

KPS-1b: ПЕРВАЯ ЭКЗОПЛАНЕТА, ОТКРЫТАЯ В РАМКАХ РОССИЙСКОГО ПРОЕКТА

К.И. ИВАНОВ,

научный сотрудник

Астрономической обсерватории Иркутского государственного университета

А.Ю. БУРДАНОВ,

аспирант Льежского университета (Бельгия)

DOI: 10.7868/50044394819030071

Термин “экзопланета”, плотно вошедший в обиход астрономов в середине 1990-х гг., давно утратил экзотический оттенок. Несмотря на то, что о возможности существования планет за пределами Солнечной системы говорил еще Джордано Бруно в далеком 1584 г. (ЗиВ, 1998, № 6), подлинное развитие астрономии в области открытия и исследований экзопланет обрело смысл лишь в XXI в. Это случилось во многом благодаря стремительному научно-техническому прогрессу последних лет. Всего пара десятилетий потребовалась ученым для того, чтобы осознать всю важность данной темы, разработать десятки новых методов получения и обработки данных, создать специализированные телескопы и модифицировать уже имеющиеся, запустить космические обсерватории “Кеплер” и TESS. Результатом проделанной работы стало открытие более чем 4000 экзопланет в почти 3000 систем, ни одна из которых, к немалому удивлению исследователей, не была в полной мере похожа на Солнечную (ЗиВ, 1995, № 6; 1998, № 3, с. 67; 1999, № 6; 2005, №№ 4–6; 2008, № 2; 2009, № 1; 2010, № 4; 2011, №№ 3, 6; 2012,

№ 6; 2013, № 2, с. 70; 2014, № 5; 2015, № 5; 2016, № 2; 2017, № 6, с. 106; 2018, № 3, с. 15–17). Последнее обстоятельство обусловило стремительный рост актуальности темы экзопланет, выводя ее на один уровень с исследованиями темной энергии, гравитационных волн и фундаментальных проблем рождения и эволюции Вселенной.

Исследованиями экзопланет сегодня занимаются ученые многих стран мира. Не осталась в стороне и Россия, представившая научному сообществу экзопланету KPS-1b около звезды UCAC4 775-030421 в созвездии Большой Медведицы, открытую в рамках проекта “Kourovka Planet Search” (KPS).

ИСТОРИЯ ПРОЕКТА

Российский проект “Kourovka Planet Search” берет свое начало с лета 2011 г. Именно в это время группа молодых ученых, в их числе: А.Ю. Бурданов, В.В. Крушинский, А.А. Попов, Е.Н. Соков, работающих в Коуровской и Пулковской астрономических обсерваториях, а также в Астрономической обсерватории Иркутского



400-мм телескоп MASTER-II Коуровской обсерватории

государственного университета, поставила перед собой задачу поиска и исследования систем экзопланет у ближайших звезд методом транзитов. На тот момент коллектив располагал всего несколькими инструментами, в числе которых были два 400-мм широкопольных роботизированных телескопа MASTER-II системы Гамильтона, разработанные в ГАИШ МГУ под руководством профессора В.М. Липунова в рамках проекта “МАСТЕР” и предназначенные для поиска оптических транзиентов (ЗиВ, 2011, № 3; 2014, № 3, с. 109–110). Телескоп MASTER-II, расположенный на территории Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой Уральского Федерального университета (Свердловская обл.; ЗиВ, 1968, № 1; 2018, № 3), использовался в качестве обзорного инструмента для поиска кандидатов в транзитные экзопланеты – звезд, блеск которых периодически меняется на 1–2%.

Скоро выяснилось, что стандартных возможностей имеющихся инструментов недостаточно для плодотворной

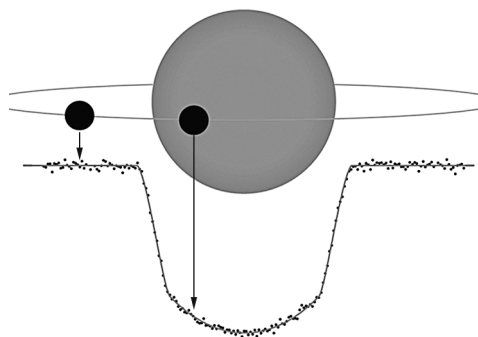
работы проекта. Сказывались, в частности, относительно низкая точность фотометрии, обусловленная значительным влиянием неоднородностей атмосферы при наблюдениях в широких полях, принципиальная невозможность проведения полного цикла исследований, необходимых для присвоения объекту статуса экзопланеты, а также не вполне благоприятный астроклимат, заметно снижающий число наблюдательных ночей. Первая проблема была успешно решена путем разработки и внедрения программного обеспечения, позволяющего минимизировать ошибки фотометрии и увеличить ее точность на порядок; вторая и третья – путем привлечения в проект заинтересованных лиц из других организаций со всего мира, что в конечном счете принесло проекту статус международного.

Несмотря на огромную проделанную работу, первые годы существования проекта не ознаменовались открытиями экзопланет. Удалось обнаружить несколько сотен новых переменных звезд, а также ложноположительных кандидатов – звезд, характер переменности

которых весьма схож с картиной транзита планеты, но в действительности вызван затмениями звездой. Успех пришел лишь в начале 2015 г., когда был найден первый уверенный кандидат в экзопланеты. Комплекс дополнительных исследований, выполненных учеными России, Англии, Бельгии, Италии, Канады, Литвы, США, Нидерландов, Португалии, Турции и Франции, доказал существование на орбите исследуемой звезды планеты, относящейся к классу “горячих юпитеров” и представляющей большой научный интерес. Согласно принятым в астрономическом сообществе правилам, обнаруженная планета получила имя KPS-1b (в честь открывшего ее проекта) и в настоящее время официально внесена в каталоги подтвержденных экзопланет.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Как уже упоминалось выше, в основе работы проекта “Kourovka Planet Search” лежит метод транзитов, суть которого заключается в регистрации незначительного (обычно в пределах 1–3%) уменьшения блеска родительской звезды в момент прохождения планеты на фоне ее диска. Большинство известных ныне экзопланет открыто именно этим методом в рамках исследований с помощью космической обсерватории “Кеплер” (“Kepler”; ЗиВ, 2009, № 4, с. 44–45; 2011, № 6), что подтверждает его высокую эффективность. Тем не менее, невзирая на кажущуюся простоту, имеется ряд ключевых моментов, несоблюдение которых сводит на нет любые попытки его применения.



Метод транзитной фотометрии. Основан на регистрации изменения блеска родительской звезды в момент прохождения планеты на фоне ее диска

Важнейшим требованием для реализации рассматриваемого метода является высокая точность фотометрии: для уверенного обнаружения экзопланеты типа “горячий юпитер” допустимая ошибка блеска звезды должна быть порядка нескольких тысячных долей звездной величины, а для обнаружения планет земной группы – на порядок меньше. Для достижения столь высокой точности на телескопе малого диаметра MASTER-II, использовавшемся в качестве обзорного, потребовалось применение уникального программного обеспечения “AstroKit” (создали А.Ю. Бурданов, В.В. Крушинский и А.А. Попов), специально разработанного участниками проекта для этой цели. Из тысяч звезд, расположенных в кадре вместе с объектом исследования, программа выбирает наиболее подходящие под заданные критерии и формирует из них искусственную звезду сравнения, с помощью которой получается высокоточная кривая блеска – график зависимости блеска звезды

Для уверенного обнаружения экзопланеты типа “горячий юпитер” допустимая ошибка блеска звезды должна быть порядка нескольких тысячных долей звездной величины, а для обнаружения планет земной группы – на порядок меньше

от времени. Подобный подход позволяет минимизировать влияние атмосферных помех, на порядок увеличивая точность фотометрии.

Вторым необходимым условием успешного применения метода транзитов является как можно большее число одновременно исследуемых звезд: шансы на обнаружение неизвестной экзопланетной системы возрастают пропорционально их числу. Здесь в полной мере проявляют себя именно обзорные телескопы с широким полем зрения, и MASTER-II, имеющий поле в 4 квадратных градуса, не стал исключением. Увеличить количество объектов можно и путем грамотного выбора областей небесной сферы; в нашем случае исследования проводились не только в приполярных областях, но и в плоскости Млечного Пути, в результате чего количество звезд в каждом кадре порой превышало 20 тысяч.

Поскольку транзит экзопланеты – явление периодическое – третьим условием применимости метода транзитов стала возможность неоднократного наблюдения одних и тех же звезд в разные моменты времени. Целенаправленно соблюсти его для десятков тысяч объектов не представляется возможным, поэтому была избрана иная тактика: автоматические наблюдения велись в строго определенных областях небесной сферы (площадках) в течение нескольких месяцев подряд, при этом каждая площадка снималась при любой возможности. Полученные кадры обрабатывались автоматически, после чего строились кривые блеска для всех обнаруженных в кадре звезд. Роль наблюдателя сводилась к грамотной настройке

инструментов и обрабатывающих программ, а также поиску характерных периодических изменений блеска звезд, попавших в конкретную площадку.

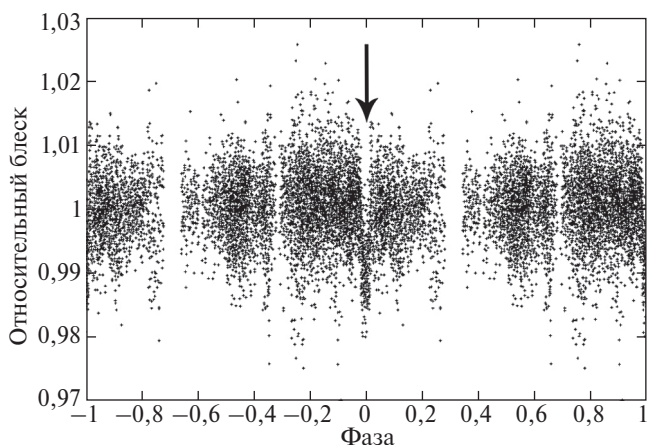
Повторные наблюдения обнаруженных при этих условиях кандидатов в экзопланетные системы были направлены в основном на уточнение орбитального периода затмевающего тела, после чего объект передавался для исследования на более крупные телескопы с диаметром объектива от метра и более. Здесь производилась еще более точная фотометрия транзита в разных оптических фильтрах, подтверждалось отсутствие звезды-компаньона посредством спекл-интерферометрических наблюдений, выполняемых с помощью 6-метрового телескопа БТА СО РАН (1975 г.; ЗиВ, 1977, № 6), а также определялись

массы всех компонентов системы методом спектроскопии. На основании полученных данных выносился окончательный вердикт о принадлежности исследуемого объекта к классу экзопланетных систем.

Необходимым условием успешного применения метода транзитов является как можно большее число одновременно исследуемых звезд: шансы обнаружения неизвестной экзопланетной системы возрастают пропорционально их числу

ОТКРЫТИЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ KPS-1b

С января по апрель 2015 г. американский астроном-любитель Пол Бенни (штат Массачусетс), присоединившись к проекту “Kourovka Planet Search” в конце 2014 г., проводил тестовые наблюдения в области созвездия Большой Медведицы с помощью 279-мм телескопа RASA – основного инструмента своей, частной обсерватории. По результатам анализа полученных кадров была обнаружена ранее не отмеченная



На диаграмме обнаружен "провал" в блеске звезды UCAC4 775-030421, расположенной в Большой Медведице. Диаграмма получена по данным анализа результатов наблюдений, полученных с помощью 279-мм телескопа RASA. Характерный "провал", обусловленный наличием периодических колебаний блеска, обозначен стрелкой. Крестиками показан блеск (в относительных единицах) звезды UCAC4 775-03041 при разном орбитальном положении затмевающего тела. Каждый крестик соответствует одному измерению

переменность звезды UCAC4 775-030421 с характерной амплитудой около $0,01^m$ при общем блеске звезды около 13^m . Дополнительные фотометрические исследования, выполненные с помощью 50-сантиметрового телескопа МТМ-500 Кисловодской горной астрономической станции, подтвердили факт переменности и позволили определить период изменения блеска, оказавшийся равным 1,706 земных суток.

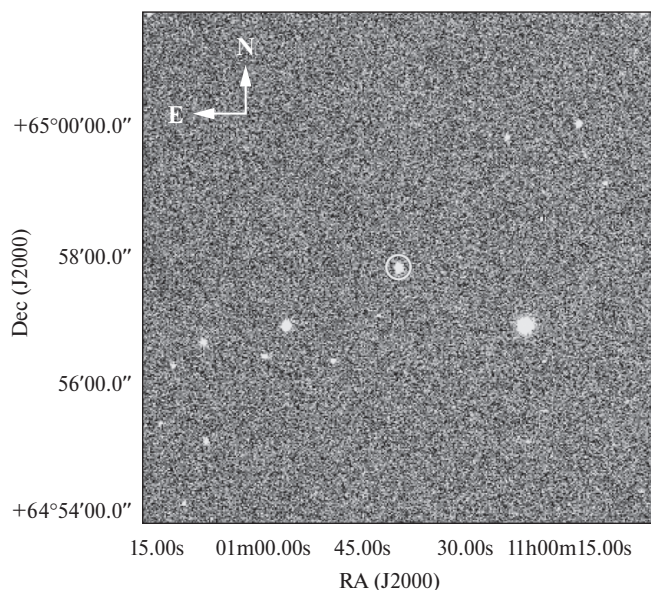
В процессе идентификации системы экзопланет крайне важно определить подлинную природу затмевающего тела. Нередко таковым становится маломассивная звезда, имеющая низкую светимость и обращающаяся вокруг более яркого компаньона на близкой орбите, в результате чего

фотометрическая картина становится весьма похожей на транзит экзопланеты. Дополнительные фотометрические исследования, проведенные с помощью ряда телескопов по всему миру, в том числе с помощью 1-метрового телескопа Т-100 Национальной обсерватории "Тюбитак" (Турция) и 1,65-метрового телескопа Молетайской обсерватории (Литва), по-

зволили с высокой долей вероятности исключить сценарий системы затменных звезд.

Последним и решающим фактором, формирующим окончательное представление о природе затмевающего тела, служат результаты доплеровской спектроскопии, позволяющие оценить взаимное гравитационное влияние компонент системы и, как следствие, определить их массы. Темный объект с массой более $10 M_{Ю}$ уже не может считаться планетой и относится к классу коричневых карликов. В нашем случае прецизионный анализ, выполненный с помощью спектрографа SOPHIE на базе 1,93-метрового телескопа (Прованс, Франция), позволил определить верхний предел массы для затмевающего тела; она равна $1,09 M_{Ю}$. Первая экзопланета, обнаруженная на основе любительских данных при определяющем "участии" российского проекта, была официально открыта и заняла свое место в каталоге экзопланетных систем под именем KPS-1b.

Безусловно, изучение планеты на этом не окончилось. В течение полутора лет после ее обнаружения удалось получить достаточно данных для формирования полного представления как о системе в целом, так и об отдельных ее компонентах. В частности, родительская



В центре кадра родительская звезда UCAC4 775-03042 (отмечена кружком) экзопланеты KPS-1b в Большой Медведице. Изображение получено с помощью 500-мм телескопа МТМ-500, расположенного на территории Кисловодской горной астрономической станции

звезда, удаленная от нас на расстояние 270 пк (55 691 496 а.е., 880 св. лет), по массе и размеру очень похожа на Солнце, но, по-видимому, несколько старше. Экзопланета принадлежит к классу газовых гигантов и обращается вокруг звезды UCAC4 775-030421 по очень низкой орбите (на расстоянии около 4 млн км), в результате чего средняя температура ее атмосферы достигает 1500° С, что, по всей видимости, должно приводить к постоянной потере массы посредством испарения. Вопрос о том, каким образом планета оказалась так близко к родной звезде, остается открытым и требует дальнейшего изучения.

среди всего многообразия уже открытых внесолнечных планет “горячие юпитеры” являются одними из самых экзотических. Обладая уникальным сочетанием физико-химических характеристик, по сей день ставящим многих ученых в тупик, объекты данного класса к тому же достаточно редки: их количество не превышает 10% от общего числа известных экзопланет. Данное обстоятельство придает KPS-1b особую научную ценность.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта (№ 3.9620.2017/БЧ) базовой части государственного задания.

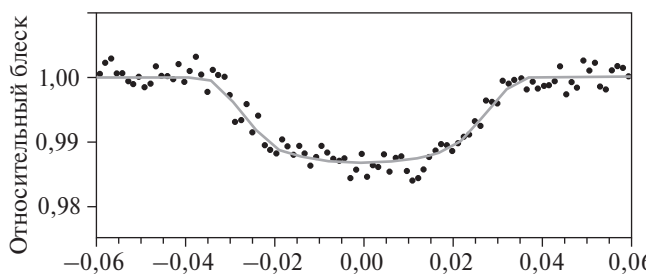


График кривой блеска транзита экзопланеты KPS-1b по диску родительской звезды UCAC4 775-030421, полученный на основе данных телескопа T-100 Национальной обсерватории “Тюбитак” (Турция). Имеет характерную U-образную форму с продолжительным минимумом

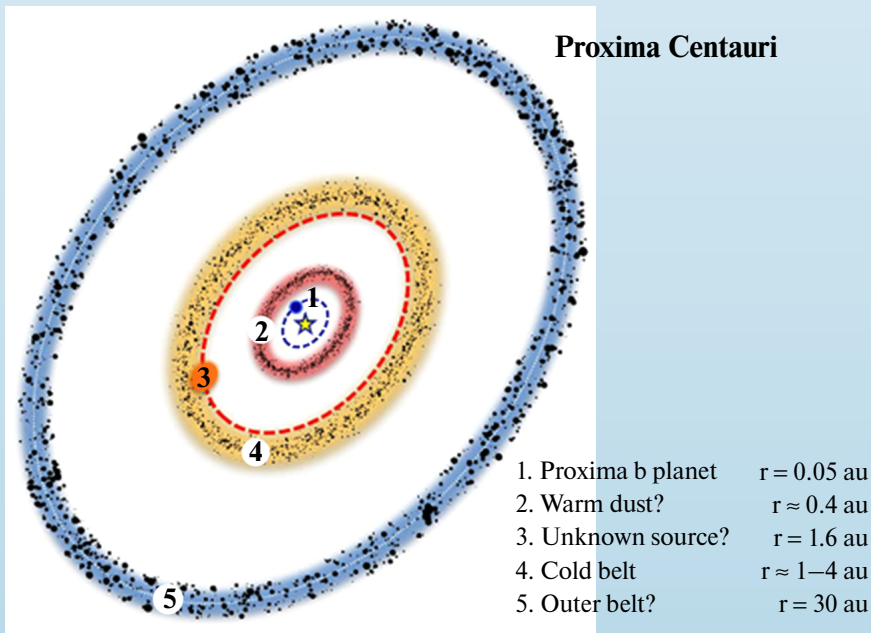
Информация

У Проксимы Центавра, возможно, обнаружена вторая планета

У ближайшей к Солнцу звезды Проксима Центавра методом лучевых скоростей обнаружена вторая планета – суперземля (или мини-нептун) с минимальной массой в 6 масс Земли и орбитальным периодом 1936 земных суток. Об этом 12 апреля было объявлено на конференции “Breakthrough Discuss-2019”, проходившей 11–12 апреля в Беркли (Великобритания).

Проксима Центавра – тусклый красный карлик, удаленный от нас на $1,302 \pm 0,002$ пк, или 4,25 световых года. Несмотря на близость, звезда не видна невооруженным глазом, ее светимость составляет всего 1/645 часть солнечной; диаметр – меньше, чем у нашего светила, в семь раз, а масса – в восемь раз. В августе 2016 г. было объявлено об открытии у Проксимы Центавра потенциально обитаемой планеты **Проксима b**, имеющей проективную массу 1,3 массы Земли и орбитальный период 11,186 земных суток. Планета вращается вокруг своей звезды на среднем расстоянии 0,0485 а.е. (то есть она к ней в 20,6 раза ближе, чем Земля к Солнцу), но из-за низкой светимости Проксимы Центавра получает от нее только 65% той энергии, что получает Земля от Солнца. Иначе говоря, ее температурный режим оказывается промежуточным между температурными режимами Земли и Марса.

И вот – новое открытие! 12 апреля 2019 г. Марио Дамассо из Туринской обсерватории (Италия) объявил об обнаружении в этой системе второй планеты – **Проксимы c**, с проективной массой около 6 масс Земли и орбитальным периодом примерно 1936 земных суток.



Сложная структура пылевого диска вокруг звезды Проксима Центавра. На рисунке показаны (без соблюдения пропорций): 1 – орбита планеты Проксима b; 2 – кольцо теплой пыли на расстоянии 0,4 а.е. от звезды; 3 – неизвестный источник, расположенный в 1,6 а.е. от звезды, – предполагаемая планета Проксима c; 4 – кольцо пыли и ледяных обломков – аналог пояса Койпера в Солнечной системе; 5 – возможный внешний пояс очень холодной пыли с температурой 10 К