УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ КАРЛИКИ – "НОВЫЕ" ОБЪЕКТЫ ГАЛАКТИКИ

Я. В. Павленко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
e-mail: yp@mao.kiev.ua

Обсуждается прогресс в исследовании недавно открытых ультрахолодных карликов, которые вместе с известными карликами спектрального класса М составляют самую многочисленную популяцию Галактики.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних двадцати лет известны по меньшей мере две "лихорадки открытий" новых типов космических объектов в окрестности Солнца: первая относится к 90-м годам прошлого столетия. Тогда неимоверный интерес представляла проблема открытия коричневых карликов. Второй всплеск активности наблюдается сейчас, при открытии экзопланет и особенно планет земного типа. Вообще-то само проведение этих исследований стало возможным благодаря применению новых технологий и инструментов. Однако при этом немалая роль принадлежит энтузиазму и самоотверженной работе ученых многих стран. Заметим, что эти две по сути научно-технических революции в астрофизике стали возможны и благодаря активному привлечению молодых ученых как наименее консервативной части научного сообщества к этим, во многом пионерским, исследованиям. В свою очередь, эти исследования означают не только ряд технологических прорывов в наблюдательной и теоретической астрофизике, но и дают шанс изменить наши представления о Космосе вокруг нас и о Космосе внутри нас.

Ранние представления

Предположение о существовании субзвездных объектов было высказано в начале 1960-х гг. в форме предположения о "несостоявшихся звездах". Пожалуй, первым среди исследователей субзвезд следует назвать индийского теоретика Кумара, который при теоретическом моделировании эволюции объектов разных масс показал [1, 2], что коллапсирующий газовый шар должен иметь массу не менее чем в 80 раз больше массы Юпитера M_J, чтобы в его центральной части реализовались условия, необходимые для ядерных реакций стабильного горения водорода (этим ограничением в настоящее время считается около 75 масс Юпитера).

Долгое время считалось, что объекты с меньшими массами могут существовать, но было признано, что их обнаружение является чрезвычайной трудной задачей, поскольку они, в принципе, должны быть объектами слишком низкой светимости и испускать очень мало видимого света.

Первые результаты

Интерес к исследованиям маломассивных объектов Галактики начал усиливаться на рубеже 90-х. На это время приходится всплеск активного изучения молодых звезд типа T Tau [3, 4]. Определения содержания лития в атмосферах звезд типа T Tau в молодых скоплениях показало, что его содержание в них мало изменяется, по меньшей мере, на протяжении первых миллионов лет их эволюции. С другой стороны, теоретические расчеты показывали, что в объектах с массой меньше 65 M_J (здесь M_J – масса Юпитера) литий не выгорает вообще [6–9]. Именно эти обстоятельства послужили обоснованием Реболо и др. предложить т. н. "литиевый тест" для выделения коричневых карликов (к тому времени термин уже был общепризнан для обозначения членов популяции объектов с массами меньше $65\,M_\mathrm{J}$) среди совокупности маломассивных звезд, внутри которых протекали ядерные реакции горения водорода. Конечно, были определенные сомнения в том, возможно ли обнаружение линий лития в спектрах объектов с эффективными температурами ниже 2600 K на фоне молекулярного поглощения TiO, которое доминирует в оптическом диапазоне спектров поздних М-карликов. Впервые эта возможность была доказана численным моделированием линий лития в спектрах поздних М-карликов Павленко и др. [5]. Кстати, в то время самым холодным из известных М-карликов считался VB10 – красный карлик спектрального класса M8 с эффективной температурой порядка 2600 K. Именно он замыкал последовательность звезд, положение которых отмечалось на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. Этот красный карлик является звездой, т. к. в его спектре линии лития отсутствуют, поскольку этот элемент выгорел на предшествующих стадиях эволюции внутри VB10.

Отметим, что в конце 80-х развитие наблюдательной техники, в особенности приемников в ИК-области спектра, ускорилось. Это позволило получить ряд спектров, которые не укладывались в рамки существующей классификации; они долгое время не могли быть объяснены в рамках общепринятых в то время представлений. Одним из них был спектр GD 165B, этот очень красный (или покрасневший) объект был обнаружен Цукерманом и Буклин в 1988 году на орбите вокруг белого карлика. Собственно, спектрально GD 165B впервые проявил себя избытком потока в ИК-области при наблюдении белого карлика. Несколько позже удалось зарегистрировать спектр самого GD 165B, который разительно отличался от известных в то время спектров звезд. Однако это были единичные наблюдения таких объектов, максимум их открытий приходится на время сразу после обнаружения первых коричневых карликов. Сейчас общепризнано, что этот карлик по сути является первым из известных (если не первым) L-карликом.

ОТКРЫТИЕ ПЕРВЫХ КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ

Teide 1 и GJ 229B

Первое сообщение об открытии коричневого карлика было заявлено в "Nature" группой исследователей из Института астрофизики на Канарских островах 14 сентября 1995 года в статье с названием "Открытие коричневого карлика в звездном скоплении Плеяд" [10]. Это открытие стало возможно в результате проведения целенаправленного фотометрического глубокого обзора центральной области относительно молодого скопления Плеяд. Заметим, что фотометрия проводилась Марией Роза Запатеро Озорио и коллегами на относительно небольшом телескопе IAC-80, оснащенном красной ПЗС-матрицей. Вывод о статусе Teide 1 как коричневого карлика был сделан на основе комплексного анализа фотометрических данных и собственных движений этого объекта. Годом позже Реболо и др. [11] показали присутствие достаточно сильной бленды линии резонансного дублета лития в спектре Teide 1, полученном совместно с американскими коллегами на телескопе Keck. Павленко [12] показал, что наблюдаемая линия Li I 6708 Å вполне соответствует ожидаемому космическому содержанию лития в атмосфере Teide 1, т. е. этот карлик сохранил литий со времени своего формирования, как и предполагалось в "литиевом тесте" для субзвездных объектов.

Спустя несколько недель после статьи об открытии Teide 1 в "Nature", там же появилось сообщение об открытии второго коричневого карлика GJ 229B [13]. Второй коричневый карлик был обнаружен на орбите радиусом 50 а. е. от звезды спектрального класса M1 V. Накаджима и др. [13] и Оппенгеймер и др. [14] опубликовали открытие и спектральное подтверждение буквально через несколько недель после сообщения об открытии Teide 1. Два первых коричневых карлика разительно отличаются по характеру спектра: спектр Teide 1 практически не отличается от спектра других M-карликов Плеяд того же возраста, за исключением наличия в спектре достаточно сильной линии лития на 6708 Å. В то же время спектр GJ 229B на момент открытия "неопровержимо" отличался от спектров известных звезд.

Список первых открытых коричневых карликов можно найти в Интернете по адресу
`http://astro.berkeley.edu/~basri/bdwarfs/table1.htm`.

Пропущенные открытия

В 1994 году Тинней на 3.6-м телескопе в Европейской Южной обсерватории пронаблюдал достаточно яркий M-карлик LP944-20. Используя спектрограф CASPEC, он получил спектры этого красного карлика с умеренным разрешением $R = 20\,000$ на 6700 Å. На полученных спектрах четко выделялась достаточно сильная бленда линий резонансного дублета лития на 6708 Å. В 1998 году Тинней [16] опубликовал результаты количественного анализа этой линии. Измеренная "эквивалентная ширина" бленды линий резонансного дублета оказалась равной 0.6 Å, что при использовании теоретических кривых роста Павленко и Магаззу [15] дает обилие лития $\lg N(\mathrm{Li}) = 0.6$, т. е. обилие гораздо меньше "космического". И только в 2006 году Павленко и др. [17] на основе анализа наблюдательного материала более высокого качества и интерпретации его в рамках более сложной модели атмосферы показали, что содержание лития в атмосфере LP944-20 существенно выше и составляет $\lg N(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.2$, т. е. этот красный карлик сохранил свой первоначальный литий и поэтому должен рассматриваться в качестве коричневого карлика. Содержание лития, полученное Тиннеем в 1998 году оказалось заниженным (более чем в 100 раз!) вследствие неучета молекулярного поглощения при расчете профиля бленды линий резонансного дублета лития. По сути Тинней использовал для анализа псевдоэквивалентную ширину дублета резонансных линий лития, которая была определена по отношению к локальному псевдоконтинууму, сформированному молекулярным поглощением в окрестности дублета лития 6708 Å. Как показал Павленко [12], величины псевдоэквивалентных ширин линий могут в разы отличаться от теоретических эквивалентных ширин, рассчитанных по отношению к истинному континууму, который, вообще говоря, не виден в спектрах поздних M-карликов из-за сильного поглощения линиями систем полос TiO.

Таким образом, наблюдения 1994 года были вполне достаточны для номинации LP944-20 в качестве первого коричневого карлика. Правда, статья Павленко и др. [5] о самой возможности наблюдения бленды лития на фоне молекулярных полос в спектрах коричневых карликов появилась в 1995 году, а представления об псевдоэквивалентных ширинах линий в спектрах карликов поздних спектральных классов были развиты после 1996 года ([12], см. также [18]).

УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ КАРЛИКИ

Коричневые карлики – это только часть населения Галактики, состоящего из совокупности разнородных маломассивных космических тел. Для обозначения этой выборки используется термин ультрахолодные карлики. В настоящее время популяция ультрахолодных карликов занимает правый нижний квадрант главной последовательности. Существенная часть ультрахолодных карликов была обнаружена после 1995 года [19, 20].

Можно определить по крайней мере три разных подмножества ультрахолодных карликов:

— Звезды малых масс (low mass stars, LMS). Водород горит в их ядре.
— Коричневые карлики (brown dwarfs, BD). Водород не горит в их ядре. Заметим, что литий все же выгорает внутри массивных ($55M_{\rm J} < M < 75M_{\rm J}$) коричневых карликов (см. [21] для более подробной информации). Скорость истощения лития в этом случае выше для объектов большей массы. При этом дейтерий отсутствует в атмосферах коричневых карликов, эффективно выгорая при температурах порядка 1 МК.
— Планеты ($M < 13M_{\rm J}$) сохраняют и дейтерий, и литий в ходе их эволюции [22].

Первые спектральные классификации ультрахолодных карликов были предоставлены Киркпатрик и др. [23] и Martin и др. [24].

На сегодня в Интернете имеются обширные библиотеки спектров ультрахолодных карликов [25, 26] различных спектральных типов:

— М-карлики (GJ 406, VB10, VB8...), TiO доминирует в их спектрах [12].
— L-карлики (GD 169B, Kelu-1, 2MASS 0920 35), их оптические спектры формируются поглощением в резонансных линиях нейтральных атомов K и Na [27, 28], Ti и V атомы связаны в пылевые частицы.
— Т-карлики (GJ 229B, SDSS 0151, SDSS 1110) – в инфракрасных спектрах хорошо видны полосы поглощения метана CH_4.
— Y-карлики – пока гипотетические объекты, занимающие промежуточное положение по массам между Т-карликами и планетами. Поиск этих объектов в окрестности Солнца активно проводится в настоящее время [29].
— Планеты (см. список обнаруженных планет на Web [30] и ссылки в нем). Спектры экзопланет, полученные с высоким разрешением, пока отсутствуют.

Заметим, что "главные последовательности" коричневых карликов, L-, T-, Y-карликов и больших планет (с массами порядка массы Юпитера) составляют на диаграмме масса–радиус примерно горизонтальную линию с Юпитером на левой границе [31]. Зависимость радиусов ультрахолодных карликов от их массы чрезвычайно слаба из-за вырождения газа в их ядрах. В результате, размеры старых коричневых карликов, L-карликов и Юпитера сравнимы.

В зависимости от возраста, Т-карлики могут быть коричневыми карликами (если они старые) либо "планетарными объектами" (с массой ниже предела горения дейтерия, если они молоды). Более массивные молодые Т-карлики могут сохранять некоторое время дейтерий.

Ультрахолодные карлики в зависимости от массы имеют разное строение:

— Внутри звезд малой массы имеется зона горения водорода.
— Коричневые карлики сжигают дейтерий, массивные коричневые карлики ($55M_{\rm J} < M < 75M_{\rm J}$) сжигают и литий в относительно коротких временных масштабах [32].
— Планетами являются объекты без каких-либо процессов горения водорода, лития и дейтерия.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В АТМОСФЕРАХ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ КАРЛИКОВ

Вследствие низких температур и высоких значений плотности и давления на эффективных глубинах формирования спектров ультрахолодных карликов при их исследовании необходимо учитывать ряд достаточно сложных физических процессов:

- *Формирование пылинок.*
  Из-за низких температур и высокого давления парциальные давления многих молекул (и атомов) превосходят величины давлений насыщения, поэтому для них выполняется условие фазового перехода [33, 34]. Конечно, физика формирования пылинок в атмосферах гораздо сложнее: здесь, по-видимому, реализуются различные механизмы с включением процессов на поверхности пылинок, фотохимических процессов и др. Однако в целом именно связыванием атомов металлов в пылинки объясняется тот наблюдательный факт, что молекулярные полосы VO, TiO и других молекул слабее в спектрах L-карликов по сравнению со случаем М-карликов.

- *Резонансные линии калия и натрия.*
  При понижении эффективных температур в атмосферах ультрахолодных карликов степень ионизации и возбуждения атомов калия и натрия уменьшается. Это означает, что подавляющая часть этих атомов находится в основном состоянии. Как результат, уже в случае L-карликов происходит сильное усиление резонансных линий Na I и K I $\lambda\lambda$ 589.1, 589.7 нм и 796.6, 770.1 нм соответственно. По сути, пара этих суперсильных линий поглощения и определяет вид оптических спектров L-карликов. Формально рассчитанные эквивалентное ширины этих линий для случая L-карликов с эффективными температурами порядка 1800 K могут быть порядка нескольких килоангстрем [28, 35]. При этом механизмы формирования этих линий здесь отличаются от случая атмосфер M-карликов ранних спектральных классов, где доминирует известное уширение ван дер Ваальса, хорошо описываемое в рамках столкновительного приближения. В условиях плотных и холодных атмосфер ультрахолодных карликов применима т. н. теория квазистационарного уширения, которая позволяет рассчитать смещение квантовых уровней атома вследствие воздействия внешнего электрического поля, создаваемого атомами водорода и гелия, а также молекулами водорода [36–38].
- *Вклад пыли в непрозрачность.*
  Важность учета непрозрачности, обусловленной наличием поглощения/рассеяния излучения при численном моделировании спектров L- и T-карликов была показана Павленко и др. [35]. Конечно, проблема учета непрозрачности, обусловленная рассеянием и/или поглощением излучения пылинками, достаточна сложна – мы должны учитывать зависимость непрозрачности от химического состава пылинок, их размеров и ориентации. Кроме того, последние исследования предоставили определенные доказательства присутствия облачных структур из слоев пыли в атмосферах L-карликов (см. материалы IAUS 211 [20]). В цитируемой выше работе по определению содержания лития в атмосфере LP944-20 мы использовали достаточно сложную модель атмосферы – в ней предполагалось наличие облачного слоя на некоторой высоте. Сам вид спектров, рассчитанный для этой модели, показывает зависимость как от толщины облачного слоя, так и от положения его в атмосфере коричневого карлика.

ОТ КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ К ПЛАНЕТАМ

До недавнего времени существование экзопланет было уделом научных фантастов. Астрономам было известно о существовании девяти планет Солнечной системы и их спутников [39]. Удивительно, но обнаружение первой экзопланеты, фактически земного типа, на орбите вокруг нейтронной звезды [40] рассматривалось скорее как некий уникальный случай. Эта система, несомненно, имеет историю, очень отличающуюся от истории развития нашей Солнечной системы. Действительно, существующая орбита этой экзопланеты в прошлом располагалась внутри сверхгиганта, на месте которого сейчас наблюдают пульсар.

Однако лавинообразное увеличение числа открытых экзопланет после 1995 года, со времени открытия Майером и Лвелосом [41] с последующим подтверждением Марси и др. [42] планеты на орбите вокруг 51 Peg, по сути кардинально изменило картину ближнего космоса вокруг Солнечной системы. Большая группа горячих экзопланет (свыше 200 на данный момент) была обнаружена по вариациям радиальной скорости звезд [43], вокруг которых они вращаются. Эти объекты иногда существенно больше Юпитера, и довольно часто (по сравнению с нашей Солнечной системой) они близки к центральной звезде и движутся по эллиптическим орбитам. В последнее время достаточно большое количество экзопланет были также обнаружены методом "транзитов", основанном на регистрации периодических изменений потоков излучения, получаемого от центральной звезды вследствие покрытий ее экзопланетой (например [44]). Среди других методов следует отметить методы, основанные на обнаружении гравитационного микролинзирования [45], и прямую регистрацию движения планет вокруг центральных звезд [46].

Отметим ряд важных моментов:

- Недавние открытия планет и планетных систем вокруг ближайших звезд изменили представления о нашей собственной планетной системе. Самым важным моментом является осознание того, что эта система не является уникальной и единственной не только в Галактике, но и в окрестности Солнца.
- В свете последних открытий число формально признанных планет – "действительных членов" Солнечной системы – даже уменьшилось до восьми [51]. Из числа планет был исключен Плутон, поскольку в системе Солнца были открыты новые маломассивные объекты со сравнимыми с ним размерами и массами и ожидается открытие новых.
- Открытые системы оказались не похожими на Солнечную систему. По-видимому, их планеты отличаются и химическим составом.

- В настоящее время планируется и реализуется ряд космических и наземных проектов (superWASP [47], COROT [48], Keppler [49], ELT [50]...) с целью обнаружения и изучения новых экзопланет, в том числе и планет земного типа, которые обращаются вокруг своих звезд на расстояниях внутри обитаемой зоны, т. е. там, где должна быть в жидкой форме вода и, следовательно, возможно существование жизни в формах, напоминающих земную экосистему, или, что вполне вероятно, отличных от нее.

Я благодарю своих соавторов за плодотворное сотрудничество, Яковину Ларису за помощь в правке текста. Мои исследования были поддержаны программой Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины "Космомикрофизика".

[1] *Kumar S. S.* The Kelvin Time Scale for Stars of Very Low Mass // Astrophys. J.–1963.–**137**.–P. 1126–1128.

[2] *Kumar S. S.* The Structure of Stars of Very Low Mass // Astrophys. J.–1963.–**137**.–P. 1121–1125.

[3] *Magazzu A., Rebolo R., Pavlenko Ya. V.* Lithium abundances in classical and weak T Tau stars // Astrophys. J.–1992.–**392**.–P. 159–171.

[4] *Martin E. L., Rebolo R., Magazzu A., Pavlenko Y. V.* Pre-main sequence lithium burning. 1. Weak T Tauri stars // Astron. and Astrophys.–1994.–**282**.–P. 503–517.

[5] *Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martín E. L., Garcia Lopez R. J.* Formation of lithium lines in very cool dwarfs // Astron. and Astrophys.–1995.–**303**.–P. 807–818.

[6] *D'Antona F., Mazzitelli I.* Evolution of very low mass stars and brown dwarfs. I. The minimum main-sequence mass and luminosity // Astrophys. J.–1985.–**296**.–P. 502–513.

[7] *Nelson L. A., Rappoport S. A, Joss P. C.* The evolution of very low mass stars // Astrophys. J.– 1986.–**311**.–P. 226–240.

[8] *Burrows A., Hubbart W. B., Lunine J. I.* Theoretical models of very low mass stars and brown dwarfs // Astrophys. J.–1989.–**345**.–P. 939–958.

[9] *Pozio F.* Li in brown dwarfs and very low mass pre-MS stars // Mem. Soc. Astron. Ital.–1991.–**62**.–P. 171–179.

[10] *Rebolo R., Zapatero Osorio M. R., Martín E. L.* Discovery of a Brown Dwarf in the Pleiades Star Cluster // Nature.–1995.–**377**.–P. 129–132.

[11] *Rebolo R., Martín E. L., Basri G., et al.* Brown Dwarfs in the Pleiades Cluster Confirmed by the Lithium Test // Astrophys. J.–1996.–**469**.–P. L53–L56.

[12] *Pavlenko Ya. V.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // Astrophys. and Space Sci.–1997.–**253**.–P. 43–53.

[13] *Nakajima T., Oppenheimer B. R., Kulkarni S. R., et al.* Discovery of a Cool Brown Dwarf // Nature.–1995.–**378**.–P. 463–467.

[14] *Oppenheimer B. R., Kulkarni S. R., Matthews K., Nakajima T.* Infrared Spectrum of the Cool Brown Dwarf Gl 229B // Science.–1995.–**270**, N 5241.–P. 1478–1479.

[15] *Pavlenko Y. V., Magazzu A.* Theoretical LTE and non-LTE curves of grow for LiI lines in G-M dwarfs and subgiants // Astron. and Astrophys.–1996.–**311**.–P. 961–967.

[16] *Tinney C. G.* The intermediate-age brown dwarf LP944-20 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–1998.–**296L**.–P. 42–44.

[17] *Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Martín E. L., et al.* Lithium in LP944-20 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2007.–**380**.–P. 1285–1296.

[18] *Zapatero Osorio M. R., Béjar V. J. S., Pavlenko Ya., et al.* Lithium and H-alpha in stars and brown dwarfs of sigma Orionis // Astron. and Astrophys.–2002.–**384**.–P. 937–953.

[19] *Basri G.* Observations of Brown Dwarfs // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.–2000.–**38**.–P. 485–519.

[20] Brown dwarfs // Proc. of IAUS 211 / Ed. E. Martín.–2004.

[21] *Chabrier G., Baraffe I,. Allard F., Hauschildt P.* Deuterium burning in substellar objects // Astrophys. J.– 2000.–**542**.–P. L19–L22.

[22] *Saumon D., Hubbard W. B., Burrows A., et al.* A Theory of Extrasolar Giant Planets // Astrophys. J.–1996.–**460**.–P. 933–1018.

[23] *Kirkpatrick J. D., Reid I. N., Liebert J., et al.* Dwarfs Cooler than "M": The Definition of Spectral Type "L" Using Discoveries from the 2 Micron All-Sky Survey (2MASS) // Astrophys. J.–1999.–**519**.–P. 802–822.

[24] *Martín E. L., Delfosse X., Basri G., et al.* Spectroscopic Classification of Late-M and L Field Dwarfs // Astron. J.–1999.–**118**.–P. 2466–2482.

[25] ftp://ftp.jach.hawaii.edu/pub/ukirt/skl/

[26] http://www.ucm.es/info/Astrof/fgkmsl

[27] *Pavlenko Ya. V.* Depletion of TiO and spectra of the coolest brown dwarfs // Odessa Astron. Publ.–1997.–**10**.–P. 76–77.

[28] *Pavlenko Ya. V.* The "lithium test" and the Spectra of Late M Dwarfs and Brown Dwarfs: Condensation Effects // Astron. Rep.–1998.–**42**, N 6.–P. 787–792.

[29] *Squires G. K., Carey S., Helou G., et al.* Hot Science With a "Warm" Telescope – Archival Research Opportunities in the Spitzer "Warm" Mission // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–2007.–**211**.–P. 4729.

[30] http://exoplanets.org/

[31] *Burrows A., Liebert J.* The science of brown dwarfs // Rev. Mod. Phys.–1993.–**65**, N 2.–P. 301–336.

[32] *Lane B. F., Zapatero Osorio M. R., Btitton M. C., et al.* The orbit of the brown dwarf binary Gliese 569B // Astrophys. J.–2001.–**560**.–P. 390–399.

[33] *Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., Nakajima T.* Evolution of dusty photospheres through red to brown dwarfs: how dust forms in very low mass objects // Astron. and Astrophys.–1996.–**308**.–P. L29–L32.

[34] *Tsuji T.* Dust in Very Cool Dwarfs // Very Low-mass Stars and Brown Dwarfs / Eds R. Rebolo and M. R. Zapatero Osorio.–Cambridge University Press, 2000.–P. 156–167.

[35] *Pavlenko Ya., Zapatero Osorio M. R., Rebolo R.* On the interpretation of the optical spectra of L-type dwarfs // Astron. and Astrophys.–2000–**355**.–P. 245–255.

[36] *Burrows A., Volobuyev M.* Calculations of the Far-Wing Line Profiles of Sodium and Potassium in the Atmospheres of Substellar-Mass Objects // Astrophys. J.–2003.–**583**.–P. 985–995.

[37] *Allard N. F., Allard F., et al.* A new model for brown dwarf spectra including accurate unified the line shape theory for the Na I and K I resonance line profiles // Astron. and Astrophys.–2003.–**411**.–P. L473–L476.

[38] *Pavlenko Ya. V., Zhukovskaya S. V., Volobuev M.* Resonance potassium and sodium lines in the spectra of ultracool dwarfs // Astron. Rep.–2007.–**51**.–P. 282–290 .

[39] *Аллен К. У.* Астрофизические величины.–М.: Мир, 1977.

[40] *Wolszczan A., Frail D. A.* A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12 // Nature.–1992.–**355**.–P. 145.

[41] *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star // Nature.–1995.–**378**.–P. 355–358.

[42] *Marcy G. W., Butler R. P., Williams E., et al.* The Planet around 51 Pegasi // Astrophys. J.–1997.–**481**.–P. 926–935.

[43] *Marcy G. W., Butler R. P.* Detection of Extrasolar Giant Planets // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.–1998.–**36**.–P. 57–98.

[44] *Burrows A.* New Insights into Extrasolar Giant Planets (Invited Review) // Planetary Systems in the Universe: Proc. IAU Symp. 202 (7–11 August 2000) / Ed. A. Penny.–Manchester, United Kingdom, 2004.–P. 255–260.

[45] *Bond I. A., Udalski A., Jaroszyński M. et al.* OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event // Astrophys. J.–2004.–**606L**.–P. 155–158.

[46] *Chen C. H., Sheehan P., Watson D. M., et al.* Solar System Analogs Around IRAS-Discovered Debris Disks // Astrophys. J.–2009.–**701**.–P. 1367–1372.

[47] http://www.superwasp.org/

[48] http://smsc.cnes.fr/COROT/

[49] http://kepler.nasa.gov/

[50] http://www.eso.org/public/astronomy/teles-instr/e-elt.html

[51] http://kuffner-sternwarte.at/im_brennp/archiv2006/Planeten_Definition_Resolution_5_6_7.html