

УДК 524.6:524.318

Роль субзвезд в эволюции Галактики

В.А. Захожай

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета

Приводится краткая история предсказания субзвезд и их определения. Обсуждается вероятность встречаемости их в Галактике. Анализируются модели внутреннего строения субзвезд, проблемы их обнаружения и результаты поиска. Обсуждается метод описания эволюции Галактики графами, позволяющий учитывать влияние субзвезд на распределение массы в Галактике.

ЗНАЧЕННЯ СУБЗИРОК У ЕВОЛЮЦІЇ ГАЛАКТИКИ, Захожай В.А. -- Наведена коротка історія передбачення субзірок і їх визначення. Обговорюється ймовірність зустрічі їх у Галактики. Аналізуються моделі внутрішньої будови субзірок, проблеми їх виявлення та результати пошуку. Обговорюється метод опису еволюції Галактики графами, який дозволяє урахувувати вплив субзірок на розподіл маси в Галактиці.

SIGNIFICANCE OF SUBSTARS IN GALAXY EVOLUTION, by Zakhzhaj V.A. – Short history predication of substars and theirs determination are presented in the article. Probability of its meeting in Galaxy is discussed. Models of substars inner structure, problems and results of theirs searchs have being analyzed. A method of Galaxy evolution description by means of graphs, which allows take into account influence of substars on mass distribution in Galaxy has been discussing.

ВВЕДЕНИЕ

Структура Галактики зависит от распространенности космических тел различной природы и их массы. Еще 25 лет назад выделяли два основных класса объектов: звезды и планеты. Звезды различной массы по-разному вносят вклад в структуру Галактики. Звезды большой светимости вносят основной вклад в светимость Галактики видимого диапазона электромагнитных волн (наблюдаемые форма и спиральный узор). Они являются основными поставщиками звездных остатков (белых карликов, нейтронных звезд, черных дыр), а также переработанного газопылевого вещества, за счет звездного ветра и сбрасываемых оболочек на заключительных стадиях эволюции. Маломассивные звезды, принадлежащие главной последовательности, вносят основной вклад в массу Галактики. Вклад планет в массу и светимость Галактики мал, однако, их роль определяющая для существования жизни во Вселенной, поскольку только на них возникают устойчивые условия для ее зарождения и эволюции.

С 70-х годов активно обсуждается проблема существования и поиска планет в Галактике (см., например, [3, 4, 6, 15, 30, 43, 54] и др.). Необходимость решения этой проблемы связана не только с рядом астрономических задач, но и общих проблем естествознания и философии. Открытие невидимых компонентов у звезд по астрометрическим и спектроскопическим [18] наблюдениям требовало ответа на ряд вопросов: какова внутренняя структура этих спутников, как они образуются и эволюционируют, какова их роль в эволюции Галактики? Это планеты [5, 36] или объекты другой природы? Отсутствие ответов на возникшие вопросы влияет на достоверность статистической информации об общем количестве звезд и распространенности кратных систем с компонентами различной природы в Галактике [16].

Интерес к планетам и планетным системам возник и в связи с проблемой SETI (см., например, [4, 6, 12, 30, 43, 54]). Без решения задачи о распространенности планетных систем, на образование которых влияет распределение масс космических тел различной природы [2, 60], не решается задача обнаружения

и распространенности Внеземных цивилизаций (ВЦ). Проблема же ВЦ напрямую связывает все естественные науки, превращая ее в философскую дилемму: мы уникальны во Вселенной, или во Вселенной существуют “множество миров с живыми разумными существами”.

В середине 70-х – начале 80-х годов объекты с массами больше планетных и меньше звездных получили название: «коричневые карлики» [81] и «субзвезды» [1]. Выбору их однозначного определения, краткому историческому экскурсу, распространенности и поиску, а также выяснению внутреннего строения и значения для строения и эволюции Галактики посвящена настоящая статья.

1. ОБ ИСТОРИИ ПРЕДСКАЗАНИЯ СУБЗВЕЗД

Обсуждая осенью 1976 года на философском семинаре Астрономической обсерватории Харьковского университета возможности поиска планетных систем в Галактике, используя возможности построенного в обсерватории Когерентно-оптического вычислителя и вступившего в строй 6-метрового БТА АН СССР, пришли к выводу, что ставить такую задачу есть основания. Анализ методов поиска планет у звезд показал, что существенный результат может быть получен при наблюдении звезд окрестностей Солнца [4, 12]. Для этих целей был создан каталог звезд, расположенных от Солнца не далее 10 пк, содержащий наибольшее число известных к тому времени звезд и их важнейшие астрофизические характеристики, включая массы и радиусы [10, 14]. Каталог составлялся с учетом критерия минимальных масс звезд, с тем чтобы в него не попали объекты незвездной природы. Поскольку к тому времени существовало представление о наличии во Вселенной лишь двух принципиальных типов космических объектов (звезд и планет), автор с Александровым попытались найти объективные критерии для их классификации. В качестве такого критерия была выбрана масса объектов, определяющая внутреннюю структуру и светимость космических объектов [1]. Мы начали анализировать вопрос об определении планет, как космических тел, принадлежащих не только Солнечной системе, но Галактике и Вселенной в целом. Анализ этого вопроса позволил определить планетные системы, как системы имеющие в своем составе хотя бы одну планету, выдвинуть гипотезу о природе астрометрических спутников и компонентов спектрально-двойных звезд с одной видимой линией. Планеты были определены, как космические тела с массой в пределах $10^{23} \div 10^{31}$ г, содержащие вещество в конденсированном состоянии и эволюционирующие вследствие гравитационной дифференциации вещества. Было также выдвинуто предположение о существовании в Галактике нового класса космических тел, субзвезд. Это космические тела, ожидаемые астрофизические свойства которых в значительной мере отличаются от звезд и планет из-за наличия в своих недрах вещества с вырожденным электронным газом. Предполагалось, что верхняя граница их масс совпадает с нижним пределом звездных масс, а нижняя – определяется их центральной плотностью, равной критической плотности вырожденных электронов. Примерно в это же время, в малодоступной работе Тартер [82], космические объекты с массой меньше звездных было предложено называть коричневыми карликами.

2. ОЖИДАЕМОЕ ДОЛЕВОЕ СОДЕРЖАНИЕ СУБЗВЕЗД

Холфельд и Терциан, по-видимому, впервые предположили, что объекты с массами $(0.01 \div 0.07)m_{\odot}$ не являются планетами [60]. Воспользовавшись результатами Хелпенхеймера [59] о влиянии вторичных компонентов на эволюцию протопланетного облака, они рассмотрели задачу о встречаемости планетных систем в двойных системах, предполагая, что механизм образования вторичных компонентов незвездной природы, включая планеты, одинаков. Поэтому для вычисления долевого содержания планет и космических тел больших масс предложили использовать функцию масс вторичных компонентов, введенную Абтом и Леви [40], согласно которой компоненты тесных (с периодом $P < 100$ лет) и широких (с $P > 100$ лет) двойных звезд распределены по закону

$$f(m_2) \propto m^{1/3}. \quad (1)$$

Таким образом, если механизм образования субзвезд (по современному определению, занимающих

интервал масс $(0.01 \div 0.07)m_{\odot}$) и планет едины, то доля субзвезд среди космических тел не звездной природы, по Холфельду и Терциану, есть

$$p_{ss} = \int_{m_0}^{m_1} f(m_2) dm / \int_0^{m_1} f(m_2) dm, \quad (2)$$

где: m_0, m_1 – минимальная и максимальная массы субзвезд.

Позже Александров и Захожай [2] использовали эти результаты для оценки вероятности появления субзвезд и планетных систем у звезд различной кратности с учетом замечаний Брэнча [44] о правильности приведенной степенной зависимости функции масс вторичных компонентов Абта и Леви [40].

Результаты изучения роли распределения момента количества движения протозвезд, полученные Рузмайкиной [31, 32], вызывают сомнения в правильности использования лишь функции масс вторичных компонентов для оценки долевого содержания субзвезд по нескольким причинам. Есть основания предполагать, что субзвезды, могут образовываться и как звезды, и как планеты [50]. Из результатов Рузмайкиной следует, что механизм образования субзвезд в кратных системах, скорее ближе к механизму образования двойных звезд, чем к механизму образованию планет из протопланетных облаков. Поэтому доленое содержание субзвезд надо искать либо по спектру масс, либо по функции распределения момента количества движения. Если известен звездно-субзвездный спектр масс $\varphi(m)$, доля вещества заключенная в субзвездах есть

$$p_{ss} = \int_{m_0}^{m_1} \varphi(m) dm / \int_{m_0}^{m_2} \varphi(m) dm, \quad (3)$$

где: m_0 – минимальная масса, способная к самогравитации, m_1, m_2 – минимальная и максимальная масса звезд, соответственно.

При аппроксимации спектра масс степенной функцией с показателем степени γ

$$\varphi(m) \propto m^{\gamma}, \quad (4)$$

доленое содержание субзвездной составляющей в явном виде будет

$$p_{ss} = \begin{cases} \frac{m_1^{\gamma+1} - m_0^{\gamma+1}}{m_2^{\gamma+1} - m_0^{\gamma+1}}, & \text{для } \gamma \neq -1, \\ \frac{\ln(m_1 / m_0)}{\ln(m_2 / m_0)}, & \text{для } \gamma = -1. \end{cases} \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что в зависимости от значений m_0, m_1, m_2, γ доленое содержание p_{ss} существенно разное. При стремлении γ к нулю – доленое содержание субзвезд (по массе) может составлять проценты, при $\gamma = -1$ и более (по модулю) – содержание субзвезд может составлять 20–30 % и более, в зависимости от m_0 и m_2 , значения которых известны в настоящее время недостаточно надежно.

Доленое содержание субзвезд, образующихся в протопланетных дисках, может быть оценено из распределения масс вторичных компонентов планет, о котором в настоящее время известно чрезвычайно мало.

3. МЕТРОЛОГИЯ СУБЗВЕЗД И ИХ ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА

Еще 30 лет назад не было единого мнения об определении критерия для минимальных масс звезд. Голдрейч и Линден-Белл определили минимальную массу, равную $\approx 0.04 m_{\odot}$, из условия минимальной длины волны, возникающей в неустойчивом однородно вращающемся диске (модель Накано) [53]. Эта оценка совпадала с ошибочно вычисленными массами компонентов близкой двойной системы UV Кита, считавшимися самыми малыми среди известных масс звезд. Другие авторы оценили минимальную джинсовскую массу, способную обособиться из протозвездного облака единичной оптической толщины путем самогравитации и находиться в гидродинамическом и тепловом равновесии [61, 64, 65, 69, 79, 90 и

др.]. Эти расчеты дают минимальную массу сферических фрагментов в пределах трех – десяти масс Юпитера или меньше [35].

Кумар предложил считать самыми маломассивными звездами те, в недрах которых возможен пройти полный p - p цикл ядерных реакций [63]. Объекты с массами меньше этого предела описываются политропной полностью конвективной моделью с показателем 1.5. Нижний предел масс звезд для элементного состава $X = 0.62$ и $X = 0.90$ оказался равным $0.07 m_{\odot}$ и $0.09 m_{\odot}$, соответственно.

Расчеты эволюционных треков, проведенные Федоровой и Блинниковым, для космических тел с солнечным элементным составом и массой $(0.07 \div 0.11) m_{\odot}$ показали, что условия для полного цикла протон-протонных реакций соответствуют массам звезд главной последовательности лежащих в пределах $0.08 < m_0/m_{\odot} < 0.09$ [38]. Аномальное увеличение тяжелых ядер, учет вращения и собственного магнитного поля может привести к увеличению предельной минимальной массы звезд на 20÷50 % [37].

В 80-е годы было установлено, что в космических телах с массами в пределах $0.015 m_{\odot} - 0.08 m_{\odot}$ в течение менее миллиарда лет есть физические условия для усеченного цикла ядерных протон-протонных реакций (отсутствуют реакции горения ^3He). В недрах субзвезд с массами более $0.07 m_{\odot}$ горит водород, с массами более $0.06 m_{\odot}$ – литий, более $0.015 m_{\odot}$ – дейтерий [48, 55, 56, 78]. У космических тел с массами ниже $0.015 m_{\odot}$ реакции термоядерного синтеза отсутствуют.

Таким образом, под минимально возможной массой звезд целесообразно подразумевать значение $0.08 m_{\odot}$, что и определяет верхний предел масс субзвезд.

Первые оценки минимальных масс субзвезд, полученные из зависимости “масса – центральная плотность” и “средняя плотность – критическая плотность” приводились Ландау и Лифшицем и нами с Александровым, дали значения для минимальных масс субзвезд $\sim 0.005 m_{\odot}$, что соответствует пяти массам Юпитера [1, 28]. Слабость этого критерия в том, что при переходе от космических тел, содержащих вещество с полностью вырожденным электронным газом, к космическим телам содержащих только частично вырожденный электронный газ, нет качественного изменения ни у их светимостей, ни каких-либо фазовых переходов в веществе недр. Можно принять за нижнюю границу субзвездных масс минимальные джинсовские массы. Ее можно оценить из равенства скорости энергоотвода (светимость) чернотельного излучения с поверхности выделившегося фрагмента средней скорости высвобождения потенциальной энергии [29, 79]. Для холодных межзвездных облаков с температурой $T = 10$ К, минимальная масса “протосубзвезд” получается равной трем массам Юпитера. Другие аналогичные подходы, иногда дают несколько большие массы (до семи масс Юпитера). Поэтому, на сегодняшнем уровне представлений, можно принять следующую редакцию определения субзвезд, что это космические тела образующиеся путем самогравитации и содержащие в недрах электронный газ различной степени вырождения. Фактически, по внутреннему строению, они наряду с белыми карликами и планетами-гигантами в Солнечной системе образуют непрерывный ряд, отличаясь от последних происхождением и элементным составом.

Оценки показали, что абсолютная видимая величина субзвезд должна быть больше 19^m [13]. Эффективная температура субзвезд нулевого возраста ожидается в пределах $\approx 1000 \div 2800$ К и за эффективное время порядка миллиард лет падает до 10^2 К (если они не принадлежат к кратной системе; в случае если субзвезда входит в кратную систему, эффективное время ожидается большим за счет «подсветки» их компонентами системы).

Если окажется, что минимальная масса самогравитирующих тел (m_0) меньше масс космических тел в недрах которых горит дейтерий, приходим к выводу о существовании двух видов субзвезд. В наиболее массивных среди них (назовем именно их коричневыми карликами) может идти усеченный протон-протонный цикл ядерных реакций с дальнейшим выделением запасов тепловой энергии ($0.015 m_{\odot} - 0.08 m_{\odot}$); в менее массивных с массой больше массы самогравитации ($m_0 - 0.015 m_{\odot}$), не идут никакие термоядерные реакции и их существование связано с остыванием недр.

Модели внутреннего строения субзвезд, полученные за рубежом с середины 80-х годов и до на-

стоящего времени основаны на политропной зависимости давления от плотности вещества их недр (см., например, [47–49, 66, 70, 80]). Как показывает анализ, такое допущение выполняется тем лучше, чем больше масса субзвезд. Для малых масс субзвезд все большую роль начинает играть наличие частично-вырожденного электронного газа, что ведет к увеличению радиусов субзвезд по сравнению с моделями субзвезд, состоящих из вещества, уравнение состояния которого подчиняется политропному закону [23, 24]. Чтобы уйти от политропной зависимости, с 90-х годов нами ведутся исследования по построению неполитропных моделей субзвезд, учитывающие физические свойства их недр, включающего частично-вырожденный электронный газ, полную и частичную ионизацию вещества, химического состава атмосфер субзвезд [21, 23–27, 94, 97, 98]. На первом этапе была использована гипотеза о веществе недр субзвезд, как классическом газе атомов и ионов и квантовом идеальном газе электронов. Далее вещество недр субзвезд рассматривалось как классический газ атомов и ионов и квантовый газ электронов с учетом слабой неидеальности. С учетом изменения вдоль радиуса субзвезд степени ионизации вещества, вырождения электронного газа, влияния электронного экранирования, поправок на неидеальность атомов и электронов, было проведено численное моделирование внутренней структуры субзвезд не имеющих осевого вращения и магнитного поля, в недрах которых не идут ядерные реакции и которые достигли стадии, начиная с которой они начинают охлаждаться и терять тепловую энергию. Удалось получить в зависимости “масса–радиус” максимум для радиусов субзвезд, равный $\approx 0.2 R_{\odot}$ (соответствующий массе $\approx 0.007 m_{\odot}$). Это ведет к пониманию и интерпретации светимостей космических тел солнечного состава с массами соизмеримыми с массой Юпитера, радиус которых равен $\sim 0.1 R_{\odot}$.

Полученные численные модели субзвезд позволяют проследить степень согласия с аналогичными моделями вырожденных конфигураций (включая такие, как белые карлики с практически чисто гелиевым содержанием), объяснить отклонения от них, за счет снижения степени ионизации у верхних слоев субзвезд малых масс ($< 0.009 m_{\odot}$), и уменьшение параметра вырождения. Уже сейчас следует констатировать, что дальнейшее совершенствование модели вещества, позволит, с помощью разработанного нами алгоритма вычисления внутренней структуры субзвезд, объяснить положение Юпитера и Сатурна на диаграмме “центральная плотность–масса”. В верхних слоях субзвезд учитывались химические процессы, ведущие к образованию вероятного набора частиц, основывающегося на распространенности химических элементов в различные эпохи Галактики. Такая работа является началом цикла по определению коэффициентов непрозрачности ожидаемых атмосфер субзвезд (а возможно и планет-гигантов) различного элементного состава, включая элементы с ядрами тяжелее гелия. Без решения этой задачи нет возможности получить зависимость “масса–светимость” для субзвезд, важнейшей статистической связи для оценок масс одиночных субзвезд по их фотометрическим наблюдательным данным.

В дальнейшем предполагается учесть магнитное поле, вращение субзвезд и включить уравнения описывающие их эволюцию за счет остывания и сжатия.

4. ПРОБЛЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СУБЗВЕЗД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ПОИСКА

Основные идеи и методы поиска субзвезд аналогичны предложенным методам поиска внесолнечных планет, которые достаточно подробно обсуждались в 70–80-е годы [3, 4, 6, 12, 15, 30, 43, 54]. Наиболее эффективными методами поиска к настоящее время оказались: астрометрический, лучевых скоростей, ИК–спекл-интерферометрия, прямых изображений далекого видимого излучения, источников близкого ИК-диапазона, гравитационного микролинзирования, спектрограмм (по литиевому тесту и на принадлежность к L и T карликам).

Заподозрено несколько десятков невидимых спутников звезд (или астрометрических двойных), в окрестностях Солнца, остающихся предметом споров: отклонения от «средних траекторий» вызваны действием реально существующих космических тел, или они являются результатом ошибок астрометрических позиционных наблюдений. Астрометрический – это наиболее старый метод, которым наблюдают близкие звезды поля Галактики уже более ста лет, основанный на анализе собственного и орбитального движения одиночных и кратных близких звезд. Амплитуда отклонения от траектории движущихся бли-

жайших звезд за счет наличия у них невидимых спутников субзвездных масс не превышает $\sim 0''.01 \div 0''.1$ за периоды от одного до нескольких лет. Всего лишь у двух звезд было подтверждено их существование методом ИК– спекл-интерферометрии (субзвездный компонент у Лаланд 21185 и звездный спутник в двойной системе χ^1 Ориона) [71].

Наиболее достоверные данные об астрометрических невидимых спутниках получены из анализа собственного и орбитального движений 10 звезд ближе 10 пк. У двух ближайших звезд массы невидимых компонентов попадают в интервал планетных масс: снова предполагают наличие планеты с массой $0.0018 m_{\odot}$, вращающейся вокруг Проксимы на расстоянии 0.85 а.е. с периодом 3.5 года [74] и остается не опровергнутым наличие до трех планет ($0.0012 m_{\odot}$, $0.0006 m_{\odot}$, $0.0008 m_{\odot}$, на расстоянии 4.5 а.е., 2.9 а.е., 1.8 а.е. с периодами 4.5, 2.9 и 1.8 лет, соответственно [87]) у звезды Бардарда. Планеты или субзвезды (в зависимости от выбранного определения верхней границы планетных масс) заподозрены у трех систем: двух одиночных звезд и одной двойной звезды. Отмечают невидимые астрометрические спутники у звезд ϵ Эридана с массой $0.006 \div 0.05 m_{\odot}$ (период 25 лет, большая полуось $0''.019$) [68, 85, 86], у DM+59°1915 – $0.006 m_{\odot}$ (период 5 лет, большая полуось $0''.010$) [39] и у двойной 61 Лебеда: у компонента А два спутника с массами $0.0035 m_{\odot}$, $0.0055 m_{\odot}$ и периодами 6 и 12 лет, у компонента В – $0.003 m_{\odot}$, период 7 лет [8, 9, 74]. В интервал субзвездных масс попадают компоненты пяти астрометрически-двойных. Это одиночные звездные системы G 175–34 (масса $0.02 m_{\odot}$, период 23 года, большая полуось $0''.070$) [52, 57], Лаланд 21185 (масса $0.02 m_{\odot}$, период 8 лет, большая полуось $0''.03$) [86], G 202–45 (масса $0.06–0.08 m_{\odot}$, период 3.72 года, большая полуось $0''.049$) [67, 86], EV Ящерицы (масса $0.009–0.023 m_{\odot}$, период 28.9 лет, большая полуось $0''.03$) [68, 86, 88] и двойная – Крюгер 60 (масса $0.01 m_{\odot}$) [52].

Наличие планет в кратных системах α Центавра и 61 Лебеда (орбитальный период звездных компонент, имеющих планеты, больше 100 лет) не противоречит результатам теоретических исследований Хеппенхеймера [59] об образовании планетных систем у двойных звезд, при наличии у компонент системы зон неограниченного роста планетезималей. Заподозренная субзвезда в системе Крюгер 60 не может образоваться как планета, поскольку орбитальный период звездных компонент 45 лет.

К апрелю 2001 г. [46] было обнаружено 53 одиночных невидимых спутников и одна система из трех компонент, обращающихся вокруг звезды υ And, для которых $m \cdot \sin i$ было определено, в основном, по измерениям точных вариаций лучевых скоростей попадает в диапазон ($0,15 \div 38$) m_J , где m_J – масса Юпитера, i – наклон плоскости орбиты планеты к картинной плоскости. Диапазон больших полуосей этих космических тел $0,04 \div 3,8$ а.е. 15 из 56 невидимых спутников имеют орбиты с $a < 0,1$ а.е., а 11 имеют $a = 0,3 \div 1,0$ а.е., $15 - a > 1,0$ а.е. Большая половина невидимых спутников (33 из 54) имеют эксцентриситеты $< 0,3$, из них 17 – $< 0,1$. Эксцентриситеты 14 попадают в интервал $0,3 \div 0,5$, а 7 – $< 0,7$

Распределение интервалов по $m \cdot \sin i$ следующее: ($0,15 \div 3$) m_J – 37 спутников, ($3 \div 5$) m_J – 9 спутников, ($5 \div 7$) m_J – 3 спутника, ($7 \div 10$) m_J – 2 спутника, ($13 \div 38$) m_J – 5 спутников. Некоторые из этих объектов при малых значениях i могут оказаться маломассивными звездами. Распределение по $m \cdot \sin i$ дало почву для разделения невидимых спутников на два населения, граница между которыми лежит в районе $5 \div 7 m_J$ [76]. Нельзя исключать, что одни невидимые спутники формировались в протопланетных облаках, другие – по сценарию образования двойных звезд: путем гравитационной фрагментации сжимающегося газопылевого облака с большим кинетическим моментом [41].

Существенным недостатком метода поиска невидимых спутников по кривым лучевых скоростей является то, что масса невидимого компонента звезды определяется с точностью до угла наклона орбиты к лучу зрения. Поэтому, по-видимому, среди более пяти десятков компонентов звезд, открытых этим методом, только половина принадлежат к субзвездам. Остальные компоненты могут иметь планетную и, возможно, звездную природу.

Методом ИК-спекл-интерферометрии у звезды ван Бисбрука 8 обнаружен холодный спутник (субзвезда) с характеристиками: $\Delta m_{\lambda=2.2\mu} = 3^m$, $T_{\text{эф}} = 1360$ К, $R = 0.09 R_{\odot}$, $L = 3 \cdot 10^{-5} L_{\odot}$, $m \sim 0.01 m_{\odot}$ [72].

ИК-фотометрия, проведенная для объекта LHS 2924 позволяет заключить, что он является молодой субзвездой: $m \sim 0.05 m_{\odot}$, $M_V \sim 21^m$, $T_{\text{эф}} = 2450 \text{ K}$, $L \sim 10^{-5} L_{\odot}$ [77]. Впервые субзвезда обнаружена без звездного компонента.

Глубокие обзоры слабых источников от далекого видимого до близкого ИК-диапазонов в поле Галактики и близких рассеянных скоплениях, позволили по вычисленным эффективным температурам обнаружить более 210 субзвезд (в настоящее время насчитываются многие десятки работ где приводятся данные об открываемых субзвездах, выделим лишь те где приводятся целые списки этих объектов [45, 62, 84 и много других]). 95 субзвезд были выявлены, как поздние М карлики с эффективной температурой 2100–2800 К (25 в поле Галактики и 70 в 6 близких рассеянных скоплениях: 21 в Плеядах, 12 в Гиадах, 11 в Верхнем Скорпионе, 10 в ρ Змееносце, по 8 в σ Орионе и IC2391). В поле Галактики также было открыто 107 субзвезд, как L карлики ($T_{\text{эф}} = 1500\text{--}2000 \text{ K}$), и 12 субзвезд выявлено как T карлики с $T_{\text{эф}} < 1000 \text{ K}$.

Среди вышеуказанных субзвезд поля Галактики, 32 входят в кратные системы. 9 открыты, как компоненты звездных систем, спектральных классов M, G, K, в основном, главной последовательности (T карлик в системе Gl 229, два поздних M карлика в системах TWA 5 и HR 7329, 4 L карлика в системах GJ 1048, G 196–3, GJ 1001, Gl 417), в окрестностях белого карлика GD 165 (L карлик). Спектральный класс субзвезды входящий в состав системы субгиганта HD 10697 класса G5IV не определен. 14 субзвезд входят в 7 двойных систем, компонентами которых являются L карликами (2M0746, 2M0920, 2M0850, DENIS 1228, 2M1146, DENIS 0205), одна система состоит из двух поздних M6 карликов (PP1 15). 5 субзвездных компонентов входят в три тройные системы: одна полностью субзвездная Gl 569 (два поздних M карлика и один L карлик), вторая (Gl 584) состоит их двух G карликов и L карлика, в третью (V 471 Tau) входит K карлик, белый карлик и L карлик. Единственный T карлик входит в четверную систему Gl 570 со звездными компонентами спектральных классов K и двух M карликов.

5. УЧЕТ СУБЗВЕЗД В ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ МЕТОДОМ ГРАФОВ

Для описания поведения статистических ансамблей различного уровня (звезд, субзвезд и их скоплений) в процессе эволюции Галактики может быть применен математический аппарат теории графов, в сочетании с теорией вероятностей [19, 20, 96]. Оказалось удобным представить эволюцию графом, характеризующим с определенной вероятностью состояние Галактики на определенный момент времени. Для построения графов понадобилось ввести понятие ключевого события, характеризующего появления (или состояние) основных компонентов Галактики и их систем: образование скоплений, звезд, гигантов, звездных остатков, газа (в различных проявлениях: в виде межзвездных облаков, звездного ветра, сбрасываемых оболочек). Чем точнее очерчен круг ключевых событий, тем точнее удастся построить граф и, следовательно, точнее удастся предсказать статистическое состояние Галактики на определенный момент времени.

Сведение эволюции Галактики до сложного статистического процесса предполагает наличия определенных функций распределения, позволяющих вычислить вероятности ключевых событий. К началу постановки задачи (конец 80-х годов) такие функции распределения построены не были, поэтому возникла необходимость разработать специальную методологию по их определению. Оказалось, что нахождение всех необходимых функций распределения может быть сведено к четырем задачам:

- определению спектров масс фрагментирующих облаков на различных этапах звездообразования (уровень протоскоплений);
- статистическому описанию процесса эволюции скоплений;
- определению пространственных плотностей распределения скоплений различного возраста в Галактике;
- нахождению основных плотностей распределения, описывающих ансамбли эволюционирующих звезд.

Анализ образования протоскоплений привел к пониманию того, что ранее считавшимися звездными

скопления, на самом деле являются звездно-субзвездными скоплениями. Это подтверждается исследованиями ближайших рассеянных скоплений в малых полях с ПЗС-детекторами – проведение глубоких фотометрических обзоров (см. предыдущий раздел). Статистическое описание образования протоскоплений свелось к выводу трех спектров масс фрагментирующих облаков, описывающих фрагментацию в сферической, промежуточной и плоской составляющих Галактики [93, 95]. Первый из них выведен из предположения об однородной флуктуирующей среде реликтовой протогалактики; второй – с учетом распределения газовой составляющей вдоль направления на галактические полюса, третий – действия волн плотности в галактическом диске.

Опираясь на ожидаемую принципиальную однотипность процессов фрагментации в протогалактике и протоскоплениях, ненаблюдаемость спиральных веществ в скоплениях звезд, процес фрагментации в звездно-субзвездных протоскоплениях может быть ограничен спектрами протозвездных масс $\propto m_{\Sigma}^{-1}$ и $\propto m_{\Sigma}^{-1/3}$. Результаты численного моделирования Аппенцеллера и Тшарнюттера [42], Ларсона [64], Уэстбрука и Тартера [89], Йорка и Кругела [91] и Йорка [92], приведенные на рис.1, позволили найти аппроксимационную зависимость между массами протозвезд m_{Σ} и звездами нулевого возраста m :

$$\lg m_{\Sigma} = \lg m \cdot (0.81 + 0.41 \lg m) \pm 0.09 \pm 0.08 \quad (6)$$

Эта связь дает возможность записать функцию распределения масс звезд и субзвезд в скоплениях нулевого возраста.

Нет оснований для неприменимости теории диссипации звезд из скоплений в области субзвездных масс. Поэтому, используя результаты Гуревича и Левина об описании процесса испарения звезд из звездных систем [7], а также результаты численного решения уравнения Фоккера–Планка, представленные Спитцером мл. [33], удалось записать выражение для изменения спектра масс звездно-субзвездного скопления со временем.

Согласно исследований, проведенных Спитцером мл., Тримейном, Острайкером, и Пиблсом [33, 75, 83], Сурдиным и Чариковым [34], звездно-субзвездные скопления, вследствие динамического трения о звездно-субзвездный галактический фон, “падают” на центр Галактики за время зависящее от массы и расстояния до галактического центра. Для “времени падения” скопления на центр Галактики, полученного Сурдиным и Чариковым без учета диссипации из него звезд и субзвезд и для равномерного пространственного распределения скоплений нулевого возраста дифференциальная функция распределения “времен падения” отличается от соответствующего выражения, найденного с учетом диссипации звезд и субзвезд в процессе динамической эволюции звездно-субзвездных скоплений и не зависит от галактической эпохи звездообразования.

Полученные плотности распределения позволили записать выражения для всех вероятностей ключевых событий, входящих в графы, описывающие эволюцию Галактики. Вычисление этих вероятностей предоставляет возможность строить статистические модели Галактики, зависящие от ее возраста и наличие в ней субзвезд.

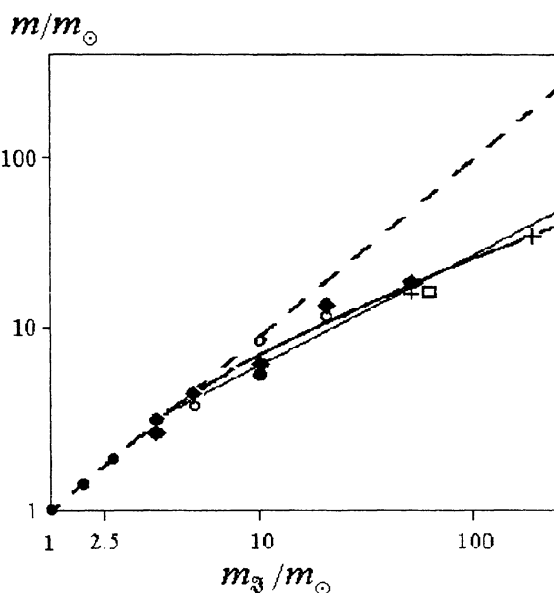


Рис.1. Зависимость «масса звезды нулевого возраста (m) – масса начального протозвездного облака (m_{Σ})», построенная по данным расчетов Аппенцеллера и Тшарнюттера [42] – \square , Ларсона [64] – \bullet , Уэстбрука и Тартера [89] – \blacklozenge , Йорка и Кругела [91] – $+$ и Йорка [92] – \circ . Аппроксимация зависимости (6) представлена кривой.

Средние массы образующихся звездно-субзвездных скоплений нулевого возраста ожидаются $\sim 10^7 m_{\odot}$. Средняя масса звездно-субзвездных компонент скоплений нулевого возраста зависит от распределения газа в протоскоплениях и наличия собственного осевого момента. Однако, уже через миллиард лет средняя масса компонент не зависит от принятой модели распределения и равна $\approx 0.4 m_{\odot}$, что и наблюдается для звезд Галактики [11].

Разработанная концепция эволюции Галактики впервые позволяет рассчитать статистику наблюдаемых и ожидаемых объектов и их систем с учетом минимальных масс субзвезд, существенно влияющие на ожидаемую массу темного вещества и поле Галактики. Анализ показал, что существуют модели, при низких значениях минимальной массы субзвезд, когда масса темного вещества Галактики за счет субзвезд может составлять до 40 % от общей массы Галактики, а по числу объектов звездная и субзвездная составляющие могут сравняться. Это приведет к тому, что на этапах общего галактического звездообразования, ИК-функция светимости во многом будет обязана субзвездной составляющей.

В настоящее время не решен ряд принципиальных вопросов, существенно влияющих на место субзвезд в структуре Галактики. К ним относятся следующие:

- какова минимальная масса объектов, способных образоваться путем самогравитации?
- как ведет себя звездно-субзвездный спектр масс на участке масс меньше минимальных масс звезд?

Первый вопрос уже обсуждался в начале доклада. Второй сейчас активно обсуждается в литературе при вычислении начального звездно-субзвездного спектра масс [51, 58, 73], где существует три точки зрения:

- наклон спектра масс одинаков для звезд и субзвезд;
- спектр масс постоянен на участке масс субзвезд;
- спектр масс описывается убывающей функцией в сторону минимальных масс субзвезд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не вызывает сомнения, что субзвезды занимают важное место в процессе эволюции Галактики. Если значение минимальных масс субзвезд соизмеримо с массой Юпитера, следует ожидать их заметного вклада в общую массу Галактики и ИК-светимость Галактики, особенно в период повышенной активности галактического звездообразования. При фрагментации протоскоплений, в процессе динамической эволюции они входят как неотъемлемая часть космических тел. Поскольку не исключено, что вероятность испарения космических тел из скоплений обратнопропорциональна их массе [33], следует ожидать их малое число в старых шаровых скоплениях и значительное в молодых рассеянных скоплениях. При образовании планетных систем в одиночных и кратных системах наличие субзвезд может влиять на устойчивость протопланетного диска [60]. Оценки показывают, что если субзвезда существует как одиночный объект, он остывает за характерное время $\sim 10^9$ лет. Учитывая, что их число может быть соизмеримо с числом звезд, следует ожидать, что часть их может быть в окрестностях Солнца в виде невидимых астрономических спутников и компонентов спектрально-двойных звезд с одним видимым спектром.

Как показал опыт расчета внутренней структуры субзвезд, они расширяют простор теоретических исследований физических и химических свойств вещества находящегося под большим давлением и нагретого до сотен тысяч градусов. Следует ожидать, что результаты таких исследований окажутся полезными и важными не только для изучения субзвезд, но и для понимания природы планет-гигантов Солнечной системы, внесолнечных планет и белых карликов.

1. Александров Ю.В., Захожай В.А., Астрон. вестник. – 1980. – 14, №3. – С.129.

2. Александров Ю.В., Захожай В.А., Астрон. вестник. – 1983. – 17, №2. – С.82.

3. Александров Ю.В., Захожай В.А., Астрон. вестник. – 1983. – 17, №3. – С.131.

4. Александров Ю.В., Захожай В.А. // В кн.: Проблемы поиска жизни во Вселенной. – М.: Наука, 1986. – 201 с.

5. Блэк Д., Саффолк Г.К.Д. // В кн.: Происхождение Солнечной системы / Под ред. Г. Ривса. – М.: Мир, 1976. – 496 с.

6. Голд Т. // В кн.: Проблема СЕТИ (связь с внеземными цивилизациями) / Под ред. С.А.Каплана. – М.: Мир, 1975. – с.15.
7. Гуревич Л.Э., Левин Б.Ю., Докл. АН СССР. – 1950. – 70, №5. – С.781.
8. Дейч А.Н., Орлова О.Н., Астрон. журн. – 1977. – 54, вып.2. – С.327.
9. Дейч А.И., Письма в Астрон. журнал. – 1978. – 4, №2. – С.95.
10. Захожай В.А., Вестник Харьк. ун-та, №190, вып. 14, Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия. – Харьков, 1979. – С.52.
11. Захожай В.А., Астрометрия и астрофиз. – 1980. – № 42. – С.64.
12. Захожай В.А., Александров Ю.В. // Поиск разумной жизни во Вселенной / Тезисы всесоюзного симпозиума "SETI", Tallin'81". – Таллин, 1981. – С.27.
13. Захожай В.А. // В кн.: Проблемы астрометрии /22-я астрометрическая конференция СССР, 1–5 июня 1981 г. – М., МГУ, 1984. – С.278.
14. Захожай В.А., Вестник Харьк. ун-та, № 232. вып. 17, Астрометрия и физика Солнечной системы. – Харьков, 1982. – С.64.
15. Захожай В.А., Рузмайкина Т.В., Астрон. вестник. – 1986. – 20, №2. – С.128.
16. Захожай В.А. // Дис. канд. физ.-мат. наук. – Л., 1987. – 206 с.
17. Захожай В.А. // Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды. – Свердловск, УрГУ, 1990. – С.44.
18. Захожай В.А., Кинем. и физ. неб. тел. – 1994. – 10, № 2. – С.68.
19. Захожай В.А. // Astrophysics and cosmology after Gamow /The conference devoted to the 90th anniversary G.A.Gamow (1904–1968), September 5–10, 1994, Odessa, Ukraine. – Abstracts. – М., Космосинформ., 1994. – С.26.
20. Захожай В.А. // Тези наукових доповідей третього з'їзду УАА /Інформаційний бюлетень УАА. – 1995. – №7. – С.49.
21. Захожай В.А., Блохина М.Д. // Тези наукових доповідей третього з'їзду УАА / Інформаційний бюлетень УАА. – 1995. – №7. – С.49.
22. Захожай В.А., Яценко А.А., Писаренко А.И., Кинем. и физ. неб. тел. – 1999. – 15, №3. – С.206.
23. Захожай В.А., Писаренко А.И., Яценко А.А., Педаш Ю.Ф., Котелевский С.И., Кинем. и физ. неб. тел. – 1999. – 15, №6. – С.516.
24. Захожай В.А., Яценко А.А., Писаренко А.И., Кинем. и физ. неб. тел. – 1999. – 15, №3. – С.206.
25. Захожай В.А., Котелевский С.И., Писаренко А.И., Педаш Ю.Ф., Яценко А.А. // Тези доповідей Всукраїнської (з міжнародною участю) конференції з аналітичної хімії, присвяченої 100-річчю від дня народження професора М.П.Комаря, 15–19 травня 2000 р., Харків. КУАС 2000. – С.43.
26. Захожай В.А., Писаренко А.И., Яценко А.А. // Тезисы докладов международной мемориальной научной конференции "Астрономия 2000 года", 21 августа – 1 сентября 2000 р., Одесса, АстроПринт, 2000. – С.24.
27. Захожай В.А., Котелевский С.И., Писаренко А.И., Педаш Ю.Ф., Яценко А.А., Кинем. и физ. неб. тел. – 2001. – 17, №1. – С.3.
28. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т.5: Статистическая физика, ч.1. – 3-е изд. доп. – М.: Наука, 1976. – 584 с.
29. Марочник Л.С., Сучков А.А. Галактика. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
30. Мороз В.И. // В кн.: Проблемы поиска внеземных цивилизаций. – М., Наука, 1981. – С.171.
31. Рузмайкина Т.В., Письма в Астрон. журнал. – 1981. – 7. – С.188.
32. Сафронов В.С., Рузмайкина Т.К. // В кн.: Протозвезды и планеты / Под ред. Т. Герелса, т.2. – М.: Мир, 1982. – С.623.
33. Спитцер Л. мл. Динамическая эволюция шаровых скоплений // Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 184 с.
34. Сурдин В.Г., Чариков А.В. Астрон. журнал. – 1977. – 54, вып.1. – С.24.
35. Сучков А.А., Щектинов Ю.А. Астрон. журнал. – 1975. – 52. – С.662.
36. тер Хаар Д. // В кн. Происхождение Солнечной системы. / Под ред. Г. Ривса. – М.: Мир, 1976. – С.502.
37. Федорова А.В., Научные информации. – 1976. – вып.46. – С.3.
38. Федорова А.В., Блинные С.И., Научные информации. – 1978. – вып.42. – С.75.
39. Шахт Н.А., Письма в Астрон. журнал. – 1984. – 10, №10. – С.765.
40. Abt H.A., Lavy S.G., Astrophys. J. Suppl. – 1970. – 30. – С.273.
41. Adams F.C., Benz W. // In H.A.McAlister, W.I.Hartkopf, eds., Complementary Approaches to Double and Multiple Star Research, ASP Conf. San Francisco. – 1992. – Series 32. – P.185.
42. Appenzeller I., Tscharnutter W., Astron. Astrophys. – 30. – P.423.
43. Black D.C., Space Science Rev. – 1980. – 25, №1. – P.35.
44. Branch D., Astrophys. J. – 1976. – 210. – P.392.
45. Burgasser A.J., Astrophys. J. – 1999. – 522. – L65.
46. Burrows A., Hubbard W.B., Lunine J.I., Liebert J. // astro-ph/0103383 – 22 Mar 2001.
47. Burrows A., Habbord W.B., Saumon D., Lunine J.I., Astrophys. J. – 1993. – 406. – P.158.
48. Burrows A., Liebert J., Rev. Mod. Phys. – 1993. – 65, №2. – P.301.

49. *Chabrier G., Baraffe I.*, Astron. Astrophys. – 1997. – **327**. – P.1039.
50. *Dole S.*, Icarus. – 1970. – **13**. – P.500.
51. *Elmegreen B.G.*, Astro-ph/0010582.
52. *Gliese W.* Catalogue of nearby stars. – Karlsruhe: Braun, 1969. – 118 p.
53. *Goldreich P., Lynden-Bell D.*, MN RAS. – 1965. – **130**, № 2–3. – P.97.
54. *Greenstein J.L., Black D.*, NASA, 1977, SP-419, The search for extraterrestrial intelligence (SETI). – P.53.
55. *Grossman A.S.*, Astrophys. J. – 1970. – **161**, №2. – P.619.
56. *Grossman A.S., Hays D., Graboske H.C.*, Astron. Astrophys. – 1974. – **30**, №1. – P.95.
57. *Harrington R.S., Dahn C.C.*, Astron. J. – 1980. – **85**, №4. – P.454.
58. *Haywood M.*, Astron. Astroph. – 1994. – **282**. – P.444.
59. *Heppenheimer T.A.*, Icarus. – 1974. – **22**. – P.436.
60. *Hohlfeld R.G., Terzian Y.*, Icarus. – 1977. – **30**. – P.598.
61. *Hoyle F.*, Astrophys. J. – 1953. – **118**, №3. – P.512.
62. *Kirkpatrick J.D., et al.*, Astron. J. – 2000. – **120**. – P.447.
63. *Kumar S.S.*, Astrophys. J. – 1963. – **137**, №4. – P.1121.
64. *Larson R.*, Found. Cosm. Phys. – 1973. – **1**. – P.1.
65. *Larson R.B., Starfield S.*, Astron. Astrophys. – 1971. – **13**. – P.190.
66. *Liebert J., Probst R.G.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1987. – **25**. – P.473.
67. *Lippincott S.L., Borgmann E.R.* Publ. Astron. Soc. Pacif. – 1978. – **90**, №534. – P.226.
68. *Lippincott S.L.*, Colloque Astronomique Europeen: O telescópio refractor ea astrometria ao serviço das estrelas duplas. – Coimbra (Portugal), October, Pino Torinese, 1974. – P.131.
69. *Low C., Lynden-Bell D.*, MN RAS. – 1976. – **176**, №2. – P.367.
70. *Lunine J.I., Hubburd W.B., Burrows A.*, Astrophys. J. – 1989. – **345**. – P.939.
71. *McCarthy D.W.* // In: Colloquium №76 IAU: The nearby stars and the stellar luminosity function./ Prepr. Steward Observ., Univ. Arizona, Tucson, Arizona 85 721, USA. – 1983. – №467. – P.6.
72. *McCarthy Jr. D.W.*, Astrophys. J. – 1985. – **290**. – L9.
73. *McDonald J.M., Clarce C.J.*, MN RAS. – 1993. – **262**. – P.800.
74. *Niedzielski A.*, Urania. – 2001. – 4. – P.156.
75. *Ostriker J.P., Peebles P.J.E.*, Astrophys. J. – 1973. – **186**. – P.467.
76. *Perryman M.A.C.* // Preprint Rep. Prog. Phys., 31 May 2000. – P.1.
77. *Probst R.G., Liebert J.*, Astrophys. J. – 1983. – **274**, №1, part 1. – P.245.
78. *Rebolo R., Martin E.L., Maggazzu A.* Astron. Astrophys. – 1992. – **389**. – L83.
79. *Rees M.J.*, MN RAS. – 1976. – **176**, №3. – P.483.
80. *Stevenson D.J.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1991. – **29**. – P.163.
81. *Strauss M.A., et al.*, Astrophys. J. – 1999. – **522**. – L61.
82. *Tarter J.* // Ph.D. thesis, Univ. Calif., Berkeley, 1975.
83. *Tremain S.D., Ostriker J.P., Spitzer L.*, Astrophys. J. – 1975. – **196**, №2. – P.407.
84. *Tsvetanov Z.I., et al.*, Astrophys. J. – 2000. – **531**. – L61.
85. *van de Kamp P.*, Astron. J. – 1974. – **79**, №4, 491,
86. *van de Kamp P.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1975. – **13**. – P.295.
87. *van de Kamp P.*, Astron. J. – 1975. – **80**, №8 – P.658.
88. *van de Kamp P., Wortn M.D.*, Astron. J. – 1972. – **77**, №9. – P.762.
89. *Westbrook Ch., Tarter B.* Astrophys. J. – 1974. – **200**. – P.48.
90. *Yoneyama T.*, Publ. Astron. Soc. Japan. – 1972. – **24**, №1. – P.87.
91. *Yorke H., Krugel H.*, Astron. Astrophys. – 1977. – **54**. – P.183.
92. *Yorke H.*, Astron. Astrophys. – 1979. – **80**. – P.308.
93. *Zakhozha V.A.* // In "Mathematical methods in studying the structure and dynamics of gravitating systems", Program and abstracts of the Conference. – Petrosavodsk, 1993. – P.43.
94. *Zakhozha V.A., Blokhina M.D.* // Тези доповідей наукової конференції присвяченої 225-й річниці заснування АО ЛУ (8–10 грудня 1994 року). – Львів, 1994. – С.41.
95. *Zakhozha V.A.*, Astron. Astrophys. Transact. – 1995. – **6**. – P.221.
96. *Zakhozha V.A.*, Astron. Astrophys. Transact. – 1996. – **10**. – P.321.
97. *Zakhozha V.A., Blokhina M.D., Pysarenko A.I., Yatsenko A.A., Slusarenko Yu.V.*, Odessa Astron. Publ. – 1996. – **9**. – P.173.
98. *Zakhozha V.A., Pysarenko A.I., Yatsenko A.A., Slusarenko Yu.V.* // Proceedings of the All-Ukrainian astronomical conference, October 27–28, 1997, Kyiv, Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. Scientific program and abstracts of papers. / Інформаційний бюлетень УАА. – Київ, 1998. – №12. – С.80.

Поступила в редакцію 11.09.2001