

УДК 520.8

ПОИСК ЭКЗОПЛАНЕТ: СТАТУС 2020

*В. Г. Сурдин**

Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова;
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ,
Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, г. Москва, Россия

Дан обзор истории, состояния к середине 2020 года и ближайших перспектив поиска и исследования планет за пределом Солнечной системы — экзопланет.

1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Термин «экзопланета» (англ. exoplanet) сегодня используют в двух значениях. В широком смысле — это любая планета за пределом Солнечной системы, т. е. внесолнечная планета (англ. extrasolar planet), независимо от того, связана она с какой-либо конкретной звездой или нет. В этом смысле все планеты во Вселенной, кроме восьми известных планет Солнечной системы, являются экзопланетами. Однако это определение противоречит принятому в 2006 году Международным астрономическим союзом (МАС) определению планеты как астрономического тела, обращающегося вокруг звезды или звёздного остатка, имеющего массу менее той, при которой могут протекать термоядерные реакции с дейтерием (более 13 масс Юпитера для объектов солнечной металличности), но достаточную для того, чтобы гравитация придала телу шарообразную форму и расчистила окрестности его орбиты от объектов меньшей массы.

Для того, чтобы избежать противоречия, термин «экзопланета» нередко толкуют в узком смысле, как «планета, принадлежащая иной, не Солнечной, планетной системе». Под это определение не попадают планетообразные тела, не связанные гравитационно с какой-либо звездой, а свободно плавающие в межзвёздном или межгалактическом пространстве. Для них приходится вводить отдельные термины: планета-сирота (orphan planet), планета-изгой (rogue planet), планета-бродяга (nomad planet), планемо (объект планетной массы, planetary mass object), планета-странник или блуждающая планета (wandering planet), межзвёздная планета (interstellar planet), свободно плавающая планета (free-floating planet), свободная планета (unbound planet), беззвёздная планета (starless planet, sunless planet), квазипланета, одиночная планета, коричневый субкарлик (sub-brown dwarf). Пока МАС не принял однозначного решения по поводу названия таких планет. Далее будем называть экзопланетами все тела планетной массы за пределом Солнечной системы, т. е. не связанные гравитацией с Солнцем.

Обозначение экзопланеты, принадлежащей какой-либо звезде, состоит из обозначения этой звезды с последующей латинской буквой, начиная с «b». Буква «a» зарезервирована за самой звездой. Например, YZ Cet b, YZ Cet c и YZ Cet d — это первая, вторая и третья (в порядке открытия) планеты звезды YZ Кита (YZ Ceti) соответственно.

Для привлечения общественного интереса к науке в 2014 году МАС предложил всем желающим придумывать имена для экзопланет с последующим всенародным голосованием. Так несколько десятков экзопланет получили собственные имена, например: Орбитар (42 Дракона b), Полтергейст (PSR B1257+12 c) и др. Имена некоторых планет оказались исторически связаны.

* vsurdin@gmail.com

Например, четыре планеты у звезды Мю Жертвенника (μ Arae) названы Кихот (μ Ara b), Дульсиния (μ Ara c), Росинант (μ Ara d) и Санчо (μ Ara e). А пять планет у звезды 55 Рака (55 Cancri, 55 Cnc) названы Галилей (55 Cnc b), Браге (55 Cnc c), Липперсгей (55 Cnc d), Янсен (55 Cnc e) и Хэрриот (55 Cnc f).

2. КОСВЕННЫЕ УКАЗАНИЯ

Косвенные признаки существования экзопланет неоднократно фиксировались в течение XX века. Первым указанием, правильно понятым только в наши дни, было обнаружение в 1917 году в спектре ближайшего одиночного белого карлика Звезда ван Маанена (van Maanen 2) линий тяжёлых элементов, которые, учитывая большую силу тяжести у его поверхности, не могли долго оставаться в верхних слоях его атмосферы. В наши дни в излучении этой звезды найден инфракрасный избыток, указывающий на окружающий её пылевой диск. Весьма вероятно, что тяжёлые элементы падают на звезду вместе с пылью и более крупными телами (астероидами, ядрами комет), в орбитальное движение которых вносит возмущения как минимум одна массивная планета [1].

Морфология планетарных туманностей — предшественников белых карликов — также намекает на наличие планет. Нередко у планетарных туманностей наблюдается зеркальная симметрия, косвенно указывающая на то, что плоскость симметрии определяется орбитальной плоскостью планетной системы. Подобные «биполярные» туманности составляют 14 % всех классифицированных объектов [2], что с учётом их произвольной пространственной ориентации можно считать довольно высокой долей.

Наличие газово-пылевых протопланетных дисков у формирующихся звёздных объектов и молодых звёзд типа T Tauri давно указывало на возможность рождения планетных систем [3]. Детальные исследования последних лет с помощью телескопа ALMA выявили «расчищенные» от пыли орбиты в этих дисках, что косвенно указывает на наличие массивных тел на этих орбитах. В 2018 году предположение подтвердилось: у звезды типа T Tau PDS 70 (V1032 Centauri) в протопланетном диске были обнаружены две планеты. При этом у одной из них замечен даже протоспутниковый диск [4].

Таким образом, косвенные признаки формирования и наличия планет у звёзд разного типа обнаруживались ещё до открытия самих экзопланет.

3. ПЕРВЫЙ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОИСК

Практические поиски экзопланет начались в середине XX века методами оптической астрономии. В табл. 1 показано, как бы выглядела Солнечная система при её наблюдении от ближайшей звезды Альфа Кентавра (α Cen). Вообще говоря, наши планеты сами по себе были бы доступны для обнаружения самыми совершенными из современных телескопов, если бы они располагались на небе вдали от ярких светил. Но в действительности рядом с ними — на очень малом угловом расстоянии — находится Солнце с его видимым блеском $0,5^m$. Оно в сотни миллионов раз ярче любой из планет и своим рассеянным светом полностью скрывает их изображения. Без специальной техники, которая начала появляться только в XXI веке, зарегистрировать столь тусклые объекты рядом с таким ярким светилом было невозможно.

Поэтому с 1938 года по 1990 год поиски велись только с помощью астрометрических измерений: предпринимались попытки зарегистрировать периодические смещения самих звёзд в картинной плоскости (т. е. в плоскости неба, перпендикулярной лучу зрения наблюдателя) под влиянием обращающихся вокруг них планет. Хотя даже для ближайших звёзд эти колебания, как правило,

не превосходят $0,01''$, что ниже практической точности наземных астрометрических измерений, была надежда выделить их на фоне ошибок, учитывая периодический характер смещения звезды, связанный с орбитальным движением планеты.

Таблица 1. Солнечная система при наблюдении от α Cen

планета	максимальное угловое расстояние от Солнца, секунды	видимый блеск, m
Меркурий	0,3	27
Венера	0,5	24
Земля	0,8	25
Марс	1,1	27
Юпитер	3,9	22
Сатурн	7,2	23
Уран	14,0	27
Нептун	23,0	28

весьма заметным. Более полувека, начиная с 1938 года, движение этой звезды изучал американский астроном Питер ван де Камп (1901–1995). Он измерил её положение на тысячах фотопластинок и заявил, что у звезды обнаруживается волнообразная траектория с амплитудой покачиваний около $0,02''$, а значит, вокруг неё обращается невидимый спутник. Из расчётов ван де Кампа следовало, что масса спутника чуть больше массы Юпитера ($M_{\text{Юп}}$), а радиус его орбиты 4,4 а. е. В начале 1960-х годов это сообщение облетело весь мир и получило широкий резонанс.

Продолжая наблюдения, ван де Камп позже настаивал на существовании у Звезды Барнарда двух или даже трёх планет. Уверенность в существовании планет у Звезды Барнарда была столь велика, что в середине 1970-х годов детально разрабатывался проект запуска к ней ядерного звездолёта «Дедал» для поиска обитаемой планеты.

Но не все астрономы согласились с выводами ван де Кампа. Продолжая наблюдения и увеличивая точность измерений, американский астроном Джордж Гейтвуд и его коллеги к 1973 году выяснили, что Звезда Барнарда движется ровно, без колебаний, а значит, массивных планет в качестве спутников не имеет. Однако эти же работы принесли в 1996 году новую находку: были замечены зигзаги в движении шестой от Солнца звезды Лаланд 21185, удалённой от нас на 2,5 пк (на её волнообразное движение указывал и сам ван де Камп ещё в 1951 году). По мнению Гейтвуда, вокруг звезды Лаланд 21185 обращаются две планеты: одна с периодом 30 лет (масса $1,6M_{\text{Юп}}$, радиус орбиты 10 а. е.) и вторая с периодом 6 лет ($0,9M_{\text{Юп}}$, 2,5 а. е.). Но это открытие до сих пор не только не подтверждено, но и вызывает всё большие сомнения. Правда, в 2017 году у звезды Лаланд 21185 доплеровским методом (см. ниже) обнаружена планета массой около $0,01M_{\text{Юп}}$ на орбите с большой полуосью 0,07 а. е. и периодом около 10 сут. Но это совсем не то, что предполагали астрометристы.

Поиск планет у Звезды Барнарда доплеровским методом тоже принёс положительный результат: в 2018 году рядом с ней обнаружилось тело с массой около 3 масс Земли ($0,01M_{\text{Юп}}$) и орбитальным периодом 233 суток. Но это совсем не то, о чём сообщал ван де Камп.

К 2020 году астрометрический метод принёс лишь два надёжных результата: в 2010 году у двойной звезды HD 176051 обнаружилась планета с массой $1,5M_{\text{Юп}}$ и в 2018 году у двойной звезды 2MASS J0249-0557 нашли «супер-юпитер» с массой $12M_{\text{Юп}}$, близкой к пограничной массе

В течение нескольких десятилетий астрометрический метод не приносил надёжных результатов, хотя, начиная с 1942 года, несколько раз публиковались сообщения об открытии экзопланет, но каждый раз они не подтверждались. Наибольший интерес астрономов привлекала «Летающая Звезда Барнарда» в созвездии Змееносец (BD+04°3561a, Gliese 699, HIP 87937). Её визуальная видимая звёздная величина составляет $9,5^m$, а расстояние от неё до Солнца равняется 1,83 пк. По близости к нам это четвёртая звезда после трёх компонентов системы Альфа Кентавра (α Cen).

Поскольку масса Звезды Барнарда почти в 6 раз меньше массы Солнца, влияние на неё соседей-планет (если они есть) должно быть

с коричневыми карликами ($13M_{\text{Jup}}$). Однако перспектива у этого метода есть и она связана с работой космической обсерватории Gaia (ESA), которая с 2014 году измеряет положения 1 млрд звёзд с точностью от 7 до 300 микросекунд дуги (в зависимости от их блеска). Накопление данных должно закончиться в 2024 году, и это может привести к прорыву в изучении экзопланет.

4. ОТКРЫТИЕ ЭКЗОПЛАНЕТ

Ещё в 1952 году Отто Струве в США писал о том, что нет веских причин, по которым планеты не могут быть намного ближе к своей родительской звезде, чем в Солнечной системе, и предположил, что доплеровская спектроскопия и фотометрия проходов (метод транзитов) могут быть использованы для обнаружения супер-юпитеров на компактных орбитах. Он оказался прав: именно эти два метода сейчас приносят наибольшие плоды в поиске и изучении экзопланет. Но в середине XX века применить их было технически невозможно.

В конце 1980-х годов точность оптической спектроскопии звёзд стала возрастать и астрономы приступили к поиску периодического доплеровского смещения линий, вызванного влиянием на звезду обращающихся вокруг неё планет. В 1987–1989 годах были замечены намёки на такое смещение у звёзд HD 114762 и Гамма Цефея (γ Сер A), но тогда они не подтвердились и открытие не состоялось. Позже, в 2003 году, планету у γ Сер A всё же обнаружили.

Первую систему из трёх экзопланет открыли в 1991 году вокруг нейтронной звезды-радиопульсара PSR B1257+12. Их массы оказались сравнимы с массой Земли (M_{E}): $3,8 M_{\text{E}}$, $4,1 M_{\text{E}}$ и $0,02 M_{\text{E}}$. Хотя последнее тело своей массой больше напоминает Луну, но имеет физические признаки планеты, поскольку, исходя из его массы, должно иметь шарообразную форму. Открытие совершил работающий в США на 305-метровом телескопе в Аресибо польский радиоастроном Алекс Вольцан, заметив периодическое изменение частоты прихода импульсов от пульсара. Хотя обычно этот приём называют методом тайминга (timing), по существу он близок к доплеровским методам.

Позже поиск планет у нескольких тысяч других пульсаров привёл к обнаружению планетоподобных объектов у 13 из них, причём у половины пульсаров они оказались настоящими планетами с массами меньше нижнего предела массы коричневых карликов. Многопланетная система, кроме PSR B1257+12, обнаружилась только у пульсара PSR B0943+10; она состоит из двух планет с массами около $3M_{\text{Jup}}$ у каждой. Орбитальные периоды у некоторых околопульсарных планет чрезвычайно короткие: от 40 минут до 2 часов.

Хотя обнаруженные рядом с пульсарами тела по своим массам похожи на планеты, их происхождение представляется вторичным. Известно, что рождению нейтронной звезды предшествует взрыв сверхновой, вызывающий большую потерю массы (в виде сброшенной оболочки звезды). Поэтому исходная планетная система не смогла бы сохраниться: имея большие орбитальные скорости, планеты улетели бы от лёгкой нейтронной звезды. Но если взорвавшаяся звезда входила в двойную систему с более массивным (к моменту взрыва) компонентом, то из вещества второй звезды, перетекавшего на пульсар уже после взрыва, возможно, могли бы образоваться планетообразные тела. Сейчас обсуждаются несколько вариантов такого сценария, но полноценными планетами такие тела не признаются. Таким образом, планеты у нейтронных звёзд — это редкий и не до конца понятный феномен.

Существование «настоящей» экзопланеты у нормальной звезды было впервые надёжно доказано в 1995 году. Это сделали астрономы Женевской обсерватории в Швейцарии Мишель Майор и Дидье Кёло, создавшие в 1993 году звёздный спектрограф, способный измерять доплеровское смещение линий с точностью до 13 м/с. До появления этого прибора наилучшая точность измерения лучевых скоростей звёзд составляла 1 км/с, т.е. новый прибор повысил её сразу на два

порядка.

В 1994 году Майор и Кёло на Обсерватории Верхнего Прованса (Франция) начали регулярные измерения лучевых скоростей 142 солнцеподобных звёзд из близкого окружения Солнца и уже в 1995 году обнаружили «покачивания» звезды 51 Пегаса (51 Peg) с периодом 4,23 сут, вызванные влиянием на неё планеты, по массе близкой к Юпитеру. В те годы подобными поисками занимались несколько групп астрономов, но первая удача, отчасти случайно, пришла к группе Майора. В дальнейшем эта группа оставалась в числе лидеров по количеству открытых экзопланет, но на первое место вышла американская группа под руководством Джеффри Марси, которая начала подобные наблюдения раньше, но им не удалось сделать первое открытие. Обнаружение внесолнечных планетных систем считается одним из крупнейших научных достижений XX века. В 2019 году Мишель Майор и Дидье Кёло были отмечены за это открытие Нобелевской премией по физике.

К концу XX века было обнаружено около 20 планетных систем у близких звёзд. Затем рост числа открытий ускорился (см. табл. 2). К началу 2008 году в 230 системах было замечено наличие более чем 270 планет (до 5 планет в системе). А к 2012 году было открыто уже более 760 планет (до 6, возможно 7, планет в системе). Большинство из них обнаружили доплеровским методом — по периодическому изменению лучевой скорости звезды, но значительную часть нашли методом прохождений (см. ниже), который становится всё более продуктивным.

Сначала открывались лишь сравнительно массивные и близкие к звезде планеты-гиганты, но год от года снижается нижняя граница массы и возрастает предельное расстояние. К 2012 году массы замеченных доплеровским методом экзопланет лежали в интервале от $25M_{\text{Юр}}$ до $1M_{\text{Е}}$ ($M_{\text{Е}} = 0,003M_{\text{Юр}}$), а большие полуоси орбит — от 0,006 до 30 а. е.; при этом эксцентриситеты орбит, как правило, довольно большие. Отметим, что из физических соображений граница между планетами и коричневыми карликами проходит по значению около $13M_{\text{Юр}}$, но в каталог экзопланет вносят объекты с запасом массы, поскольку старые коричневые карлики незначительно отличаются от предельно массивных планет-гигантов, супер-юпитеров (см. рис. 1).

К 2020 году нижний предел массы обнаруженных экзопланет уменьшился до $6,7 \cdot 10^{-4} M_{\text{Е}}$, т. е. до 5 % массы Луны. Этот рекорд принадлежит планете белого карлика WD 1145+017, имеющей диаметр около 1900 км и радиус орбиты 0,005 а. е. с периодом обращения 4,5 часа. Эта планета вдвое больше и вчетверо массивнее карликовой планеты Цереры, которая считается карликовой лишь потому, что своим гравитационным влиянием на окружающие тела Солнечной системы не способна конкурировать с большими пла-

Таблица 2. Выборочная статистика открытия экзопланет [5]

дата	количество надёжно обнаруженных экзопланет
5 октября 2003	117
14 декабря 2006	210
23 марта 2009	344
7 ноября 2012	843
1 декабря 2016	3 544
11 марта 2019	4 000
11 января 2020	4 168
2 июня 2020	4 268

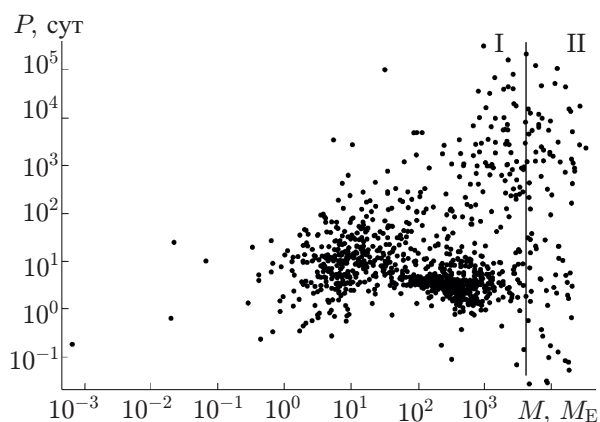


Рис. 1. Распределение объектов сетевой «Энциклопедии экзопланет» [5] на 5 мая 2020 года. Здесь M — масса планеты, P — орбитальный период. Отмечена пограничная масса ($13M_{\text{Юр}} = 4130M_{\text{Е}}$) между планетами (I) и коричневыми карликами (II)

нетами. В остальном Церера — полноценная планета, поскольку имеет гидростатическую сфероидальную форму и её недра претерпели гравитационную дифференциацию вещества.

Расчёты показывают, что ледяные тела принимают округлую форму при диаметре более 400 км, а льдисто-каменистые тела типа Цереры — при диаметре более 900 км. Поэтому объект WD 1145+017 b без сомнений можно считать планетой, хотя и чрезвычайно своеобразной. Её звезда — белый карлик — имеет температуру поверхности около 16 000 К, а вычисленная температура поверхности планеты составляет около 4 000 К. Ясно, что при столь малой массе и высокой температуре происходит интенсивная абляция, и расчётное время жизни планеты составляет от 100 до 200 млн лет. Однако и расчётное время остывания её звезды составляет 175 млн лет [6], поэтому не очевидно, что планета успеет полностью испариться.

5. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Существующие и перспективные способы поиска экзопланет разнообразны, но по количеству открытий абсолютных лидеров сейчас два: спектроскопический метод лучевых скоростей (доплеровский метод) и фотометрический метод прохождений (транзитов) [7].

5.1. Метод лучевых скоростей

Данный метод состоит в регистрации периодического движения звезды вдоль луча зрения наблюдателя под влиянием притяжения обращающихся вокруг неё планет. Поскольку массы планет в сотни и даже в сотни тысяч раз меньше масс звёзд, скорости колебания звёзд при этом чрезвычайно малы. К примеру, максимальная амплитуда колебаний скорости Солнца под влиянием Юпитера составляет 12,4 м/с, а под влиянием Земли — 0,1 м/с.

Даже если спектрограф позволяет проводить измерения с такой точностью, нужно помнить, что мы видим не центр масс, а поверхность звезды, которая под действием идущих снизу, из конвективной зоны, акустических волн испытывает собственные колебания — тяжёлые (гравитационные) волны. Они несут полезную информацию о внутреннем строении светила, которую сейчас изучают в рамках гелиосейсмологии для Солнца и астросейсмологии для других звёзд. Но для поиска экзопланет эти колебания представляют вредный шум.

Например, в фотосфере Солнца наблюдаются колебания с периодом около 5 минут и амплитудой радиальной скорости около 0,5 км/с в масштабе тысячи километров, при этом Солнце — одна из самых спокойных звёзд. При наблюдении звезды издали мы видим суммарный свет от её полного диска, поэтому колебания усредняются, но всё равно создают шум с амплитудой скорости от 0,1 до 1 м/с и относительной амплитудой блеска порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$. Как раз такие точности измерений требуются в спектральных и фотометрических методах поиска экзопланет. Поэтому неслучайно пульсации солнечного типа у другой звезды (Эта Волопаса) были впервые достоверно зарегистрированы в 1995 году — почти одновременно с открытием первой экзопланеты.

До появления современных высокоточных спектрографов наилучшая точность измерения лучевых скоростей звёзд, как уже было сказано, составляла 1 км/с. Андре Баран, Мишель Майор и Дидье Кёло в 1993 году построили для 2-метрового телескопа звёздный эшелонный спектрограф ELODIE с разрешением 45 000, способный измерять доплеровское смещение линий с точностью до 13 м/с (позже точность довели до 7 м/с). Среди особенностей его конструкции можно выделить оптоволоконную передачу света от телескопа в отдельное термостатированное помещение, изборажение спектра вплоть до 67 порядка интерференции, регистрацию с помощью ПЗС-матрицы и численную кросс-корреляцию с цифровой маской.

Развитием этой схемы стал прибор SOPHIE (Spectrographe pour l'Observation des Phenomenes des Interieurs stellaires et des Exoplanetes, спектрограф для наблюдения явлений в звёздных недрах и экзопланет), имеющий разрешение 75 000 и охлаждаемый приёмник. Его точность при однократном измерении 1,3 м/с, а при длительных сериях — 2 м/с.

В 2002 году на 3,6-метровом телескопе в обсерватории Ла-Силья (ESO, Чили) был установлен спектрограф HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher), в помещении которого температура была стабилизирована с точностью до 0,01 К. Его внутренняя точность измерения скоростей составляет 30 см/с и могла бы быть доведена до 1 см/с, но при реальных длительных сериях измерений он даёт точность 0,97 м/с, которая снижена, в основном, по причине собственного шума звёздной поверхности (для астросейсмологии это не шум, а полезные данные). До запуска космического телескопа «Кеплер» в 2012 году спектрограф HARPS был самым продуктивным инструментом для обнаружения экзопланет.

Подобный прибор HIRES (High Resolution Echelle Spectrometer) работает на 10-метровых телескопах обсерватории «Кек» на о. Гавайи. Его точность также составляет 1 м/с. Но за счёт большего диаметра питающей оптики он может исследовать менее яркие звёзды.

Доплеровский метод позволяет измерять массу экзопланеты с неопределённостью, вызванной отсутствием данных о наклоне её орбиты к лучу зрения. Достигнутая сейчас точность регистрации лучевой скорости звёзд в 1 м/с, по-видимому, близка к пределу, связанному с нестабильностью звёздных атмосфер. Это не позволяет обнаруживать аналоги Земли вблизи аналогов Солнца, для чего нужна точность порядка нескольких сантиметров в секунду. Однако это уже даёт возможность регистрировать наличие планет в несколько раз массивнее Земли (так называемые «суперземли») вблизи звёзд в несколько раз менее массивных, чем Солнце. И такие планеты действительно обнаружены, причём некоторые из них находятся в тех областях своих планетных систем, где по температурным условиям на их поверхности возможно наличие жидкой воды (так называемые «зоны жизни»).

5.2 Метод прохождений, или транзитов (transit photometry)

Данный метод заключается в точном измерении блеска звезды для регистрации его уменьшения при прохождении экзопланеты на фоне звёздного диска (см. рис. 2). Оценим глубину такого «микрозатмения» на примере Солнечной системы: диаметр Юпитера в 10 раз меньше диаметра Солнца, а диаметр Земли — в 109 раз. Поэтому прохождение Юпитера ослабит блеск Солнца на 1 %, а прохождение Земли — на 0,008 %. Первое явление легко заметить при наблюдении достаточно яркой звезды с поверхности Земли, а второе обнаружить с Земли практически невозможно.

Рисунок 2, хотя он и выполнен схематично, отражает некоторые тонкие детали в изменении блеска системы «звезда + экзопланета». Например, при прохождении планеты перед звездой блеск меняется симметрично с минимумом в середине. Это связано с тем, что после пересечения лимба планета сначала приближается к центру диска, а затем удаляется от него. Из-за эффекта потемнения к краю диск звезды в оптическом

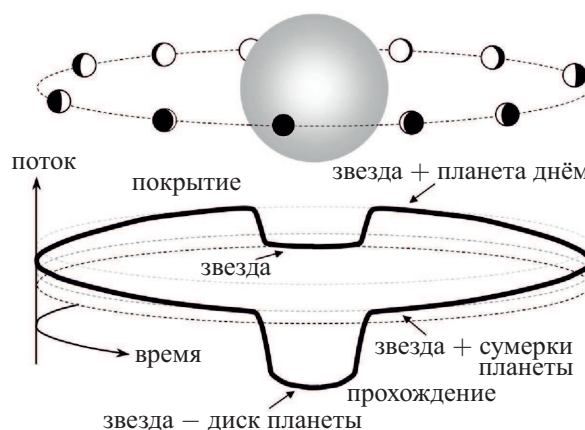


Рис. 2. Изменение блеска системы «звезда + планета» в течение орбитального периода. Светимость звезды считается неизменной

диапазоне имеет максимальную яркость в центре (см. рис. 3). При прохождении яркость планеты почти не меняется, и планета просто сканирует звезду, закрывая своим тёмным диском различные части звёздного диска. Это позволяет измерять эффект потемнения к краю в разных областях спектра, исследуя таким образом строение фотосферы звезды.

Через половину орбитального периода происходит покрытие планеты диском звезды. Наблюдать это явление сложнее, поскольку поверхностная яркость планеты намного ниже, чем звезды. Но если это удаётся, то можно измерить альбедо и даже спектр планеты (линии планеты быстро исчезают из суммарного спектра, а по окончании покрытия восстанавливаются) и получить данные о наличии и даже составе её атмосферы. Но для таких измерений требуется очень высокая точность фотометрии и спектрофотометрии.

На рис. 3 показаны в разных цветах кривые блеска звезды HD 209458 в момент прохождения перед ней её единственной планеты HD 209458 b. Видно, что эффект потемнения к краю значительно сильнее в голубых лучах. Эта звезда — почти копия Солнца (масса $1,15M_{\odot}$, радиус $1,2R_{\odot}$, температура поверхности 6100 K), а планета — «горячий юпитер» (масса $0,69M_{\text{Jup}}$, радиус $1,4R_{\text{Jup}}$), движущийся очень близко к звезде (большая полуось орбиты $a = 0,0475$ а. е.) с периодом 3,5 сут в состоянии приливного захвата. Температура её дневной поверхности — от 1250 до 1400 K.

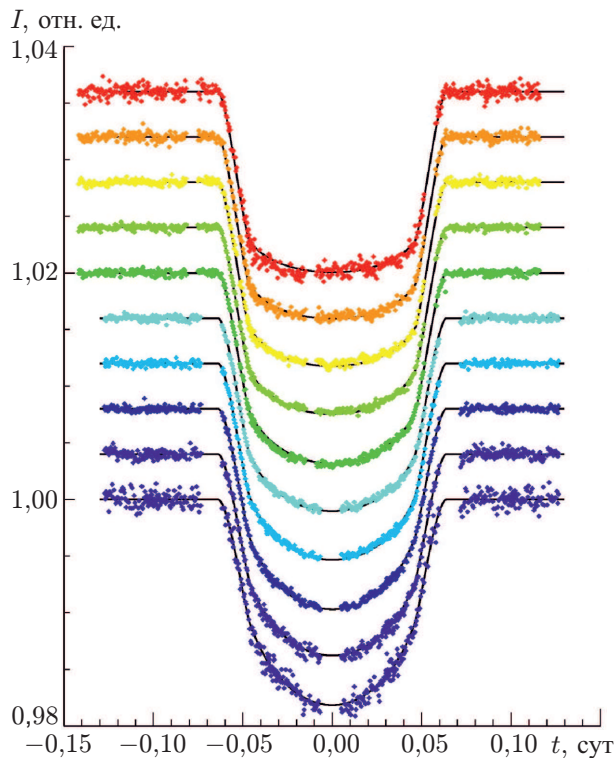


Рис. 3. Кривые блеска звезды HD 209458 при прохождении [8] (I — относительный поток излучения, t — время от середины прохождения). Измерения получены космическим телескопом «Хаббл» в десяти полосах спектра (снизу вверх) от 320,1 до 970,8 нм

до 4 сут. Из них пока подтвердились только две самые яркие системы, возможно потому, что для остальных с блеском от 22^m до 26^m невозможно получить результат наземными методами. Однако этот опыт показал, что для поиска экзопланет методом покрытий нужны специализированные

Первую планету (HD 209458 b) методом прохождения открыли с Земли в 2000 году Дэвид Шарбонно и Тимоти Браун, а также почти одновременно с ними и другие группы астрономов. Глубина затмения у этой звезды составляет 1,7 %. Это яркая звезда типа Солнца, а её планета по размеру на треть больше Юпитера и имеет орбитальный период всего 3,5 сут. Открытие было неизбежным. Но прохождения не столь крупных экзопланет обнаружить не так легко. Поэтому данный метод доказал свою высокую эффективность лишь после запуска космических обсерваторий, с борта которых при отсутствии атмосферных помех ведутся очень точные фотометрические наблюдения за звёздами.

Первую попытку поиска экзопланет из космоса предпринял знаменитый и до сих пор крупнейший космический телескоп «Хаббл» (NASA/ESA) с объективом с диаметром 2,4 м. В 2006 году на нём реализовали программу SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search): сквозь сравнительно прозрачную область Млечного Пути — «окно» Стрельца — в течение недели в поле с размером несколько угловых минут он наблюдал 180 000 звёзд галактического балджа. Обнаружилось 16 кандидатов в экзопланеты с орбитальными периодами от 0,4

инструменты с большим полем зрения.

Первым таким инструментом стал французский CoRoT (Convection, Rotation and Planetary Transits), работавший на околоземной орбите с 2006 года по 2014 год. Имея телескоп с объективом с диаметром всего 27 см, он обнаружил 34 экзопланеты и исследовал акустические колебания у тысяч звёзд.

Значительно более эффективным оказался космический телескоп «Кеплер» (NASA) с объективом с диаметром 0,95 м. С 2009 года по 2018 год он работал вдали от Земли, на околосолнечной орбите с большой полуосью $a = 1,0133$ а.е. и периодом 372,5 сут, в своём движении постепенно отставая от Земли. Его широкоугольная камера Шмидта с большой ПЗС-мозаикой имела поле зрения $10^\circ \times 10^\circ$ и была с 2009 года по 2013 год постоянно наведена на одну и ту же область неба у границы созвездий Лебедь и Лира, обеспечивая высокоточную фотометрию 150 000 звёзд. Затем из-за поломки гироскопов телескоп потерял стабильность, но продолжал наблюдения различных областей неба вблизи эклиптики.

Всего «Кеплер» измерил блеск более полу-миллиона звёзд, надёжно обнаружил 2 670 экзопланет и ещё 3 600 не подтверждённых пока кандидатов. По его данным открыто 2 165 затменных двойных звёзд и огромное количество переменных звёзд других типов. В 2020 году «Кеплер» остаётся абсолютным лидером по количеству открытых экзопланет, доказавшим высокую эффективность метода прохождений. И это при том, что «Кеплер» подробно (до поломки) изучил около 100 квадратных градусов неба, а площадь всей небесной сферы составляет 41 253 квадратных градуса.

Вслед за космическими телескопами CoRoT и «Кеплер» было создано новое поколение подобных инструментов для изучения экзопланет. В 2018 году на высокоапогейную орбиту с периодом 13,7 суток был запущен спутник TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Его 4 широкоугольные камеры с объективами с диаметром 10 см и полем зрения $24^\circ \times 24^\circ$ у каждой одновременно покрывают $24^\circ \times 96^\circ = 2\,300$ квадратных градусов, т.е. более 5 % небесной сферы (см. рис. 4). Ожидалось, что за 2 года работы TESS совершит неоднократный обзор всей небесной сферы и обнаружит более 20 000 экзопланет. Однако к июню 2020 года в каталоге надёжно обнаруженных экзопланет [5] указано только 58 находок от TESS; кроме этого на сайте команды TESS сообщается о 1 913 подозрительных звёздах, наличие планет у которых пока не подтверждено [10]. Тем не менее, данные этого спутника очень полезны при подготовке программы наблюдений будущего крупного космического телескопа «Джеймс Уэбб» с объективом 6,6 м. Поскольку TESS изучает только яркие звёзды до 12^m в диапазоне длин волн от 600 до 1 000 нм, найденные им экзопланеты станут идеальной целью для их детального исследования телескопом «Уэбб», который будет работать в диапазоне 600–28 300 нм.

В конце 2019 года европейский спутник CHEOPS (CHAracterising ExOPlanets Satellite) с телескопом системы Ричи—Кретьена с диаметром 30 см был запущен на солнечно-синхронную орбиту с высотой 700 км (см. рис. 5). Его задача — точное измерение методом прохождений размеров сравнительно небольших планет земного типа (суперземель). Как TESS, так и CHEOPS должны выявить перспективные объекты для будущих космических и наземных гигантских телескопов.

Для запуска в ближайшие годы готовятся и другие космические телескопы. «Платон» (PLATO,

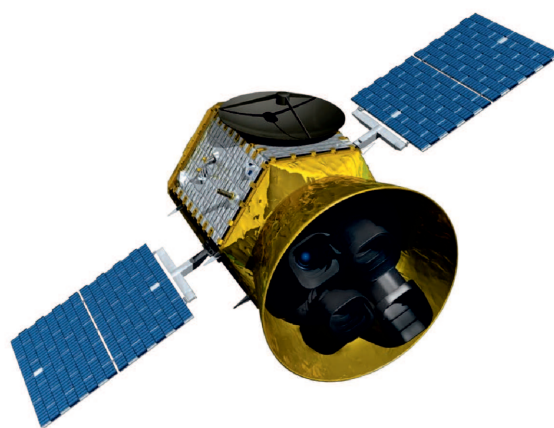


Рис. 4. Космическая обсерватория TESS (NASA/MIT) [9]

PLANetary Transits and Oscillations of stars, ESA) будет оснащён 26 телескопами-рефракторами с диаметром 12 см каждый для поиска землеподобных планет в зонах жизни (см. ниже) и исследований по астросейсмологии. Их общее поле зрения составит 2 250 квадратных градуса. Запуск намечен на 2026 год в точку Лагранжа L2 системы Солнце–Земля. Ожидаемое время работы — минимум 4 года с возможным продлением ещё на 4 года. За это время будет исследовано не менее миллиона звёзд.

На 2028 год в ту же точку Лагранжа намечен запуск спутника ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey, ESA) с телескопом видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Это касегреновский рефлектор с овальным главным зеркалом с размерами $1,1 \times 0,7$ м. Его инфракрасный спектрометр будет работать при температуре 55 K в диапазоне длин волн $1,95 \div 7,8$ мкм. Предполагается, что за 4 года методом прохождений он изучит атмосферы не менее чем 1 000 экзопланет.

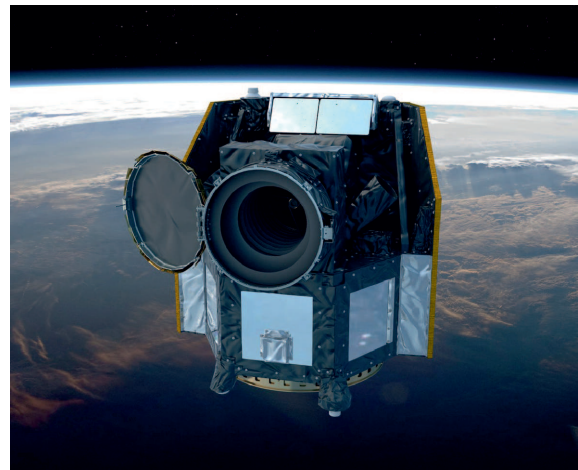


Рис. 5. Космическая обсерватория CHEOPS (ESA) [11]

5.3. Прочие методы

Все другие методы, помимо доплеровского и транзитного, внесли малый вклад в число обнаруженных экзопланет. Этот вклад виден на рис. 6, отражающем ситуацию на начало 2018 года, и в табл. 3. Тогда вклад прочих методов составлял около 3 %, но к 2020 году увеличился до 5 %, и

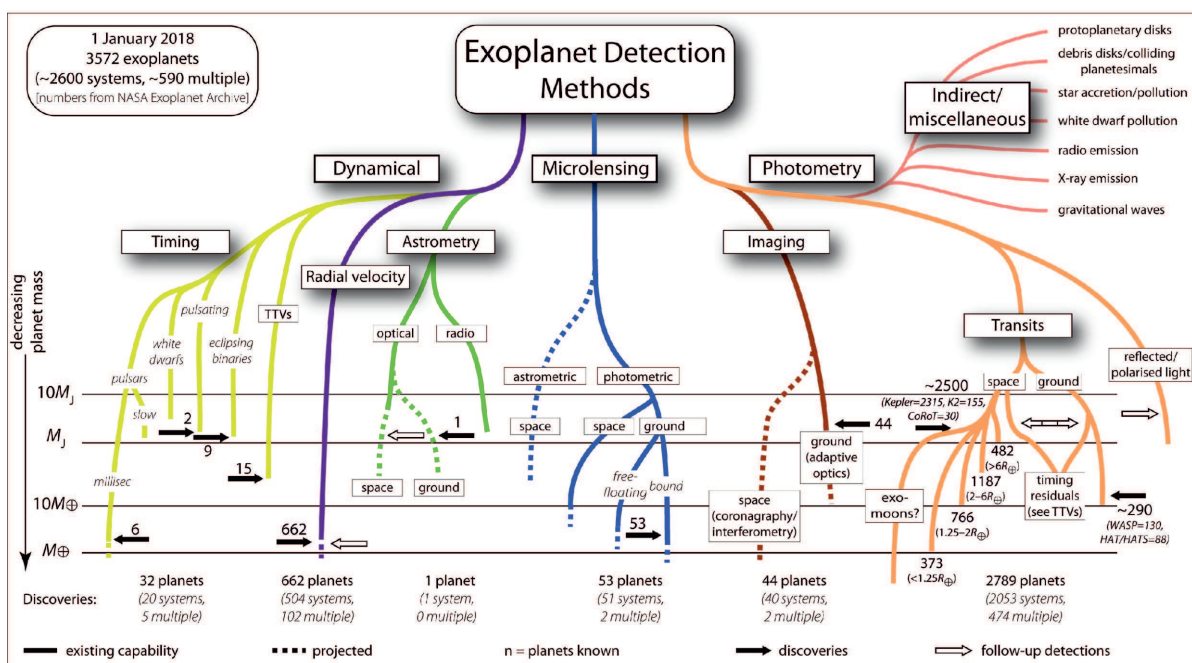


Рис. 6. Методы обнаружения экзопланет по Perryman [7]

Таблица 3. Статистика открытия экзопланет по методам к июню 2020 года [18]

метод открытия	количество планет
астрометрический (колебания координат звезды)	1
регистрация изображения планеты	49
доплеровский (колебания лучевой скорости звезды)	802
фотометрия прохождений планеты перед звездой (транзиты)	3 164
вариации моментов прохождений планет	21
вариации моментов затмений звезды	16
гравитационное микролинзирование фоновых звёзд	89
вариации периодов радиопульсаров	7
вариации периодов пульсаций звезды	2
орбитальная модуляция общего блеска звезды и планеты	6
кинематика протопланетного диска	1

что указывает на их возросшую результативность.

Несмотря на небольшое количество открытий, каждый из «второстепенных» методов имеет свои преимущества. Например, метод гравитационного микролинзирования позволяет заметить далёкие от звезды маломассивные экзопланеты, а также и спутники планет. А метод прямой регистрации изображений даёт возможность исследовать излучение этих тел (но пока самых массивных).

Эффект гравитационной линзы увеличивает яркость далёкого источника излучения (например, галактики или квазара) при прохождении перед ним массивного объекта (другой галактики или скопления галактик). Если же источником служит звезда, а линзой — объект звёздной или планетной массы, то это называют гравитационным микролинзированием. Иногда говорят о «нанолинзировании», если у линзы планетная масса. Первую гравитационную микролинзу обнаружили в 1989 году. В 1990-е годы начались эксперименты по поиску носителей невидимой массы (dark matter) с использованием эффекта гравитационного микролинзирования: польско-американский эксперимент OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), американо-австралийский MACHO (Massive Compact Halo Objects), французский EROS (Experience de Recherche d'Objets Sombres), японско-новозеландский MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) и др. В каждом из них с телескопами с диаметром от 1 до 4 м практически непрерывно измеряются яркости тысяч звёзд в надежде, что проходящий между Землёй и наблюдаемой звездой невидимый объект своим гравитационным полем исказит её изображение и изменит его яркость.

Отличить это изменение от колебаний яркости переменной звезды довольно легко: если между звездой и Землёй проходит массивное тёмное тело, то у звезды наблюдается однократное симметричное изменение блеска характерной формы (рис. 7), которое в дальнейшем не повторяется, поскольку для каждой конкретной звезды это крайне маловероятное событие. Для того, чтобы за разумное время заметить такое событие, нужно одновременно измерять яркость десятков миллионов звёзд. Для этого наблюдают богатые звёздами поля в Магеллановых Облаках, Туманности Андромеды или балдже Галактики.

При поиске носителей тёмного вещества эксперименты по гравитационному микролинзированию дали лишь верхний предел, показав, что такого рода объекты в интервале масс от 10^{-7} до $30 M_{\odot}$ не могут быть доминирующим компонентом тёмного гало Галактики. Но эти наблюдения

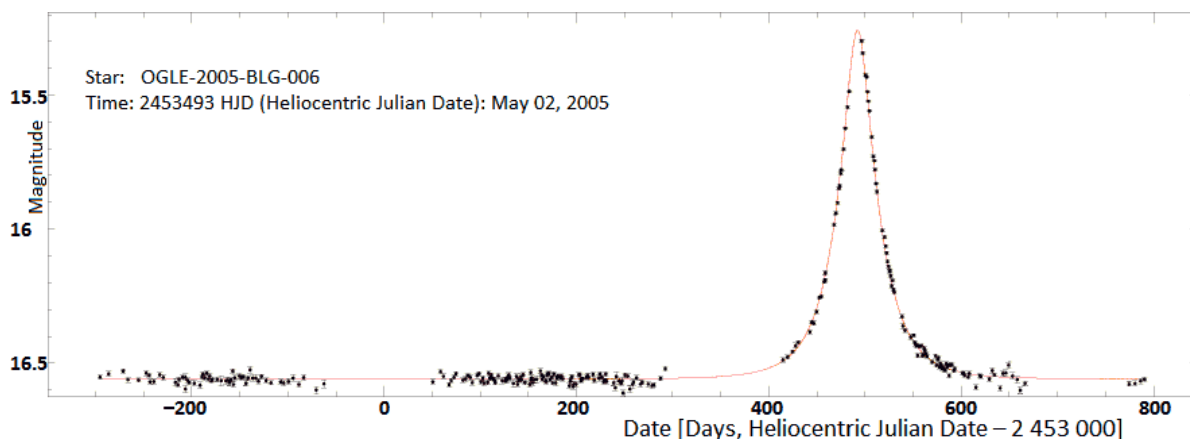


Рис. 7. Кривая блеска звезды при гравитационном микролинзировании [12]. Событие продолжалось около 300 суток. В максимуме яркость звезды возросла на $1,3^m$, т.е. в 3,3 раза. Точки — данные наблюдений; линия — теоретическая кривая в рамках общей теории относительности, аппроксимирующая наблюдения

принесли и положительный результат: к июню 2020 года методом микролинзирования по наличию небольших вторичных пиков яркости на кривой блеска фоновой звезды была обнаружена 121 экзопланета. Поэтому большинство исследователей, занимавшихся поиском тёмной материи, теперь переключились на поиск экзопланет, используя ту же аппаратуру. Лидируют в этой работе команды OGLE и MOA.

Суть метода заключается в детектировании вторичных коротких пиков на кривой блеска, указывающих на наличие каустик в линзированном изображении, вызванных совместным действием гравитационных полей звезды и обращающихся вокруг неё планет.

На рис. 8 для примера показана кривая блеска события гравитационного микролинзирования, которое наблюдалось телескопами OGLE, MOA и KMTCS в мае 2019 года и позволило обнаружить звезду-линзу KMT-2019-BLG-0842L (о чём говорит буква L в её обозначении), а также её планету KMT-2019-BLG-0842Lb. Масса звезды-линзы оценивается в $0,8M_{\odot}$, а масса её планеты — в $10M_{\oplus}$. Их взаимное расстояние около 3 а. е., и они удалены от нас приблизительно на 3 кпк. В принципе, источником второго (меньшего) пика яркости могла бы быть не планета рядом со звездой-линзой, а второй компонент двойной звезды-источника света, если она на самом деле двойная. Но анализ показывает [13], что вероятность этого мала.

Прямое фотографирование (imaging) экзопланет сталкивается с большими трудностями по причине слабого блеска самой планеты и её близости к яркой родительской звезде. Техника фотографирования постоянно совершенствуется в основном путём создания звёздных коронографов, в которых маска закрывает или иным образом тушит изображение звезды. Но до сих пор получить изображение экзопланеты удавалось в исключительных случаях: если родительская звезда очень тусклая (белый карлик) или если планета расположена очень далеко от звезды и при этом настолько массивна и молода, что сама светится в инфракрасном диапазоне. При этом используется либо космический телескоп, либо наземный телескоп с адаптивной оптикой.

В недавнем прошлом лучшие телескопы с системой адаптивной оптики позволяли получать в ближнем инфракрасном диапазоне изображения и спектры экзопланет на угловом расстоянии от звезды в $0,25''$; $0,5''$ и $1,0''$ при контрасте блеска планета/звезда не менее 10^{-3} ; 10^{-4} и 10^{-5} соответственно. При этом массы большинства изученных экзопланет были не менее $10\div 15M_{\text{Юр}}$, а расстояния от звезды превышали $0,5''$ (это около $30\div 100$ а. е. у ближайших звёзд). Но недавно были созданы более совершенные системы с адаптивной оптикой, такие как GPI (Gemini

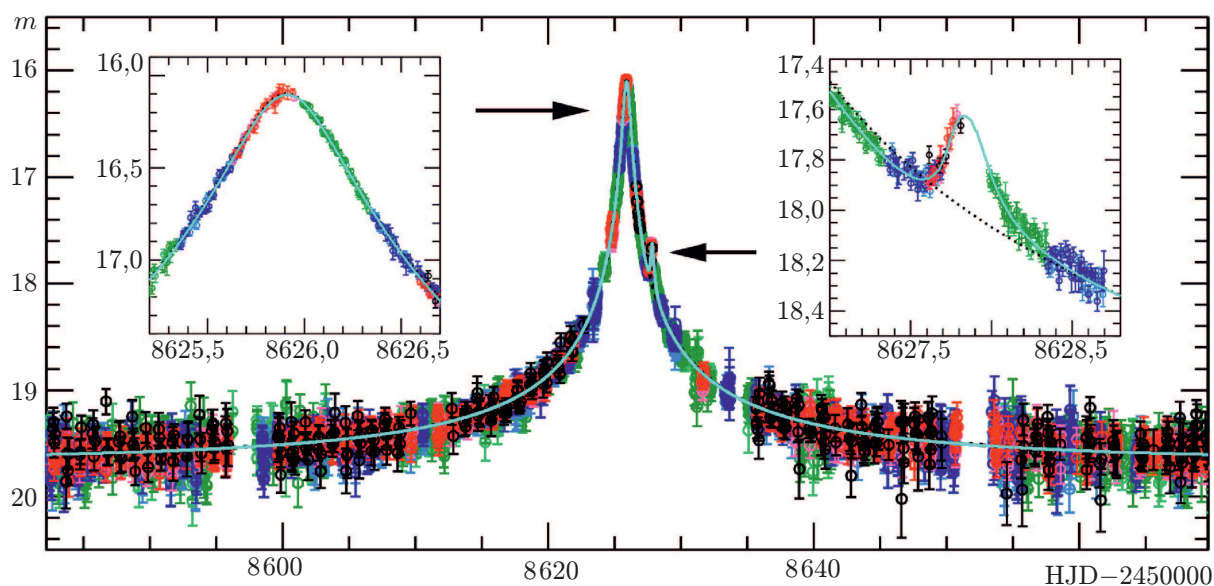


Рис. 8. Событие микролинзирования KMT-2019-BLG-0842. Здесь m — видимая звёздная величина, HJD — гелиоцентрическая юлианская дата. На врезках в увеличенном масштабе показаны пики яркости, вызванные звездой-линзой (слева) и её планетой (справа). По материалам [13]

Planet Imager) на телескопе Gemini-South, а также SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch instrument) на телескопе VLT (Very Large Telescope), способные обнаруживать планеты на расстоянии в $0,25'' \div 1,0''$, если их блеск в ближнем инфракрасном диапазоне ещё в $10 \div 100$ раз слабее. Это позволит исследовать планеты с меньшей массой (до $2M_{\text{Jup}}$), а также массивные планеты, расположенные ближе к звезде (до $0,1'' \div 0,4''$, т. е. $10 \div 15$ а. е.). Спектрографы интегрального поля в сочетании с GPI и SPHERE позволят исследовать атмосферы молодых планет, включая их облачный покров, температуру и силу тяжести. Но пока эта программа не реализована.

Пример прямого фотографирования показан на рис. 9: это изображение звезды Каппа Андромеды (κ And) и её спутника κ And b, полученное прибором SCEXAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics) и интегральным полемым спектрографом CHARIS в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн на японском 8,2-метровом телескопе «Субару» (Мауна-Кеа, о. Гавайи) с системой адаптивной оптики. Масса спутника оценивается от 13 до $50M_{\text{Jup}}$, т. е. это коричневый карлик или предельно массивная планета. В любом случае температура спутника около 2000 К, поэтому, находясь на расстоянии около 100 а. е. от звезды, он светится сам.

Из 137 объектов каталога [5], отмеченных в мае 2020 года как сфотографированные, 91 объект имеет массу выше границы между планетами и коричневыми карликами, а все остальные являются супер-юпитерами с массой более $2,5M_{\text{Jup}}$.

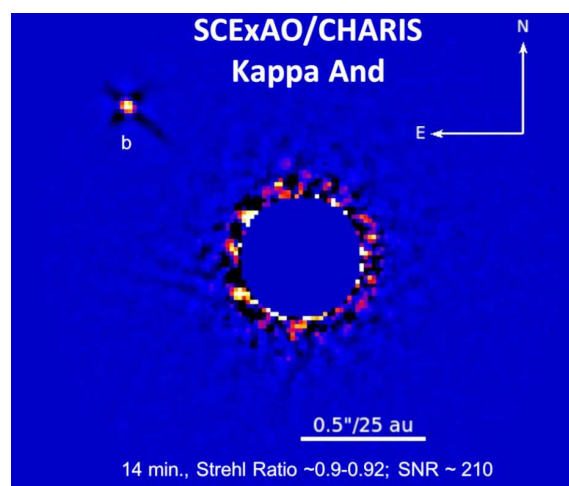


Рис. 9. Изображение звезды κ And (в центре, закрыта маской) и её спутника в диапазоне длин волн $1,1 \div 2,4$ мкм [14]

Наземным телескопам с адаптивной оптикой и звёздным коронографам в исключительных случаях удаётся получать изображения очень массивных и молодых планет на расстоянии около $0,1''$ от предельно маломассивной звезды или коричневого карлика. Именно по причине чрезвычайно малого возраста планета светится не столько отражённым, сколько собственным инфракрасным излучением, сравнимым по блеску с излучением звезды.

Астрометрический метод мы уже обсудили выше. Пока он не принёс заметных результатов в области экзопланет, поскольку из 12 объектов, отмеченных в каталоге [5] как «астрометрические», только два попадают по массе в область планет, а остальные — коричневые карлики. Но есть надежда, что космическая обсерватория Gaia через несколько лет закончит измерения положений звёзд с необходимой точностью, и тогда астрометрический метод принесёт свои плоды.

6. СВОЙСТВА ЭКЗОПЛАНЕТ

Этот обзор в основном посвящён методам поиска экзопланет, поэтому мы лишь кратко опишем их основные свойства. До 1995 года астрономы знали только одну планетную систему — Солнечную. Её характеристики казались в целом понятными и негласно распространялись на все ещё не открытые системы, но это было ошибкой: свойства обнаруженных экзопланетных систем оказались разнообразными и неожиданными.

Возможно, единственным ожидаемым из общих соображений открытием стало обнаружение супер-юпитеров, заполняющих промежуток в распределении масс от планет-гигантов Солнечной системы до коричневых карликов, т. е. от $1M_{\text{Юп}}$ до $13M_{\text{Юп}}$. Но неожиданным оказалось открытие супер-земель с массами от 1 до 15 масс Земли, т. е. от землеподобных планет до планет с массами Урана или Нептуна; в Солнечной системе такие отсутствуют. Станным оказалось и открытие планет с высокоэксцентричными орбитами (рис. 10). И совсем невероятным было обнаружение газовых гигантов вблизи их родительских звёзд. Открытие этих «горячих юпитеров» потребовало существенного дополнения теории формирования планетных систем, в частности — развития взглядов на механизмы миграции молодых планет в протопланетных дисках.

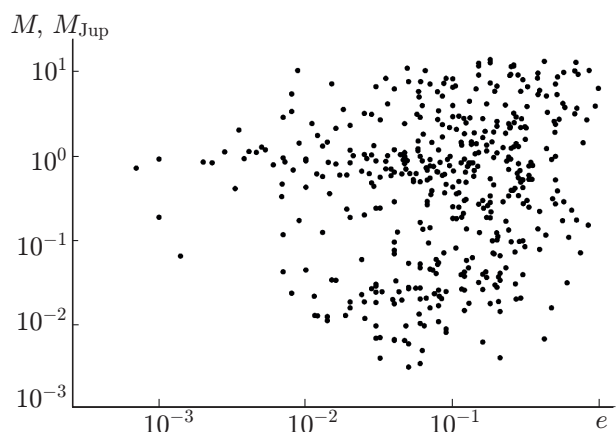


Рис. 10. Распределение объектов сетевой «Энциклопедии экзопланет» [5] на 5 мая 2020 года (M — масса планеты, e — эксцентриситет орбиты). Показаны планеты с массами менее $14M_{\text{Юп}}$

Термин «горячий юпитер» возник в самом конце XX века в связи с тем, что среди экзопланет, открытых первыми после 1995 года, большинство оказалось гигантами типа Юпитера, но, в отличие от него, обращающимися по короткопериодическим орбитам настолько близко к родительской звезде, что их верхний облачный слой атмосферы оказывается разогрет излучением звезды более чем до 1000 K, а порой и до нескольких тысяч кельвинов.

В том, что первыми были открыты именно такие экзопланеты, нет ничего удивительного: применявшийся для их поиска доплеровский метод, регистрирующий периодические изменения лучевой скорости звезды, прежде всего реагирует на тесное соседство звезды с массивной планетой. Однако попытки объяснить происхождение горячих юпитеров сталкиваются с проблемами.

В рамках современной космогонии планета-гигант, в основном состоящая из лёгких элементов (водород и гелий), может сформироваться лишь вдали от звезды, где летучие вещества (вода, метан, диоксид и монооксид углерода, аммиак) могут

оставаться в твёрдом состоянии. Для этого требуется температура $145\div 170$ К. Расстояние от Солнца, на котором это происходит, называют линией льда (frost line, snow line, ice line). В эпоху формирования планет, когда в протопланетном диске было много пыли и газа, а светимость Солнца была ниже, линия льда проходила на расстоянии от 2,7 до 3,2 а.е. от Солнца. Сегодня она отодвинулась на расстояние 5 а.е., до области между орбитами Марса и Юпитера. Поэтому казалось вполне естественным, что линия льда делит планетную систему на внутреннюю область, лишенную летучих веществ и содержащую твёрдые тела, и внешнюю область, богатую летучими веществами и содержащую ледяные тела.

Большинство специалистов и сейчас сходится в том, что планеты-гиганты формируются вдали от звезды, но позже некоторые из них, взаимодействуя с массивным протопланетным газово-пылевым диском, мигрируют ближе к звезде и становятся горячими.

Термин «горячий юпитер» стал настолько привычным, что уже было неудивительным открытие в 2009 году планеты WASP-18 b, имеющей массу $10,4M_{\text{Юп}}$ и обращающейся по почти круговой орбите на расстоянии 0,02 а.е. от своей звезды. Орбитальный период этой планеты составляет всего 22,6 часа. Учитывая, что звезда WASP-18 (HD 10069) имеет спектральный класс F9 и обладает большей светимостью, чем Солнце, температура поверхности планеты должна достигать 2100 К. Из-за близости к звезде и своей большой массы планета вызывает сильные приливные возмущения на поверхности звезды, которые, в свою очередь, тормозят планету и в будущем приведут к её падению на звезду.

В 2019 году у звезды WASP-18 была обнаружена вторая планета на круговой орбите с периодом 2,16 сут. Её масса $0,17M_{\text{Юп}}$, т.е. значительно меньше, чем у внутренней, соседней с ней планеты. Не понятно, как могла массивная планета WASP-18 b мигрировать издалека к звезде и пройти мимо менее массивной планеты WASP-18 c, не задев её и даже не возмущив её движение. Один из возможных ответов на этот вопрос заключается в том, что раньше это могла быть двойная планета, распавшаяся в процессе миграции.

Обнаружение горячих юпитеров и в целом огромного разнообразия планетных систем вызвало небывалую активность в области планетной космогонии. До создания единой теории формирования планет ещё далеко. Но уже ясно, что она будет намного сложнее теории формирования звёзд, поскольку содержит намного больше свободных параметров. Например, немало планет обнаружено у двойных, тройных и даже четырёхкратных звёзд [15, 16]. Построить динамическую модель формирования таких планет будет нелегко.

За четверть века исследования экзопланет принесли один неоспоримый результат: планетные системы — не исключительный, а вполне обычный продукт протозвёздной эволюции. Факт того, что мы окружены разнообразными планетными системами, стимулирует сейчас астрономию, астробиологию и даже космонавтику. При этом особый интерес обращён к экзопланетам земного типа с условиями на поверхности, близкими к земным. Ведь речь идёт о возможности внеземной жизни.

7. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОГО ТИПА И ЗОНА ЖИЗНИ

Если условно отнести к планетам земного типа те экзопланеты, массы которых измерены и лежат в интервале от 0,3 до 3,0 масс Земли, то в мае 2020 года по данным каталога [18] таких было около 60. Если за критерий подобия взять размер планеты, то в диапазоне $\pm 20\%$ от размера Земли найдётся около 300 экзопланет. К сожалению, среди тех и других всего 5–6 планет расположены на таких расстояниях от своих звёзд, где температуры на их поверхностях обеспечивают существование жидкой воды, т.е. благоприятствуют развитию жизни земного типа. Всего в этой зоне (рис. 11) обнаружено 132 экзопланеты, но в основном это гиганты. Здесь мы

сталкиваемся с понятием «зона жизни», и этот термин требует отдельного обсуждения.

Введение новых научных терминов — ответственное дело. Особенно тщательно следует продумывать перевод английских, т. е. международных терминов на родной язык. Когда новый и, тем более, неудачный термин начинает входить в оборот, есть время обсудить проблему и демократическим путём прийти к общему мнению. Обсудим перевод английского термина «circumstellar habitable zone», или короче «habitable zone», ставшего в последнее время очень популярным у исследователей экзопланетных систем. Речь идёт о диапазоне расстояний от звезды, в пределах которого температура на поверхности планеты лежит в пределах от 0 до 100 °С. При нормальном давлении атмосферы это открывает возможность для существования жидкой воды, а значит, и жизни в её нынешнем понимании (см. рис. 11).

В отечественных публикациях на эту тему сейчас конкурируют три варианта перевода термина «habitable zone» — зона жизни, обитаемая зона и зона обитаемости. Попробуем разобраться.

Очевидна полная непригодность термина обитаемая зона, указывающего на присутствие в этой зоне живых существ и даже намекающего на присутствие там человека. Обитаемый означает населённый, а «обитаемая зона» — населённая зона, в которой кто-то живёт. В действительности же речь идет о зоне, в которой на поверхности планеты с атмосферой могут быть условия для существования жидкой воды. При этом возможность существования воды не означает, что вода действительно существует, а наличие воды не гарантирует всех условий для развития жизни. А наличие условий для жизни вовсе не означает наличия живых существ. Очевидно, что авторы, использующие термин обитаемая зона, наименее чувствительны к смыслам родного языка.

А что такое зона обитаемости? Слово обитаемость в русском языке есть. Толковый словарь Ушакова указывает: обитаемость — степень населённости местности. Другие словари дают близкое к этому толкование. Поэтому термин «зона обитаемости» противоречит традиционному смыслу слова обитаемость.

Прямой перевод «habitable» по словарю дает следующие варианты: обитаемый, удобный, пригодный для жилья. С обитаемостью мы уже разобрались, но пригодность для жилья, для жизни точно отражает смысл термина habitable zone. Вообще, в английском «-able» говорит о возможности, а не о наличии. С этим согласны знатоки английского языка [14].

Таким образом, наиболее адекватным переводом было бы длинное выражение «зона возможной жизни» или же «зона, пригодная для жизни». Но более простое и короткое «зона жизни», по мнению автора, достаточно точно передаёт смысл английского выражения. Не последнюю роль играет и удобство произнесения. Сравните: зона жизни или зона обитаемости. Очевидно, выигрывает зона жизни.

Обратимся к смыслу этого понятия. Ясно, что границы зоны жизни сильно зависят от сделанных предположений относительно альбедо планеты и состава её атмосферы (фактически — от степени парникового эффекта). И это при том, что мы обсуждаем условия для жизни на поверхности планеты. А если учесть, что при наличии внутренних источников тепла и минерального сырья жизнь вполне может процветать под грунтом и подо льдом, то холодная, дальняя граница зоны жизни вообще отодвигается на межзвёздное расстояние.

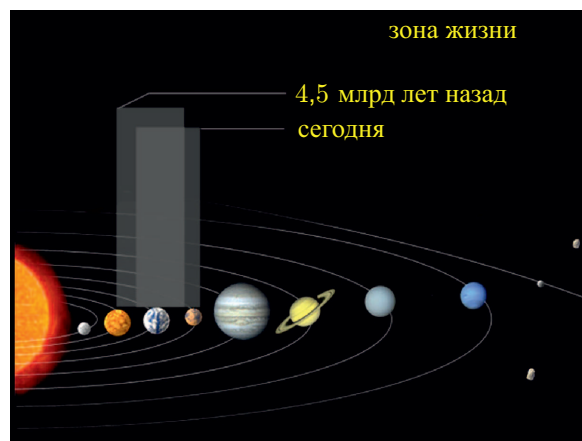


Рис. 11. Зона возможной жизни на поверхностях планет с атмосферами в Солнечной системе и её перемещение со временем, вызванное изменением светимости Солнца

Положение границ зоны жизни для поверхности планеты также нуждается в детальном обсуждении, которое выходит за рамки этого краткого обзора. Отметим лишь некоторые факты, связанные с массой родительской звезды.

Светимость звёзд главной последовательности солнечного типа зависит от их массы как $L \propto M^4$. Температура T на поверхности планеты зависит от светимости звезды и радиуса орбиты R при фиксированных свойствах атмосферы: $T \propto (L/R^2)^{1/4}$. Границы зоны жизни требуют фиксированной температуры, т. е. для них $R \propto L^{1/2} \propto M^2$. С другой стороны, приливный эффект звезды, тормозящий суточное вращение планеты, пропорционален M/R^3 . Значит, максимальное расстояние приливного захвата планеты $R \propto M^{1/3}$. Следовательно, по мере уменьшения массы звезды зоны жизни быстро приближается к области приливного захвата, где осевое вращение планеты замедленно, а её освещенность асимметрична: одно полушарие всегда лишено света. Это резко меняет динамику атмосферы, делает более контрастным климат и может ускорить затухание магнитного поля, поскольку динамо-механизм требует быстрого осевого вращения.

Второй факт тоже связан с массой звезды. Основным населением Галактики являются маломассивные красные карлики спектральных классов М и К, проявляющие высокую вспышечную активность. Вклад жёсткого излучения в светимость звезды во время вспышки существенно возрастает, а мощность вспышек у этих звёзд относительно их светимости значительно выше, чем у Солнца. Поэтому приближение зоны жизни к маломассивным звёздам значительно увеличивает поток радиации у поверхности этих планет, делая более вероятным развитие жизни под поверхностью.

Тем не менее, представление о зоне возможной жизни на поверхности планеты полезно в том смысле, что удалённые наблюдения с помощью телескопа или пролётного зонда (имеется в виду проект Breakthrough Starshot [20]) позволяют исследовать только атмосферу и поверхность экзопланеты, но не её недра. Для этих исследований уже подготовлены предложения по спектральным биомаркерам [21, 22], указывающим на наличие жизни земного типа. Но для получения спектров экзопланет земного типа в зоне жизни потребуются новые методы наблюдения.

Одним из самых амбициозных считается проект HabEx (Habitable Exoplanet Imaging Mission, NASA), предлагаемый для запуска в 2035 году. В точку L2 системы Солнце–Земля предлагается вывести телескоп ультрафиолетового, инфракрасного и видимого диапазонов длин волн (от 91 до 1 000 нм) с объективом с диаметром 4 м и внутренним звёздным коронографом, а также отдельно от него — экран с диаметром 56 м, удалённый от телескопа на 72 тыс. км (рис. 12). Это позволит изучить атмосферы землеподобных экзопланет в зоне жизни.

Цели для исследования будут выбраны в соответствии с Индексом подобия Земле (Earth Similarity Index, ESI), основанном на сходстве экзопланеты с Землёй по нескольким физическим факторам (размер, масса, температура на поверхности и др.), влияющим на «жизнепригодность». Значение ESI лежит в диапазоне от 0 до 1 (у Земли). В мае 2020 года самыми «землеподобными» считались планеты Teegarden b (ESI = 0,95), TRAPPIST-1e (0,95) и не подтверждённая пока планета KOI-4878.01 (0,98). В первую десятку входит и ближайшая к нам экзопланета Proxima Centauri b (0,87). Любопытно, что Марс и Меркурий имеют одинаковый и довольно низкий индекс ESI = 0,73. А по совокупности большего числа признаков самой жизнепригодной экзопланетой сейчас считается Teegarden b [24].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск и изучение экзопланет — это наиболее активно развивающееся направление современной астрономии. Не все задачи в этой области требуют наличия крупных телескопов с диаметрами более 8 м, которых в нашей стране нет. Многие задачи по фотометрии прохождений и гравита-

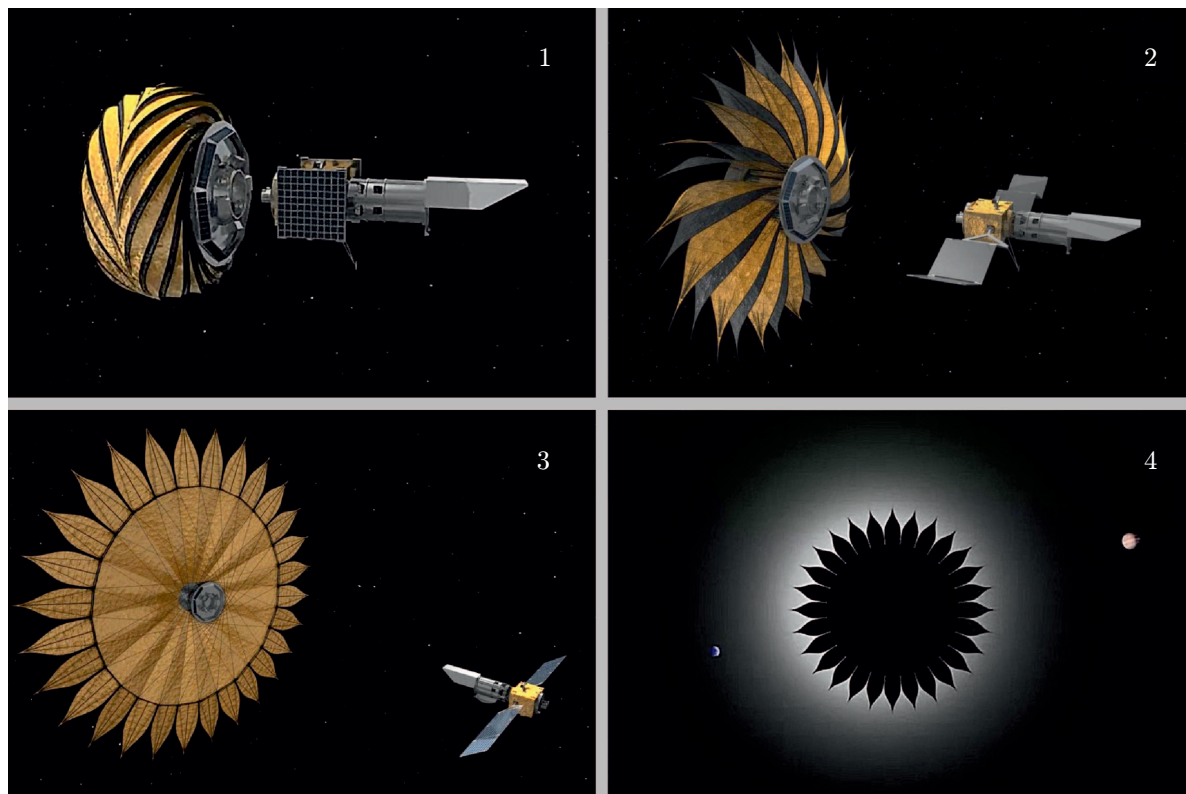


Рис. 12. Этапы развёртывания перспективного космического звёздного коронографа HabEx [23]

ционному микролинзированию можно решать с телескопами с диаметром $1\div 2$ м, имеющимися у нас в немалом количестве.

Отечественная школа астрометрии имеет глубокие корни и высокий международный статус. Уже началась и в ближайшее время продолжится публикация высокоточных астрометрических каталогов по результатам работы космической обсерватории Gaia, которые дадут прекрасный материал для обнаружения новых и исследования известных экзопланет методами астрометрии. Это следует учесть в планах работы астрономических организаций.

Существование нескольких интерактивных каталогов экзопланет [5, 10] даёт возможности для научных статистических исследований, а также для организации учебного процесса, в частности для проведения курсовых и дипломных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6991>
2. Архипова В. П. Планетарные туманности // В кн. «Звёзды» / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2013. С. 262–307.
3. Williams J. P., Cieza L. A. // Ann. Rev. Astronomy and Astrophysics. 2011. V. 49. P. 67–117. doi: 10.1146/annurev-astro-081710-102548
4. Andrea I., et al. // Astrophys. J. Lett. 2019. V. 879, No. 2. Art. no. L25. doi: 10.3847/2041-8213/ab2a12
5. <http://exoplanet.eu>
6. Veras D. // R. Soc. Open Sci. 2016. V. 3, No. 3. Art. no. 150571. doi: 10.1098/rsos.150571

7. Perryman M. The Exoplanet Handbook. Cambridge : Cambridge University Press, 2018. 972 p.
8. Knutson H. A., Charbonneau D., Noyes R. W., et al. // *Astrophys. J.* 2007. V. 655, No. 1. P. 564–575. doi: 10.1086/510111
9. <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/the-tess-space-telescope.html>
10. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
11. <https://sci.esa.int/web/cheops>
12. <http://ogle.astrouw.edu.pl>
13. Jung Y. K., Udalski A., Zang W., et al. <https://arxiv.org/abs/1912.03822>.
14. Currie T., Guyon O., Lozib J., et al. <https://arxiv.org/abs/1909.10522>
15. Schwarz R., Funk B., Zechner R., Bazso A. // *Month. Not. Royal Astronom. Soc.* 2016. V. 460, No. 4. P. 3 598–3 609. doi: 10.1093/mnras/stw1218
16. <https://www.univie.ac.at/adg/schwarz/multiple.html>
17. Kane S. R., Gelino D. M. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 2012. V. 124, No. 914. P. 323–328. doi: 10.1086/665271
18. hkgallery.org
19. Палажченко П. // Троицкий вариант. Наука. 2014. № 146. С. 8.
20. <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>
21. Hegde S., Paulino-Lima I. G., Kent R., et al. // *Proc. Nation. Acad. Sci. USA.* 2015. V. 112, No. 13. P. 3 886–3 891. <http://biosignatures.astro.cornell.edu>
22. <http://biosignatures.astro.cornell.edu>
23. <https://www.jpl.nasa.gov/habex/>
24. <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

Поступила в редакцию 6 мая 2020 г.; принята в печать 9 июня 2020 г.

SEARCH FOR EXOPLANETS: STATUS 2020

Surdin V. G.

An overview of the history, state by mid-2020 and the nearest prospects for the search and study of planets outside the solar system — exoplanets.