



УДК 524.3–14

Околосолнечное звездно-субзвездное окружение.

II. Классификация и определения основных характеристик

В.А. Захожай¹, М.А. Бабенко²¹Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина²Херсонский государственный университет

Обсуждается проблема классификации космических тел Галактики, учитывающая астрофизические и космогонические критерии. Рассматриваются основные идеи и аргументы вычисления минимальных масс звезд, субзвезд и планет, приводятся их значения и формулировки определения этих классов космических тел. Анализируются проблемы определения основных характеристик ближайших звезд и субзвезд: масс, радиусов, эффективных температур, элементного состава и возраста.

НАВКОЛОСОНЯЧНЕ ЗОРЯНО-СУБЗОРЯНЕ ОТОЧЕННЯ. II. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК, Захожай В.А., Бабенко М.О. — Обговорюється проблема класифікації космічних тіл Галактики, що враховує астрофізичні і космогонічні критерії. Розглядаються основні ідеї і аргументи розрахунку мінімальних мас зір, субзір і планет, наводяться їх значення і формулювання визначення цих класів космічних тіл. Аналізуються проблеми визначення основних характеристик найближчих зір і субзір: мас, радіусів, ефективних температур, елементного складу та віку.

SOLAR STELLAR AND SUBSTELLAR ENVIRONMENT. II. CLASSIFICATION AND DETERMINATION OF MAIN CHARACTERISTICS, by Zakhozhay V.A., Babenko M.O. — The problem of classification of celestial bodies of the Galaxy which takes into account the astrophysical and cosmogonic criteria is discussed. The main ideas and arguments of the stellar, substellar and planetary minimum mass calculation are considered. The meaning and definitions of these celestial bodies are given. The problems of determination of nearest stellar and substellar basic characteristics (masses, radii, effective temperatures, elemental composition and age) are analyzed.

Ключевые слова: звезды; субзвезды; определение физических характеристик звезд.

Key words: stars; substars; determination of stellar physical characteristics.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе продолжается подведение итогов исследования околосолнечного звездного и субзвездного окружения. Первая работа была посвящена местоположению Солнца в Галактике, звездным каталогам, которые ранее использовались и которые можно в настоящее время применить для решения широкого круга задач звездной статистики [14]. Здесь обсуждается современное состояние классификации космических тел и результаты определений их основных характеристик. Это и является основной целью предлагаемой статьи.

В сфере с центром в Солнце и радиусом 10 пк [13] находятся в основном звезды главной последовательности (спектральных классов А–М), субзвезды (13%) [114], белые карлики (5%), субкарлики (4%), встречаются субгиганты. С расширением околосолнечной сферы, начинают встречаться гиганты, в состав звезд главной последовательности начинают входить В-звезды [4].

Увеличение радиуса сферы до 500 пк ведет к тому, что в этой области уже встречаются О-звезды, как правило, в ОВ-ассоциациях. Гораздо меньшей сферой (в основном, < 200 пк) ограничена область, в которой открыто большинство экзопланет [99]. Для изучения такого широкого класса объектов необходимо знать их основные характеристики: массы, радиусы, эффективные температуры, элементный состав и возраст.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Задача, которая решается в процессе анализа выборки звезд или интересующего региона — определение класса космических тел, к которому относятся исследуемые компоненты звездной системы. Особенно неопределенность возникает, если они имеют низкую светимость или попадают в категорию невидимых спутников. В настоящее время уже не возникает сомнений, что, принципиально, можно ограничиться тремя основными классами космических тел, к которым относятся звезды, субзвезды и планеты [10]. Как правило, принимается во внимание, что минимальные массы каждого из классов являются максимальными массами следующего класса в приведенной иерархии. Однако пока что не всегда находят консенсус относительно критериев, по которым эти космические тела попадают в тот, или иной класс.

Основные идеи и аргументы определения минимальных масс космических тел. После открытия термоядерных источников звездной энергии [37], продолжительное время шла дискуссия о минимальных массах звезд — m_{\min}^* [10]. Так, значение, $m_{\min}^* \approx 0.04m_{\odot}$ было получено Голдрейчем и Линден-Беллом из условия минимальной длины волны, возникающей в неустойчивом однородно вращающемся диске [59]. И именно этому значению, отвечали ошибочно вычисленные массы компонентов кратной системы UV Кита (см., например, [2]), которая всегда считалась звездной системой.

Развитие идей Хойла [63], Фаулера и Хойла [56], Гаустеда [57], Сучкова и Щекинова [30], Лоу и Линден-Белла [75], Линден-Белла [77], Силка [101] о выборе минимальной массы звезд, как массе Джинса, соответствующей единичной оптической толщине, дали значение $m_{\min}^* = 0.005 \div 0.01m_{\odot}$. Эта идея наиболее последовательно была разработана в работе Риса [90], согласно которой можно принять, что минимальному значению $m_{\min}^* = 0.007m_{\odot}$ отвечает масса, больше которой гравитационная энергия превышает тепловую.

Кумар предложил считать самыми маломассивными звездами те, в недрах которых может проходить полный протон-протонный ($p-p$) цикл ядерных реакций [70], получив значения $m_{\min}^* = 0.07 \div 0.09m_{\odot}$, для водородного состава $X=0.62$ и $X=0.90$, соответственно. Позже Федорова и Блинников уточнили это значение, приняв солнечный состав в качестве элементного состава звезд: $m_{\min}^* = 0.08 \div 0.09m_{\odot}$ [32]. Они также получили, что увеличение доли тяжелых ядер, учет вращения и собственного магнитного поля может привести к увеличению предельной минимальной массы звезд на $20 \div 50\%$ [31]. Ниже значения $0.08m_{\odot}$ в недрах таких объектов происходит вырождение электронов, что ведет к существенному их влиянию на полное давление в «звездном» веществе.

Поскольку структура космических тел с массой меньше $0.08m_{\odot}$ существенно отличается от звездной, а термоядерные реакции уже не определяют их источники излучения, Тартер предложила назвать эти объекты коричневыми карликами [105], а Александров и Захожай — субзвездами, выделив в отдельный класс космических тел [1].

С нижним пределом коричневых карликов связывают минимальную массу, меньше которой в центральных областях не возникают физические условия для протекания никаких термоядерных реакций. У объектов с массой $< 0.08m_{\odot}$ таких реакций три, которые поддерживают горение водорода, лития и дейтерия. Для протекания последней из них необходимы самые низкие центральные температуры — $4 \cdot 10^5$ К, которые достигаются в центральных областях коричневых карликов, минимальные массы которых — $m_{\min_{ss}} = 0.012m_{\odot}$ (согласно Чабриэра и Бараффа [43]), $0.013m_{\odot}$ (Барроуз и др. [40]), $0.015m_{\odot}$ (Чабриэр и др. [44]). Разные значения рассчитанных минимальных масс коричневых карликов связаны с учетом их эволюционных особенностей.

В основу определения минимальных планетных масс $m_{\min_{pl}}$ закладывается результат действия процесса дифференциации их недр с последующим и обязательным условием образования ядра [1]. Предлагалось несколько вариантов расчета минимальных масс планет $m_{\min_{pl}}$. Александров и Захожай, в вышеупомянутой работе [1], анализируя скорость роста ядра и время полной дифференциации вещества в планете, полученные Кеонджяном и Мониным [21, 22], связали время полной эволюции планеты T_z с ее массой. Путем приравнивания T_z времени аккумуляции планет земного типа [27], было получено значение $m_{\min_{pl}} \sim 10^{-10}m_{\odot}$.

Этот результат совпадает по порядку величины с предельной массой космических тел, начиная с которой в недрах теряет устойчивость кристаллическая решетка вещества, из которой они состоят. Оценка массы может быть получена из равенства абсолютной величины гравитационной энергии космического тела и внутренней энергии кристаллической решетки вещества, из которого оно состоит, для типичных значений физических параметров недр таких планет. На порядок меньше были получены оценки Слютой и Воропаевым [29] для ледяных планет — $m_{\min_{pl}} \sim 10^{-11}m_{\odot}$.

Стерн и Левинсон [103] определяют нижний предел для планет как способность космического тела находится в гидростатическом равновесии, что должно проявляться в их сферической форме. Мерой отклонения от сферической формы может служить высота образующихся гор (типичная задача, которая решается в рамках общего планетоведения — см., например, [23]). В качестве параметров здесь выступают средняя плотность горных пород и их предел прочности, а также «форма горы». Средний предел прочности σ_n горных пород зависит не только от химического состава (не обязательно однородной) коры планет, а и от температуры, которая может существенно отличаться в зависимости от удаленности от центрального светила. Это приводит к тому, что σ_n может изменяться на порядки. Поэтому вычисления $m_{\min_{pl}}$ этим методом сопряжено с большой степенью неопределенности. При современной классификации планет [55], три типа имеют твердые поверхности: ледяные (Ic), силикатные (Si) и металлические (Me). Можно добиться согласия в определении $m_{\min_{pl}}$ этим методом для ледяных и силикатных планет, значения которых были приведены выше ($m_{\min_{pl}}(Ic) \sim 10^{-11}m_{\odot}$, $m_{\min_{pl}}(Si) \sim 10^{-10}m_{\odot}$). Тогда, исходя из средней плотности металлических гор и соответствующих им σ_n , оценка массы для металлических планет этим методом может быть следующей $m_{\min_{pl}}(Me) \sim 10^{-9}m_{\odot}$.

Астрофизические и космогонические критерии разделения на классы космических тел. Разделение космических тел на 3 класса, исходя только из их внутреннего строения, не может считаться достаточно удачным. Если ограничиться только этим критерием, в один класс космических тел следует отнести, к примеру, субзвезды и белые карлики (отличающиеся только элементарным составом), в то время как предыдущая их история является принципиально различной. С другой стороны, использование в качестве нижнего предела для субзвезд возможность горения дейтерия [60, 64, 100, 102], подразумевает, что планеты (массы которых следует принять меньше $0.012m_{\odot}$) могут образовываться как путем коагуляции в протопланетных дисках, так и путем самогравитации, исходя из результатов Риса [90]. Логичнее, чтобы космические объекты одного и того же класса имели сходное строение, одни и те же источники внутренней энергии и механизмы образования. В таком случае, следует отнести к субзвездам и космические тела с массами $(0.007 \div 0.012)m_{\odot}$, как это было предложено Захожаем [9]. В этом случае максимальные массы планет необходимо ограничить значением $0.007m_{\odot}$, а объекты с массой $(0.007 \div 0.012)m_{\odot}$ считать карликовыми субзвездами, которые образуются, как и более массивные субзвезды, и звезды в целом, — путем самогравитации, однако в их недрах не возникают условия для протекания ядерных реакций.

Вышеприведенные замечания привели к нижеследующим формулировкам определений выделенных трех классов космических тел [15].

Звезды — космические тела, образующиеся путем самогравитации и эволюционирующие за счет гравитационного сжатия и термоядерных реакций, включая полный протон-протонный цикл, в результате которых из ядер легких элементов синтезируются ядра более тяжелых. В процессе эволюции звезды проходят определенные стадии развития. Основными из них являются стадии протозвезд, звезд главной последовательности, гигантов и звездных остатков.

Субзвезды — космические тела, образующиеся путем самогравитации, содержащие вещество с различной степенью вырождения электронов и ионизации атомов, и эволюционирующие за счет запасов внутренней энергии.

Планеты — космические тела, образующиеся путем коагуляции, которая завершается вторичной аккрецией, находящиеся в конденсированном состоянии и эволюционирующие вследствие гравитационной дифференциации вещества.

3. ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕЗД

К основным характеристикам звезд относятся массы, радиусы, эффективные температуры, элементный состав и возраст. Т.е., это астрофизически независимые величины, характеризующие однозначно космические тела, находящиеся в гидростатическом равновесии.

Массы звезд, которые являются одновременно компонентами визуально-двойных и спектрально-двойных, как известно, вычисляются однозначно. До середины 90-х гг. такие вычисления производились исключительно из наземных наблюдений. К этому времени в пределах 10 пк были надежно вычислены прямыми методами массы 25 звезд, включая Солнце [8]. Оценку масс звезд можно выполнить и другими методами: по анализу орбитальных элементов спектрально-двойных, или по статистической зависимости «масса — спектр» для звезд определенных классов светимости. Обе эти возможности были реализованы Захожаем для оценок 247 масс ближайших звезд [8]. Анализируя кривые лучевых скоростей 16 компонентов спектрально-двойных систем, были предсказаны интервалы масс и звездные спектры для 14 компонентов [8, 11]. Существование этих 12 звезд и 2 субзвезд (спектральных классов M6V) в настоящее время подтверждено, и они внесены под номерами каталога Захожая [113] в базу данных Симбад: Zkh 7, 17, 57, 100, 146, 155, 156, 182, 206, 228, 237, 275, 336, 344.

Создание современных звездных интерферометров позволило использовать их для вычисления масс компонентов спектрально-двойных звезд. Интерферометр Марк III был использован для построения орбит 8 спектрально-двойных звезд: π And, θ Aqu, β Aug, ζ UMa, 93 Leo, 113 Her, β Tri, δ Tri и вычисления масс их компонентов (Хамел и др., 1995 г. [65]). Орбиты двойных звезд Аль-Ният (σ Sco) (Норт и др., 2007 г. [87]) и Дшубба (δ Sco) и массы их компонентов определены (Танго и др., 2009 г. [104]) с помощью интерферометра SUSI (Sydney University Stellar Interferometer). По результатам построенных орбит (используя этот же интерферометр) определены массы компонентов двойных систем Аль-Ният (σ Sco) (Норт и др., 2007 г. [87]), Дшубба (δ Sco) (Танго и др., 2009 г. [104]). Массы звезд 12 Per (Багнуоло и др., 2006 г. [33]), HD 193322 (Бруммелаар и др., 2011 [39]) и др. (всего около 10 двойных и кратных систем) — вычислены с использованием интерферометра CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy), полный перечень результатов которых содержится в базе данных [45].

Недавно Цветкович и Нинкович составили каталог масс визуально-двойных звезд [47, 48], положив в основу Вашингтонский каталог двойных звезд (WDS) [79] и каталог двойных и кратных систем Гиппаркоса [51, 108]. В каталоге [47, 48] фигурируют массы компонентов 18 визуально-двойных звезд, находящихся ближе 10 пк от Солнца. В каталоге Боруки и др. [38] содержатся массы 997 звезд

(сравнимые с солнечным значением), фигурирующие в программе наблюдений космического телескопа Кеплера.

Дальнейшие вычисления масс могут быть осуществлены после анализа данных Шестого каталога орбит визуально-двойных звезд (составная часть Вашингтонского каталога двойных звезд) [61], Девятого [89] и CHARA- [106] каталогов спектрально-двойных звезд, содержащих данные о суммарных и отношениях масс компонентов.

Радиусы звезд и эффективные температуры. Прямые измерения угловых диаметров звезд, при наличии их параллаксов, и светимости позволяют вычислить их линейные радиусы и эффективные температуры.

До 90-х гг. прямые измерения угловых диаметров осуществлялись с помощью звездных интерферометров, интерферометра интенсивностей, метода спекл-интерферометрии, анализа лунных покрытий, кривых блеска затменных переменных звезд. В радиусе 25 пк были измерены радиусы у 36 звезд (включая Солнце): у 9 гигантов и 23 главной последовательности [11]. Среди них число звезд, находящихся ближе 10 пк составляет всего 7 ярких звезд главной последовательности: Солнце, χ' Ориона (54 Ori), Сириус, Процион, Вега, Альтаир и Фомальгаут.

В последние 25 лет удалось создать серию звездных интерферометров с максимальной базой от десятков до сотен метров, приемная аппаратура которых позволяет детектировать объекты в видимом и ИК-диапазонах волн.

Наибольшую из них базу имеет оптический интерферометр NPOI-II (Naval Prototype Optical Interferometer) — $d = 437$ м [24, 66], первый образец которого был создан в начале 1990-х гг. С 2005 г. функционирует интерферометр CHARA, занимающий второе место по размеру максимальной базы ($d = 350$ м), с оптическим и ИК-приемниками излучения ($0.45 \div 2.4$ мкм) [5, 81]. Несложно показать, что угловому разрешению интерферометра NPOI-II на длине волны $\lambda = 0.5$ мкм доступны для измерения радиусы $R \geq 0.2R_{\odot}$ звезд, удаленных от Солнца до $r = 8$ пк; при $R \geq 0.25R_{\odot}$ — $r = 10$ пк; для $R \geq 0.1R_{\odot}$ (субзвезды) — $r = 4$ пк. Возможности интерферометра CHARA несколько меньше. При $\lambda = 0.5$ мкм для субзвезд с $R \geq 0.1R_{\odot}$ — $r = 3.3$ пк; для звезд с $R \geq 0.2R_{\odot}$ и $\geq 0.31R_{\odot}$ — $r = 6.5$ пк и 10 пк, соответственно. В ИК-диапазоне (CHARA) на длине волны $\lambda = 1.1$ мкм субзвезды еще остаются недоступными для разрешения; для звезд: при $R \geq 0.2R_{\odot}$ — $r = 3$ пк; при $R \geq 1R_{\odot}$ — $r = 7.3$ пк; при $R \geq 1.36R_{\odot}$ — $r = 10$ пк. На длине волны $\lambda = 2.2$ мкм ближе 10 пк можно разрешить звезды с радиусами больше $2.7R_{\odot}$. Последнему критерию удовлетворяют только Вега и гигант Zkh 206.

С помощью длиннобазовых оптических и ИК-интерферометров за 25 лет их работы проведены сотни измерений радиусов звезд главной последовательности и гигантов, среди которых есть и ближайšie звезды, угловые диаметры которых доступны для разрешения их базами. ИК-интерферометр IOTA (Infrared Optical Telescope Array, $d \leq 38$ м, $\lambda = 2.2$ мкм) был использован Диком, Ван Беллом и их коллегами для определения угловых диаметров 37 гигантов и сверхгигантов спектральных классов Sp = K0–M8 [54], 15 углеродных звезд [53], 74 красных гигантов [52], 69 гигантов и сверхгигантов Sp = B7–M6 [35] и 22 звезд типа Миры [36]. Вайгельт и др. с помощью интерферометра GI2T/REGAIN (Grand Interféromètre à Deux Télescopes, REGAIN — проект Моурарди, направленный на расширение астрофизических наблюдательных интерферометрических программ путем модернизации инструментов, которая включает использование ИК-диапазона, адаптивной оптики и добавления третьей апертуры [84], $d \leq 65$ м, $\lambda = 2 \div 2.2$ мкм) определили угловой диаметр красного гиганта R Cas [111]. Лейн, Боден и Кулкарни с помощью интерферометра PTI (Palomar Testbed Interferometer, $d \leq 110$ м, $\lambda = 1.6$ и 2.2 мкм) измерили угловые диаметры 5 близких к Солнцу звезд (GX And, GJ 105A, GJ 380, GJ 411, звезды Барнарда) [73]. Звездный интерферометр Mark III ($d \leq 31$ м, $\lambda = 451$ и 800 мкм) был использован Мозуркевичем, Армстронгом и Хиндсли для определения угловых диаметров 85 звезд [85]. VLT-интерферометром (VLTI: Very Large Telescope Interferometer, $d \leq 202$ м, $\lambda = 1.9 \div 2.4$ мкм; в астрометрическом режиме фигурирует как интерферометр PRIMA — Phase-Referenced Imaging and Microarcsecond Astrometry, $\lambda = 0.45 \div 1.2$ мкм [24]) Ричичи и Перчерон измерили угловые диаметры 191 гиганта и Сириуса А [94–96]. С помощью звездного интерферометра SUSI ($d \leq 80$ м, $\lambda = 0.7 \div 0.8$ мкм) были измерены угловые диаметры желтого субгиганта β Нуй (Норт и др. [86]), цефеиды 1 Car и Сириуса А (Девис и др. [49, 50]).

Сиарди и др. используя интерферометры CHARA и PTI определили угловой диаметр карлика λ Boo [46]. Другие результаты, полученные с помощью интерферометров CHARA, среди которых измеренные радиусы близких к Солнцу звезд (Альтаир [83], 61 Лебедя А и В [68], Регул [80] и др. — всего около 60 звезд), приведены в достаточно большом перечне литературных источников на сайте [45]. Состояние проблемы современных интерферометрических исследований в целом анализируется в монографии Лабейри, Липсона и Нисельсона [72].

Больше 150 угловых диаметров звезд измерено методом лунных покрытий. Так, Райтом и Фиерманом [112] в 1997 г. был составлен Каталог звездных диаметров, измеренных методом лунных покрытий.

Он содержит угловые диаметры 124 звезд, причем для каждой звезды приводятся результаты, опубликованные разными авторами. Риччи и его коллегами [91–93, 97, 98] в 1992–2001 гг. были измерены угловые диаметры больше чем 50 гигантов и супергигантов в Итальянской национальной обсерватории Тирго. В обсерватории Маунт Абу (Индия) были измерены угловые диаметры 15 М-гигантов (Тей и Чандрасекар, 2000 г. [107]) и 2-х переменных звезд типа Миры (U Agi и Z Sco) (Мондал и Чандрасекар, 2010 г. [82]).

Методом спекл-интерферометрии на 6-м БТА были измерены угловые диаметры Бетельгейзе и Арктура (Дудинов и др., 1979 [6], Кузьменков, 1985 [71]).

Элементный состав звезд обычно получают из анализа их металличности $[Me/H]$ (которая ранее имела обозначение $[Fe/H]$). Каталог металличностей близких к Солнцу 558 звезд (в основном, ближе 30 пк) впервые был составлен Захожаем и Шапаренко [18]. Эта работа основывалась на базе спектроскопических определений 1921 металличностей 1035 звезд, проведенных Карелом де Стробелом [42] и фотометрических $[Me/H]$, вычисленных по полученной ими связи с индексом металличности $\delta_{0.6}(U-B)$.

После выхода каталога фотометрических металличностей [18] выяснилось, что к ближайшим звездам следует отнести еще две звезды Gl 512.1 и Gl 137, имеющих параллаксы $\pi'' \geq 0.100''$ [58]. Таким образом, до 10 пк определены спектроскопические и фотометрические металличности 55 звезд включая Солнце. В основном это F-, G-, K-карлики. Исключение составляют три M-карлика (Zkh 69 (M0V), Zkh 71 (M1Ve), Zkh 91A (M1Ve)), Beta (Zkh 277, A0V) и Альтаир (Zkh 297, A7V). Остается еще примерно такое же количество F, G, K-звезд в области 10 пк с не вычисленными металличностями (всего 45 со спектральными классами F — 4, G — 10, K — 31).

Металличности звезд, расположенных ближе 15 пк от Солнца, содержатся в каталоге Лака и Хейтера [76]. Приведены в виде $[Me/H]$ данные о содержании 28 химических элементов для 114 звезд. Новые данные металличностей близких звезд также содержатся в каталоге спектроскопических параметров 1040 F-, G-, K-звезд Валенти и Фишера [109, 110]. В этом каталоге кроме металличностей содержатся данные об эффективных температурах и возрастах звезд.

Оценки возраста звезд, субзвезд и их систем. Возраст — наиболее проблематичная для определения характеристика космических тел. Не существует каталогов возрастов ближайших звезд. Ниже приводятся отдельные идеи его оценок для звезд и субзвезд исходя из имеющейся в литературе о них информации.

Современный состав популяции окосолнечного окружения включает звезды различного элементного состава, находящиеся на различных эволюционных стадиях. Класс светимости и металличность позволяют оценить принадлежность звезд к определенному населению Галактики. Массы звезд несут информацию о возрасте кратных систем.

Самые старые звезды — субкарлики, являющиеся представителями гало Галактики. В десятипарсековом окружении их доленое содержание составляет $\sim 4\%$, а возраст соответствует возрасту гало, т.е. ~ 12 млрд. лет. Спектры субкарликов определены по спектроскопическому анализу (т.е. это наиболее достоверно установленные субкарлики) в системах Gl 53A,B; Gl 54; Gl 275.2A; Gl 438; Gl 445; Gl 643A,B; Gl 745A,B. Обращает внимание, что большинство из них входят в двойные системы. Возможно, компоненты системы Gl 1230A,B также являются субкарликами. Gl 54 является источником ИК-излучения [20]. К старым звездным остаткам следует отнести белый карлик Gl 275.2B, входящий в двойную систему с субкарликом. Возможно, белый карлик Gl 280B также является старым звездным остатком, поскольку один из компонентов тройной системы, в которую он входит, заподозрен как субкарлик (третьим компонентом является субгигант). В таком случае возраст такого белого карлика должен быть соизмерим со временем остывания его недр [3].

Звезды с пониженным содержанием металлов, $[Me/H] < 0$, по результатам Захожая и Шапаренко [19], составляют 31%. Нет уверенности, что все они являются старыми звездами, в силу существования проблемы перемешивания дозвездного вещества. Однако, как кандидаты в более старые звезды, чем Солнце, они рассматриваться могут.

Основная доля звезд имеют схожий с солнечным элементный состав, $[Me/H] \approx 0$ [19]. На их долю приходится 68% звезд. Это звезды главной последовательности и их компоненты, если эти звезды принадлежат кратным системам.

К наиболее молодым представителям солнечного окружения следует отнести звезды с повышенным содержанием металлов. 0.4% звезд в каталоге металличностей Захожая и Шапаренко [19] имеют $[Me/H] > 0$. К молодым объектам следует отнести субзвезды, наблюдаемые в видимом диапазоне, звезды с протопланетными дисками и короткопериодическими орбитами водородно-гелиевых планет. Исходя из положения Солнца в Галактике, все эти объекты являются элементами эволюционного процесса, который идет в Местной звездной системе (МЗС).

Возраст звезд с водородно-гелиевыми планетами. Условия для формирования звезд с протопланетными дисками возникают в протозвездах, момент количества движения (МКД) которых попадает

в определенный интервал [26, 28]. У протозвезд с меньшим МКД формируются одиночные звезды, а с большим — кратные системы. Предельный случай для границы образования планетных систем и кратных звездно-субзвездных систем, был получен Захожаем в виде зависимости «большая полуось орбиты планеты — ее масса» ($\lg A = C_1 - C_2 \lg m_{\text{pl}}$, $C_i = \text{const}$) из предположения, что субзвезды образуются, как и звезды, путем самогравитации из протозвезд с избыточным моментом [12]. Полученная зависимость $\lg A = C_1 - C_2 \lg m_{\text{pl}}$ разделила построенную для планет Солнечной системы и экзопланет диаграмму $\lg A - \lg m_{\text{pl}}$ на две области. Первая область содержит старые планеты, которые вобрали в себя практически все вещество протопланетного диска в процессе своего формирования. Во второй области ожидаются молодые планеты, вращающиеся вокруг центральных тел вместе с еще оставшимся веществом протопланетного диска. Интересно отметить, что все планеты Солнечной системы, включая и те, что являются спутниками больших планет, находятся в первой зоне. Там же находится небольшое число экзопланет, включая невидимые спутники с планетными массами. Подавляющее большинство экзопланет находится во второй зоне, что согласуется с относительно недавним их образованием при формировании МЗС и распределением металличности в окрестностях Солнца [19].

Протопланетные диски легче наблюдать, чем планеты у звезд [34]. Их спектр излучения, согласно закону смещения Вина, находится в ИК-диапазоне между 3 мкм и 1 мм, для типичных температур — от 1000 К до 30 К. Типичный радиус диска у звезд — $\approx 10^2 \div 10^3$ а.е. [34, 88], у субзвезд — ≈ 10 а.е. [15], масса — $\sim 10^{-2}$ массы центрального объекта (звезды или субзвезды) [74]. Как протопланетные диски, они сохраняются в течение $1 \div 30$ млн. лет [88], что не противоречит наблюдаемому более сотни протопланетным дискам вокруг молодых звезд главной последовательности с возрастом $10^6 \div 10^7$ лет и звезд типа Т Тау в пределах 50 пк от Солнца [67]. Анализ фотометрических данных об открытых более 30 протопланетных дисков у субзвезд показал, что они имеют возраст около 5 млн. лет [74].

Оценки возраста систем, содержащих звезды, ушедшие с главной последовательности. По самой массивной звезде главной последовательности в звездной системе можно получить верхнюю оценку возраста системы. Нижняя оценка возраста системы может быть получена, если она содержит гигант, субгигант или белый карлик. По наличию гиганта или субгиганта возраст системы получается непосредственно с точностью до 0.1 времени его жизни на главной последовательности. При известной массе белого карлика в системе, можно получить нижнюю оценку ее возраста. По зависимости «масса звезд нулевого возраста — масса звездного остатка» [10] оценивается его начальная масса (на главной последовательности), а по зависимости «время горения водорода в ядре звезды — масса звезды нулевого возраста» [7] — время пребывания звезды на стадии главной последовательности. С учетом поправки на время пребывания звезды на стадии гиганта представляется возможным провести нижнюю оценку возраста системы.

Согласно каталога Захожая [113], в области ближе 10 пк содержится 11 кратных систем, которые содержат компоненты, ушедшие с главной последовательности. Их номера следующие: Zkh 58–60, Zkh 62–63, Zkh 91–92, Zkh 104–105, Zkh 106–108, Zkh 109–110, Zkh 131–132, Zkh 205–206, Zkh 230–231, Zkh 264–265, Zkh 291–292. Надежность, вычисленных масс и спектров позволили оценить возрасты трех систем: Сириуса, Прокциона и ζ Геркулеса.

Система Сириуса. Верхняя оценка времени его жизни на главной последовательности как звезды с массой $2.17m_{\odot}$ — 880 млн. лет. Следует ожидать, что В-компонент системы — белый карлик с массой $0.99m_{\odot}$, образовался из звезды с начальной массой $4.6m_{\odot}$. Эта звезда превратилась в белый карлик, когда ее возраст достиг 140 млн. лет. Таким образом, возраст системы заключен в пределах $140 < t_c < 880$ млн. лет.

Тройная система Прокциона. Поскольку Прокцион, имеющий массу $1.78m_{\odot}$, проходит стадию субгиганта, его возраст ограничен 1.7 млрд. лет. В системе имеется белый карлик с массой $0.66m_{\odot}$, который дает нижнюю оценку возраста 2.1 млрд. лет. Если масса белого карлика занижена, возраст системы может быть уменьшен до 1.7 млрд. лет.

Двойная система ζ Геркулеса. А-компонент — субгигант с массой $1.18m_{\odot}$. Его возраст ограничен 6.3 млрд. лет. Этой оценке не противоречат данные о В-компоненте — белом карлике с массой $0.76m_{\odot}$. Этой массе соответствует масса звезды нулевого возраста $2.4m_{\odot}$, которая «попала» на стадию звездного остатка, когда она достигла возраста 750 млн. лет.

Оценка возраста поздних М-карликов. Поздние М-карлики имеют эффективные температуры больше 2400 К и спектры более поздние чем М 5.5 [69, 78]. Эти объекты являются разновидностью субзвезд, эволюция которых связана, на основной стадии развития, с их остыванием. Следовательно, существует возможность проведения оценок возраста поздних М-карликов по зависимости «эффективная температура — возраст». Эту зависимость можно получить из результатов численного моделирования эволюции субзвезд [25]. Анализ показал, что в пределах 10 пк от Солнца существует 43 кратные системы, в состав которых входят 72 компоненты, включая 48 поздних М-карликов, возраст которых ограничен сверху 630 млн. лет.

Возраст субзвезд с окружающими их протопланетными дисками. Распределение энергии в спектрах (РЭС) таких систем зависит от темпа остывания субзвезд, имеющих определенные массы и элементный состав. Как следует из расчетов РЭС, проведенных для таких систем в диапазоне длин волн λ от видимого до миллиметрового диапазона [17], диски проявляются в виде ИК-избытков ($\lambda/10$ мкм). Наклон РЭС в этой области является чувствительным к значению возрасту таких систем [41].

4. ВЫВОДЫ

1. При классификации космических тел их масса является определяющей характеристикой, а образование — определяющим процессом. Элементный состав может влиять на значение граничных масс, по которым разделяются космические тела на три основные классы: звезды, субзвезды и планеты.

2. Основными (независимыми) характеристиками космических тел являются массы, радиусы, эффективные температуры, элементный состав и возраст. Современные представления о количестве звезд, у которых определены основные характеристики прямыми методами, остаются базироваться, в основном, на результатах, полученных до 1990 г. Данные, полученные в 1990–2000 гг. о таких характеристиках для ближайших звезд и субзвезд, в достаточной мере не проанализированы и не обобщены.

3. Вычисленные орбитальные характеристики двойных звезд по результатам миссии HIPPARCOS и наземным наблюдениям в постгиппарковский период требуют тщательного анализа для создания на их базе нового каталога масс звезд.

4. После создания широкой сети длинноволновых звездных интерферометров, позволяющих определять угловые диаметры звезд в оптическом и ИК-диапазонах, и наличия современных каталогов параллаксов звезд и субзвезд сложились условия для их анализа и обобщения. Создание на их базе каталога радиусов и эффективных температур звезд позволит существенно обогатить наблюдательный материал и представления о космических телах в целом ближайшего солнечного окружения.

5. Наблюдательные данные об элементном составе звезд и субзвезд продолжают оставаться ограниченными. Требуются дальнейшие измерения спектроскопических металличностей, новые методы и их реализация для определений в массовом порядке, расширении наблюдательного диапазона спектральных классов, особенно в сторону красных карликов, долевого содержания которых и в окрестностях Солнца, и в Галактике в целом, самое большое.

6. Возраст звезд и субзвезд — самое слабое звено среди перечня основных характеристик, требующихся для определения. До настоящего времени еще не разработана последовательная методика его определения. Существует необходимость в новых идеях и подходах.

1. Александров Ю.В., Захожай В.А. Что такое планеты // *Астрон. вестн.* — 1980. — **14**, № 3. — С. 129–132.
2. Аллен К.У. *Астрофизические величины.* — Пер. с англ., 2-е изд., переработ. и доп. — М.: Мир. — 1977. — 448 с.
3. Бисноватый-Коган Г.С. *Физические вопросы теории звездной эволюции.* — М.: Наука, 1989. — 488 с.
4. Бочкарев Н.Г. *Местная межзвездная среда.* — М.: Наука, 1990. — 192 с.
5. Глухов М.А., Шишаков К.В. *Современные оптические телескопы и интерферометры (Часть 2).* — Ижевск: ИГТУ, 2007. — 62 с.
6. Дудинов В.Н., Ерохин В.Н., Кузьменков С.Г. и др. Измерения угловых размеров на БТА // *Доклады АН СССР. Серия "А".* — 1979. — № 7. — С. 550–554.
7. Захожай В.А. Статистические свойства звезд и кратных систем в области 10 пк // *Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды.* — Свердловск: УрГУ, 1990. — С. 44–54.
8. Захожай В.А. Массы ближайших звезд // *Кинем. и физ. неб. тел.* — 1994. — **10**, № 2. — С. 68–73.
9. Захожай В. А. Субзвезды — новый класс космических тел // *Материалы международной междисциплинарной научно-практической конференции «Современные проблемы науки и образования», ч. 1.* — Керчь, 27 июня — 4 июля 2001 г. — Харьков, 2001. — С. 32–33.
10. Захожай В.А. Космические тела Галактики: классификация и эволюция // *Вісник Астрон. школи.* — 2002. — **3**, № 2. — С. 81–99.
11. Захожай В.А. Радиусы и спектры ближайших звезд // *Кинем. и физ. неб. тел.* — 2002. — **18**, № 6. — С. 535–552.
12. Захожай В.А. Проблема существования планетных систем. II. Ожидаемые свойства и первые результаты поиска // *Вісник Астрон. школи.* — 2005. — **4**, № 2. — С. 55–72.
13. Захожай В.А. *Статистические закономерности в звездных системах: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук.* — Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2007. — 317 с.
14. Захожай В.А., Бабенко М.А. Околосолнечное звездно-субзвездное окружение. I. Местоположение в Галактике и каталоги // *Вісник Астрон. школи.* — 2012. — **8**, № 1. — С. 13–21.
15. Захожай В.А., Гнедин Ю.Н., Шахт Н.А. Вклад пулковской и харьковской астрономических школ в проблему поисков экзопланет и маломассивных темных спутников у звезд // *Астрофизика.* — 2010. — **53**, № 4. — С. 645–664.

16. *Захожай В.А., Захожай О.В.* Диски вокруг ближайших звезд и субзвезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 2010. — **26**, № 1. — С. 3–30.
17. *Захожай В.А., Захожай О.В., Видьмаченко А.П.* Особенности моделирования тонких плоских дисков с центральными объектами в зависимости от их пространственного расположения // Кинем. и физ. неб. тел. — 2011. — **27**, № 3. — С. 54–74.
18. *Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф.* Металличности близких звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1996. — **12**, № 2. — С. 20–29.
19. *Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф.* Функция распределения металличности близких звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1997. — **13**, № 6. — С. 63–66.
20. *Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф., Васильев В.П. и др.* ИК-источники в окрестностях Солнца // Кинем. и физ. неб. тел. — 1994. — **10**, № 2. — С. 74–85.
21. *Кеонджян В.П., Мониин А.С.* Модель гравитационной дифференциации недр планет // Докл.АН СССР. — 1975. — **220**, № 4. — С. 822–824.
22. *Кеонджян В.П., Мониин А.С.* Расчеты эволюции недр планеты // Изв. АН СССР. — 1976. — № 4. — С. 3–15.
23. *Кузьменков С.Г., Сокол И.В.* Солнечная система: 36 задач: Навч. посіб. — К.: Вища школа, 2007. — 167 с.
24. *Пинигин Г.И.* Телескопы наземной оптической астрометрии. Учебное пособие. — Николаев: Атолл, 2000. — 104 с.
25. *Писаренко А.И., Яценко А.А., Захожай В.А.* Модель эволюции субзвездных объектов // Астрон. журн. — 2007. — **84**, № 8. — С. 675–684.
26. *Рузмайкина Т.В.* Угловой момент протозвезд, порождающих протопланетные диски // Письма в Астрон. журн. — 1981. — **7**. — С. 188–190.
27. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969. — 244 с.
28. *Сафронов В.С., Рузмайкина Т.К.* О переносе момента количества движения и аккумуляции твердых тел в солнечной туманности / В кн.: Протозвезды и планеты, т.2 / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1982. — С. 623–644.
29. *Слюта Е.Н., Воропаев С.А.* Малые и планетные тела Солнечной системы: критическая масса ледяных тел // Астрон. вестн. — 1993. — **27**, № 1. — С. 71–82.
30. *Сучков А.А., Шекинов Ю.А.* Замечание о звездообразовании путем гравитационной фрагментации // Астрон. журн. — 1975. — **52**. — С. 662–664.
31. *Федорова А.В.* Эволюция звезд очень малых масс в случае практического твердотельного вращения и дифференциального вращения на стадии гравитационного сжатия к главной последовательности // Научн. информ. — 1976. — Вып. 46. — С. 3–21.
32. *Федорова А.В., Блинников С.И.* Влияние аккреции и вращения на минимальную массу звезды главной последовательности // Научн. информ. — 1978. — Вып. 42. — С. 75–94.
33. *Bagnuolo W.G., Taylor S.F., McAlister H.A., et al.* First Results from the CHARA Array. V. Binary Star Astrometry: The Case of 12 Persei // Astron. J. — 2006. — **131**, Is. 5. — P. 2695–2699.
34. *Beckwith S.V.W., Sargent A.I.* Circumstellar disks and the search for neighboring planetary system // Nature. — 1996. — **383**, № 6596. — P. 139–144.
35. *Belle G.T., Lane B.F., Thompson R.R., et al.* Radii and Effective Temperatures for G, K, and M Giants and Supergiants // Astron. J. — 1999. — **117**, Is. 1. — P. 521–533.
36. *Belle G.T., Thompson R.R., Creech-Eakman M.J.* Angular Size Measurements of Mira Variable Stars at 2.2 Microns. II // Astron. J. — 2002. — **124**. — P. 1706–1715.
37. *Bethe H.A.* Energy Production in Star // Phys. Rev. — 1939. — **55**. — С. 434–456.
38. *Borucki W.J., et al.* Kepler Host Star Characteristics. — 2011. — URL: http://archdev.stsci.edu/kepler/host_stars.html.
39. *Brummelaar T.A., O'Brien D.P., Mason B.D., et al.* An Interferometric and Spectroscopic Analysis of the Multiple Star System HD 193322 // Astron. J. — 2011. — **142**, Is. 1. — P. 21–62.
40. *Burrows A, Hubbard W.B., Lunine J.I., et al.* The Theory of Brown Dwarfs and Extrasolar Giant Planets // Rev. Mod. Phys. — 2001. — № 73. — P. 719–765.
41. *Cassen P., Guillot T., Quirrenbach A.* Extrasolar Planets / eds. D. Queloz, S. Udry, M. Mayor, W. Benz. — Springer, 2006. — 454 p.
42. *Cayrel de Strobel G., Bentolila C., Hayck B., Duquennoy A.A.* Catalogue of [Fe/H] determinations, 1984 edition // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. — 1985. — **59**, № 1. — P. 145–186.
43. *Chabrier G., Baraffe I.* Theory of Low-Mass Stars and Substellar Objects // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2000. — **38**. — P. 337–372.
44. *Chabrier G., Baraffe I., Allard F., et al.* Deuterium burning in substellar objects // Astrophys. J. — 2000. — № 542. — P. 119–122.
45. CHARA Scientific and Technical Publications. — URL: <http://www.chara.gsu.edu/CHARA/techreport.php>.
46. *Ciardi D.R., van Belle G.T., Boden A.F., et al.* The Angular Diameter of λ Boötis // Astrophys. J. — 2007. — **659**, Is. 2. — P. 1623–1628.

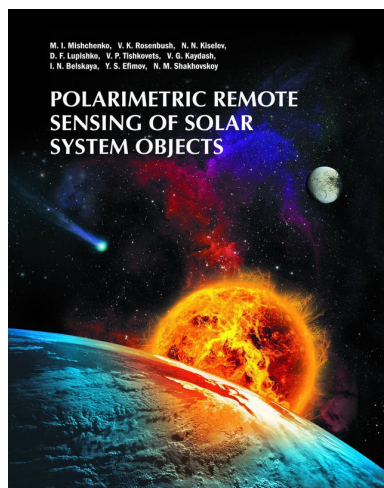
47. *Cvetkovic Z., Ninkovic S.* Masses of visual binaries. — 2010. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/other/Ser/180.71/binaries>.
48. *Cvetkovic Z., Ninkovic S.* On the Component Masses of Visual Binaries // *Serbian Astron. J.* — 2010. — № 180. — P. 71–80.
49. *Davis J., Ireland M.J., North J.R., et al.* The Angular Diameter and Fundamental Parameters of Sirius A // *Publ. Astron. Soc. Au.* — 2011. — **28**, Is. 1. — P. 58–65.
50. *Davis J., Jacob A.P., Robertson J.G., et al.* Observations of the pulsation of the Cepheid I Car with the Sydney University Stellar Interferometer // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — **394**, Is. 3. — P. 1620–1630.
51. Double and Multiples: Component solutions — COMP. — 1997. — URL: http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=I/239/h_dm_com.
52. *Dyck H.M., Benson J.A., van Belle G.T.* Radii and Effective Temperatures for K and M Giants and Supergiants // *Astron. J.* — 1996. — **111**. — P. 1705–1712.
53. *Dyck H.M., van Belle G.T., Benson J.A.* Angular Diameters and Effective Temperatures of Carbon Stars // *Astron. J.* — 1996. — **112**. — P. 294–300.
54. *Dyck H.M., van Belle G.T., Thompson R.R.* Radii and Effective Temperatures for K and M Giants and Supergiants. II // *Astron. J.* — 1998. — **116**, Is. 2. — P. 981–986.
55. *Evsukov N.N., Zakhochaj V.A., Psaryov V.A.* Planetary systems of the Galaxy // *Odessa Astron. Publ.* — 2001. — **14**. — P. 205–207.
56. *Fowler A., Hoyle F.* Star formation // *Roy. Obs. Bull.* — 1963. — **67**. — P. 301–320.
57. *Gaustad J.* The opacity of diffuse cosmic matter and the early of star formation // *Astrophys. J.* — 1963. — **138**, № 4. — P. 1050–1070.
58. *Gliese W., Jahreiss H.* Catalogue of nearby stars. — 3-rd Edition. Data Centre CD-ROM. — 1993. — *Sel. Astron. Cat.* — **1**.
59. *Goldreich P., Lynden-Bell D.* Gravitational stability of uniformly rotating disk // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1965. — **130**, № 2–3. — P. 97–124.
60. *Grossman A.S., Graboske H.C.* Evolution of Low-Mass Stars. Minimum Mass for the Deuterium Main Sequence // *Astrophys. J.* — 1973. — **180**. — P. 195–198.
61. *Hartkopf W.I., Mason B.D.* Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars. — 2011. — URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
62. *Heiter U.* Abundances for the 15pc sample. — 2005. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/AJ/129/1063/table5>.
63. *Hoyle F.* On the fragmentation of gas clouds into galaxies and stars // *Astrophys. J.* — 1953. — **118**, № 3. — P. 512–528.
64. *Hubbard W.B., Lunine J.I., Saumon D., et al.* Ignition of Deuterium in Low-Mass Brown Dwarfs // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 1994. — **185**. — P. 9006–9012.
65. *Hummel C.A., Armstrong J.T., Buscher D.F., et al.* Orbits of Small Angular Scale Binaries Resolved with the Mark III Interferometer // *Astron. J.* — 1995. — **110**. — P. 376–390.
66. *Hutter D.J., Elias N.M., Hummel C.A.* First Astrometric Results from the NPOI // *Amer. Astron. Soc., 191st AAS Meet., #16.02; Bull. Amer. Astron. Soc.* — 1997. — **29**. — P. 1234.
67. *Kalas P.* Links between dust disks and exoplanets // *Earth, Moon and Plan.* — 1998. — **81**, № 1. — P. 27–34.
68. *Kervella P., et al.* The Radii of the Nearby K5V and K7V stars 61 Cyg A & B — CHARA/FLUOR Interferometry and CESAM2k Modeling // *Astron. Astrophys.* — 2008. — **488**. — P. 667–674.
69. *Kirkpatrick J.D., 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. 802–833.
70. *Kumar S.S.* The structure of stars of very low mass // *Astrophys. J.* — 1963. — **137**, № 4. — P. 1121–1125.
71. *Kuzmenkov S.G.* Potential Accuracy of Speckle Interferometric Measurements — Angular Diameters of Stars // *Sov. Astron.* — 1985. — **29**, № 6. — P. 699–703.
72. *Labeyrie A., Lipson S.G., Niselson P.* An introduction to optical stellar interferometry. — Cambridge: Univers. Press, 2006. — 325 p.
73. *Lane B.F., Boden A.F., Kulkarni S.R.* Interferometric Measurement of the Angular Sizes of Dwarf Stars In The Spectral Range K3–M4 // *Astrophys. J.* — 2001. — **551**. — P. 81–83.
74. *Liu M.C., Najita J., Tokunaga A.T.* A Survey for Circumstellar Disks around Young Substellar Objects // *Astrophys. J.* — 2003. — **585**. — P. L372–L391.
75. *Low C., Lynden-Bell D.* The minimum Jeans mass or when fragmentation must stop // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1976. — **176**, № 2. — P. 367–390.
76. *Luck R.E., Heiter U.* Stars Within 15 Parsecs: Abundances for A Northern Sample // *Astron. J.* — 2005. — **129**. — P. 1063–1083.
77. *Lynden-Bell D.* Dynamical Structure and Evolution of Stellar Systems. — Saas Fee: Geneva Observ. — 1987. — 317 p.
78. *Martin E.L., et al.* Keck HIRES spectra of the brown dwarf DENIS-P J1228.2-1547 // *Astron. Astrophys. Let.* — 1997. — **327**. — L29-L32.

79. *Mason B.D., Wycoff G.L., Hartkopf W.I.* The Washington Double Star Catalog . — 2008. — URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds>.
80. *McAlister H.A., et al.* First Results from the CHARA Array. I. An Interferometric and Spectroscopic Study of the Fast Rotator α Leonis (Regulus) // *Astrophys. J.* — 2005. — **628**. — P. 439–452.
81. *McAlister H.A.* The CHARA Array on Mt. Wilson: An Overview // *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space.* — Proc. ASP Conf. — 1999. — **194**. — P. 241–201.
82. *Mondal S., Chandrasekhar T.* Angular Diameter Measurements of Evolved Variables by Lunar Occultations at 2.2 and 3.8 Microns // *Astron. J.* — 2010. — **130**, Is. 2. — P. 842–852.
83. *Monnier J.D., et al.* Imaging the Surface of Altair // *Science.* — 2007. — **317**. — P. 342.
84. *Mourard D.* Spectrally Resolved Interferometry with the GI2T/REGAIN Interferometer // *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space.* — Proc. ASP Conf., **194**. — 1999. — Ed.: S. Unwin & R. Stachnik. — ISBN: 1-58381-020-X. — P. 95–100.
85. *Mozurkewich D., Armstrong J.T., Hindsley R.B.* Angular Diameters of Stars from the Mark III Optical Interferometer // *Astron. J.* — 2003. — **126**. — P. 2502–2520.
86. *North J.R., Davis J., Bedding T.R.* The radius and mass of the subgiant star β Hyi from interferometry and asteroseismology // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Lett.* — 2007. — **380**, Is. 1. — P. L80–L83.
87. *North J.R., Davis J., Tuthill P.G., et al.* Orbital solution and fundamental parameters of σ Scorpii // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — **380**, Is. 3. — P. 1276–1284.
88. *Perryman M.A.C.* Extra-solar planets, review article // *Prepr. Rep. Prog. Phys.* — 2000, 31 May. — P. 1–60.
89. *Pourbaix D., Tokovinin A.A., Batten A.H., et al.* SB9: 9th Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits. — 2009. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=B/sb9>.
90. *Rees M.J.* Opacity-limited hierarchical fragmentation and the masses of protostars // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1976. — **176**, № 3. — P. 483–486.
91. *Richichi A., Calamai G.* Infrared high angular resolution measurements of stellar sources. V. Angular diameters of ten late-type stars // *Astron. Astrophys.* — 2001. — **380**. — P. 526–532.
92. *Richichi A., di Giacomo A., Lisi F., et al.* Accurate angular diameter and effective temperature of seven late-type stars // *Astron. Astrophys.* — 1992. — **265**, № 2. — P. 535–546.
93. *Richichi A., Lisi F., di Giacomo A.* Lunar Occultations of Southern Near Infrared Stellar Sources // *Astron. Astrophys.* — 1992. — **254**, № 1. — P. 149–166.
94. *Richichi A., Percheron I.* ESO VLTI Calibrators Program. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/434/1201/table4>.
95. *Richichi A., Percheron I.* First results from the ESO VLTI calibrators program // *Astron. Astrophys.* — 2005. — **434**. — P. 1201–1209.
96. *Richichi A., Percheron I., Davis J.* A list of bright interferometric calibrators measured at the European Southern Observatory Very Large Telescope Interferometer // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 2009. — **399**, Is. 1. — P. 399–409.
97. *Richichi A., Ragland S., Fabbroni L.* Infrared high angular resolution measurements of stellar sources. III. Angular diameters and effective temperatures of eleven late-type giants // *Astron. Astrophys.* — 1998. — **330**. — P. 578–584.
98. *Richichi A., Ragland S., Stecklum B., et al.* Infrared high angular resolution measurements of stellar sources. IV. Angular diameters and effective temperatures of fifteen late-type stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — **338**. — P. 527–534.
99. *Schneider J.* The Extrasolar Planets Encyclopaedia. — URL: <http://exoplanet.eu> — Update: 12 January 2012.
100. *Shu F.H., Adams F.C., Lizano S.* Star Formation in Molecular Clouds, p. Observation and Theory // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1987. — **25**. — P. 23–81.
101. *Silk J.* On the fragmentation of cosmic gas clouds. II. Opacity-limited starformation // *Astrophys. J.* — 1977. — **214**, № 1, p.1. — P. 152–160.
102. *Stahler S.W.* Deuterium and the stellar birthline // *Astrophys. J.* — 1988. — **332**. — P. 804–825.
103. *Stern S.A., Levinson H.F.* Regarding the Criteria for Planethood and Proposed. Planetary Classification Schemes // *Highlights Astron.* — 2002. — **12**. — P. 205–213.
104. *Tango W.J., Davis J., Jacob A.P., et al.* A new determination of the orbit and masses of the Be binary system δ Scorpii // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 2009. — **396**, Is. 2. — P. 842–848.
105. *Tarter J.* Interaction of gas and galaxies within galaxy clusters — Ph.D. thesis. — Univ. Calif., Berkeley. — 1975. — 281 p.
106. *Taylor S.F., McAlister H.A., Harvin J.A.* The CHARA Catalog of Orbital Elements of Spectroscopic Binary Stars. — 2003. — URL: <http://www.chara.gsu.edu/~taylor/catalogpub/catalogpub.html>.
107. *Tej A., Chandrasekhar T.* Angular diameter and effective temperature of a sample of 15M giants at 2.2 μ m from lunar occultation observations // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 2010. — **317**, Is. 3. — P. 687–696.
108. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Vol. 10. Double and Multiple Systems Annex Solar System Objects / Scientific Coordination H. Schrijver, W. O'Mullane. — Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Div., 1997. — 561 p.
109. *Valenti J.A., Fischer D.A.* Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K Dwarfs from Keck, Lick, and AAT Planet Search Programs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2005. — **159**. — P. 141–166.

110. Valenti J.A., Fischer D.A. Spectroscopic properties of cool stars. — 2005. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/ApJS/159/141/stars>
111. Weigelta G., Mourard D., Abe L., et al. GI2T/REGAIN spectro-interferometry with a new infrared beam combiner // Proc. SPIE. — 2000. — **4006**. — P. 617–626.
112. White N.M., Feigman B.H. A Catalog of Stellar Angular Diameters Measured by Lunar Occultation // Astron. J. — 1987. — **94**. — P. 751–770.
113. Zakhochaj V.A. Catalogue of stars within ten parsecs of the Sun. — 1996. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=V/101>.
114. Zakhochaj V.A. Evidence of recent changes in the local Galactic IMF of stars and substars // Astrophys. Space Sci. — 2008. — **315**, № 1–4. — P. 13–19.

Поступила в редакцію 16.08.2012

НОВІ ВИДАННЯ



Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N., Lupishko D.F., Tishkovets V.P., Kaydash V.G., Belskaya I.N., Efimov Y.S., Shakhovskoy N.M. Polarimetric remote sensing of Solar System objects. — K.: Akadempriodyka, 2010. — 291 p.

Книга містить основні фізичні принципи і практичні методи поляриметричного дистанційного зондування об'єктів Сонячної системи та підсумовує їхнє застосування в геофізиці й планетній астрофізиці. В першому розділі книги представлено завершену строгу теорію розсіяння електромагнітних хвиль дисперсними середовищами на основі рівнянь Максвелла й описано сучасні фізично обґрунтовані методи теоретичного моделювання. В другому розділі представлено теоретичний аналіз поляриметрії як методу дистанційного зондування, а також описано теоретичні основи і принципи вимірювання поляризованого випромінювання, ґрунтуючись на яких створено унікальну прецизійну апаратуру для спостережень. В третьому та четвертому розділах проведено аналіз великого обсягу наземних та аерокосмічних спостережень, на основі якого визначено оптичні та фізичні характеристики поверхонь і атмосфер багатьох тіл Сонячної системи (Земля та інші планети, супутники планет, кільця Сатурна, астероїди, транснептунові об'єкти й комети) та відкрито цілий ряд нових явищ і ефектів.

Призначено для науковців, викладачів, аспірантів та студентів, які спеціалізуються в дистанційному зондуванні, астрофізиці, атмосферній фізиці, оптиці дисперсних і випадкових середовищ та оптичній діагностиці частинок.

Зміст

1. Electromagnetic scattering by discrete random media: unified microphysical theory
2. Theoretical basis, methods, and hardware implementations of polarimetric remote sensing
3. Photopolarimetric observations of atmosphereless Solar System bodies and planets and their interpretation