

К ВОПРОСУ О ВКЛАДЕ ВЫРОЖДЕННЫХ КАРЛИКОВ БЛИЖАЙШИХ ОКРЕСТНОСТЕЙ СОЛНЦА, ГАЛО И НАСЕЛЕНИЯ III В МАССУ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Захожай В.А., Минаков А.А., Шульга В.М.

Радиоастрономический институт НАН Украины
zkhvladimir@mail.ru

ABSTRACT. The data about occurrence frequency of substars and white dwarfs among close stars are analyzed. The estimation of partial content of subdwarfs and stellar remains among populations II and III as function of power of initial mass function have been made.

Введение

Среди кандидатов в объекты, составляющих темную материю, наиболее часто, рассматриваются различные частицы (которые участвуют в гравитационном взаимодействии, но не излучают в электромагнитном диапазоне) и холодные астрономические объекты (излучение от которых является настолько слабым, что оно не доступно для регистрации современным астрономическим средствам). Каково соотношение долевых содержаний этих кандидатов в настоящее время не известно.

Если какие-либо частицы и доминируют в общей массе темной материи, все равно необходимо выяснить, а какое долевое содержание остывших астрономических объектов (вырожденных карликов) среди них, а главное: какие физические механизмы привели к такому состоянию? Поэтому необходим анализ распространенности этих астрономических объектов, основанный на современных представлениях описания процесса звездообразования и расчете долевых содержаний всех «участников» этого процесса. Необходимо проанализировать наблюдательные статистические характеристики остывших звездных остатков, образовавшихся в различные эпохи звездообразования, выяснить доверие к полученной информации и адекватность ее отражения реальными астрофизическими процессами.

В работе не рассматриваются представители небарионной материи и гипотетические звезды, существование которых не исключает современная физическая теория, но еще не являются предметом наблюдения. К

ним, как известно, относят кварковые¹, лептонные², Q -³ и преонные⁴ звезды. В целом, проблема кандидатов в объекты темной материи широко дискутируется в научной литературе (см., например, статьи [13-15, 21] и соответствующие в них литературные ссылки).

В предлагаемой статье анализируется возможность объяснения всей, или части, темной материи за счет исключительно известных видов астрономических объектов. Исследуются условия, возникающие при образовании и эволюции Галактики, в результате которых к настоящему времени долевое содержание темных карликов (остывших к настоящему времени субзвезд и звездных остатков населений I–III) составляет определенное значение, которое меньше или может превышать наблюдаемое число звезд и субзвезд. Это и является основной целью статьи.

Вначале приводятся оценки вклада, по массе, субзвезд, звездных остатков в окрестностях Солнца. Далее используется этот статистический материал для вычисления массы вещества, заключенной в субкарликах гало и долевое содержание звездных остатков среди этой популяции. Приводятся

¹ Гипотетическое космическое тело с диаметром ≈ 10 км, состоящее из кварков и имеющее плотность выше ядерной $\sim 10^{17}$ г/см³ [22]. Массы кварковых звезд ожидаются вблизи предела Оппенгеймера–Волкова $\sim 2.5m_{\odot}$.

² Переходное гипотетическое звено между кварковой звездой и черной дырой [18].

³ Гипотетический тип компактных и тяжелых нейтронных звезд, существование которых связывают с поглощением стабильных Q - шаров (англ.: Q -ball) с большими барионными и лептонными числами [20, 21].

⁴ Гипотетический космический объект, с диаметром ≈ 10 см и плотностью $\sim 10^{27}$ г/см³ [22]. Преоны – предполагаемые элементарные частицы, из которых могут состоять кварки и лептоны.

результаты расчета долевого содержания газа, оставшегося после N циклов звездообразования, позволяющего проводить оценки массы вещества, содержащегося в звездных остатках населения III. Выводы и их краткое обсуждение приводятся в заключении.

Долевые содержания звездных остатков и субзвезд среди звездно-субзвездной популяции ближайшего солнечного окружения

Окрестности Солнца – типичный регион диска Галактики, с той точки зрения, что в этой области доступны для обнаружения объекты самых низких светимостей: субзвезды, красные и белые карлики и субкарлики – звезды населения II. Наиболее достоверные статистические данные могут считаться для той области, где есть и достаточное число объектов и прослеживается их минимальный (наблюдаемый) дефицит. Такой оптимальной областью может считаться сфера с радиусом 10 пк с центром в Солнце. Здесь ожидается 500 звезд и субзвезд, а их наблюдаемая полнота соответствует 70% [4]. Специально проведенные исследования показали, что 30%-й дефицит вызван наблюдательной селекцией параллакс слабых объектов, абсолютная звездная величина которых больше 12^m [3]. Т.е. с поправкой на наблюдательную селекцию, полученные из статистических исследований данные могут служить надежной нижней оценкой долевого содержания.

Подсчеты (по числу объектов), проведенные по каталогу звезд находящихся ближе 10 пк [24], дали следующие результаты. Общая пространственная концентрация звезд, находящихся ближе 10 пк – 0.12 зв/пк^3 [3], 5% звезд относятся к классу светимости VII.

Средние массы звезд главной последовательности и известных белых карликов соответственно равны $0.4 m_{\odot}$ и $\approx 1 m_{\odot}$, соответственно [4, 5]. С учетом вышеперечисленных статистических свойств, селекции наблюдений, следует что диск Галактики образовался 10–12 млрд лет, звездообразование шло примерно равномерно, а солнечные окрестности являются типичным его населением, долевого содержание (по массе) белых карликов среди звездно-субзвездной составляющей диска следует принять 0.20–0.27.

Вычисленный спектр масс ближайших к Солнцу звезд с учетом наблюдательной селекции [4] и данных об открытых субзвездах позволили вычислить звездно-субзвездную функцию масс [25]. Долевого содержание, по массе, субзвезд в этой области составляет 0.13 и не противоречит их числу в окрестностях Солнца. Распространение этой статистики на диск Галактики с учетом современных функций масс звезд с массой $> 1 m_{\odot}$ дает верхнюю оценку содержания субзвезд 0.18.

Субкарлики поля гало

Как известно, звездные скопления, компонентами которых являются субкарлики, образовались в период формирования гало. Исходя из темпа потери звездными скоплениями своих компонентов (см., например, [2]), до настоящего времени «дожили» звездные системы населения II Галактики с массами более $10^4 m_{\odot}$, которые относят к шаровым скоплениям. Распавшиеся звездные системы (с массой $< 10^4 m_{\odot}$) населения II образовали поле гало. Оно состоит из субкарликов и звездных остатков, которые образовались из проэволюционировавших звезд населения II с массой более $0.8 m_{\odot}$. Отмечается радиальные концентрации шаровых скоплений и звезд низкой светимости гало к галактическому центру [9], таким образом, что в плоскости Галактики населения I и II перемешаны. Согласно вышеупомянутого каталога ближайших звезд и проведенных по ним статистическим исследованиям, 3–5% звезд относятся к классам светимости VI [8].

Представим, что пространственная концентрация субзвезд в окрестностях Солнца отражает их радиальное распределение в гало Галактики. Тогда, на основании проведенных статистических исследований, не сложно показать, что на расстоянии 8 кпк от центра Галактики их вышеприведенное долевого содержание среди ближайших звезд соответствует пространственной концентрации (с учетом наблюдательной селекции) – $5 \cdot 10^6 \text{ субк./кпк}^3$.

Веттерер и МакГроу построили зависимость концентрации звезд типа RR Лиры $n_{RR \text{ Lyr}}$ от галактоцентрического расстояния R_{GC} на интервале 10–110 кпк [23], которая в пределах $R_{GC} = 15–75 \text{ кпк}$ согласуется с данными SDSS- обзора [16]. Из графической зависимости « $n_{RR \text{ Lyr}} - R_{GC}$ » следует, что она имеет степенной вид

$$n_{RR \text{ Lyr}} = 2 \cdot 10^3 R_{GC}^{-3} \text{ ед} \text{ е}^{-3}. \tag{1}$$

Экстраполируя эту зависимость в область, где находится солнечный круг ($R_{GC} = 8 \text{ кпк}$), получим, что одна звезда типа RR Лиры, находящаяся в этой области, приходится на $1.3 \cdot 10^6$ субкарликов. Тогда, вычислив число звезд типа RR Лиры в пределах от внутреннего ($R_{GC} = 2 \text{ кпк}$) до внешнего ($R_{GC} = 120 \text{ кпк}$) гало [9]:

$$N_{RR \text{ Lyr}} = \int_2^{120} 4\pi R_{GC}^2 n_{RR \text{ Lyr}}(R_{GC}) dR_{GC} = 10^5, \tag{2}$$

и предполагая, что отношение чисел субкарликов к переменным типа RR Лиры сохраняется в пределах гало, не сложно оценить количество субкарликов в этой области: $N_{VI} = 1.3 \cdot 10^{11}$. Чтобы вычислить общую массу субкарликов M_{VI} необходимо знать их среднюю массу $\langle m \rangle_{II}$, которая зависит от спектра масс $n(m)$, и современных минимальных m_{minII} и максимальных m_{maxII} масс звездно-субзвездного населения II.

В соответствии с зависимостью «время горения водорода – масса звезд нулевого возраста», как уже от-

мечалось выше, звезды, образовавшиеся в эпоху формирования гало, дожившие до настоящего времени имеют максимальную массу $m_{maxII} = 0.8 m_{\odot}$. О минимальной массе объектов населения II достоверных сведений нет. Наиболее распространенным функциональным видом, который используется при решении подобных задач, выбирается степенной спектр масс $\langle m \rangle_{II} \propto m^{\gamma}$ (где $\gamma \leq 0$). Показатель спектра масс γ несет информацию о механизме звездообразования [12]. Но о спектре масс звезд населения II достоверно почти ничего не известно. Учитывая неопределенность значения общей массы M_{VI} из-за ее зависимости от значений m_{minII} и γ , рассмотрим их в качестве параметров так, что

$$M_{VI}(m_{minII}, \gamma) = N_{VI} \langle m \rangle_{II} = N_{VI} \int_{m_{minII}}^{0.8m_{\odot}} m^{\gamma+1} dm \Big/ \int_{m_{minII}}^{0.8m_{\odot}} m^{\gamma} dm. \quad (3)$$

В качестве первого приближения, для m_{minII} можно рассмотреть два значения: $0.01 m_{\odot}$ и $0.1 m_{\odot}$, что подразумевает образование субзвезд и их отсутствие в населении II. В соответствии с анализом, проведенным в работе [6], у шаровых скоплений (как представителей населения II, которые являются поставщиками субзвезд (если $m_{minII} < 0.1 m_{\odot}$), субкарликов в результате диссипации звезд) наблюдаемые γ имеют значения в интервале от 0 до -4, в зависимости от исследуемого интервала масс. Поэтому этот интервал для γ и был выбран для настоящего анализа. На рис. 1 показаны графики зависимостей $M_{VI} = M_{VI}(m_{minII}, \gamma)$.

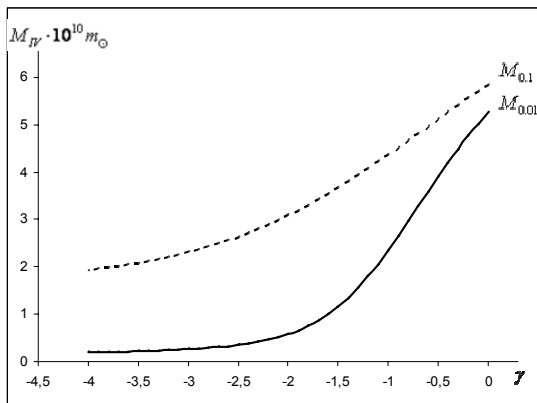


Рис. 1. Зависимость общей массы, заключенной в субкарликах, как функция показателя спектра масс и нижней массы объектов ($0.01 m_{\odot}$ и $0.1 m_{\odot}$), образовавшихся в эпоху формирования гало Галактики (указаны в виде нижних индексов – $M_{0.01}$ и $M_{0.1}$)

Звездные остатки поля галактического гало

Время остывания белых карликов 7–8 млрд лет [1]. Таким образом, самые старые белые карлики, которые образовались в диске 8–10 млрд лет назад, не доступны для наблюдения в видимом диапазоне.

Однако в их существовании никто не сомневается. Спектр масс звездных остатков $s(m_f)$ можно восстановить, если известно начальное распределение масс видимых компонентов $n(m)$ (в данном случае субкарликов) и связи между массами звезд нулевого возраста и соответствующими им массами звездных остатков – $m = \kappa(m_f)$:

$$s(m_f) = n(\kappa(m_f)) |dm/dm_f|. \quad (4)$$

Анализ показал, что связи между массами звезд нулевого возраста населений I–III и их звездными остатками могут быть представлены в следующем виде:

для белых карликов и нейтронных звезд – в виде степенной зависимости [7]

$$m_f = am^{\alpha}, \quad (5)$$

для черных дыр – в виде квадратично-логарифмической функции

$$\lg m_f = C \lg^2 m + B \lg m + A, \quad (6)$$

где $a, \alpha, A, B, C = const$.

Для степенного вида спектра масс звезд нулевого возраста

$$n(m) = \Xi m^{\gamma}, \quad (7)$$

с показателем степени γ , явный вид спектров масс звездных остатков (1 – для белых карликов и нейтронных звезд; 2 – для черных дыр) может быть получен в следующем виде:

$$s_1(m_f) = \Xi |\beta| b^{\gamma+1} m_f^{\beta(\gamma+1)-1}, \quad (8)$$

$$s_2(m_f) = \frac{\Xi}{2|C|} m_f^{-1} \text{dex} \left\{ (\gamma+1) \left[-\frac{B}{2C} \pm \lg^{1/2} (Dm_f^{1/C}) \right] \right\} \lg^{-1/2} (Dm_f^{1/C}), \quad (9)$$

где Ξ – нормировочный коэффициент, b и β – коэффициенты обратной функции (5) – $m = bm_f^{\beta}$,

$$D = \text{dex} \left[0.25 B^2 / C^2 - A / C \right].$$

Следует ожидать, что связь между массами звезд нулевого возраста населений I–III и их звездными остатками является непрерывной функцией, общий спектр масс звездных остатков должен также описываться непрерывной функцией, состоящей из суммы плотностей вероятностей (8) и (9) «сшитых» с помощью коэффициента k_2 , обеспечивающего равенство значений этих функций при значении массы Оппенгеймера–Волкова m_{fO-V} .

$$s_1(m_{fO-V}) = k_2 s_2(m_{fO-V}), \quad (10)$$

т.е.

$$k_2 = 2|\beta C| 2|\beta C| \cdot b^{\gamma+1} m_{fO-V}^{\beta(\gamma+1)} \lg^{1/2} \left(Dm_{fO-V}^{1/C} \right) / \text{dex} \left\{ (\gamma+1) \left[-\frac{B}{2C} \pm \lg^{1/2} \left(Dm_{fO-V}^{1/C} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

Это дает возможность записать общий спектр масс звездных остатков в виде

$$s(m_f) \propto s_1(m_f) + k_2 s_2(m_f). \quad (12)$$

Чтобы правильно осуществить нормировку этой плотности вероятности необходимо вычислить коэффициент k_1 , связывающий спектры масс $n(m)$ и $s(m_f)$ в точках $m = 0.8 m_{\odot}$ и $m_f = 0.5 m_{\odot}$ (согласно связи (5), у звезды с массой нулевого возраста $0.8 m_{\odot}$ образуется белый карлик с массой $0.5 m_{\odot}$):

$$n(m)|_{m=0.8m_i} = k_1 s_1(m_f)|_{m_f=0.5m_i} \quad (13)$$

Т.е. этот коэффициент в явном виде равен

$$k_1 = 0.8^\gamma / |\beta| b^{\gamma+1} 0.5^{\beta(\gamma+1)-1}, \quad (14)$$

а общий спектр масс звездных остатков есть

$$s(m_f) = k_1 [s_1(m_f) + k_2 s_2(m_f)]. \quad (15)$$

На рис. 2 приводятся результаты вычисления, полученные с использованием спектра масс (15), содержания (по массе) в гало Галактики:

- звездных остатков по отношению к субкарликам

$$\Delta = k_1 \left(\int_{0.5m}^{m_{fO-V}} s_1(m_f) dm_f + k_2 \int_{m_{fO-V}}^{m_{fmax}} s_2(m_f) dm_f \right) / \left[1 + k_1 \left(\int_{0.5m}^{m_{fO-V}} s_1(m_f) dm_f + k_2 \int_{m_{fO-V}}^{m_{fmax}} s_2(m_f) dm_f \right) \right], \quad (16)$$

- белых карликов по отношению ко всем звездным остаткам

$$\delta = \int_{0.5m_i}^{1.4} s_1(m_f) dm_f / \left(\int_{0.5m_i}^{m_{fO-V}} s_1(m_f) dm_f + k_2 \int_{m_{fO-V}}^{m_{fmax}} s_2(m_f) dm_f \right). \quad (17)$$

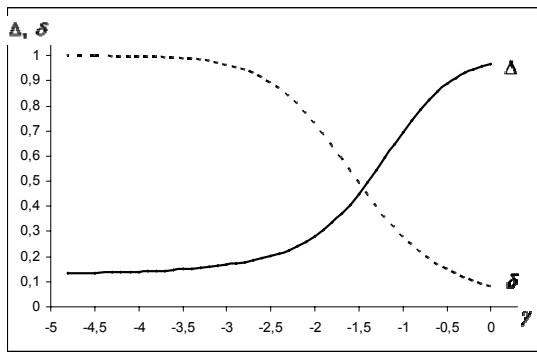


Рис. 2. Зависимости от показателя спектра масс γ отношений масс, содержащихся: Δ – в звездных остатках и субкарликах; δ – в белых карликах и звездных остатках в целом

Результаты расчета звездных остатков населения III

Звезды населения III образуются путем повторной фрагментации протоскоплений, образовавшихся в эпоху рекомбинации атомов водорода, когда температура Вселенной остыла до 4 000 К. Это соответствует возрасту Вселенной $2 \cdot 10^5$ лет и ее средней плотности 10^{-20} г/см³. Для джинсового приближения, это соответствует массе первичных фрагментов (протоскоплений) $10^6 m_\odot$.

Для расчета долевых содержаний протозвезд населения III, которые образуются путем фрагментации протоскоплений с массой $10^6 m_\odot$, эволюционирующих в дальнейшем в звезды и звездные остатки, воспользуемся алгоритмом, разработанным одним из соавторов для решения такого типа задач в рамках статисти-

ческой космогонии [10, 11]. Общий вид алгоритма для расчета компонентов эволюционирующей произвольной звездной системы достаточно громоздок. Так, при анализе долевого содержания газа, оставшегося в протоскоплении, после произвольного s -го этапа звездообразования, которое в соответствии с [10], выражение для которого в общем случае имеет вид

$$\xi_{ss} = f_{ss} [g_{ss}^1 + g_{ss}^3 (k_{ss}^1 + k_{ss}^2 w_{ss}^3)], \quad (18)$$

где⁵: f_{ss} – долевое содержание газа в системе, оставшееся во фрагментирующей системе после $(s-1)$ -го этапа звездообразования; g_{ss}^v – доли массы вещества, оставшиеся после образования протозвезд ($v = 1$) и ушедшие на образование последних ($v = 3$), соответственно; k_{ss}^μ – доли массы вещества, содержащиеся в звездных коконах ($\mu = 1$) и звездах нулевого возраста ($\mu = 2$), соответственно; w_{ss}^3 – доля вещества, теряемая за счет звездного ветра сверхветра и потери оболочек между началами s -го и $(s + 1)$ -го звездообразованиями.

Сумма долевых содержаний накопившихся за все s -циклы, пробегающего значения от 1 до N , с учетом того, что $f_{11} \equiv 1$, есть:

$$\xi_N = \prod_{i=1}^N [g_{ii}^1 + g_{ii}^3 (k_{ii}^1 + k_{ii}^2 w_{ii}^3)]. \quad (19)$$

В этом случае для $N (\geq s)$ числа звездообразований, с учетом нормировки долевых солевых содержаний, требуется $3N$ вышеприведенных характеристик.

Выражение (19) можно существенно упростить, если принять во внимание физические условия, которые существовали в ранней Вселенной, и свойства первых звезд с нулевым содержанием металлов. Допустим, что процесс каскадной фрагментации происходил достаточно быстро настолько, что можно принять одинаковыми однотипные физические характеристики образующихся протозвезд в промежутке времени, когда минимальная масса протоскоплений уменьшилась (за счет дальнейших уменьшений температуры и плотности Вселенной) от значения $10^6 m_\odot$ до $10^5 m_\odot$. Это соответствует выполнению следующих равенств:

$$g_{11}^v = g_{22}^v = \dots = g_{ss}^v = \dots = g_{NN}^v, \quad (20)$$

$$k_{11}^\mu = k_{22}^\mu = \dots = k_{ss}^\mu = \dots = k_{NN}^\mu, \quad (21)$$

$$w_{11}^3 = w_{22}^3 = \dots = w_{ss}^3 = \dots = w_{NN}^3. \quad (22)$$

Условия (20)-(22) позволяют записать выражение (19) в существенно упрощенном виде

$$\xi_N = [g_{11}^1 + g_{11}^3 (k_{11}^1 + k_{11}^2 w_{11}^3)]^N, \quad (23)$$

⁵ Индексы «ss» обозначают, что процесс эволюции описывается диагональными членами матрицы долевых содержаний вышеприведенных компонентов.

из которого легко получить число N - циклов ($s = N$) звездообразований, необходимых для достижения долевого содержания газа ξ_N :

$$N = \lg \xi_N / \lg \left[g_{11}^1 + g_{11}^3 (k_{11}^1 + k_{11}^2 w_{11}^3) \right]. \quad (24)$$

Согласно [10], при отсутствии образования в звездных системах субзвезд имеем:

$$g_{ss}^1 = \int_0^{10^5 m_\odot} m^\gamma dm / \int_0^{10^6 m_\odot} m^\gamma dm \quad (25)$$

и

$$g_{ss}^3 = 1 - g_{ss}^1. \quad (26)$$

С учетом свойств звезд населения III [17, 19], можно принять для остальных характеристик следующие значения: $k_{ss}^2 = 0.1$, $w_{ss}^3 = 0.1$. Принимая во внимание найденные значения, по формуле (24) были вычислены зависимости числа циклов звездообразования N от показателя спектра масс γ , для фиксированных значений $\xi_N = 0.1, 0.133, 0.5, 0.9$. Данные приведены на рис. 3. Эти значения отражают доленое содержание газа, оставшееся после N - циклов звездообразования (включая $0.133 \approx 0.04/(0.04 + 0.26)$ – отношение барионного вещества к сумме барионной и темной материи).

Выводы и их краткое обсуждение

1. В сфере с радиусом 10 пк с центром в Солнце содержание видимых белых карликов и субзвезд равно 5% и 13%, соответственно. Эти значения могут служить нижней оценкой соответствующих содержаний, поскольку не известно, сколько белых карликов и субзвезд в окрестностях Солнца перешло в стадию черных карликов. Для выяснения вклада, по массе, субзвезд и звездных остатков в диске Галактики в целом, необходимо проведение специальных статистических расчетов эволюционных моделей диска Галактики. Алгоритм таких расчетов разработан в рамках статистической космогонии [10, 11].

2. В гало Галактики доленое содержание звездных остатков по отношению к массе, заключенной в субкарликах не менее 14% (для $\gamma = -4$). Субкарлики образуются путем диссипации из звездных скоплений населения II, с массой меньше $10^4 m_\odot$. Если их начальный спектр масс такой же, как у рассеянных скоплений, для которых ожидается равным $\gamma = -1$. В этом случае, согласно полученной зависимости « $\Delta - \gamma$ » отношение звездных остатков к субкарликам, по массе, может составлять 70%. При таком γ общая их масса в гало может составлять: $2.3 \cdot 10^4 m_\odot$ если при образовании населения II были условия для образования субзвезд; если нет – $4.4 \cdot 10^4 m_\odot$, как это следует из рис. 1. Доленое содержание звездных остатков соизмеримо с встречаемостью субзвезд в системах, для которых показатель начального спектра масс $\gamma \rightarrow 0$, т.е., спектр масс стремится к равномерному распределению.

3. При условии, что в первичных неоднородностях существуют условия для быстрого образования звезд с нулевым содержанием металлов, при малых γ доленое

содержание газа оставшегося от формирования звездных системах может быть существенно меньше того, которое остается для последующего формирования звезд населения II и I. Значение $\gamma = -1/3$ удовлетворяет такому условию. Как ранее было показано в работе авторов [12], значению показателя начального спектра масс $\gamma = -1/3$ отвечает большое разнообразие фрагментирующих физических систем.

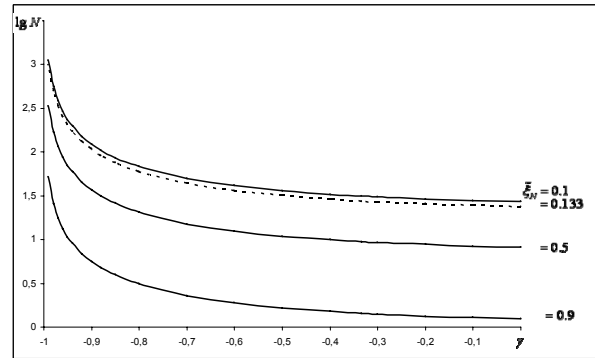


Рис.3. Зависимости числа циклов звездообразования N от показателя спектра масс γ , для фиксированных значений $\xi_N = 0.1, 0.133, 0.5, 0.9$ (ξ_N – доленое содержания газа, оставшееся после N - циклов звездообразования)

Литература

1. Бисноватый-Коган Г.С.: 1989, Физические вопросы теории звездной эволюции, М.: Наука.
2. Гуревич Л.Э., Левин Б.Ю.: 1950, Докл. АН СССР, т. 70, № 5, с. 781.
3. Захожай В.А.: 1980, Астрометрия и астрофиз., № 42, с. 64.
4. Захожай В.А.: 1990, Статистические свойства звезд и кратных систем в области 10 пк // Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды, Свердловск.: УрГУ, с. 44.
5. Захожай В.А.: 1994, Кинем. и физ.неб.тел, т. 10, № 2, с. 68.
6. Захожай В.А.: 2000, Кинем. и физ. неб. тел, т. 16, № 2, с. 153.
7. Захожай В.А.: 2002, Вісн. астрон. школи, т. 3, № 2, с. 81.
8. Захожай В.А.: 2002, Кинем. и физ. неб. тел, т. 18, № 6, с. 535.
9. Захожай В.А.: 2005, Кинем. и физ. неб. тел, т. 21, № 6, с. 414.
10. Захожай В.А.: 2009, Изв. Крымской Астрофиз. Obs., т. 104, № 6, с. 80.
11. Захожай В.А.: 2009, Изв. ГАО в Пулковке, № 219, вып.4, с. 105.
12. Захожай В.А., Минаков А.А., Шульга В.М.: 2010, 10-я гамовская астрономическая конференция-школа «Астрономия на стыке наук – космофизика, космология и гравитация, астрофизика, радиоастрономия, астробиология»: труды конференции-школы. – 23-28 августа, 2010, Одесса: Астропринт, с. 115.
13. Лукаш В.Н., Рубаков В.А.: 2008, Успехи. физ. наук, т. 178, с. 301.

14. Рябов В.А., Царев В.А., Цховребов А.М.: 2008, Успехи физ. наук, т. 178, с. 1130.
15. Чернин А.: 2008, Успехи физ. наук, т. 178, с. 267.
16. Bullock J.S., Kravtsov A.V., Weinberg D.H.: 2001, *Astrophys. J.*, Vol. 548, p. 33.
17. Bromm V., Larson R.B.: 2004, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, Vol. 42, p. 79.
18. Dai D-C., Lue A., Starkman G., Stojkovic D.: arXiv:0912.0520v3.
19. Heger A., Fryuer C.L., Woosley S.E. et al.: 2003, *Astrophys. J.*, Vol. 591, Iss.1, p. 288.
20. Kusenko A.: arXiv:hep-ph/0612159v1.
21. Kutsenko A., Steinhardt P.: 2001, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 87, p. 141301.
22. Naeye R.: 2008, *New Sci.*, Vol. 197, No. 2643, p. 34.
23. Wetterer C.J., McGraw J.T.: 1996, *Astron. J.*, Vol. 112, p. 1046.
24. Zakhzhaj V.A.: <http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=V/101>.
25. Zakhzhay V.A.: 2008, *Astrophys. Space Sci.*, Vol. 315, No. 1-4, p. 13.