

# ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТЫ

В. А. ПАЗУБАЕВ

20 декабря 2007 г. 62-я Генеральная Ассамблея ООН объявила 2009 г. Международным годом астрономии. С инициативой его проведения выступила Италия — родина великого Галилео Галилея, который в 1609 г. открыл эру телескопической астрономии. Он первым увидел Солнце, Луну, планеты и звезды в телескоп, созданный собственными руками, и сделал ряд замечательных открытий. Галилей открыл пятна на Солнце, четыре из 63 ныне известных спутника Юпитера, увидел горы на Луне и множество звезд.

В резолюции Генеральной Ассамблеи сказано: «Астрономия является одной из старейших фундаментальных наук... она вносила и продолжает вносить существенный вклад в развитие других наук и прикладных исследований».

Астрономия — наука о Вселенной. Круг вопросов, рассматриваемых современной астрономией, очень велик. Сегодня от нее отделились самостоятельные ветви, которые, в свою очередь, разделяются на множество направлений. Астрометрия — это наука об измерении пространства и времени. Небесная механика изучает закономерности движения небесных тел под действием сил тяготения. Звездная астрономия исследует распределение и движение звезд, звездных систем и межзвездной материи в пространстве. Астрофизика изучает строение, физические свойства и химический состав небесных объектов. Космогония рассматривает проблемы, связанные с происхождением и эволюцией небесных тел. Космология изучает самые общие закономерности строения и развития нашей Вселенной.

Для получения знаний о Вселенной астрономы используют весь спектр электромагнитного излучения — от гамма и рентгеновского до оптического и радиоизлучения, а также источники гравитации, космические лучи и вещество планет, их спутников и комет. Все астрономические открытия, сделанные и еще предстоящие, связаны с развитием различных наземных и космиче-

ских астрономических инструментов, а в последние десятилетия также и с новыми возможностями обработки получаемой информации, связанными с развитием компьютерных технологий.

Замечательным примером того, какого уровня может достигнуть техника эксперимента при изобретательном использовании современных возможностей, является открытие внесолнечных планет. Поиск внесолнечных планет (экзопланет, как их еще называют) дает новые фундаментальные знания о происхождении мира, в котором мы живем, новые представления об эволюции нашей планеты и, наконец, это — поиск миров с теми условиями, в которых когда-то возникла и эволюционировала жизнь на нашей планете.

В прошлом веке отправной точкой в поиске других планетных систем считалась хорошо изученная структура Солнечной системы. Ближе к Солнцу в центральной части Солнечной системы располагаются четыре планеты земного типа: Меркурий, Венера, Земля с Луной и Марс. Все они имеют высокую среднюю плотность, 4–5,5 г/см<sup>3</sup>, и, за исключением Меркурия и Луны, обладают атмосферами. Их удаленность от Солнца составляет от 0,4 до 1,5 астрономических единиц. Гораздо дальше, от 5 до 30 единиц, располагаются планеты-гиганты. Они устроены совсем иначе и имеют газо-жидкую природу. Эту группу возглавляет Юпитер, масса которого в 318 раз больше массы Земли и составляет одну тысячную массы Солнца.

Звезды находятся крайне далеко от Солнца (ближайшая — на расстоянии 4,22 световых лет). Сами планеты малы и тусклы по сравнению со звездами. Поэтому долгое время задача обнаружения планет возле других звезд была неразрешимой.

Первой открытой экзопланетой стала планета у звезды 51Peg в созвездии Пегаса. Фактически планета у звезды 51Peg была обнаружена в 1994 г., но официально объявили об этом лишь

осенью следующего года. Сообщения об открытии планет появлялись и раньше, в течение почти всей второй половины XX века, но неизменно опровергались. Сейчас благодаря усовершенствованным методам поиска такие планеты стали открывать десятками. Предложено несколько методов выявления планет около звезд.

**Астрометрический метод** основан на определении изменения собственного движения звезд под воздействием гравитационного поля планет.

**Спектрометрическое измерение** радиальной или лучевой скорости звезд — в настоящее время самый эффективный метод. Все звезды участвуют во вращении Галактики. При этом каждая звезда имеет собственную скорость, которая относительно Солнца может достигать нескольких десятков километров в секунду. Если звезда приближается к наблюдателю или удаляется, то в результате эффекта Доплера спектр излучения звезды смещается в синюю или красную сторону. Измерения смещения линий в спектре позволяют определить лучевые скорости звезд.

Если у звезды есть планета, то вместе они обращаются вокруг барицентра. Движение звезды по такой орбите наложит на доплеровскую составляющую лучевой скорости переменную составляющую, которая намного меньше полной лучевой скорости, но именно она выдаст присутствие планеты.

Предельной возможностью этого метода, существующего уже около ста лет, до 70-х гг. XX века, считалось нахождение скоростей примерно 300–500 м/с. Но соответствующие поправки к скорости звезд очень малы. Например, в Солнечной системе скорость Солнца, возникающая под действием притяжения Юпитера, всего примерно 12,5 м/с, Сатурна — 2,7 м/с, а Земли или Венеры — менее 0,1 м/с. Поэтому попытки обнаружить планеты при такой точности были совершенно бесперспективны.

В начале 1990-х гг. несколько групп в разных странах занялись совершенствованием метода лучевых скоростей. В 1988 г. в Канаде Б. Кэмпбелл и его коллеги сумели зарегистрировать лучевые скорости около 15 м/с. Они сравнивали положение линий в спектре звезды с наложенным на него лабораторным спектром паров фтори-

стого водорода, который, однако, очень неудобен для работы из-за высокой токсичности. В Швейцарии, в Женевской обсерватории, М. Майор и Д. Квелоц разработали спектрометр, где была достигнута чувствительность 13 м/с, и в 1994 г. они приступили к поиску планет у звезд солнечного типа из сравнительно близкого окружения Солнца. По предложению П. Батлера, который тогда, как и Квелоц, был аспирантом, фтористый водород в стандарте заменили парами йода. В газовой фазе йод имеет много спектральных линий как раз в области наиболее удобных линий звезд — 500–600 нм. Из-за многочисленности линий йодного стандарта требуются очень трудоемкая обработка результатов и применение мощного компьютера. По расчетам чувствительность нового метода должна была быть высокой и составлять примерно 10 м/с. В 1994 г. их коллега С. Вогт заменил оптику спектрометра в Ликской обсерватории, где выполнялись наблюдения, и сразу же удалось довести порог чувствительности до 3 м/с. Это вполне позволило бы воображаемому наблюдателю, удаленному на 10 парсеков (30 световых лет), обнаружить Юпитер по его гравитационному влиянию на Солнце.

**Метод транзитной фотометрии.** Если наблюдатель окажется примерно в плоскости кеплеровской орбиты, то можно наблюдать прохождение планеты по диску звезды (ее транзиты). Конечно, различить черный кружок на точечном диске звезды нельзя, но небольшое уменьшение



*Так со спутника экзопланеты может выглядеть ее транзит — прохождение по диску звезды*

потока света от звезды измерить можно. В работах 1985 г., опубликованных накануне открытия первого короткопериодического «горячего Юпитера» указывалось, что перспективы обнаружить внесолнечные планеты по их транзитам сомнительны. Авторы исходили из принятых в то время представлений о структуре планетных систем. Действительно вероятность благоприятного для наблюдения транзитов положения плоскости орбиты низка (для пары Солнце — Юпитер вероятность равна 0,0006), и само явление происходит исключительно редко (исходя из периода обращения Юпитера в Солнечной системе, 1 раз в 12 лет). О существовании низкоорбитальных «горячих юпитеров» никто не подозревал, а у них вероятность оказаться в плоскости наблюдения транзитов гораздо выше, вплоть до 0,06 и даже до 0,20. Для системы звезды HD 209458, первой, транзиты которой были обнаружены, вероятность их наблюдения составила 0,17. Транзиты стали новым инструментом астрофизики, позволяющим исследовать не только экзопланету, но и саму родительскую звезду. Только с помощью транзитов удается исследовать ряд важных характеристик экзопланет, прежде всего, измерить их радиусы и исследовать свойства их атмосфер.

**Гравитационное линзирование.** Когда одна звезда проходит в луче зрения на фоне другой, то свет дальней звезды искривляется тяготением ближней и ее яркость увеличивается. Если у ближайшей звезды есть планеты, то это скажется на кривой изменения яркости. Для получения результатов нужно одновременно следить за блеском миллионов звезд. Хотя эффект был предсказан в 60-х гг. XX века, реализация его стала возможна лишь после появления мощных компьютеров и хороших ПЗС матриц. Этот метод наиболее чувствителен к легким планетам типа Земли, находящимся на далеких орбитах. К недостаткам метода следует отнести то, что провести повторное наблюдение эффекта гравитационного линзирования одной и той же звезды невозможно.

**Визуальное наблюдение.** Увидеть экзопланету даже мощным телескопом очень непросто. Яркий свет родительской планеты затмевает ее блеск. Тем не менее, для слабых звезд и бурых карликов прямое детектирование уже стало возможным.

Теоретически большими преимуществами обладает радиометрический метод, который отличается от фотометрического только диапазоном длин волн. Идея связана с использованием осо-

бенностей планковской кривой излучения абсолютно черного тела. Регистрируется не отраженный свет, а собственное инфракрасное излучение планеты в диапазоне 25–50 мкм. Длина волны выбирается правее максимума планковской кривой для планеты, где выигрыш получается наибольшим. К тому же, в отличие от оптической фотометрии, тепловое излучение исходит от всей поверхности планеты, а не только от освещенной стороны. С учетом свойств уравнения Планка отношение интенсивности инфракрасного излучения Юпитера и Солнца получается в 150 тысяч раз больше отношения их яркостей в оптическом диапазоне. Но реальный выигрыш, по техническим причинам, пока не превышает 100 раз.

**Найденные планетные системы не похожи на солнечную.** Согласно данным интернет-энциклопедии Википедия к октябрю 2009 г. найдено 403 экзопланеты в 341 планетных системах. Большинство из этих планет — газовые гиганты, и более похожат на Юпитер, чем на Землю. Это, скорее всего, объясняется ограниченностью методов (легче обнаружить короткопериодичные массивные планеты).

Первоначально удавалось обнаружить лишь одиночные планеты. Первой системой с несколькими планетами стала система звезды Ипсилон Андромеды. Уже в первые годы исследований было установлено, что по орбитальным признакам экзопланеты делятся на две большие группы: «горячие Юпитеры» («Юпитеры», поскольку их масса порядка массы Юпитера, а горячие — поскольку расположены близко к звезде) на низких круговых орбитах с радиусом орбиты менее 0,15 астрономической единицы (астрономическая единица — 150 млн. км) и периодом обращения менее 10 суток и более массивные, как правило, объекты на высоких орбитах с периодом меньше 10 лет. Орбиты дальних планет образуют эллипс, с неожиданно большим эксцентриситетом, что больше подходит для комет, а не для планет.

Низкие орбиты «горячих Юпитеров» не соответствуют существующим теориям образования Солнечной системы по целому ряду причин, прежде всего, потому, что образование планет-гигантов считалось возможным вдали от Солнца, там, где происходила конденсация воды и других летучих веществ с образованием льдов.

В настоящее время на основании имеющейся статистики можно утверждать, что планетными системами (или одиночными планетами) предполагают примерно четыре процента звезд, по

спектральным свойствам близких к солнечному классу.

Взгляд художника на некоторые экзопланеты представлен на рисунках.

**Инструменты для обнаружения экзопланет.** Для поиска экзопланет используются телескопы как размещенные на поверхности Земли, так и в космосе. В рамках программы «SuperWASP» два робота-телескопа, один на Канарах, другой в Южной Африке, каждую ночь автоматически анализируют изображения миллионов звезд и ищут признаки транзитов планет. После обнаружения нужного события астрономы, работающие во французской обсерватории Верхнего Прованса, на Северном оптическом телескопе на Ла-Пальме или Швейцарском телескопе Эйлера в Чили, проводят дополнительные измерения для подтверждения эффекта. За четыре года было обнаружено пятнадцать планет из срока пяти, открытых методом транзита.

Система «RoboNet», созданная в 2004 г., объединила три робота-телескопа с двухметровыми зеркалами, расположенными на Ла-Пальме, на гавайском острове Мауи и в австралийской обсерватории Сайдинг-Спринг. Они в автоматическом режиме ищут аномалии в поведении гравитационных линз. В течение сезона 2005 г. они следили за 60 линзами, возле одной из них обнаружили новую планету.

В настоящее время в космосе работают несколько телескопов. Это — канадский MOST, выведенный на орбиту в 2003 г., французский COROT, запущенный в декабре 2006 г., и американский «Кеплер», запущенный в марте 2009 г.

В ближайшие годы число телескопов, предназначенных для поиска экзопланет, должно существенно возрасти: 2013 г. — телескоп имени Джеймса Уэбба с зеркалом 6,5 метра, США; 2014 г. — инфракрасный интерферометр «Дарвин», Европа; 2015 г. — «SIM Planet Quest», при объединении с другим телескопом получится гигантский интерферометр, который сможет определять положение звезд и расстояние до них с точностью, в тысячу раз превышающей достигнутую сегодня.

**Последствия открытия экзопланет.** Открытие экзопланет позволило астрономам сделать



*Один из роботов-телескопов сети «RoboNet». Эффективный диаметр зеркала два метра получается в результате сложения данных, полученных восемью маленькими телескопами*

вывод: планетные системы — явление в космосе распространенное. До сих пор нет общепризнанной теории образования планет, но теперь, когда появилась возможность подвести статистику, ситуация в этой области меняется к лучшему. Большинство обнаруженных систем сильно отличается от Солнечной, скорее всего, это объясняется особенностью применяемых методов (легче обнаружить короткопериодичные массивные планеты). В большинстве случаев планеты, подобные Земле, современными методами в таких планетных системах обнаружить пока невозможно. Интересно, что у звезды Эпсилон Эрида, которая вместе с Тау Кита и Эпсилон Индейца считается одной из трех ближайших к Солнцу звезд, подходящих для существования жизни, также обнаружена планетная система, хотя достоверность этого открытия пока остается под вопросом.

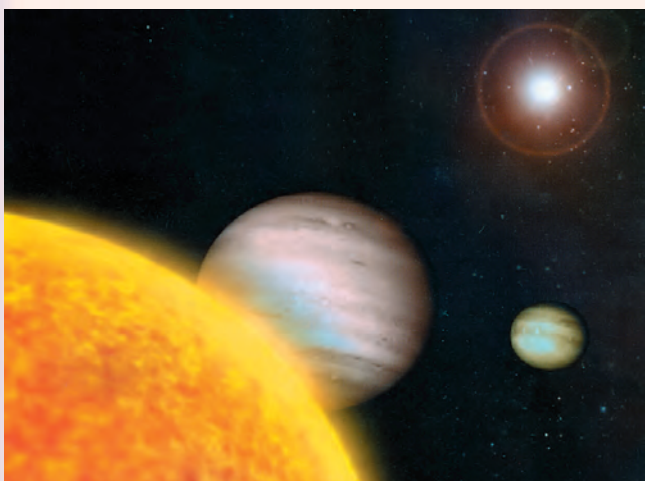
Итак, в конце XX века с открытием экзопланет Солнечная система перестала быть единственной известной планетной системой. Экзопланеты и экзопланетные системы отличаются от нашей Солнечной системы. В чем причина столь необычных свойств Солнечной системы? На сегодняшний день убедительных ответов на этот вопрос нет, как нет и общей теории образования и эволюции планет и планетных систем. Несомненно, что пройдет время и такая теория появится, но новые данные, поток которых непрерывно увеличивается, поставят перед учеными и новые вопросы.



Так должен выглядеть «горячий Юпитер», открытый Майором и Квелоцем



Когда земляне долетят до звезды HD69830, они увидят три «Нептуна» и пояс астероидов



«Юпитер» и «Сатурн» у звезды OGLE-2006-BLG-109L. Вдалеке видна звезда, свет которой усилен гравитационной линзой

В связи с этим уместно привести эпитафию на могиле Ньютона, которую сочинил английский поэт А. Поп:

*Природы строй, ее закон  
В извечной тьме таится.  
И бог сказал: «Явись, Ньютон!».  
И всюду свет разлился.*

После работ Эйнштейна появилось дополнение:

*Но сатана недолго ждал реванша —  
Пришел Эйнштейн, и стало все, как раньше.*

В последнее время в прессе появились сообщения об открытии астрометрическим методом планеты с массой в несколько масс Юпитера, об обнаружении планеты у звезды в галактике M31 (Туманность Андромеды) в результате анализа выполненных ранее наблюдений линзирования звезд в этой галактике; сообщения об обнаружении двух планет в результате непосредственного наблюдения. Исследователи из Франции получили снимки окрестностей звезды  $\beta$  Живописца, находящейся на расстоянии примерно 70 световых лет от нас, с помощью системы адаптивной оптики, установленной на телескопе VLT. Наблюдения были проведены еще в 2003 г., но их обработка была завершена лишь недавно, поскольку потребовалось создание новых методик и алгоритмов, чтобы максимально точно распознать и исключить вклад рассеянного света звезды. В результате обнаружена планета массой около восьми масс Юпитера, находящаяся на расстоянии около 8 астрономических единиц от звезды. Обнаружение планеты было подтверждено и другими методами. Вторую планету удалось сфотографировать с помощью телескопа Хаббл. Это планета у звезды Фомальгаут, удаленной от нас на примерно 25 световых лет и расположенная от нее на расстоянии примерно 119 астрономических единиц.

Французский космический телескоп COROT обнаружил у одной из звезд созвездия Единорога самую маленькую из известных сейчас экзопланет. Она больше Земли всего примерно в 1,75 раза. Открытия продолжаются.

**РАЗУВАЕВ Виктор Александрович** —  
начальник отдела ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
доктор физико-математических наук