экзопланеты, орбита которой сильно эллиптична с очень далеко расположенным от родительской звезды апоцентром. Если бы такая планета находилась в Солнечной системе, то она подходила бы почти до пояса астероидов, а потом отдалялась бы за орбиту Нептуна. Масса экзопланеты HR 5183 b не менее 3,24 юпитерианских, эксцентриситет орбиты 0,84, а один полный оборот по орбите она делает примерно за 74 года (от 54 до 117 лет с учетом ошибок).

Открытие удалось сделать благодаря длительным наблюдениям за многими звездами. Группа Говарда начала использовать возможности телескопов обсерватории Кека еще в 1997 году и, в частности, наблюдала звезду HR 5183. В последние годы HR 5183 b проходила периастр, то есть ближайшую к звезде точку траектории. На этом отрезке пути планета движется с самой большой скоростью, поэтому в наибольшей степени возмущает движение звезды. В результате это позволяет как определить наличие планеты, так и за относительно короткий промежуток измерить положение планеты в разных точках, благодаря чему можно определить параметры ее орбиты с высокой точностью.

Пока трудно сказать, как планета оказалась на столь странной орбите. Они искали другое массивное тело в данной системе, но не нашли ничего подходящего. Возможно, что изначально было две планеты, но их гравитационное взаимодействие перевело одну на вытянутую орбиту, а другую выбросило прочь из системы.

Часть 14. Протопланетные диски. 2016 – 2019 года

Содержание

- 14.1. Получены редкие «детские снимки» планетных систем
- 14.2. В диске близлежащей звезды обнаружилась звезда-компаньон небольшой массы
- 14.3. Астрономы отыскали переходный объект между экзопланетой и коричневым карликом
- 14.4. В остаточном диске близлежащей звезды обнаружены концентрические кольца
- 14.5. Протопланета загнала частицы пыли в ловушку
- 14.6. Искусственный интеллект научили искать протопланетные диски
- 14.7. Астрономы разглядели у молодых звезд разные по форме и структуре околозвездные диски
- 14.8. Движение газа в протопланетном диске выдало три новорожденных планеты
- 14.9. Астрономы впервые обнаружили муравьиную кислоту в протопланетном диске
- 14.10. ALMA обнаружила протопланетный диск у только что родившейся звезды
- 14.11. Астрономы впервые получили прямой снимок зарождающейся планеты

14.1. Получены редкие «детские снимки» планетных систем

Ноябрь 2016, Astronomy&Astrophysics, nplus1.ru

Три международные команды астрономов получили детальные снимки сразу нескольких протопланетных дисков вокруг молодых звезд. Работы исследователей опубликованы в журнале Astronomy&Astrophysics.

Протопланетный диск представляет собой вращающийся диск из газа и пыли, который окружает звезды на раннем этапе их эволюции. Именно в нем происходит формирование планет: сначала частицы пыли сталкиваются друг с другом и «сбиваются» в небольшие комки, которые затем под действием гравитации превращаются в планетезимали. Если планетезималь накапливает достаточно вещества, то она становится протопланетой, которая потом уже может превратиться в полноценную планету.

Благодаря появлению новых инструментов, в число которых входит приемник SPHERE, установленный на комплексе телескопов Very Large Telescope в пустыне Атакама, астрономы смогли в деталях «рассмотреть» сразу несколько протопланетных дисков.

Первая группа ученых наблюдала за молодой звездой RX J1615, которая находится на расстоянии 600 световых лет от Земли в созвездии Скорпиона. Исследователям удалось обнаружить у нее сложную систему концентрических колец, которые по форме отдаленно напоминают кольца Сатурна. Возраст протопланетного диска, по оценкам астрономов, составляет всего 1,8 миллион лет, а его структура указывает на то, что вокруг звезды все еще формируются новые экзопланеты. Исследователи отмечают, что настолько молодые протопланетные диски удается запечатлеть крайне редко.

Открытая учеными система оказалась похожа на другую систему из звезды и протопланетного диска, за которой наблюдала вторая команда астрономов.

Исследователи изучали звезду HD 97048, находящуюся от нас на расстоянии 500 световых лет в созвездии Хамелеона, и также обнаружили вокруг нее протопланетный диск с кольцами. Сходство двух систем удивило ученых, так как до этого концентричные кольцевые структуры в газопылевых дисках встречались астрономам нечасто.

Третья группа ученых исследовала газопылевой диск вокруг звезды HD 135344B, которая расположена в 450 световых годах от Земли. Астрономам уже было известно о существовании у HD 135344B протопланетного диска, однако с помощью инструмента SPHERE в нем удалось «разглядеть» рукава и пустоты. По мнению ученых, эти структуры были созданы массивными протопланетами, которые в будущем станут мирами, похожими на Юпитер.

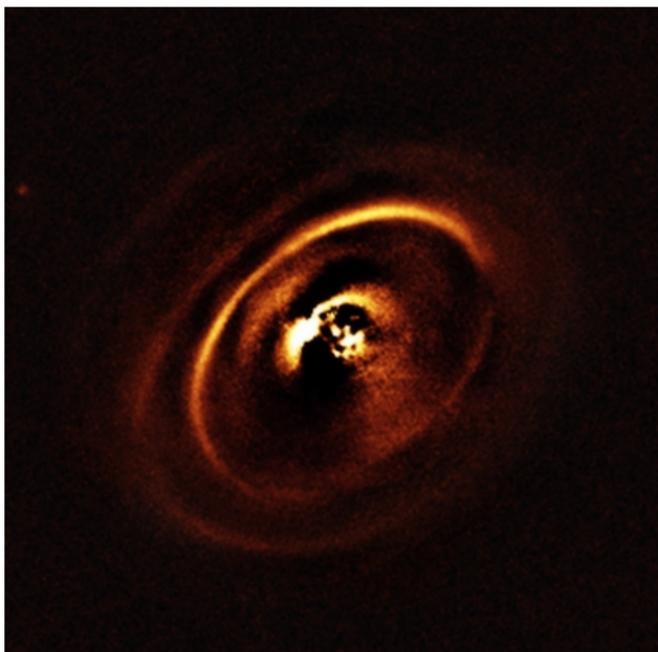


Рис. Протопланетный диск вокруг звезды RXJ1615

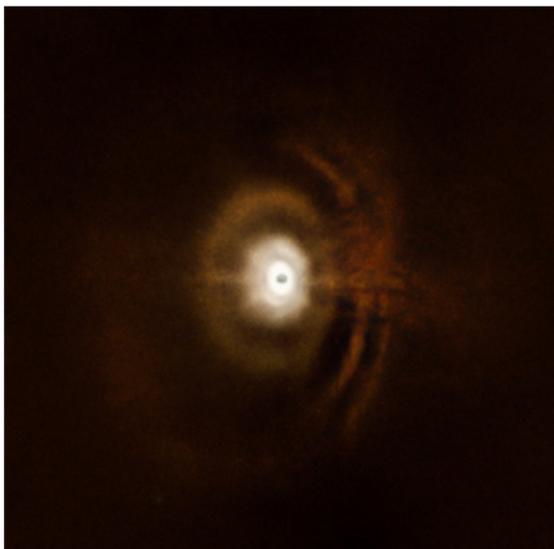


Рис. Диск вокруг звезды HD97048 ESO

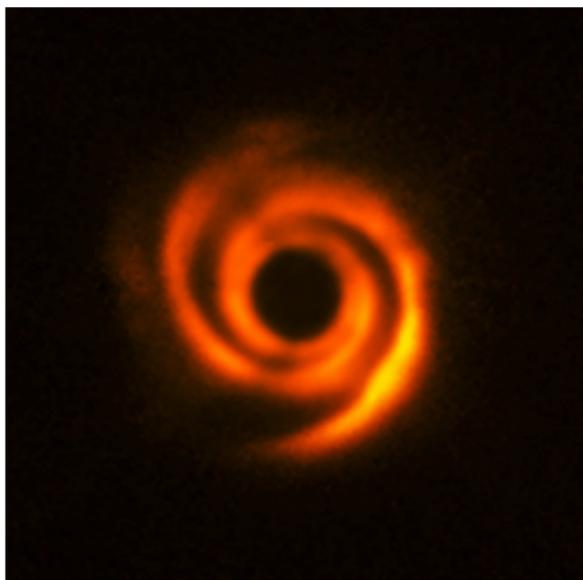


Рис. Протопланетный диск вокруг звезды HD135344B

14.2. В диске близлежащей звезды обнаружилась звезда-компаньон небольшой массы

Декабрь 2016, arxiv.org, astronews.ru

Звезда HD 206893, которую относят к классу F5V с примерно солнечной металличностью и массой 1,24 массы Солнца на расстоянии примерно 125 световых лет от Солнца, окружена остаточным диском, наличие которого было установлено по избыточному излучению в ИК-диапазоне.

Недавно команда исследователей во главе с Жюльеном Милли (Julien Milli) из Европейской южной обсерватории, Чили, при помощи телескопа Very Large Telescope (VLT) провели наблюдений окрестностей звезды HD 206893 и наткнулись там на тусклый, но высококонтрастный объект, обращающийся вокруг родительской звезды на расстоянии примерно 10 а.е..

Этот вновь обнаруженный объект, вероятно, представляет собой коричневый карлик массой от 24 до 73 масс Юпитера. Однако команда не исключает, что этот объект вполне может оказаться гигантской планетой.

14.3. Астрономы отыскиали переходный объект между экзопланетой и коричневым карликом

Январь 2023, [arXiv.org](https://arxiv.org), nplus1.ru

Астрономы при помощи космического телескопа Gaia и наземных телескопов обнаружили массивную экзопланету, которая попадает в область перехода между экзогигантами и коричневыми карликами. В ядре HD 206893c могут идти реакции слияния ядер дейтерия, а компаньоном планеты выступает коричневый карлик. Препринт работы опубликован на сайте [arXiv.org](https://arxiv.org).

Считается, что планетой может называться тело, масса которого меньше 13 масс Юпитера — предела, выше

которого в ядре объекта могут начать протекать реакции ядерного горения дейтерия. Чтобы проверить теории образования таких объектов и понять разницу между ними астрономы ищут системы, где есть и экзопланеты и коричневые карлики, которые образовались в одно и то же время из одного и того же протопланетного диска.

Группа астрономов во главе с Сашей Хинкли (Sasha Hinkley) из Эксетерского университета сообщила об обнаружении экзопланеты HD 206893c в системе солнцеподобной звезды, расположенной в 130 световых годах от Солнца. Открытие было сделано благодаря астрометрическим данным, полученным космическим телескопом Gaia, а также данным по колебаниям лучевой скорости звезды, полученным спектрографами HARPS и GRAVITY, установленных на телескопах Европейской южной обсерватории.

HD 206893 представляет собой звезду спектрального класса F5V с примерно солнечной металличностью и массой 1,24 массы Солнца. Большинство оценок возраста этой звезды находятся в диапазоне 100–300 миллионов лет, но в некоторых работах допускается возраст до 3 или 50 миллионов лет или 1,1 миллиардов лет. В 2017 году у звезды был обнаружен компаньон HD 206893B, большая полуось орбиты которого равна 9,6 астрономических единиц, а эксцентриситет — 0,14. Объект обладает массой 28 масс Юпитера и радиусом 1,25 радиусов Юпитера, что позволяет отнести его к коричневым карликам.

Масса HD 206893c составляет 12,7 массы Юпитера, а радиус — 1,46 радиуса Юпитера, что помещает эту экзопланету в область перехода между коричневыми карликами и экзогигантами. Светимость HD 206893c может быть объяснена моделями, включающими в себя ядерное горение дейтерия в ядре объекта и облачной атмосферой. Заодно ученым удалось однозначно определить возраст системы, который составляет теперь 155 ± 15 миллионов лет. Наблюдения за HD 206893 будут продолжаться, так как это крайне ценный объект, позволяющий проверить модели образования экзогигантов и коричневых карликов.

14.4. В остаточном диске близлежащей звезды обнаружены концентрические кольца

Декабрь 2016, arxiv.org, astronews.ru

Исследователи открыли нескольких концентрических колец в остаточном диске, окружающем близлежащую молодую звезду, известную как HIP 73145. Необычные субструктуры могут помочь глубже понять эволюцию околозвездных дисков, окружающих молодые звезды.

Звезда HIP 73145, расположенная на расстоянии примерно 400 световых лет от нас, является звездой спектрального класса A2IV возрастом примерно 15 миллионов лет. Она принадлежит к движущейся подгруппе Верхней Центавра — Волка OB-звездной ассоциации Скорпиона — Центавра. Эта звезда примерно на 70 процентов более массивная, по сравнению с Солнцем, а её радиус составляет 1,38 радиуса нашей звезды. Кроме того, известно, что вокруг этой звезды располагается остаточный диск радиусом примерно 96 а.е..

Диск звезды HIP 73145 был обнаружен в ближней и дальней ИК-частях спектра в 2015 году. Однако не было обнаружено никаких субструктур. В этом году команда астрономов во главе с Маркусом Фельдтом (Markus Feldt) из Института астрономии общества Макса Планка, Гейдельберг, Германия, провела мультиволновую наблюдательную кампанию, которая позволила им выявить концентрические кольца в остаточном диске звезды.

Первое обнаруженное кольцо имело радиус 66 а.е., открытые позднее кольца – 35 и 45 а.е. соответственно. Наблюдения проведены при помощи инструмента SPHERE Европейской южной обсерватории. Причинами появления колец могли стать либо планеты, либо взаимодействие между газом и пылью.

14.5. Протопланета загнала частицы пыли в ловушку

Октябрь 2017, The Astrophysical Journal, nplus1.ru

Установлено, что пылевые ловушки в протопланетном диске могут создаваться протопланетами. Статья опубликована в журнале The Astrophysical Journal.

Астрономы с помощью телескопа ALMA получили изображение газопылевого диска вокруг звезды V1247 Ориона. В нем хорошо видны четкое центральное кольцо и небольшая серповидная структура во внешней части. Между двумя частями диска пролегает большая темная полоса: авторы работы предполагают, что она могла быть образована движущейся протопланетой.

Небесное тело, согласно симуляциям, должно находиться на расстоянии примерно 100 а.е. от материнской звезды. Моделирование также показало, что протопланета, вращаясь вокруг родительской звезды, создает по обеим сторонам от себя области высокого давления — пылевые ловушки. В протопланетном диске V1247 Ориона пылевая ловушка представлена внешней серповидной структурой. В ней скапливаются небольшие комки пыли, которые позже превратятся в планетезимали. Кроме того, исследователи обнаружили признаки существования другой пылевой ловушки — она находится рядом с серповидной структурой, но во внутренней части диска. Открытие ученых говорит в пользу протопланетарного механизма возникновения областей высокого давления, однако сам «зародыш» планеты им пока обнаружить не удалось.

Ранее было показано, что пылевые ловушки могут возникать благодаря обратному аэродинамическому сопротивлению. В этом случае скопление частиц пыли может менять структуру газа в диске. Обе теории не являются взаимоисключающими — они, скорее, дополняют друг друга и в будущем их можно будет проверить дополнительными наблюдениями.

14.6. Искусственный интеллект научили искать протопланетные диски

Март 2018, Astronomy and Computing, nplus1.ru

Астрономы очень часто работают с большими массивами данных, и нередко им приходится просматривать их вручную. Чтобы облегчить задачу, исследователи в последние годы все чаще используют нейросети и алгоритмы машинного обучения, которые позволяют не только автоматизировать процесс, но и заметно его ускорить.

Авторы новой работы под руководством Тэм Нгуен (Tam Nguyen) из Массачусетского технологического института опирались на данные проекта гражданской науки Disk Detective. Его участники изучают снимки звезд, полученные в рамках нескольких обзоров, и пытаются определить, окружено ли светило газопылевым диском. Для обучения классификатора методом опорных векторов астрономы использовали результаты анализа обзора, выполненного инфракрасным телескопом WISE. Они выбрали 114 звезд, которые были отобраны для дальнейших наблюдений аргентинской обсерваторией CASLEO и считаются хорошими кандидатами для обнаружения протопланетных дисков. Кроме того, ученые использовали два дополнительных набора данных — один состоял из 13 «перспективных» звезд, а второй включал 138 заведомо плохих кандидатов.

Полученные алгоритмом результаты совпадали с классификацией, сделанной людьми, в 97 процентах случаев. Кроме того, программа смогла обнаружить следы 367 протопланетных дисков, которые ранее были неизвестны исследователям. Все они находятся вокруг звезд, у которых уже есть известные экзопланеты (алгоритм обрабатывал данные архива NASA Exoplanet Archive).

Последующие наблюдения выбранных объектов позволят проверить точность работы системы.

14.7. Астрономы разглядели у молодых звезд разные по форме и структуре околозвездные диски

Апрель 2018, *Astrophysical Journal*, nplu1.ru

Планетные системы образуются из околозвездного диска вокруг молодой звезды. Обычно он состоит из пыли, газа, астероидов, планетезималей и обломков, которые образуются при столкновениях тел. Околозвездные диски имеют самые разные формы и размеры, в некоторых из них можно заметить яркие или темные кольца, слои или другие детали. Изучение подобных объектов позволяет понять механизмы, управляющие образованием звезд и планетных систем вокруг них, а также выявить связь между свойствами диска и формированием в нем планет.

В рамках обзора DARTTS-S (Disks Around T Tauri Stars with SPHERE), при помощи инструмента SPHERE, установленного на телескопе VLT, астрономы смогли получить достаточно четкие изображения околозвездных дисков вокруг близко расположенных к нам молодых звезд (от 230 до 550 световых лет от Земли). Такие наблюдения позволяют понять механизмы образования и эволюцию планет. Статьи будут опубликованы в журналах *Astronomy & Astrophysics* и *Astrophysical Journal*.

Восемь молодых звезд, у которых наблюдались околозвездные диски, принадлежат к классу очень молодых (возрастом менее десяти миллионов лет), переменных звезд типа Т Тельца. Размеры этих дисков колеблются от 80 до 400 астрономических единиц. Еще один диск, видимый с ребра, располагается вокруг видимого с ребра диска вокруг красного карлика М-класса GSC 07396-00759, входящего в двойную звездную систему. Этот диск выглядит более старым, чем аналогичный диск вокруг звезды типа Т Тельца, которая является компаньоном карлика, хотя возраст звезд одинаковый. Пока эта разница не имеет четкого объяснения и является еще одной причиной для наблюдений подобных объектов.

14.8. Движение газа в протопланетном диске выдало три новорожденных планеты

Июнь 2018, *Astrophysical Journal Letters*, nplus1.ru

Астрономы при помощи системы радиотелескопов ALMA и новой техники поиска планет открыли три недавно сформировавшихся планеты в протопланетном диске у очень молодой звезды. Результаты работы позволят более глубоко понять механизмы образования планет и улучшить методику их поиска. Статьи (раз и два) опубликованы в журнале *Astrophysical Journal Letters*, кратко о работе рассказывается в пресс-релизе на сайте Европейской Южной обсерватории.

Прямое обнаружение протопланет в среде, где они формируются (газопылевых дисках вокруг молодых звезд) возможно, но достаточно сложно, поэтому исследователи пользуются косвенными методами. В новых работах две группы астрономов во главе с Кристофом Пинте (Christophe Pinte) и Ричардом Тигом (Richard Teague) сообщают о результатах наблюдений, проведенных при помощи системы радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), с использованием новой методики обнаружения протопланет. Целью наблюдений стала молодая звезда Хербига А-типа HD 163296, расположенная на расстоянии около 330 световых лет от Земли в созвездии Стрельца. Масса звезды оценивается в 1,9 масс Солнца, а возраст — в четыре миллиона лет. Более ранние наблюдения космического телескопа «Хаббл» выявили наличие у HD 163296 протопланетного диска, простирающегося на 375 астрономических единиц от звезды, который и изучался в работе.

Изображения с высоким разрешением, полученные при помощи ALMA в миллиметровом диапазоне, показали яркую центральную компоненту диска и набор из трех газопылевых колец, а также определили, что газовая составляющая диска простирается на расстояния до 415 астрономических единиц от звезды. Однако

исследователей интересовала не столько структура диска, сколько распределение и динамика газа в нем, которые отслеживались по излучению молекул угарного газа (СО). Движение газовых облаков вокруг звезды в отсутствии других тел имеет достаточно простое описание (кеплеровское вращение) и наблюдаемые возмущения (кольцеобразные структуры, щели в диске, спиральные волны и завихрения) могут указать на наличие массивного тела, например планеты.

Именно таким образом группа Тига идентифицировала две планеты с массами 0,6 и 1 масс Юпитера, расположенные примерно на расстояниях в 12 и 21 миллиарда километров от своей материнской звезды, а группа Пинте — еще одну планету, с массой 1,3 масс Юпитера, на дистанции около 39 миллиардов километров, применив более точную методику.

14.9. Астрономы впервые обнаружили муравьиную кислоту в протопланетном диске

Июль 2018, ArXiv.org, nplus1.ru

Астрономы при помощи системы радиотелескопов ALMA обнаружили признаки присутствия муравьиной кислоты в протопланетном диске вокруг звезды TW Гидры. Это первый случай обнаружения в протопланетном диске простейших карбоновых кислот — основы для синтеза более сложных органических соединений, необходимых для живых организмов на Земле. Препринт работы опубликован на ArXiv.org.

Основой жизни на Земле являются различные комбинации относительно небольшого количества ключевых органических компонентов, синтезированных из более простых «кирпичиков», таких как аминокислоты, фосфаты, сложные эфиры, органические кислоты, сахара и спирты. Некоторые из этих пребиотических молекул были обнаружены в областях звездообразования, а также в составе метеоритов и комет.

Ученых давно интересует вопрос, какие химические процессы идут в протопланетных дисках, окружающих молодые звезды, до завершения формирования самих планет и какие органические молекулы при этом образуются. Однако органический «зоопарк», обнаруженный в протопланетных дисках ограничен 20 видами молекул, в числе которых, например, цианиды, метанол или формальдегид. Поиск относительно больших молекул в протопланетных дисках — весьма сложная задача, для решения которой требуются высокая чувствительность телескопа и разрешение (как пространственное, так и спектральное).

Звезда TW Гидры, оранжевый карлик, расположенный на расстоянии примерно в 194 световых годах от нас, относится к звездам типа Т Тельца. Ее возраст оценивается менее чем в 10 миллионов лет, а масса не превышает 0,7 массы Солнца. TW Гидры уже неоднократно становилась целью для наблюдений, так как это самая близкая к нам звезда, обладающая плотным газопылевым диском, плоскость которого перпендикулярна лучу зрения с Земли, что позволяет наблюдать его полностью и избежать искажений.

Несмотря на то, что сам диск вокруг TW Гидры был открыт еще в 2005 году, недавние наблюдения показали, что в нем, возможно, присутствует планета-гигант, а также неоднородности — формирующиеся планеты.

Ранее исследователи уже находили в диске вокруг TW Гидры газообразный метанол (CH_3OH), который играет важнейшую роль в формировании органических соединений, необходимых для возникновения жизни, а также впервые получить в высоком разрешении изображение протопланетного диска и разглядеть его структуру.

Теперь группа во главе с Сесилем Фавре (Cecile Favre) сообщает о достоверной регистрации эмиссионной линии муравьиной кислоты (HCOOH) на частоте 129 ГГц, сделанной в середине 2016 года при помощи системы радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array).

14.10. ALMA обнаружила протопланетный диск у только что родившейся звезды

Сентябрь 2018, The Astrophysical Journal Letters, nplus1.ru

Астрономы при помощи системы радиотелескопов ALMA обнаружили вокруг очень молодой протозвезды вращающийся газопылевой диск, в котором, возможно, формируется новая планетная система. Это означает, что протопланетные диски могут возникать даже на самых ранних стадиях эволюции звезд, что раньше считалось маловероятным. Статья опубликована в The Astrophysical Journal Letters.

Особый интерес для астрономов представляют системы, находящиеся на начальных этапах формирования, где вокруг новорожденных звезд наблюдаются вращающиеся газопылевые диски. Данные по структуре и свойствам таких объектов позволяют оценить массу протозвезды и возможное количество протопланет в системе.

На сегодняшний день большинство протопланетных дисков были обнаружены у протозвездных объектов класса II и III (когда звезда становится видимой и готова выйти на главную последовательность), однако предсказывалось их существование у гораздо более молодых объектов (класса 0/I), которое в дальнейшем подтвердилось.

Группа во главе с Йоко Оя (Yoko Oya) из Токийского университета сообщила о результатах наблюдений за объектом IRAS 15398-3359 — это маломассивная протозвезда, расположенная в молекулярном облаке L1689B на расстоянии 505,5 светового года от Земли. Болومترическая температура звезды составляет 44 кельвина, что характерно для протозвезд класса 0 (это самая ранняя форма протозвезды, когда она еще достаточно холодна и окружена облаком из газа и пыли). С химической точки зрения IRAS 15398-3359

представляет собой объект, богатый различными молекулами ненасыщенных углеводородов, такими как CCH, C₄H и CH₃CCH, присутствующими в масштабах несколько тысяч астрономических единиц вокруг протозвезды.

Наблюдения IRAS 15398-3359 проводились в субмиллиметровом диапазоне волн в июле 2015 года при помощи системы радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), в спектральных линиях CCH и SO.

Более ранние наблюдения при помощи ALMA показали, что в системе недавно происходили всплески аккреции вещества на протозвезду и существует биполярный отток вещества. Кроме того, было высказано предположение, что у протозвезды есть уже сформированная вращающаяся дисковая структура, а верхний предел массы самой протозвезды оценивался примерно 0,01-0,09 масс Солнца.

Анализ новых данных показал, что вокруг звезды действительно существует вращающийся газопылевой диск. Оценка массы протозвезды оказалась ниже, чем считалось ранее — около 0,007 массы Солнца. Оценка массы диска, при условии, что температура пыли составляет 20-100 кельвинов, составляет примерно 0,1-0,9 массы звезды, а сам диск может быть либо теплым и малым по размерам, либо находится в неустойчивом режиме, из-за чего будут происходить новые всплески аккреции вещества на звезду, благодаря чему она может увеличить свою массу на 20 процентов всего за несколько десятков тысяч лет.

Альтернативная точка зрения, позволяющая объяснить столь малую массу протозвезды, заключается в том, что мы наблюдаем процесс формирования планетной системы вокруг коричневого карлика, однако это представляется маловероятной. В любом случае необходимы новые, более детальные наблюдения для понимания процесса образования звезд и дисков вокруг них.

14.11. Астрономы впервые получили прямой снимок зарождающейся планеты

Июль 2018, arXiv.org, nplus1.ru

Астрономы получили первый прямой снимок зарождающейся планеты, движущейся в протопланетном диске молодой звезды. Это позволяет серьезно расширить наши знания о механизмах образования планетных систем и проверить теоретические модели формирования планет. Препринты статей опубликованы на портале arXiv.org.



Рис. Система PDS 70

Две группы астрономов во главе с Мириам Кепплер (Miriam Keppler) и Андре Мюллером (André Müller)

сообщают о результатах наблюдений, проведенных при помощи приемника SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch instrument), смонтированного на телескопе VLT (Very Large Telescope) в Чили. Основная цель этого мощного специализированного научного инструмента — получение снимков экзопланет и околозвездных дисков методом прямых изображений, для этой цели свет от звезды блокируется при помощи коронографа, а данные обрабатываются при помощи специальных алгоритмов. Целью наблюдений стала звезда PDS 70 типа Т Тельца, расположенная на расстоянии 370 световых лет в созвездии Центавра. Ее масса оценивается в 0,76 масс Солнца, а возраст — в 5,4 миллионов лет. Звезда окружена протопланетным диском, открытым в 2006 году, и имеющим средний радиус примерно 140 астрономических единиц.

Итогом наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне, проведенных в рамках обзоров SHINE (SpHere INfrared survey for Exoplanets) и DISK (sphere survey for circumstellar DISK), стало открытие формирующейся планеты PDS 70b, окруженной собственным аккреционным диском, которая при движении создает зазор в протопланетном диске. Моделирования, проведенные с использованием данных спектрофотометрических наблюдений, дают оценки массы планеты от 2 до 17 масс Юпитера, радиус от 1,4 до 3,7 радиусов Юпитера, температуру внешних слоев в 1000–1600 Кельвинов. Планета расположена на расстоянии в 22 астрономических единицы от звезды, а орбитальный период PDS 70b оценивается в 118 лет. Ученые отмечают, что проведенная работа представляет собой лишь первый шаг к всестороннему изучению параметров орбиты и атмосферы новорожденной планеты, дальнейшие наблюдения, проведенные при помощи космического телескопа имени Джеймса Уэбба и системы радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) позволят ввести дополнительные ограничения на характеристики этого объекта.

Часть 15. Экзолуны и экзокометы 2016 – 2019 года

- 15.1. Гигантские кольца экзопланеты J1407b
- 15.2. «Хаббл» обнаруживает «экзокометы», падающие на молодую звезду
- 15.3. Размер первой потенциальной экзолуны сравнили с Нептуном
- 15.4. Астрономы усомнились в существовании первой потенциальной экзолуны
- 15.5. Планетологи предсказали извержения железных вулканов на несостоявшихся планетах
- 15.6. Астрономы впервые обнаружили протолунный диск вокруг экзопланеты
- 15.7. Астрономы заподозрили наличие вулканически активной экзолуны

15.1. Гигантские кольца экзопланеты J1407b

Январь 2015, rochester.edu, kiri2ll.livejournal.com

Молодая солнцеподобная звезда J1407 находится на расстоянии 420 световых лет в созвездии Центавра. Ее возраст оценивается в 16 миллионов лет, масса в 0.9 солнечных. В 2007 году астрономы заметили колебания блеска звезды — в некоторые моменты времени ее яркость уменьшалась на 95%. Как правило, такие явления связаны с транзитом планеты или другой менее яркой звезды, но в данном случае кривая яркости имела не характерный вид. Ученые посчитали, что причиной изменений яркости стал транзит невидимого спутника звезды — J1407b, который обладает системой из минимум четырех мощных колец.

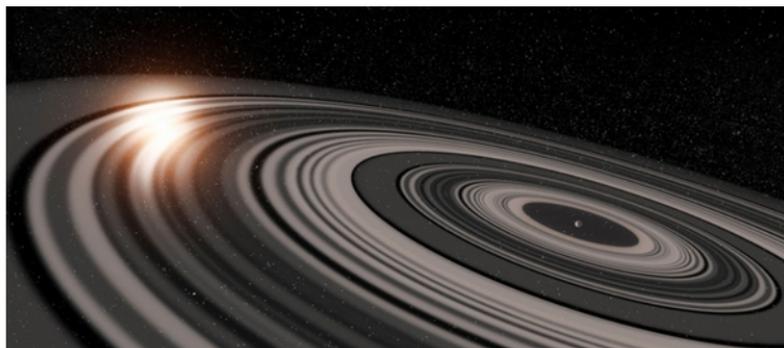


Рис. Кольцевая система J1407b

Группа астрономов из Лейденской обсерватории и Рочестерского университета выяснила, что кольцевая система J1407b намного больше, чем считалось ранее и насчитывает 37 колец, общая масса которых в 100 раз больше массы Луны, а радиус составляет 0.6 а.е. (90 миллионов километров). Для сравнения, радиус основных колец Сатурна около 80 000 километров, а масса по разным оценкам составляет от 1/2000 до 1/650 массы

Луны. Если бы у Сатурна имелась кольцевая система такой же мощи, как у J1407b, она была бы заметна невооруженным глазом на земном небе, а ее видимый диаметр намного превышал бы размеры полной Луны.

Масса J1407b оценивается от 10 до 40 масс Юпитера. Это может быть как супергигант, так и коричневый карлик. Его период обращения около 10 земных лет. Удалось обнаружить, как минимум, один большой разрыв в кольцах на расстоянии 61 миллион километров от J1407b, и он связан с формирующейся экзолуной с массой 0.8 земных. Период обращения которой вокруг J1407b — 2 земных года.

Считается, что в кольцах J1407b будут зарождаться новые экзолуны, и через несколько миллионов лет кольцевая система исчезнет.

15.1. «Хаббл» обнаруживает «экзокометы», падающие на молодую звезду

Январь 2017, astronews.ru

Космический телескоп НАСА «Хаббл» помог обнаружить кометы, падающие на звезду HD 172555, молодое светило возрастом 23 миллиона лет, которое находится на расстоянии 95 световых лет от Земли.

Сообщение об этом было сделано 6 января на зимнем собрании Американского астрономического общества, проходившем в г. Грейпвин, штат Техас, главным автором нового исследования Кэрол Грейди (Carol Grady) из научной организации Eureka Scientific Inc., США, и Центра космических полетов Годдарда НАСА.

Экзокометы не наблюдались напрямую, однако на их существование указывает обнаружение газа, вероятно, оставшегося от их испарившихся ледяных ядер. Были зафиксированы следы углерода и кремния, что может указывать на поглощение звездой комет.

Присутствие этих «обреченных» комет, в свою очередь, косвенно указывает на присутствие в системе звезды планеты размером с Юпитером, гравитация которой, подобно праще, отправляет кометы в направлении звезды.

HD 172555 — это третья по счету система, в которой обнаружены экзокометы. Все три этих системы являются молодыми, возраст каждой из них составляет не более 40 миллионов лет. Звезда входит в состав движущейся группы звёзд Беты Живописца, рожденных из одного молекулярного облака.

Астрономы обнаружили примеры подобных погружений комет в родительскую звезду и в нашей Солнечной системе, где такие падающие на звезду кометы носят название околосолячных комет. Обнаружение такой активности в Солнечной системе и в трех системах молодых звезд означает, что такого рода активность может быть характерна для систем молодых звезд.

15.2. Размер первой потенциальной экзолуны сравнили с Нептуном

Октябрь 2017, ArXiv.org, nplus1.ru

Кандидат в первые экзолуны, обнаруженный этим летом у планеты Kepler-1625 b. Такое предположение сделала группа астрономов из Колумбийского университета (США) под руководством Рене Хеллера после изучения наблюдений телескопом «Кеплер» трех транзитов экзопланеты по диску звезды. Препринт доступен на сайте ArXiv.org. В октябре 2018 года статья была опубликована в журнале Science Advances.

Экзолуна Kepler-1625 b-i была найдена летом 2017 года. Она вращается вокруг планеты Kepler-1625 b примерно в 4000 световых годах от Земли. Статистики немного, и однозначно сказать, что это действительно экзолуна, пока нельзя.

По мнению Хеллера, планеты Kepler-1625 b может быть газовым гигантом наподобие нашего Сатурна, или вообще оказаться коричневым карликом с массой около

75 масс Юпитера. Ее спутник гораздо более экзотичен — подобные ему луны не встречаются в Солнечной системе. Он, вероятнее всего, похож на наш Нептун — планету, которая в 17 раз тяжелее нашей. При этом Хеллер не отвергает и другие возможности — например, что экзолуна представляет собой раздутого газового гиганта с массой, как у Земли, или же это гигантское каменистое тело, покрытое океанами.

Современные теории не могут объяснить, как планета Kepler-1625 b могла получить такой спутник. Считается, что Луна возникла после столкновения Земли с гипотетической планетой Тейя. Но такой механизм не подходит для Kepler-1625 b-i, так как потребовалось бы слишком большое количество вещества. С другой стороны, возможен приливной захват спутника — так Нептун получил свою луну Тритон.

15.3. Астрономы усомнились в существовании первой потенциальной экзолуны

Апрель 2019, arxiv.org, nplus1.ru

Астрономы из Гарварда попытались воспроизвести работу своих коллег, обнаруживших первую потенциальную экзолуну, и им это не удалось, причем никто из ученых не может понять, с чем связана разница в результатах и существует ли на самом деле эта экзолуна. Препринт статьи опубликован на сайте [arXiv.org](https://arxiv.org).

Кандидат в первые экзолуны ученые обнаружили у планеты Kepler-1625 b летом 2017 года. Данные «Хаббла», обработанные первооткрывателями экзолуны Дэвидом Киппингом (David Kipping) и Алексом Тичи (Alex Teachey) из Колумбийского университета, свидетельствовали о том, что у Kepler-1625 b действительно есть спутник размером с Нептун.

Сигнал спутника был зарегистрирован во время трех транзитов Kepler-1625 b по диску материнской звезды — это небольшая статистика, и поэтому астрономы не могли

однозначно сказать, является ли этот объект первой известной человечеству экзолуной. Более того, как рассказывает издание *New Scientist*, повторный анализ данных «Кеплера» заставил усомниться в первоначальных выводах. Лора Крейдберг (Laura Kreidberg) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и ее коллеги заново обработали исходные данные и не смогли подтвердить существование экзолуны.

Издание отмечает, что обе команды перепроверили работы друг друга и не смогли найти ни ошибок, ни просто различий в последовательности действий, которые могли бы привести к разным результатам. При этом заявка Киппинга и Тичи на дополнительное время «Хаббла» для наблюдений Kepler-1625 была отклонена, так что ученые не верят, что им удастся окончательно подтвердить существование этой экзолуны.

15.4. Планетологи предсказали извержения железных вулканов на несостоявшихся планетах

Апрель 2019, *Geophysical Research Letters*, nplus1.ru

Ученые Френсис Ниммо (Francis Nimmo) и Джейкоб Абрахамс (Jacob Abrahams) из Калифорнийского университета в Санта-Крузе предсказали, что на поверхности металлических астероидов — зародышей планет, которым не удалось вырасти в крупные тела, можно наблюдать выбросы расплавленного железа. Подобные процессы должны были происходить на раннем этапе формирования планетной системы, когда изначально полностью расплавленные тела не успели полностью затвердеть, сообщают авторы в журнале *Geophysical Research Letters*.

Небесные тела, окружающие звезды, формируются из протопланетного диска. На начальных этапах частицы пыли соударяются и слипаются, постепенно формируя планетезимали — тела размером с километр, которые способны заметно влиять на движение окружающих

объектов посредством собственной гравитации. Такие тела затем могут объединяться в протопланеты, из которых, в конце концов, получатся полноценные планеты. Однако далеко не все планетезимали войдут в состав планетных ядер — многие будут выброшены во внешние области системы, а пережившие этап раннего формирования упадут на крупные тела в виде метеоритов.

В современной Солнечной системе встречается три типа слагающих кору материалов: силикаты в случае каменных планет, их лун и многих астероидов, льды на большинстве лун планет-гигантов, некоторых астероидов и объектах пояса Койпера, а также металлы, которые встречаются у некоторых тел главного пояса астероидов. Последний тип — наиболее редкий, он считается результатом разрушения более легкой мантии достаточно крупных тел в результате соударений на ранних этапах формирования планетной системы.

15.5. Астрономы впервые обнаружили протолунный диск вокруг экзопланеты

Июль 2019, *Astrophysical Journal Letters*, naked-science.ru

Планеты формируются из дисков газа и пыли вокруг звезд, и если планета достаточно велика, она может сформировать собственный диск, поскольку собирает материал на своей орбите вокруг звезды.

Используя массив из 66 радиотелескопов ALMA в Чили, астроном Университета Райса Андреа Изелла и его коллеги обнаружили околопланетный диск из газа и пыли вокруг экзопланеты PDS 70 c — все еще формирующегося газового гиганта, расположенного на расстоянии около 370 световых лет от Земли. Впервые она была обнаружена в прошлом месяце на изображениях, полученных с телескопа при съемке в видимом диапазоне. Опубликовано в *Astrophysical Journal Letters*

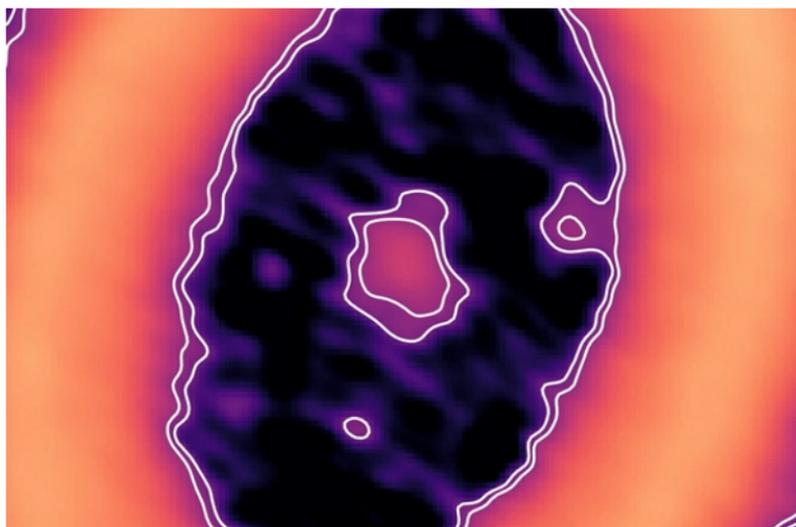


Рис. Околоразпланетный диск вокруг экзопланеты PDS 70 c

15.6. Астрономы заподозрили наличие вулканически активной экзолуны

Август 2019, arxiv.org, nplus1.ru

Астрономы теоретически определили возможность обнаружения у экзопланет лун, подобных спутнику Юпитера Ио, и нашли подходящего кандидата в системе WASP-49. Найти такую экзолуну можно по большому количеству натрия и калия, а доказать их происхождение со спутника можно путем точного наблюдения изменения спектров во время транзита по диску звезды, пишут авторы в препринте на [arXiv.org](https://arxiv.org).

Астрономы из США и Европы под руководством Апурва Оза (Aparva Oza) из Бернского университета в Швейцарии изучили теоретические возможности наблюдения объектов типа Ио и сравнили с наблюдательными данными системы WASP-49 b. В спектре этой планеты, относящейся к классу горячих газовых гигантов, было

замечено присутствие нейтрального натрия, причем на очень больших высотах от поверхности.

Ученые не считают свою работу доказательством существования экзолуны, хотя и считают это объяснение наиболее правдоподобным. Однако в системе возможно наличие газового кольца вокруг планеты или же явление нетепловой природы, которое может привести к аномальному выделению натрия планетой. Отмечается, что для прояснения ситуации необходимы наблюдения спектров не только во время транзита планеты по диску звезды, но и в начале и конце этого процесса, когда звезда просвечивает только сквозь окружающий планету газ.

На данный момент ни одного достоверного обнаружения экзолуны еще не было сделано. Это связано с трудностью обнаружения небольшого тела рядом с планетой и яркой звездой. Так, в 2017 году появились первые указания на существования экзолуны, но впоследствии их воспроизвести не удалось.

Часть 16. Формирование и эволюция экзопланет. 2016 – 2019 года

Содержание

- 16.1. Астрономы впервые увидели космический снегопад
- 16.2. Землеподобным планетам разрешили формироваться у тусклых звезд
- 16.3. Как формируются планеты, подобные Юпитеру
- 16.4. Ученые определяют размер зародышей планет
- 16.5. Найдено недостающее звено в формировании планет
- 16.6. Астрономы нашли механизм рождения планет по ускоренному сценарию
- 16.7. Теория образования планет не смогла объяснить гиганта на орбите у карлика
- 16.8. TESS нашел пережившую расширение звезды планету

16.1. Астрономы впервые увидели космический снегопад

Июль 2016, Nature, nplus1.ru

Группа астрофизиков во главе с ученым из Лукасом Съезой (Lucas Cieza) из Университета Диего Порталес впервые наблюдала водную снеговую линию вокруг молодой звезды. Об этом сообщает статья, опубликованная в журнале Nature.

Молодые звезды часто окружены плотными протопланетарными дисками, состоящими из смеси газа, пыли и частичек льда. Внутри этих дисков существует разделение на зоны, где вещество может существовать в виде льда или, например, наоборот только в виде газа. Для солнцеподобных звезд граница водной снеговой линии (в данном случае области, где вода превращается в лед) проходит примерно в трех астрономических единицах от звезды — то есть на расстоянии около 450 миллионов километров.

Ученым с помощью телескопа ALMA удалось увидеть молодую звезду V883 Orionis, которая «отодвинула» границу водной снеговой линии на расстояние почти 40 астрономических единиц — это примерно равно дистанции между Солнцем и Плутоном. Исследователи смогли обнаружить эту линию благодаря увеличению яркости молодой звезды, которое возникло в результате падения большого количества материала из газопылевого диска на поверхность звезды и подсветило протопланетарный диск. Однако даже при этом условии, если бы водная снеговая линия находилась очень близко к звезде (как предполагают теории), ALMA бы уже не смог ее запечатлеть.

Открытие того, что мощные вспышки молодых звезд могут сдвинуть снеговую линию на более далекие расстояния важно для получения корректных моделей процесса образования планет. Например, сейчас известно, что в области, лежащей ближе снеговой линии

солнцеподобной звезды, путем слипания частиц (коагуляции) образуются маленькие каменные тела, такие как Меркурий или Земля, так как лед существовать там не может, а газ оттуда активно выметается. В середине, где много вещества и газа, образуются газовые гиганты типа Юпитера, а еще дальше образуются ледяные тела вроде комет или таких планет, как Нептун.

Так как вспышки весьма характерны для звезд на ранних этапах эволюции, возможность того, что водная снеговая линия под их воздействием «уходит» дальше, может, по предположениям ученых, оказаться вполне характерной для множества подобных звезд. Это значит, что расстояния, на которых образуются небесные тела определенного типа, тоже могут сдвинуться.

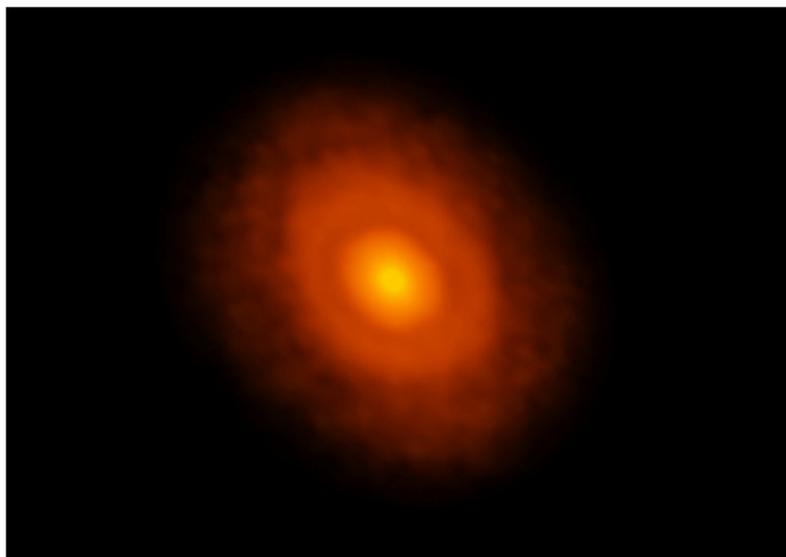


Рис. Тонкий темный диск вокруг звезды — снеговая линия

16.2. Землеподобным планетам разрешили формироваться у тусклых звезд

Октябрь 2016, Astronomy and Astrophysics Letters, nplus1.ru

В августе 2016 года ученые обнаружили экзопланету возле Проксимы Центавра — самой близкой к Земле звезды. Эта звезда относится к классу красных карликов, то есть тусклых и значительно менее крупных, чем Солнце, звезд, отличающихся исключительной продолжительностью жизни. Экзопланета находится в потенциально пригодной для жизни зоне, и по оценкам ее масса может быть сравнима с земной. В связи с этим ученые стали активно исследовать распространенность подобных планет в обитаемых зонах у звезд, похожих на Проксиму Центавра.

Швейцарские астрономы провели компьютерную симуляцию формирования планет в обитаемых зонах у небольших и тусклых звезд. Судя по ее результатам, большинство планет в этой области будут иметь глубокий океан и их размер будет сравним с размером Земли. Статья ученых принята к публикации в журнале Astronomy and Astrophysics Letters, с ее текстом можно ознакомиться на сервере препринтов ArXiv.

Продолжаются споры о пригодности для жизни планет рядом с красными карликами. Во-первых, планеты в зоне потенциальной обитаемости имеют тенденцию быть приливно-захваченными. В этом случае они все время обращены одной стороной к своей материнской звезде, и между «дневной» и «ночной» частью планеты наблюдается высокий перепад температур. Одна сторона нагревается очень сильно, что может приводить к выпариванию океанов, а другая наоборот замерзает. Во-вторых, поверхность планеты будет подвергаться экстремальному ультрафиолетовому и рентгеновскому излучениям. На примере Проксимы b ученые показали, что планета будет получать в 250 раз больше рентгеновского излучения, по сравнению с Землей.

16.3. Как формируются планеты, подобные Юпитеру

Октябрь 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, astronews.ru

Исследователи из Швейцарской высшей технической школы Цюриха (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, ETH Zürich) и Университетов Цюриха и Берна под руководством Я. Силадьи (J. Szulágyi) произвели моделирование различных сценариев с использованием вычислительных возможностей, предоставляемых Швейцарским национальным суперкомпьютерным центром (Swiss National Supercomputing Centre, CSCS), чтобы точно выяснить, как происходит формирование и эволюция молодых гигантских планет таких планет. Они сравнили результаты своих вычислений с наблюдениями и смогли сформулировать критерии, позволяющие различать между собой постулированные механизмы формирования гигантских планет.

Астрономам известны два основных механизма формирования гигантских планет: механизм аккреции ядра и механизм неустойчивости диска. В первом случае сначала формируется массивное ядро планеты, которое затем притягивает к себе газ, формирующий атмосферу гигантской планеты. Второй механизм предполагает прямое формирование планеты из газопылевого диска звезды, подобно тому, как происходит формирование самой звезды.

В своем новом исследовании эти швейцарские ученые обнаружили большое различие между двумя этими механизмами: в сценарии неустойчивого диска газ в окрестностях планеты остается холодным, его температура составляет примерно 50 Кельвинов, в то время как в случае сценария с аккрецирующим ядром околопланетный диск разогревался до температуры в несколько сотен Кельвинов.

16.4. Ученые определяют размер зародышей планет

Декабрь 2016, *Astrophysical Journal*, astronews.ru

Астрономы считают, что планеты формируются из газа и частиц пыли, хотя подробный механизм этого процесса до сих пор остается загадкой. Одним из главных препятствий при изучении этого механизма является проблема измерения размеров частиц пыли. Исследователи при помощи радиотелескопа Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) впервые смогли с высокой точностью определить размер небольших частиц пыли, окружающих молодую звезду, измеряя поляризацию радиоволн. Высокая чувствительность телескопа ALMA к поляризованным радиоволнам стала залогом успеха этого исследования, позволившего глубже понять процессы формирования планет вокруг молодых звезд.

Группа астрономов во главе с Акимаса Катаока (Akimasa Kataoka) из Гейдельбергского университета, Германия, и Национальной астрономической обсерватории, Япония, смогла решить эту проблему для одного отдельного случая, рассчитав размеры зерен пыли, окружающей молодую звезду HD 142527, измеряя параметры поляризационной картины, наблюдаемой для радиоволн, рассеянных на частицах пыли.

Согласно результатам команды Катаока размер частиц пыли, входящей в состав пылевого диска, окружающего эту звезду, не превышает 150 микрон, что примерно в 10 раз меньше, по сравнению с предыдущими расчетами, основанными на измерении параметров радиоволн, рассеиваемых на частицах пыли. Нестыковка полученных данных может объясняться тем, что в предыдущих исследованиях размер частиц определялся, исходя из допущения о сферической форме частиц, в то время как в новом исследовании, может содержаться информация об истинной форме частиц.

Работа опубликована в журнале *Astrophysical Journal*.

16.5. Найдено недостающее звено в формировании планет

Февраль 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, nplus1.ru

Астрономы выяснили, как небольшие комки космической пыли превращаются в планетезимали в аккреционном диске звезды. По мнению ученых, в этом процессе важную роль играют так называемые пылевые ловушки и аэродинамическое сопротивление. Работа ученых опубликована в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Планетные системы, подобные Солнечной системе, начинают свое существование в виде газопылевого диска вокруг звезды. Частицы пыли в протопланетном диске хаотически двигаются вместе с потоками газа, при этом сталкиваясь и слипаясь друг с другом. Постепенно эти небольшие комки космической пыли, размером всего в несколько сантиметров, собираются в гораздо более крупные тела, называемые планетезималями. Именно они служат зародышами для будущих планет.

Но есть сложности. Чем крупнее становятся пылинки, тем быстрее они «падают» на звезду, где они испарятся и разрушатся. К тому же, подросшие частицы при столкновении друг с другом на высокой скорости могут опять распасться на огромное число мелких, что повернет процесс накопления массы вспять.

Единственная область в протопланетном диске, где обе эти проблемы могут быть решены, это пылевые ловушки. Так называют области высокого давления, где движение пылинок частиц замедляется, что позволяет им слипаться и расти, не разрушаясь при этом при столкновениях. Раньше астрономы считали, что такие пылевые ловушки могут существовать только в очень специфичных условиях, однако авторы новой работы с помощью компьютерного моделирования показали, что они должны быть распространены гораздо чаще.

16.6. Астрономы нашли механизм рождения планет по ускоренному сценарию

Июнь 2018, Astronomy & Astrophysics, nplus1.ru

Крупные зародыши планет могут формироваться почти сразу после появления протопланетного диска, рассказывают астрономы в статье, принятой к публикации в Astronomy & Astrophysics. Как сообщается в пресс-релизе Российского научного фонда, открытие позволит лучше понять процессы, происходящие при формировании экзопланет, а также объяснить, как формируются суперземли.

Астрономам до сих пор до конца не ясно, как формируются разные типы планет. Достоверно известно, что на начальном этапе вокруг молодой звезды образуется протопланетный диск из космической пыли и газа. Дальнейшие процессы, предшествующие формированию небесного тела, до сих пор вызывают споры. Одни ученые считают, что крошечные частицы пыли соединяются в более крупные объекты, а затем превращаются в зародыши планет — планетезимали. Если такой объект притянет к себе много газа, он превращается в газовый гигант, как Юпитер, а если нет — в каменистую планету, как Земля. Однако это медленный процесс и есть вероятность, что газ рассеется еще до формирования газового гиганта. Другие исследователи утверждают, что газовые гиганты возникают в результате внезапных коллапсов в наиболее плотных и холодных областях протопланетного диска. Этот процесс в миниатюре копирует процесс формирования звезд. Сегодня наиболее привлекательной считается первая теория, однако она не способна объяснить все разнообразие наблюдаемых экзопланет. Поэтому астрономы пытаются создать сценарий, который бы мог точно объяснить происходящие в протопланетном диске процессы.

Группа астрономов под руководством Эдуарда Воробьева, научного сотрудника Венского технического университета (Австрия) и Южного федерального

университета (Россия), предложила новое объяснение механизма формирования планет. Для этого исследователи проанализировали эволюцию молодых звезд. Ранее считалось, что рост пылевых частиц идет медленно и формирование планет начинается в дисках возрастом около миллиона лет. Однако исследователи показали, что эти процессы начинаются намного раньше, почти одновременно с образованием диска и самой звезды.

Чтобы проследить процесс роста частиц пыли и формирования планеты на ранних стадиях развития, ученые использовали метод гидродинамического моделирования. Он предполагает, что околозвездные газ и пыль можно рассматривать как сжимаемую жидкость и применить к ее описанию стандартные уравнения гидродинамики. Симуляция начиналась с гравитационного коллапса молекулярного облака и рождения звездного ядра с массой примерно равной солнечной. За этим следовало образование звезды и протопланетного диска, состоящего из частиц двух типов — более одного микрометра и менее одного микрометра.

Моделирование показало, что протопланетный диск растет крайне быстро — масса входящих в него частиц достигает десятков и даже сотен земных масс еще до того, как звезда перейдет на следующую стадию эволюции и превратится в переменную Т Тельца (если расстояние от светила больше одной астрономической единицы). Пыль, сравнимая по размеру с бактериями (менее 1 микрометра), может в результате слипания превратиться в метровый валун уже спустя сто тысяч лет после образования звезды. Валуну, общая масса которых превышает земную в несколько сотен раз, дрейфуют по направлению к звезде, что облегчает процесс образования небесных тел на небольшом расстоянии от светила. Именно в этих областях космический телескоп «Кеплер» обнаружил многочисленные планеты, названных суперземлями из-за их массы, превышающей массу Земли в несколько раз.

16.7. Теория образования планет не смогла объяснить гиганта на орбите у карлика

Сентябрь 2019, Science, nplus1.ru

Астрономы открыли систему красного карлика GJ 3512, в которой планета с массой примерно в половину Юпитера обращается на близкой орбите вокруг звезды, которая в восемь раз легче Солнца. Настолько большое отношение масс планеты и звезды с трудом объясняется современными теориями образования планет. Исследование проведено группой астрономов из Европы, Израиля, Чили и Мексики под руководством Хуана Карлоса Моралеса (Juan Carlos Morales) из Автономного университета Барселоны. Статья опубликована в журнале Science

Красный карлик GJ 3512 находится на расстоянии 9,5 парсека от Земли, ее масса всего 0,123 массы Солнца, что делает ее похожей на ближайшую к Солнцу звезду Проксима Центавра.

Авторам удалось однозначно определить наличие одной планеты и найти указания на возможное присутствие второй. Ближняя к звезде планета GJ 3512 b делает один оборот вокруг светила за 214 дней по вытянутой орбите с эксцентриситетом около 0,44, а ее масса не меньше 0,46 массы Юпитера. Период второй планеты GJ 3512 c должен составлять порядка 1400 дней, но ее другие параметры точно неизвестны.

Система GJ 3512 интересна во многих отношениях. Во-первых, масса планеты очень высока. Во-вторых, ее орбита сильно вытянута, а такое обычно случается только в случае взаимодействия с другими планетами. Вторая планета, если и существует, то находится намного дальше от звезды, поэтому авторы предполагают, что изначально было три планеты, но одна из них была выброшена в результате взаимодействия с ближней, переместив ее на эксцентричную орбиту и образовав большой промежуток между оставшимися двумя.

16.8. TESS нашел пережившую расширение звезды планету

Октябрь 2019, The Astrophysical Journal, nplus1.ru

Международный коллектив астрономов при участии Тьяго Капманте (Tiago Campante) из Университета Порту в Португалии проанализировали результаты наблюдения космическим телескопом TESS звезд HD 212771 и HD 203949 — первых светил с открытыми экзопланетами, у которых зафиксировали заметные колебания. Оказалось, что у одной из них планета находится настолько близко к звезде, что должна была быть поглощена на этапе расширения светила. Скорее всего, раньше планета находилась дальше и мигрировала к центру относительно недавно, пишут авторы в The Astrophysical Journal.

Телескоп TESS создан для изучения звезд в солнечной окрестности. В первую очередь он нацелен на поиск экзопланет транзитным методом, то есть на основе изменений яркости светил при прохождении объектов по их диску. Однако исключительно точные измерения потоков излучения инструментами TESS позволяют проводить множество других исследований, в том числе в области астросейсмологии, науки о колебаниях звезд. Также этому способствует наблюдательная программа телескопа, в рамках которой он покрывает почти все небо и соберет информацию о большом количестве объектов.

Астросейсмология особенно продуктивна в случае похожих на Солнце звезд или красных гигантов, так как у таких светил внешние оболочки находятся в конвективном движении, благодаря чему могут происходить крупномасштабные колебания с заметной амплитудой. В контексте изучения экзопланет астросейсмология может указать как на само наличие таких объектов на орбите вокруг звезды, так и на детальные свойства, такие как взаимная ориентация угловых и орбитальных моментов, а также эксцентриситет планет.