

Вклад ультрадиффузных галактик в войдах в скрытую массу и оптическое фоновое космическое излучение

Contribution of ultra-diffuse galaxies in voids to the hidden mass and optical background cosmic radiation

Поройков С.Ю.

Канд. физ-мат. наук Московского государственного Университета им. М.В. Ломоносова,
г. Москва
e-mail: sporoykov@mail.ru

Poroykov S.Yu.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Moscow
e-mail: sporoykov@mail.ru

Аннотация

Войды содержат 20% галактик – ультрадиффузные галактики (УДГ), имеющие протяженное массивное темное гало, с отношением масса-светимость $\sim 10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$. При показателе Солпитера $\gamma = 3,85$ для разреженной среды войдов УДГ могут состоять в основном из темных карликов. УДГ в войдах слабо проявляются в линзировании, но вносят вклад в фоновое космическое излучение (ФКИ). Показано, что УДГ могут формировать $\sim 50\%$ ФКИ в видимой области. На этой основе, с учетом экспериментальных данных о доле вещества в филаментах $\Omega_m = 0,31 \pm 0,012$ и ионизованного газа в войдах $\Omega_{gv} = 0,05 \pm 0,025$, оценена доля вещества в УДГ в войдах $\Omega_v = 0,64 \pm 0,037$. Также подтверждена оценка числа нейтронных звезд $\sim 10^9$, образующих в галактике массой $\sim 10^{11} M_{\odot}$ обилие дейтерия $\sim 10^{-5}$.

Ключевые слова: ультрадиффузные галактики, скрытая масса, темные карлики, фоновое космическое излучение.

Abstract

The voids contain 20% of cataloged galaxies – ultra-diffuse galaxies (UDG) with an extended massive dark halo, with a mass-luminosity ratio of $\sim 10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$. With the Salpeter exponent $\gamma = 3.85$ for a rarefied medium of the voids, the UDG may consist mainly of dark dwarfs. UDGs in voids are weakly manifested in lensing, but contribute to the background cosmic radiation (BCR). It is shown that UDGs can form $\sim 50\%$ of the BCR in the visible region. On this basis, taking into account the experimental data on the substance fraction in the filaments $\Omega_m = 0.31 \pm 0.012$ and the ionized gas in the voids $\Omega_{gv} = 0.05 \pm 0.025$, the fraction of the substance in the UDG in the voids $\Omega_v = 0.64 \pm 0.037$ was estimated. The estimate of the number of neutron stars $\sim 10^9$, which form an abundance of deuterium $\sim 10^{-5}$ in a galaxy with a mass of $\sim 10^{11} M_{\odot}$, is also confirmed.

Keywords: ultra-diffuse galaxies, hidden mass, dark dwarfs, background cosmic radiation.

1. Характеристики галактик в войдах

В войдах (пустотах) обнаружены *ультрадиффузные галактики* (УДГ) [1]; [2] с *низкой поверхностной яркостью* (LSBD) вследствие рассеянного распределения звезд. Из общего числа каталогизированных галактик $N_0 = 6792$ в пределах 25 Мпк от Местной группы галактик войды содержат $N = 1354$ УДГ, что составляет $\delta v = N/N_0 \approx 20\%$ всех галактик. $N_d = 1088$ галактик в войдах – карликовые [1] (по светимости), что составляет $N_d/N \approx 80\%$ галактик. При светимости карликов УДГ имеют размеры гигантов [3], а их средняя масса (с учетом гало) на порядок выше, чем у галактик общей популяции (с учетом корон), которые концентрируются в филаментах, образуемых галактиками, их группами и скоплениями.

УДГ имеют низкую металличность [2]; [4] и эволюционно моложе галактик общей популяции [5]. УДГ в войдах формируют *субструктуры*. В центрах субструктур обнаружены небольшие, в основном карликовые галактики, содержащие много голубых звезд. Вокруг центра на удалении ~ 2 Мпк находятся крупные красные галактики [1].

В пределах $R = 25$ Мпк УДГ находятся $Z = 25$ близлежащих пустот – субструктур в виде сфер, ограниченных яркими красными галактиками [1]. Среднее число УДГ в группах $N_0 = N/Z \approx 54$. Например, в пустоте Эридана обнаружено 70 тусклых изолированных галактик [5].

Субструктуры в войдах распределены достаточно однородно. При этом УДГ – протяженные звездные системы [6] гигантского размера [3] с протяженным гало [7], которым присуще рассеянное распределение звезд. Вследствие чего УДГ вносят вклад в *фоновое космическое излучение* (ФКИ) в оптическом диапазоне (§ 3), но слабо проявляются в линзировании, в отличие от массивных галактик общей популяции.

В войдах обнаружено незначительное гравитационное линзирование, связываемое со скрытой массой (темной материей) [9]. Тем самым, наиболее массивные УДГ и их плотные группы могут проявляться в линзировании. Окружающие субструктуры войдов и содержащиеся в них УДГ покрывают всю небесную сферу, т.е. в силу линзирующего эффекта они могут вносить вклад во *флуктуации* изотропного микроволнового фонового излучения.

УДГ имеют в основном эллиптическую и сферическую морфологию [6]. Сфероидальные карликовые галактики окружены массивными ореолами скрытой массы [8]. Так, УДГ обладают массивным темным гало [7], с учетом которого они имеют соотношение масса-светимость $M_v/L_v \sim 10^3 M_\odot/L_\odot$ [4].

Для сравнения, у галактик общей популяции (в филаментах) среднее соотношение масса-светимость $M_f/L_f \sim 10 M_\odot/L_\odot$ [10, с. 389], что на два порядка меньше. Так, соотношение масса-светимость галактик в филаментах (без учета корон) и галактик в войдах (с учетом гало):

$$\Delta v_f = M_v L_f / M_f L_v, \quad (1)$$

где L_f – светимость галактик в войдах; L_f – в филаментах; M_v – масса галактик в войдах (с учетом гало); M_f – в филаментах (без учета корон).

При приведенных выше параметрах $\Delta v_f \sim 10^2$.

На этой основе оценим вклад галактик в войдах в массу Вселенной:

$$\Omega_{uv} = \delta v \Omega_s \Delta v_f / K, \quad (2)$$

где δv – доля галактик в войдах среди всех галактик; Ω_s – доля видимых звезд в массе Вселенной; K – превышение суммарной массы видимых звезд в типичных галактиках в филаментах в сравнении с галактиками в войдах.

Доля барионов (в звездах) $\Omega_b = 0,0484 \pm 0,001$ [15]. В данном случае учитываются *видимые звезды*, т.е. звезды, излучающие в видимой области спектра, с массовой долей $\Omega_s \sim \Omega_b$. Так, в массу галактики вносят заметный вклад труднообнаружимые темные (преимущественно красные) карлики, излучающие в ближнем *инфракрасном* (ИК) диапазоне (§ 5).

Последующие оценки на основе формулы (5) показывают, что средняя суммарная масса видимых звезд в УДГ в $K \approx 1,6$ раз меньше, чем в галактиках в филаментах. При $\delta v \sim 20\%$ [1] согласно формуле (2) доля *вещества в войдах* $\Omega_{uv} \approx 0,6$ при погрешности расчетов $\pm 10\%$.

В свою очередь, соотношение масса-светимость галактик в войдах и филаментах с учетом массы их гало и корон:

$$\Delta v_f = MvL_f/M_fL_v, \quad (3)$$

где M_f – масса галактик в филаментах с учетом корон.

У галактик общей популяции (в филаментах) среднее отношение масса-светимость $M_f/L_f \sim 10 M_\odot/L_\odot$ объяснимо высокой долей маломассивных звезд [10, с. 389]. Отношение вириальной массы галактик к массе звезд $\mu = M_{vir}/\Sigma M_s = 2 \pm 0,5$ [7], т.е. соотношение масса-светимость видимых звезд в галактиках $M_s/L_s = M/\mu L \sim 5 M_\odot/L_\odot$ при параметре $\eta_f = L_s/L_\odot \sim 0,2$. Так, у нашей галактики $\eta = 0,19 \pm 0,03$ (§ 5). При зависимости светимости звезд от массы $L \sim m^4$ [11, с. 68] светимость $L_s \sim 0,2 L_\odot$ имеют звезды массой $\sim 0,7 M_\odot$.

Галактики (в филаментах) имеют массивные короны, чья масса может на порядок превышать массу звезд [13, с. 545]. По данным Planck 2015 доля скрытой массы, ассоциируемой с «темной материей», проявляющейся в линзировании $\Omega_c = 0,258 \pm 0,011$ при доле барионов (в видимых звездах) $\Omega_b = 0,0484 \pm 0,001$ [15], т.е. $\Omega_s \sim \Omega_b$. Суммарная доля скрытой массы и звезд $\Omega_m = \Omega_c + \Omega_s = 0,306 \pm 0,012$. По другим данным $\Omega_m = 0,315 \pm 0,012$ [16]. Средняя доля вещества в филаментах $\Omega_m = 0,31 \pm 0,012$, что сравнимо с долей вириальной массы корон галактик $\leq 0,3$ [10, с. 347]; [7]. Масса галактик в филаментах с учетом корон больше, чем у видимых звезд в $\Omega_m/\Omega_s \approx 6,4$ раза.

При соотношении масса-светимость видимых звезд $M_s/L_s \sim 5 M_\odot/L_\odot$, отношение масса-светимость галактик (в филаментах) с учетом корон $M_f/L_f \sim 32 M_\odot/L_\odot$. При приведенных выше параметрах $\Delta v_f \approx 30$ (3), т.е. средняя светимость галактик (в филаментах) в 30 раз выше, чем УДГ в войдах.

Вклад УДГ в ФКИ в видимом диапазоне позволяет оценить массовую долю *видимых звезд в галактиках в войдах* $\Omega_{sv} = 0,006 \pm 0,0006$ (§ 3).

На этой основе можно оценить массовую долю галактик в войдах:

$$\Omega_{uv} = \eta_v \Omega_{sv} M_v L_\odot / M_\odot L_v, \quad (4)$$

где M_\odot – масса Солнца; L_\odot – его светимость; Ω_{sv} – массовая доля видимых звезд в войдах; η_v – параметр, характеризующий светимость звезд в войдах.

При светимости видимых звезд в войдах $\eta_v \sim 0,1$ (5) светимость УДГ в войдах эквивалентна светимости звезд типа Солнца с массовой долей $\eta_v \Omega_{sv} = 6 \cdot 10^{-4} \pm 6 \cdot 10^{-5}$ (§ 3). При соотношении масса-светимость УДГ $M_v/L_v \sim 10^3 M_\odot/L_\odot$ [4] массовая доля *галактик в войдах* $\Omega_{uv} \approx 0,6 \pm 0,06$.

В свою очередь, на основе массовой доли галактик в войдах и их соотношения масса-светимость можно оценить среднюю светимость видимых звезд в УДГ. Так, формула (4) представима в виде:

$$\eta_v = \Omega_{uv} M_\odot L_{sv} / \Omega_{sv} M_v L_\odot, \quad (5)$$

где L_{sv} – светимость видимых звезд в галактиках в войдах.

При приведенных выше значениях параметров $\eta_v = L_{sv}/L_\odot \approx 0,1$. Соответственно, *средняя светимость видимых звезд в войдах* $L_{sv} \sim 0,1 L_\odot$.

При зависимости светимости звезд от массы $L \sim m^4$ такая светимость у звезд массой $\sim 0,6 M_\odot$. При $\eta_f/\eta_v \approx 2$ видимые звезды в УДГ вдвое тусклее, чем в галактиках общей популяции. При этом средняя масса видимых звезд в УДГ в $(\eta_f/\eta_v)^{1/4} \approx 1,2$ раза меньше, чем в галактиках в филаментах.

Средняя суммарная масса видимых звезд в УДГ в $K = \delta v \Omega_s / \Omega_{sv} \approx 1,6$ раза меньше, чем в галактиках в филаментах, т.е. средняя светимость галактик в войдах меньше, чем в филаментах в $K \eta_f / \eta_v \approx 3,2$ раза.

При доле видимых звезд в войдах в массе всех видимых звезд $\Omega_{sv}/\Omega_s \approx 12\%$, вклад УДГ в светимость всех галактик лишь $\Omega_{sv} \eta_v / \Omega_s K \eta_f \approx 6\%$, что сравнимо со светимостью карликовых галактик с долей $\delta d \sim 6\%$ массе всех галактик общей популяции согласно функции масс Холмберга (§ 3).

Так, УДГ образуются в разреженной среде войдов [17], которой может соответствовать показатель функции Солпитера $\gamma = 3,85$ (стандартный показатель $\gamma = 2,35$) [18], т.е. УДГ могут содержать маломассивные звезды слабой светимости – темные карлики (§ 2).

Темные карлики вносят вклад в скрытую массу наряду с прочими *массивными астрофизическими объектами гало* (МАСНО). К МАСНО традиционно относят красные, коричневые и белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры (§ 5). МАСНО, включая черные дыры звездного генезиса, являются звездами, либо продуктами эволюции звезд (§ 6), состоящих из барионов. Так, теория гравитационных неустойчивостей свидетельствует в пользу доли *барионов в первичном газе* $\Omega_b \sim 1$; при этом ограничение на долю барионов исходя из наблюдаемого обилия дейтерия может быть снято в силу ряда факторов (§ 10).

Долю материи в войдах ограничивает космологическая плотность. При средней доле вещества в филаментах $\Omega_m = 0,31 \pm 0,012$ согласно данным [15]; [16], доля *вещества в войдах* $\Omega_v = 1 - \Omega_m = 0,69 \pm 0,012$ (§ 9).

Эффект Зельдовича – Сюняева выявляет горячий межгалактический газ в окрестности филаментов [19], который может быть ионизован излучением горячего газа в коронах галактик. Характеристики быстрых радиовсплесков указывают на долю *ионизованного* водорода в войдах $\Omega_{gv} = 0,05 \pm 0,025$ [20]. Доля вещества в войдах помимо ионизованного газа $\Omega_{uv} = \Omega_v - \Omega_{gv} = 0,64 \pm 0,037$, что сравнимо с оценкой $\Omega_{uv} = 0,6 \pm 0,06$ на основе формул (2) и (4). Разница в оценках $\Delta\Omega_v \approx 0,04$ может быть обусловлена вкладом в массу УДГ межзвездного газа, а также планет-гигантов (§ 9).

Так, УДГ содержат *нейтральный* газ. Согласно радиолинии водорода 21 см нейтральный газ, как правило, преобладает по массе над звездным компонентом УДГ [7]. Например, УДГ J0015+0104 и J235437.29-000501.6 в пустоте Эридана имеют массовые доли газа 0,98 и 0,97 массы видимых звезд [2]. Вклад газа в массу УДГ с учетом гало $\delta g \sim \delta v \sim 1\%$, что на порядок больше, чем в эллиптических Е-галактиках, где доля газа минимальна $\sim 0,1\%$ [13, с. 216]. Между тем, эллиптическая и сферическая морфология УДГ [6] не коррелирует с высокой долей газа. Кроме того, эволюция галактик в войдах происходит медленнее, чем у галактик общей популяции [26], что объяснимо низкой концентрацией газа. При этом низкая светимость УДГ связывается с низкой долей межзвездного газа, из которого формируются звезды. Указанные выше известные противоречия требуют объяснения.

На основе массовой доли УДГ Ω_{uv} оценим соотношение средних масс галактик в войдах и филаментах с учетом массы их гало и корон:

$$M_v/M_f = \Omega_{uv}/\delta v \Omega_m, \quad (6)$$

где Ω_m – вклад вещества в филаментах в массу Вселенной.

При доле галактик в войдах $\delta v = 0,2$ [1] и среднем $\Omega_m = 0,31 \pm 0,012$ с учетом данных [15]; [16], отношение $M_v/M_f \approx 10$, т.е. *средняя масса галактик с учетом гало в войдах на порядок выше, чем в филаментах с учетом корон*.

Высокая скрытая масса и протяженность гало УДГ могут быть обусловлены их формированием в условиях консолидации звездных скоплений, включая *шаровые скопления* (ШС), и карликовых (по массе) галактик. Так, в гало (коронах) галактик общей популяции наблюдаются ШС [10, с. 387]; [11, с. 65] и карликовые галактики [25, с. 1224]. При этом согласно одной из известных моделей галактики могут образовываться при слиянии звездных комплексов типа карликовых галактик [10, с. 390]. На актуальность данной модели для УДГ указывает целый ряд факторов:

Во-первых, в УДГ наблюдаются ШС [17]; [3]. При этом ШС массой $10^4 - 10^6 M_\odot$ возрастом ≥ 5 млрд лет – типичные представители гало галактик [11, с. 65], т.е. они могут формироваться в разреженной среде.

Во-вторых, ШС в гало имеют низкую металличность (близкую к первичному газу) и состоят в основном из маломассивных звезд массой $< 0,7 - 0,8 M_\odot$ [11, с. 65]. Также УДГ имеют низкую металличность [2]; [4] и содержат маломассивные видимые звезды сравнимой типичной массой $\sim 0,6 M_\odot$ согласно предыдущим оценкам.

В-третьих, у УДГ преобладает сферическая и эллиптическая морфология [6]. Эллиптические галактики вращаются медленнее спиральных и характеризуются случайным движением звезд, что объясняется их образованием путем слияния галактик меньшей массы [10, с. 342].

ШС движутся в гало по вытянутым орбитам, которые из-за динамического торможения за счет гравитационной фокусировки сжимаются [11, с. 66].

В-четвертых, УДГ с эллиптической (сферической) морфологией [6] обладают массивным и протяженным гало [7]. Эллиптические галактики общей популяции имеют протяженные короны [13, с. 213], что объяснимо их образованием путем слияния корон галактик меньшей массы. При этом может происходить «приливной захват» крупными галактиками ШС из карликовых сфероидальных галактик [21]. В данных условиях ШС могут формировать в гало УДГ достаточно протяженные структуры, что соответствует наблюдаемому в них рассеянному распределению звезд.

В-пятых, присутствие ШС позволяет объяснить высокую долю в УДГ межзвездного газа его удержанием гравитацией ядер ШС. В силу чего газ не оседает в центрах УДГ, как это происходит в медленно вращающихся эллиптических галактиках общей популяции.

Модель УДГ, чье гало образуют карликовые галактики и ШС, объясняет его большой масштаб. Радиус гало УДГ с эллиптической (сферической) морфологией [6] может быть сравним с радиусом корон гигантских эллиптических E-галактик общей популяции. Так, E-галактики имеют протяженные короны [13, с. 213]. У радиогалактик, отождествляемых с гигантскими E-галактиками [10, с. 390]; [13, с. 213], согласно расстоянию между радиоизлучающими компонентами, радиус корон может достигать ~ 1 Мпк [13, с. 214]. Напомним, что УДГ с учетом гало также имеют гигантские размеры [3].

2. Распределение звезд по массам в разреженных средах

Распределение рождающихся звезд по массам описывается начальной функцией масс Солпитера, имеющей степенной вид:

$$N(m) \sim 1/m^\gamma, \quad (7)$$

где m – масса звезд; γ – показатель функции Солпитера.

При $\gamma = 2,35$ в диске нашей галактики вероятность рождения звезд обратно пропорциональна примерно квадрату их массы.

В общем случае массовая доля звезд пропорциональна их числу и массе $\Omega_s(m) \sim mN(m)$. Массовая доля тусклых карликов в галактике:

$$\Omega_d = \Omega_s(M_\odot/md)(\gamma - 1), \quad (8)$$

где md – масса карлика; Ω_s – массовая доля звезд типа Солнца.

Распределение карликов по массам уточняется. Показатель Солпитера $\gamma = 2,35$ согласно Крупе сохраняется для звезд массой $\geq 0,5 M_\odot$. Для красных карликов массой $\leq 0,5 M_\odot$ в диске галактики вероятен параметр $\gamma \sim 1,3$ [22]; который может падать до $\gamma \sim 0,3$ для коричневых карликов массой $(0,01 - 0,08) M_\odot$ [23]. Согласно данным космической обсерватории Gaia наибольшая доля карликов в диске галактике относится к классам M3 – M5 [24], что соответствует массе $0,14 - 0,35 M_\odot$ [27], т.е. $\gamma > 1$ для звезд массой $\geq 0,14 M_\odot$.

Вместе с тем, для звезд в УДГ в войдах, образовавшихся из более разреженного газа, чем звезды в диске галактики, доля темных карликов может быть выше [18]. Так, распределение звезд по массам зависит от доли газа в галактиках. У бедных газом E-галактик соотношение масса-светимость $M/L \sim (5 - 15) M_\odot/L_\odot$ до трех раз выше, чем у богатых газом неправильных Ir-галактик $M/L \sim 5 M_\odot/L_\odot$ [10, с. 389]. Тем самым, *со снижением плотности межзвездного газа растет соотношение масса-светимость звезд.*

Соответственно, *показатель Солпитера возрастает при снижении плотности межзвездного газа*, т.е. растет доля звезд малой массы. Так, для периферии (гало) галактики, где газ разрежен [12, с. 85], характерны звезды малой массы $\leq 0,85 M_\odot$ [10, с. 387]. В диске галактики, насыщенном газом [12, с. 85], наблюдаются звезды всех масс, в том числе массивные [10, с. 387]. Так, средняя светимость видимых звезд в галактиках общей популяции $L_{sf} \sim 0,2 L_\odot$ соответствует звездам массой $0,7 M_\odot$; у звезд в УДГ в войдах светимость вдвое меньше $L_{sv} \sim 0,1 L_\odot$ при меньшей массе звезд $0,6 M_\odot$ (§ 1).

При массовой доле УДГ в войдах $\Omega_{uv} \sim 0,6$ доля звезд типа Солнца в войдах может составлять лишь $\Omega_{sv} \sim 10^{-3}\Omega_{uv} \approx 0,0006$ (§ 3).

Отмечается неразвитость галактик в войдах [2], т.е. они эволюционно моложе галактик в филаментах. Эволюция галактик в войдах происходит медленнее, чем в галактиках общей популяции [26], что объяснимо низкой концентрацией газа. Так, УДГ формируются в разреженных средах [17], т.е. они могут содержать высокую долю маломассивных звезд.

Высокое соотношение масса-светимость УДГ в войдах объяснимо высоким показателем функции масс Солпитера $\gamma = 3,85$ [18], так что согласно формуле (7) вероятность рождения звезды обратно пропорциональна примерно четвертой степени ее массы, т.е. *скрытую массу ультрадиффузных галактик могут формировать темные карлики* массой $\sim 0,1 M_{\odot}$.

Соотношение масса-светимость УДГ $M_V/L_V \sim 10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$ [4] согласно формуле (8) реализуемо, если основную массовую долю имеют звезды массой $m_d \sim 0,07 M_{\odot}$ светимостью $L_d \sim 7 \cdot 10^{-5} L_{\odot}$ [27]. У таких звезд соотношение масса-светимость $m_d/L_d \sim 10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$. Это звезды пограничной массы между красными и коричневыми карликами.

Напомним, что к тусклым карликам относят *красные карлики* (КК) спектрального класса М массой $0,075 M_{\odot} \leq m_{dr} \leq 0,5 M_{\odot}$ и маломассивные *коричневые карлики* (КоК) массой $0,012 M_{\odot} \leq m_{db} \leq 0,07 M_{\odot}$ [27]; [28].

Более высокую долю КК и КоК может содержать периферия диска галактик общей популяции, где газ достаточно разрежен. Так, на периферии нашей галактики на удалении 10 – 12 кпк от ее центра согласно радиолинии водорода слой нейтрального водорода размывается до 1 кпк по толщине и отклоняется от галактической плоскости [13, с. 216].

3. Вклад ультрадиффузных галактик в оптическое фоновое излучение

Интенсивность спектра ФКИ в ряде диапазонов определяется многочисленными далекими дискретными неразрешенными источниками излучения [14, с. 336]. Обнаружение значительного числа карликовых галактик позволило связать ФКИ в *оптической* области с их излучением [29]. В силу низкой поверхностной яркости УДГ в войдах трудно обнаружимы, так что они также могут вносить вклад в ФКИ в оптическом диапазоне.

Оценим плотность энергии *видимого* излучения галактик, усредненную по всему пространству Вселенной:

$$\epsilon_g \approx \eta f_{pc} L_{\odot} \Omega_s \chi T_g / M_{\odot}, \quad (9)$$

где ρ_c – критическая плотность Вселенной; Ω_s – массовая доля звезд; T_g – возраст галактик; ηf – параметр, характеризующий светимость звезд в галактиках в филаментах; χ – параметр, учитывающий красное смещение видимого излучения удаленных галактик.

Коэффициент χ в формуле (9) с учетом (11) представим в виде:

$$\chi = [1 - 1/(z + 1)^{3/2}]. \quad (10)$$

Коэффициент χ учитывает красное смещение, при котором длина волны излучения удаленных галактик $\lambda = \lambda_0(z + 1)$ сохраняется в видимом диапазоне. Видимое излучение звезд типа Солнца с максимумом в области энергетического спектра $\lambda_0 = 450$ нм [13, с. 594] сместится к границе видимого спектра $\lambda \leq 760$ нм [10, с. 276], если оно было испущено в эпоху $z = \lambda/\lambda_0 - 1 \approx 0,7$. Падение энергии фотонов $E_v = E_0/(z + 1)$ в диапазоне $0 \leq z \leq 0,7$ в сравнимой степени компенсирует рост скорости звездообразования в галактиках той эпохи [29]; [30].

Возраст нестационарной Вселенной критической плотности в эпоху, определяемую красным смещением z :

$$T_0 = T_v/(z + 1)^{3/2}, \quad (11)$$

где T_v – возраст современной Вселенной.

Возраст галактик $T_g \geq 10$ млрд лет [10, с. 387] сравним с возрастом Вселенной $T_v = 13,8$ млрд лет [15]. Время распространения излучения галактик $T = T_v - T_0 = \chi T_v$, где согласно формуле (10) параметр $\chi \approx 0,6$ при $z \sim 0,7$. Соответственно, $T = \chi T_v \approx 8$ млрд лет.

Для галактик типично соотношение масса-светимость $M/L \sim 10 M_{\odot}/L_{\odot}$ [10, с. 389]. Скрытая масса галактик сравнима с массой видимых звезд [13, с. 550]. Отношение вириальной массы галактик к массе звезд $\mu = M_{vir}/\Sigma M_s = 2 \pm 0,5$ [7], т.е. соотношение масса-светимость видимых звезд в галактиках $M_s/L_s = M/\mu L \sim 5 M_{\odot}/L_{\odot}$ при параметре $\eta f = L_s/L_{\odot} \sim 0,2$.

Массовая доля барионов (в видимых звездах) $\Omega_b = 0,0484 \pm 0,001$ [15] при $\Omega_s \sim \Omega_b$. При $\rho_c \sim 9 \cdot 10^{-30}$ г/см³ [31]; $L_{\odot} \sim 3,9 \cdot 10^{26}$ Вт; $M_{\odot} \sim 2 \cdot 10^{30}$ кг [13, с. 589] согласно формуле (9) *плотность энергии видимого излучения галактик в филаментах* $\epsilon_f \approx 0,025$ эВ/см³.

Данная оценка на порядок ниже плотности энергии излучения звезд в диске галактики $\sim 0,4$ эВ/см³ [25, с. 1214], т.е. ярость галактик на ночном небе на порядок меньше ярости звезд. Ярость ночного неба в видимом диапазоне на два порядка выше, чем ФКИ, в связи с чем ФКИ в оптическом диапазоне связывается с излучением звезд в галактиках [14, с. 337].

Оценим долю видимых звезд в карликовых галактиках в филаментах, способную обеспечить ФКИ в видимой области. Из формулы (9) следует:

$$\Omega_s \approx \epsilon_0 M_{\odot} / \delta d \eta f \rho_c L_{\odot} \chi T \Gamma, \quad (12)$$

где ϵ_0 – плотность энергии ФКИ в видимой области; δd – доля карликовых галактик в массе всех галактик общей популяции.

Согласно функции масс Холмберга, вклад карликовых галактик массой $\leq 10^9 M_{\odot}$ в суммарную массу всех галактик $\delta d \sim 6\%$ [32, с. 444]. В видимом диапазоне $\epsilon_0 \sim 3 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³ [14, с. 336]. При $\eta f \sim 0,2$ согласно предыдущим оценкам, массовая доля звезд в карликовых галактиках в филаментах $\Omega_{sd} \approx 0,096$, что вдвое больше доли барионов (в видимых звездах) $\Omega_s \sim \Omega_b = 0,0484$ [15]. При $\delta f \sim \Omega_s / \Omega_{sd} \approx 0,5$ *карликовые галактики в филаментах могут формировать $\sim 50\%$ ФКИ в видимой области* с плотностью энергии $\epsilon_f = \delta f \epsilon_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³.

Вследствие рассеянного распределения звезд УДГ в войдах могут вносить вклад в ФКИ при параметре $\delta d \sim 1$. Напомним, что в силу различной плотности сред, в которых формировались галактики в войдах и филаментах, параметр, характеризующий соотношение масса-светимость видимых звезд в УДГ $\eta v \sim 0,1$ вдвое ниже, чем в галактиках общей популяции $\eta f \sim 0,2$ (§ 2). При данных параметрах согласно формуле (12) доля видимых звезд в УДГ в войдах, способная сформировать ФКИ в видимой области $\Omega_{sv}' \approx 0,012$.

Суммарно карликовые галактики в филаментах и УДГ в войдах могут формировать до 100% ФКИ в видимой области при вкладе УДГ в войдах $\delta v = 1 - \delta f \approx 0,5$ с плотностью энергии $\epsilon_v = \delta v \epsilon_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³. Данный вклад в ФКИ обеспечит массовая доля видимых звезд в войдах $\Omega_{sv} = \delta v \Omega_{sv}' \approx 0,006$.

Для сравнения, массовая доля видимых звезд в карликовых галактиках в филаментах, вносящих вклад в видимое ФКИ $\Omega_{df} = \delta d \Omega_s \approx 0,003$ при массовой доле видимых звезд $\Omega_s = 0,0484$ [15] и $\delta d \sim 6\%$ [32, с. 444]. Тем самым, массовая доля видимых звезд в войдах:

$$\Omega_{sv} = \delta d \Omega_s \eta v \delta v / \eta f \delta f, \quad (13)$$

где δf – вклад в ФКИ в видимой области карликовых галактик в филаментах; δv – ультрадиффузных галактик в войдах.

При $\delta f \sim 0,5$; $\delta v \sim 0,5$ согласно предыдущим оценкам, массовая доля *видимых звезд в войдах* $\Omega_{sv} \approx 0,006$ при погрешности расчетов $\pm 10\%$.

Исходя из доли галактик в войдах δv , массовой доли видимых звезд Ω_s при параметре K , характеризующем их светимость, массовая доля видимых звезд в УДГ в войдах может достигать $\Omega_{sv} = \delta v \Omega_s / K \approx 0,0064$ (§ 1), т.е. оценка $\Omega_{sv} \sim 0,006$ (13) реалистична. Тем самым, *ультрадиффузные галактики в войдах могут формировать $\sim 50\%$ ФКИ в видимой области*.

При параметре $\eta v \sim 0,1$ массовая доля звезд типа Солнца в ультрадиффузных галактиках в войдах, способная обеспечить 50% ФКИ в видимой области $\Omega_{ov} = \eta v \Omega_{sv} \approx 6 \cdot 10^{-4} \pm 6 \cdot 10^{-5}$.

Отметим, что в ФКИ в оптической области, включая ближний ИК диапазон, УДГ в войдах могут вносить вклад со сравнимой плотностью энергии, формируя достаточно плоский

спектр. Во-первых, центры субструктур войдов, содержащих УДГ, в которых много *голубых* звезд, окружают *красные* галактики, излучающие в ближнем ИК диапазоне [1].

Во-вторых, УДГ в войдах могут формировать достаточно плоский спектр в видимой области в силу особенности зависимости светимости звезд от их массы $L(m)$ и их числа $N(m)$. Так, плотность энергии излучения УДГ:

$$\epsilon_0(m) \sim L(m)N(m). \quad (14)$$

При зависимости $L(m) \sim m^4$ [11, с. 68] и показателе Солпитера для УДГ $\gamma = 3,85$ [18] зависимость (14) сводится к виду $\epsilon_0(m) \sim m^{0,15}$, т.е. плотность энергии излучения звезд в УДГ слабо зависит от их массы, незначительно снижаясь в ИК области. Со снижением массы звезды длина волны ее излучения растет $\lambda \sim 1/m^{0,65}$ (16). Тем самым, с ростом длины волны излучения УДГ плотность его энергии незначительно снижается:

$$\epsilon_0(m) \sim 1/\lambda^{0,22}. \quad (15)$$

Длина волны в ИК пике ФКИ $\lambda_{ик} \sim 1$ мкм вдвое выше, чем в области максимума энергетического спектра звезд типа Солнца $\lambda_0 \sim 0,45$ мкм [13, с. 594]. При этом плотность энергии снизится в $\epsilon_{ик}/\epsilon_0 = (\lambda_{ик}/\lambda_0)^{0,22} \approx 1,2$ раза, т.е. *излучение УДГ в войдах может формировать достаточно плоский энергетический спектр в оптическом диапазоне, включая ИК область*.

Так, согласно диаграмме Герцшпрунга – Рассела у звезд, относящихся к главной последовательности, светимость является степенной функцией температуры $L \sim T^\beta$ при показателе $\beta \sim 6,15$ [11, с. 68]. Данная зависимость следует из закона Стефана-Больцмана $L \sim R^2 T^4$ [13, с. 611] при $L \sim m^4$ в условиях зависимости радиуса звезды от ее массы $R \sim m^{0,7}$ [11, с. 68].

Соответственно, $\lambda \sim 1/L^{1/\beta}$, что при $L \sim m^4$ представимо как $\lambda \sim b/m^{4/\beta}$. Тем самым, со снижением массы звезды длина волны излучения растет:

$$\lambda(m) \sim 1/m^{0,65}. \quad (16)$$

Оптический диапазон включает ИК область, спектр которой не подчиняется зависимости $\epsilon_0(\lambda)$ (15), т.е. его формируют иные факторы (§ 4).

4. Вклад в фоновое ИК излучение удаленных галактик, а также красных карликов в нашей галактике

В спектре ФКИ в ближнем ИК диапазоне на длине волны ~ 1 мкм наблюдается пик с плотностью энергии $\sim 10^{-2}$ эВ/см³ [33]; [34], что втрое выше, чем в видимой области $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³ [14, с. 336].

В ИК пик ФКИ в области ~ 1 мкм вносит вклад излучение удаленных карликовых галактик в условиях роста светимости галактик с увеличением красного смещения, при максимуме звездообразования в эпоху $z \sim 2$ [29]. Напомним, что согласно оценке (12) карликовые галактики общей популяции сформируют ФКИ в видимой области с плотностью энергии $\epsilon_f \sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³, что на порядок меньше, чем в ИК пике $\epsilon_{ик} \sim 10^{-2}$ эВ/см³.

Скорость звездообразования в эпоху при $z \sim 2$ в $Q \sim 10$ раз превышала современную [29]; [30]. При этом возраст галактик той эпохи согласно формуле (11) меньше современного в $Q' = (z + 1)^{3/2} \approx 5$ раз. Энергия фотонов $E_\nu = E_0/(z + 1)$ от галактик той эпохи упадет в $Q'' = (z + 1) \approx 3$ раза. С учетом данных факторов плотность энергии излучения галактик эпохи при $z \sim 2$ окажется в $\Delta = Q/Q'Q'' \approx 1,5$ раза меньше, чем от современных галактик.

Число удаленных галактик на небесной сфере радиусом r растет $\sim r^2$, что компенсирует пропорциональное падение их светимости с расстоянием $\sim 1/r^2$. При $z \sim 2$ светимость галактик снизится в $Z = (z + 1)^2 \approx 9$ раз. У ФКИ плотность энергии в ИК пике ~ 1 мкм в $Z' \sim 3$ раз выше, чем в видимой области спектра. При пропорциональной зависимости светимости галактик от массы $L_g \sim M_g$ при $z \sim 2$ неразрешенными окажутся галактики массой $M_g = ZZ'M_g \leq 3 \cdot 10^{10} M_\odot$, при массе карликовых галактик $M_g \leq 10^9 M_\odot$.

Согласно Холмбергу вклад галактик массой $\leq 3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ в суммарную массу всех галактик $\Delta g \sim 30\%$, что в $\Delta g/\delta d \approx 5$ раз больше вклада $\delta d \sim 6\%$ карликовых галактик массой $\leq 10^9 M_{\odot}$ [32, с. 444].

С учетом всех перечисленных выше факторов, галактики общей популяции эпохи $z \sim 2$ могут формировать ИК пик ФКИ с плотностью энергии в $N = \Delta g/\delta d \Delta \approx 3,3$ раза большей, чем современные карликовые галактики в видимой области при $\epsilon f \sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³ (§ 3).

Плотность энергии излучения галактик той эпохи $N \epsilon f \approx 5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³, при вкладе в ИК пик $N \epsilon f/\epsilon_{ИК} \sim 0,5$. Тем самым, удаленные галактики в филаментах могут формировать ок. 50% ИК пика ФКИ в области 1 мкм.

УДГ в войдах могут вносить 50% вклад в ФКИ в видимой области с плотностью энергии $\epsilon v \sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³ (§ 3). В разреженной среде войдов галактики могли сформироваться в эпоху $z \sim 1$ [31]. Оценки с учетом данных работ [29]; [30] показывают, что плотность энергии излучения галактик эпохи $z \sim 1$ может повыситься в $K \sim 1,3$ раза, что позволит сформировать ИК излучение с плотностью энергии $K \epsilon v \approx 2 \cdot 10^{-3}$ эВ/см³, при вкладе в ИК пик $K \epsilon v/\epsilon_{ИК} \sim 0,2$. Тем самым, излучение удаленных УДГ в войдах может формировать ок. 20% ИК пика ФКИ в области 1 мкм.

В ИК светимость удаленных УДГ в войдах могут вносить вклад темные карлики, составляющую их основную массу. При коллапсе газа в звезду выделяется значительная гравитационная энергия и протозвезды имеют избыточную светимость в ближнем ИК диапазоне [11, с. 67], в том числе карлики (рис. 1). Особенностью молодых КК является то, что они ярче, чем звезды главной последовательности в течение $\leq 10^9$ лет [11, с. 489], что отражают треки Хаяши [13, с. 164]. Вместе с тем, излучение молодых КК эпохи $z \sim 1$ в ИК области $\lambda_0 \sim 1$ мкм к настоящему времени сместится в область $\lambda = \lambda_0(z + 1) \approx 2$ мкм, т.е. выйдет за пределы ИК пика в области ~ 1 мкм.

Время жизни звезд УДГ, рожденных в эпоху $z \sim 1$ и к настоящему времени потухших, с учетом формулы (11) не выше 10 млрд лет. У таких звезд масса $\geq M_{\odot}$ [11, с. 68]. Их излучение на длине волны $\lambda_0 \leq 450$ нм [13, с. 594] сместится в область $\lambda = \lambda_0(z + 1) \leq 0,9$ мкм, т.е. не достигнет ИК пика.

Суммарный вклад излучения удаленных карликовых галактик в формирование ИК пика с учетом предыдущих оценок может достигать $\epsilon g/\epsilon_{ИК} = (N \epsilon f + K \epsilon v)/\epsilon_{ИК} \approx 0,7$.

Расчеты показывают, что заметный вклад в ИК пик может вносить излучение многочисленных тусклых КК малой массы $\sim 0,14 M_{\odot}$ (как неразрешенных источников), которые вносят соответствующий вклад в скрытую массу галактики.

Так, согласно закону Вина звезды излучают в области максимума энергетического спектра на длине волны λ при температуре:

$$T = b/\lambda, \quad (17)$$

где b – постоянная Вина.

При постоянной Вина $b = 0,29$ см·К в области ИК пика ФКИ на длине волны $\lambda \sim 1$ мкм [33]; [34] могут излучать звезды с температурой $T \approx 2900$ К. Сравнимая температура $T \sim 2800$ К у КК массой $0,14 M_{\odot}$ [27].

КК неразличимы на небе, т.е. могут формировать скрытую массу, если их светимость не превышает фоновых значений. Ярость ночного неба на два порядка выше, чем ФКИ в видимом диапазоне [14, с. 337]. При средней светимости видимых звезд $L \sim 0,2 L_{\odot}$ (§ 1) неразличимы звезды светимостью $L_{dr} \leq 2 \cdot 10^{-3} L_{\odot}$. У таких КК масса $\leq 0,14 M_{\odot}$ и температура $T \leq 2800$ К [27], т.е. они излучают на длине волны $\lambda_{ИК} = b/T \geq 1$ мкм в области ИК пика ФКИ.

Наибольшая доля КК приходится на классы М3 – М5 [24], чему соответствует диапазон масс $0,14 - 0,35 M_{\odot}$ [27], включающий КК массой $0,14 M_{\odot}$. Оценим число таких КК в диске нашей галактики:

$$N_{dr} = \delta d g \epsilon_{ИК} L_g / \epsilon_s L_d, \quad (18)$$

где ϵ_s – плотность энергии излучения звезд в галактике; $\epsilon_{ИК}$ – ФКИ в ИК диапазоне; L_g – светимость галактики; L_d – светимость карлика.

Весовой вклад излучения КК галактики в ИК пик ФКИ:

$$\delta dr = (\epsilon_{ик} - \epsilon_r) / \epsilon_{ик}, \quad (19)$$

где ϵ_r – плотность энергии излучения галактик в области 1 мкм.

Согласно предыдущим оценкам $\epsilon_r / \epsilon_{ик} \sim 0,7$ при $\delta dr \approx 0,3$.

Светимость нашей галактики $L_g \sim 5 \cdot 10^{36}$ Вт [25, с. 1214] эквивалентна светимости $N_{s0} = L_g / L_{\odot} \approx 1,3 \cdot 10^{10}$ звезд типа Солнца. Соответственно, суммарная светимость КК (как неразрешенных источников) не может превышать 1% светимости галактики, т.е. $\Sigma L_{dr} \leq 1,3 \cdot 10^8 L_{\odot}$.

При $\epsilon_{ик} \sim 10^{-2}$ эВ/см³ [33]; [34]; $\epsilon_s \sim 0,4$ эВ/см³ [25, с. 1214] согласно формуле (18) число звезд массой $0,14 M_{\odot}$ в диске галактики $N_{dr} \approx 5 \cdot 10^{10}$, что согласуется с их числом $\sim 5 \cdot 10^{10}$ по данным обсерватории Gaia (§ 5).

Суммарная светимость таких КК $\Sigma L_{dr} = N_{dr} L_{dr} \approx 10^8 L_{\odot}$ удовлетворяет критерию $\Sigma L_{dr} \leq 1,3 \cdot 10^8 L_{\odot}$. В силу зависимости $L \sim m^4$ [11, с. 68] светимость КК меньшей массы резко падает, т.е. они могут вносить не более чем $\leq 30\%$ вклад в суммарную светимость КК. У КК массой $0,14 M_{\odot}$ в галактике суммарная масса $\Sigma m_{dr} \approx 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$, что составляет $\Sigma m_{dr} / M_{mg} \approx 7\%$ ее скрытой массы $M_{mg} \sim 10^{11} M_{\odot}$. Тем самым, красные карлики массой $\leq 0,14 M_{\odot}$ в галактике могут формировать ок. 30% ИК пика ФКИ в области ~ 1 мкм.

5. Компоненты скрытой массы дисков галактик

Скрытая масса галактик сравнима с массой видимых звезд [13, с. 550]. Анализ вращения галактик указывает на отношение их вириальной массы к массе звезд $\mu = M_{vir} / \Sigma M_s = 2 \pm 0,5$ [7]. Например, масса нашей галактики $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ [10, с. 389]; ее скрытая масса $M_{sg} = M_g / \mu \approx 10^{11} M_{\odot}$, что сравнимо с массой видимых звезд $M_{sg} \sim 10^{11} M_{\odot}$ [10, с. 387].

При доле барионов в видимых звездах $\Omega_s = 0,0484 \pm 0,001$ [15] доля скрытой массы галактик в массе Вселенной $\Omega_{sg} \approx \Omega_s \sim 0,05$.

Вириальная масса галактик включает массу диска галактики, а также сферической подсистемы (гало). Анализ устойчивости вращения диска галактики показывает, что значительная часть массы галактик заключена в сферической составляющей [10, с. 342]. По экспериментальным данным скрытая масса в дисках галактик достигает $\xi = 27 \pm 4\%$ массы звезд; масса темного гало $65 \pm 5\%$ массы звезд [7].

Скрытая масса галактик включает МАСНО (табл. 1). Доля компонент МАСНО в диске галактики в общей массе звезд:

$$\Delta m_g = \delta s N_{mg} m_{mm} / M_{sg}, \quad (20)$$

где m_{mm} – масса объектов, являющихся компонентой МАСНО; N_{mg} – их число в галактике; M_{sg} – масса видимых звезд в галактике; δs – коэффициент, учитывающий среднюю массу видимых звезд.

При расчете числа объектов, являющихся компонентой МАСНО при их известной доле в числе звезд галактики, введем поправочный коэффициент δs . Так, число звезд в нашей галактике, как правило, указывается $N_s \sim 10^{11}$ [10, с. 386] при их общей массе $M_{sg} \sim 10^{11} M_{\odot}$ [10, с. 387], что предполагает равенство массы звезд массе Солнца $M_s \sim M_{\odot}$.

По другим данным, в галактике $N_s \sim (7 \pm 1) \cdot 10^{10}$ звезд абсолютной звездной величиной меньше $16,5^m$ суммарной светимостью $L_g \sim 1,3 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ [25, с. 1214]. Средняя светимость видимых звезд $L_s = L_g / N_s \approx (0,19 \pm 0,03) L_{\odot}$ при параметре $\eta = L_s / L_{\odot} \approx 0,19 \pm 0,03$.

При зависимости светимости звезд от массы $L \sim m^4$ светимость $0,2 L_{\odot}$ имеют КК спектрального класса К массой $m_{dr} \sim 0,7 M_{\odot}$, при суммарной массе видимых звезд $M_{sg} = N_s m_{dr} \sim 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$; чему при использовании принятых оценок $N_s \sim 10^{11}$; $M_{sg} \sim 10^{11} M_{\odot}$ соответствует поправочный параметр $\delta s \sim 1,4$.

Напомним, что к МАСНО относят труднообнаружимые тусклые красные, коричневые и белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.

Белые карлики (БК) составляют $3 \leq \delta w_g \leq 10\%$ общего числа звезд в галактике [10, с. 185]. С учетом данных обсерватории Gaia число БК составляет $\delta w_g \sim 4\%$ числа звезд при типичной массе БК (0,6 – 0,8) M_\odot [35], т.е. средняя масса БК $m_{dw} \sim 0,7 M_\odot$. При числе видимых звезд в нашей галактике $N_s \sim 10^{11}$ [10, с. 386] число БК $N_{wg} = \delta w_g N_s \approx 4 \cdot 10^9$. Согласно формуле (20) доля БК в массе звезд галактики $\Delta w_g \approx 6\%$.

Галактика содержит $N_{rg} \sim 3 \cdot 10^{11}$ *красных карликов* (КК), в которых сосредоточена основная часть вещества звезд нашей и других галактик [11, с. 489]. По данным Gaia доля КК $\delta r_g \sim 75\%$ всех звезд; в том числе у КК массой 0,14 M_\odot доля $\sim 13\%$; у КК меньшей массы (0,08 – 0,1) M_\odot доля $\sim 10\%$ [35]. Соответственно, число труднообнаружимых КК массой 0,14 M_\odot в галактике $\sim 5 \cdot 10^{10}$; КК меньшей массы (0,08 – 0,1) M_\odot насчитывается $\sim 4 \cdot 10^{10}$.

Отметим, что при доле КК массой 0,14 M_\odot в массе звезд $\Delta r_g \approx 7\%$ согласно формуле (20), они могут вносить 30% вклад в ИК пик ФКИ в области ~ 1 мкм (§ 4). Вклад КК меньшей массы (0,08 – 0,1) M_\odot в скрытую массу диска галактики $\sim 5\%$. Суммарная доля труднообнаружимых КК массой (0,08 – 0,14) M_\odot в массе звезд галактики $\Delta r_g \approx 12\%$.

Диск галактики содержит $N_{bg} = (0,25 - 1) \cdot 10^{11}$ *коричневых карликов* (КоК) [23]. По уточненным данным Gaia, доля КоК в числе звезд галактики $\sim 23\%$ [24], т.е. $N_{bg} \sim 2,3 \cdot 10^{10}$. При массе КоК $> 0,03 M_\odot$ [23]; $\leq 0,07 M_\odot$ [27]; [28] их типичная масса $m_{db} \sim 0,05 M_\odot$. Доля КоК в массе звезд галактики $\Delta b_g \sim 2\%$. Вместе с тем, периферия диска, а также гало галактики, где газ более разрежен, чем в диске, может содержать более высокую долю КоК (§ 2).

Распределение компонент скрытой массы диска галактики (с учетом данных Gaia [24]; [35]) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Компоненты скрытой массы диска галактики

Компоненты	Доля в массе видимых звезд	Доля в скрытой массе диска галактики
красные карлики	0,12	46%
белые карлики	0,06	23%
нейтронные звезды	0,05	19%
коричневые карлики	0,02	8%
черные дыры	0,01	4%
Всего МАСНО:	0,26	100%

Галактика также содержит *нейтронные звезды* (НЗ). Исходя из современного темпа звездообразования, сверхновые в галактике породили $N_{ng} \sim 10^9$ НЗ [12, с. 282]. Вместе с тем, эта оценка может быть занижена в несколько раз. Напомним, что при $z \sim 2$ скорость звездообразования в $Q \sim 10$ раз была выше современной [29]; [30], а возраст галактик той эпохи меньше современного в $Q' \approx 5$ раз (§ 4). В эпоху $z \sim 2$ сверхновые могли породить в галактике $N_{ng} Q / Q' \approx 2 \cdot 10^9$ НЗ. С учетом более ранних эпох суммарное число НЗ $> 3 \cdot 10^9$.

Скорость звездообразования была максимальной при образовании галактик [11, с. 68]. При этом размер протогалактик был намного больше, чем современных галактик [10, с. 388]. Так, в сферической составляющей галактик наблюдаются старые звезды [10, с. 390]; [11, с. 68]. Тем самым, существенная часть НЗ может находиться в гало (коронах) галактик (§ 8).

В этой связи обоснованной представляется оценка числа НЗ в нашей галактике $N_{ng} \sim 3 \cdot 10^9$ НЗ исходя из обилия дейтерия, а также иных оценок (§ 10). При типичной массе НЗ m_{nH}

$\sim 1,5 M_{\odot}$ [11, с. 69] согласно формуле (20) доля НЗ в массе видимых звезд галактики $\Delta n_{\gamma} \approx 5\%$.

Лишь малая часть $\sim 10^3$ НЗ проявляет себя как радиопульсары, барстеры и транзиенты или источники γ -всплесков [12, с. 280]. Также лишь часть *черных дыр* (ЧД) проявляет себя в качестве рентгеновских пульсаров, что позволяет оценить соотношение НЗ и ЧД в галактике. Так, в двойных рентгеновских системах обнаружено $N_h \sim 70$ ЧД массой $(4 - 20) M_{\odot}$ [36], т.е. $\delta h = N_h/N_n \approx 3,5\%$ числа НЗ $N_n \sim 2 \cdot 10^3$ по данным каталога ATNF (за 2011 г.). При средней массе наблюдаемых ЧД $m_h \sim 12 M_{\odot}$ [36] вероятная доля всех ЧД в диске галактики в массе видимых звезд $\Delta h_{\gamma} = \delta h \Delta n_{\gamma} m_h / m_n \approx 1\%$.

У рассмотренных компонент *МАСНО* суммарная доля в массе видимых звезд $\xi = \Delta w_{\gamma} + \Delta g_{\gamma} + \Delta b_{\gamma} + \Delta n_{\gamma} + \Delta h_{\gamma} \approx 26\%$, что согласуется с долей скрытой массы в массе звезд других галактик $\xi \sim 27 \pm 4\%$ [7], т.е. *скрытую массу дисков галактик формируют МАСНО*.

Для сравнения, доля *межзвездного газа* в массе звезд галактики 2% [10, с. 387], что на порядок меньше вклада МАСНО.

Почти половину скрытой массы диска галактики формируют тусклые КК массой $(0,08 - 1,4) M_{\odot}$; до четверти – БК массой $\sim 0,7 M_{\odot}$ (табл. 1).

6. Число поколений звезд в галактиках в войдах и филаментах

За время существования Вселенной сменилось несколько поколений звезд. Например, считается, что Солнце – звезда третьего поколения [11, с. 68]. Первыми звездами могли быть *сверхгиганты* [3]; [38].

Согласно радиолинии водорода 21 см излучение первых сверхгигантов ионизовало водород в эпоху $z \sim 17$ [37]. Такими сверхгигантами могли быть горячие звезды Вольфа – Райе с температурой $T \sim 10^5$ К, в которые эволюционируют массивные звезды массой $30 - 50 M_{\odot}$ [10, с. 337], образующие НЗ при взрывах сверхновых II типа [13, с. 434].

Оболочки сверхгигантов, близких к финальной стадии, излучают в области ИК длины волны $\lambda_{\text{ИК}} \sim 8$ мкм [12, с. 178]. Это излучение эпохи $z \sim 17$ за счет красного смещения сместится в субмиллиметровый диапазон $\lambda_{\text{сб}} = \lambda_{\text{ИК}}(z + 1) \approx 140$ мкм. В спектре ФКИ на длине волны 140 мкм наблюдается пик [33], что подтверждает присутствие сверхгигантов в эпоху $z \sim 17$ [31].

При доле барионов в первичном газе $\Omega_b \leq 1$ (§ 10), исходя из массы первых сверхгигантов, можно оценить массовую долю первых НЗ:

$$\Omega_n = m_n(1 - \delta_g)\Omega_b/M, \quad (21)$$

где M – масса первых сверхгигантов; m_n – типичная масса нейтронных звезд; δ_s – доля межзвездного газа в протогалактиках.

Средняя доля газа в галактиках $\delta_g \sim 5\%$ [25, с. 1223]; $m_n \sim 1,5 M_{\odot}$ [11, с. 69]. При $M \sim 30 - 50 M_{\odot}$ [10, с. 337] массовая доля НЗ $\Omega_n \leq 0,03 - 0,05$. Напомним, что старые звезды присущи сферической составляющей галактик (§ 5), т.е. первые НЗ могут содержаться в гало (коро- нах) галактик (§ 8).

Из формулы (21) следует оценка массы первых сверхгигантов:

$$M = m_n(1 - \delta_g)\Omega_b/\Omega_n. \quad (22)$$

Ограничение, следующее из плотности энергии ФКИ $0,04 < \Omega_n < 0,08$ [31], позволяет уточнить массовую *долю НЗ* $0,04 < \Omega_n \leq 0,05$.

При доле барионов $\Omega_b \leq 1$ *средняя масса первых сверхгигантов* $M \leq 30 - 35 M_{\odot}$. В данных условиях ограничение на массу сверхгигантов $\geq 30 M_{\odot}$, эволюционирующих в звезды Вольфа – Райе [10, с. 337], свидетельствует в пользу доли барионов в первичном газе $\Omega_b \sim 1$ (§ 10).

В пользу оценки массы первых сверхгигантов (22) свидетельствует максимальная масса *черных дыр* (ЧД), наблюдаемых в рентгеновских двойных системах: $m_h \leq 20 M_{\odot}$ [36], достижимая при аккреции газа сверхгигантов на НЗ в тесных двойных системах до их взрыва [14, с. 110]. Сверхгиганты массой $\geq 30 M_{\odot}$ теряют значительную часть газа со звездным ветром,

так что масса звезд на стадии Вольфа – Райе $M \leq 20 M_{\odot}$ [10, с. 337]. Вероятно, первые ЧД могли наращивать массу до $m_h < m_n + M \approx 21 M_{\odot}$.

Излучение рентгеновских пульсаров при $z \sim 17$ объясняет особенности спектра ФКИ в *длинноволновом радиодиапазоне*, а также *метagalактическое изотропное гамма-излучение* (МИГИ) в области ≥ 3 МэВ, что позволяет оценить плотность энергии излучения первых пульсаров $\epsilon v \sim 0,1$ эВ/см³ [31].

С учетом падения энергии квантов из-за красного смещения $E = E_0/(z + 1)$ оценим массовую долю ЧД, образованных в процессе аккреции на НЗ:

$$\Omega_h \approx \beta \epsilon v (z + 1) / \eta r_{\text{pc}} s^2, \quad (23)$$

где ϵv – современная плотность энергии излучения рентгеновских пульсаров; η – доля гравитационной энергии, излучаемой пульсаром; s – скорость света; β – параметр, учитывающий вклад нейтронных звезд в массу черных дыр.

Параметр, учитывающий вклад НЗ в массу ЧД звездной массы:

$$\beta = m_h / (m_h - m_n), \quad (24)$$

где m_h – масса черных дыр в двойных рентгеновских системах.

К настоящему времени измерены массы 70 ЧД $m_h \sim (4 - 20) M_{\odot}$ в рентгеновских двойных системах [36]. При $m_n \sim 1,5 M_{\odot}$ [11, с. 69] параметр $\beta \approx 1,1 - 1,6$ при среднем $\beta \sim 1,4$.

При падении газа на аккреционный диск ЧД с магнитным полем в виде излучения выделяется гравитационная энергия $\eta \sim 0,3$ энергии покоя [10, с. 33]. При $z \sim 17$ [37]; $\rho_s \sim 9 \cdot 10^{-30}$ г/см³; $\epsilon v \sim 0,1$ эВ/см³ [31] согласно формуле (23) массовая доля *первых черных дыр* $\Omega_h \approx 0,002$. Для сравнения, по данным микролинзирования OGLE в гало (короне) галактики могут присутствовать ЧД с сопоставимой долей $\Omega_h \leq 0,005$ (§ 8).

Звездами второго поколения могли быть *гиганты* в галактиках, а также старые звезды малой массой на их периферии. Если сверхгиганты массой $\geq 10 M_{\odot}$ эволюционируют в сверхновые II типа, порождая НЗ массой $1,5 M_{\odot}$ [11, с. 69], то гиганты массой $5 - 8 M_{\odot}$ не рождают НЗ и взрываются в качестве сверхновых I типа [13, с. 434], обогащая межзвездный газ тяжелыми элементами. Гиганты массой $\leq 5 M_{\odot}$ рождают БК массой $\sim M_{\odot}$ [10, с. 185].

Компоненты МАСНО – *белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры* звездной массы являются звездами (объектами) третьего поколения.

Старые звезды на периферии галактик отличает низкая металличность, как звезды в гало массой $\leq 0,85 M_{\odot}$ [10, с. 387] или звезды, образовавшиеся в межгалактической среде низкой плотности. Старые звезды, принадлежащие гало галактики и звездным ШС, содержат в $10 - 10^3$ раз меньше тяжелых элементов, чем Солнечная система [13, с. 264].

Спектры галактик в *войдах* указывают на то, что они содержат мало тяжелых элементов; при этом отмечается неразвитость галактик в войдах [2], т.е. они являются эволюционно моложе галактик общей популяции [5]. УДГ в войдах могут содержать преимущественно темные (красные и коричневые) карлики (§ 2) – долгоживущие звезды второго поколения.

В центрах субструктур войдов обнаружены УДГ, содержащие много голубых звезд [1]; [5]. Голубые звезды, быстро эволюционируя [11, с. 68], рождают БК и НЗ [10, с. 185], т.е. УДГ в центрах субструктур войдов могут содержать звезды третьего поколения в виде БК и НЗ. Вместе с тем, массовая доля БК в войдах незначительна. Доля БК $\delta_{\text{w}} \sim 4\%$ числа видимых звезд галактики [35]. Поскольку в центрах войдов присутствует лишь часть УДГ, при массовой доле видимых звезд в УДГ в войдах $\Omega_{\text{sv}} \sim 0,006$ (§ 1) массовая доля *белых карликов в войдах* $\Omega_{\text{wv}} < \Omega_{\text{sv}} \delta_{\text{w}} \approx 2 \cdot 10^{-4}$.

Сверхгиганты могут рождаться в УДГ в центрах субструктур войдов, где много голубых звезд, что указывает на их насыщенность газом. В данном случае применим стандартный показатель Солпитера $\gamma = 2,35$ (§ 2). При среднем соотношении масс гигантов и сверхгигантов $M_{\text{с}}/M_{\text{г}} \sim 2$ вероятность рождения сверхгигантов в $P = 2\gamma \approx 6$ раза ниже. Массовая доля порождаемых ими НЗ может быть пропорционально ниже доли БК, т.е. $\Omega_{\text{nv}} \sim \Omega_{\text{wv}} m_n / P m_{\text{dw}}$. При типичной массе БК $m_{\text{dw}} \sim 0,7 M_{\odot}$ [35] и НЗ $m_n \sim 1,5 M_{\odot}$ [11, с. 69] массовая доля *нейтронных звезд в войдах* $\Omega_{\text{nv}} < 6 \cdot 10^{-5}$.

Темное (т.е. холодное) гало УДГ в войдах [7] подтверждает низкую долю в них НЗ. Так, горячий газ в коронах галактик может разогревать излучение двойных рентгеновских систем, включающих компактные продукты эволюции массивных звезд [7], таких как НЗ и карлик [39] (§ 8).

7. Массовая доля планет-гигантов в ультрадиффузных галактиках

К МАСНО относят не только маломассивные звезды, но и субзвезды – газовые *планеты-гиганты*. Планеты образуются из газового облака, окружающего протозвезды. Например, молодой КоК Cha 110913-773444 окружен околос звездным аккреционным диском, из которого впоследствии может сформироваться планетарная система [40] (рис. 1).

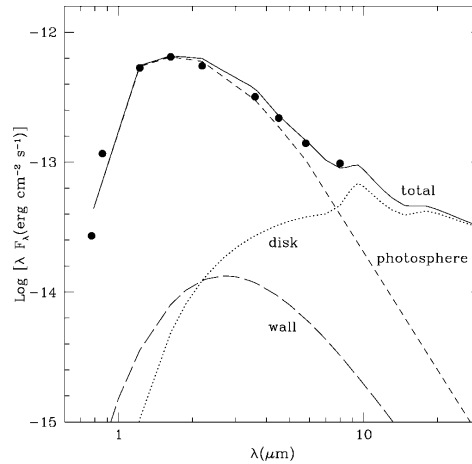


Рис. 1. Спектр излучения молодого коричневого карлика

Массовая доля планет-гигантов в УДГ в войдах:

$$\Omega_p = \Omega_d m_p / m_d, \quad (25)$$

где Ω_d – доля темных карликов в УДГ; m_d – масса темных карликов; m_p – масса их планет.

Основную массу УДГ, образовавшихся в войдах, могут составлять темные карлики массой $m_d \sim 0,07 M_\odot$ (§ 2). Масса газовых планет $m_p \leq 0,01 M_\odot$ [27] при соотношении $\theta = m_p / m_d \leq 0,14$. При $\Omega_d \sim 0,6$ (§ 9) массовая доля планет-гигантов в УДГ $\Omega_p \leq 0,08$.

Массовая доля планет-гигантов в войдах также может быть оценена на основе массы аккреционного диска протозвезд. Масса аккреционного диска протозвезд типа Солнца массой $\sim M_\odot$ достигает $\theta_d \sim 5 - 10\%$ массы звезды [13, с. 139]. Из аккреционного диска формируются планеты. Например, масса планет Солнечной системы $\sim 10^{-3} M_\odot$ [13, с. 620]. Для темных карликов данное соотношение может быть выше. Так, маломассивный КоК ChaNa 8 имеет спутник сравнимой массы при соотношении $m_p / m_d \sim 0,4$ [41]. На этой основе можно оценить массовую долю планет-гигантов в УДГ:

$$\Omega_p \leq \theta_d \Omega_d, \quad (26)$$

где θ_d – вклад аккреционного диска в массу звезды.

При $\theta_d \sim 5 - 10\%$ [13, с. 139]; $\Omega_d \sim 0,6$ (§ 9) массовая доля планет-гигантов в УДГ $\Omega_p \leq 0,03 - 0,06$. С учетом вклада прочих составляющих УДГ в войдах, массовая доля *планет-гигантов* может достигать $\Omega_p \sim 0,03$ (§ 9).

8. Компоненты скрытой массы гало (корон) галактик

Скрытая масса, проявляющаяся в линзировании, включает скрытую массу *дисков галактик* (§ 5) и сферической подсистемы галактик [7], к которой относятся их *гало* и *короны*.

В филаментах также наблюдаются карликовые (по светимости) УДГ – *спутники* более крупных галактик общей популяции [4]. Напомним, что УДГ присуща эллиптическая и сфе-

рическая морфология, в то время как сфероидальные карликовые галактики окружены массивными ореолами скрытой массы (§ 1).

Массовую долю компонент скрытой массы гало (короны) галактики можно оценить на основе соотношения:

$$\Omega_k = \delta_k(\Omega_c - \xi\Omega_s - \Omega_u), \quad (27)$$

где Ω_c – доля скрытой массы в филаментах; ξ – доля скрытой массы диска галактики в массе видимых звезд; Ω_u – доля ультрадиффузных галактик в филаментах; δ_k – вклад компонент скрытой массы в массу гало (короны).

Доля скрытой массы по данным линзирования $\Omega_c = 0,258 \pm 0,011$ [15]. Доля МАСНО в диске нашей галактики в массе видимых звезд $\xi \sim 26\%$ (§ 5) сравнима с долей в других галактиках $\xi \sim 27 \pm 4\%$ [7]. При доле барионов в видимых звездах $\Omega_s = 0,0484 \pm 0,001$ [15] доля скрытой массы диска галактик $\Omega_{sg} = \xi\Omega_s \approx 0,013 \pm 0,002\%$. При $\Omega_u \sim 0,007$ согласно последующей оценке, скрытая масса гало (корон) галактик $\Omega_c - \Omega_{sg} - \Omega_u \approx 0,24 \pm 0,013$.

При известной доле компонент скрытой массы Ω_k из формулы (27) следует оценка их вклада в массу гало (корон) галактик:

$$\delta_k = \Omega_k / (\Omega_c - \xi\Omega_s - \Omega_u). \quad (28)$$

Короны галактик содержат горячий межгалактический газ [12, с. 81]. Исходя из излучения в спектральных линиях, доля наблюдаемых барионов достигает $\Omega_b \leq 0,15$ массы Вселенной [12, с. 81]. По уточненным данным, доля барионов $\Omega_b = 0,18 \pm 0,04$ [42]; [43]. Эффект Зельдовича-Сюняева позволяет оценить долю горячего межгалактического газа $\Omega_g = 0,11 \pm 0,07$ [19]. С учетом доли видимых звезд $\Omega_s = 0,0484 \pm 0,001$ [15] массовая доля межгалактического газа в филаментах $\Omega_g = \Omega_b - \Omega_s \approx 0,13 \pm 0,04$.

На этой основе может быть оценена массовая доля МАСНО в филаментах $\Omega_m = \Omega_c - \Omega_g \approx 0,13 \pm 0,04$, включая короны $\Omega_m' \approx 0,11 \pm 0,04$.

Микролинзирование света сверхновых типа Ia ограничивает массовую долю МАСНО в гало (короне) галактики $\delta_m \sim 35 - 37\%$ наблюдаемого вещества Вселенной [44]. При доле вещества в филаментах $\Omega_m \sim 0,31$ доля МАСНО в гало (коронах) галактик $\Omega_m' = \delta_m\Omega_m \approx 0,11 \pm 0,005$, что позволяет уточнить массовую долю межгалактического газа $\Omega_g \approx 0,13 \pm 0,025$.

Оценка Ω_m' меньше оценки Ω_m на $\Delta\Omega \sim 0,02$. Данная разница в доле МАСНО в филаментах и в гало (коронах) галактик может быть обусловлена вкладом МАСНО в диске галактики Ω_{sg} , а также в карликовых (по светимости) УДГ – спутниках более крупных галактик общей популяции вне их корон с долей $\Omega_u \sim \Delta\Omega - \Omega_{sg} \approx 0,007$.

Доля межгалактического газа в массе гало (короны) согласно формуле (28) $\delta_g \approx 0,54$. Вклад МАСНО в массу гало (короны) $\delta_m = 1 - \delta_g \approx 0,46$.

Распределение компонент скрытой массы гало (короны) галактики (с учетом данных миссий EROS [45]; [46]; OGLE [47]) представлено в табл. 2.

Таблица 2

Компоненты скрытой массы гало (короне) галактики

Компоненты	Доля в массе Вселенной	Доля в массе гало (короны)
Межгалактический газ	0,13	54%
МАСНО, в том числе:	0,11	46%
нейтронные звезды	0,05	21%
красные карлики	0,026	11%
коричневые карлики	0,007	3%
черные дыры	$\leq 0,005$	$\leq 2\%$
облака МАСНО	0,022	9%
Всего:	0,24	100%

Существенную часть МАСНО составляют КК; при этом если на фоне ФКИ в галактике неразличимы КК массой $\leq 0,14 M_{\odot}$ светимостью $\leq 2 \cdot 10^{-3} L_{\odot}$ (§ 5), то в гало (короне) неразрешенными становятся более удаленные звезды массой $0,4 - 0,5 M_{\odot}$, чья светимость не превышает $\leq 3,5 \cdot 10^{-2} L_{\odot}$ [27]. Например, в работе [45] в качестве МАСНО в гало галактики рассматриваются КК массой $\sim 0,5 M_{\odot}$; в работе [47] учитываются КК массой $0,1 - 0,4 M_{\odot}$.

Данные микролинзирования света в направлении звезд Магеллановых облаков указывает на долю КК в массе гало (короны) галактики $\sim 20\%$ [45]; $\sim 8\%$ [46]; $\sim 6\%$ [47] при среднем вековом вкладе $\delta d_{\text{г}} = 11 \pm 6\%$. Согласно формуле (27) доля красных карликов $\Omega_{\text{дг}} \approx 0,026$.

Доля КоК в массе гало (короны) галактики $\delta b \sim 3\%$ [47]. Массовая доля коричневых карликов $\Omega_{\text{дб}} \approx 0,007$.

Микролинзирование OGLE в направлении звезд Малого Магелланова облака выявило долю ЧД звездной массы до $\delta h \leq 2\%$ массы гало (короны) галактики [47]. Массовая доля черных дыр $\Omega_{\text{дч}} \leq 0,005$. Для сравнения, расчеты показывают, что массовая доля ЧД, которые могли появиться при формировании галактик, может достигать $\sim 0,002$ (§ 6).

Сферическая составляющая галактик – гало (короны) могут содержать НЗ (§ 5). Так, данные микролинзирования света сверхновых Ia выявляют в гало (короне) галактики компактные объекты, чья масса меньше чем у черных дыр звездного генезиса [44]. В данной работе подобные компактные объекты ассоциируются с первичными ЧД массой $< M_{\odot}$. Между тем сходный эффект линзирования согласно формуле (29) могут вызывать НЗ.

Так, горячий газ в коронах галактик может разогревать излучение двойных рентгеновских систем, включающих компактные продукты эволюции массивных звезд [7], таких как НЗ и карлик [39]. НЗ также проявляют себя в качестве источников γ -всплесков в толстом диске с высотой над границей галактической плоскости $1 - 2$ кпк [12, с. 280]. Сходный профиль имеет распределение вириальной массы галактик [7].

Отметим, что события микролинзирования в рассмотренных работах [44–47] интерпретируются в рамках моделей, учитывающих массу лишь темных карликов и ЧД. Карты микролинзирования интерпретируются в работе [45] как проявления КК массой $0,5 M_{\odot}$. В работе [47] рассматриваются КК массой $0,1 - 0,4 M_{\odot}$, а также КоК меньших масс. В исследовании [44] события микролинзирования приписывались первичным ЧД массой $(0,01 - 1) M_{\odot}$. При этом НЗ в качестве объектов линзирования не рассматривались.

При гравитационной фокусировке угол отклонения луча света пропорционален массе тела и обратно пропорционален прицельному параметру (ограниченному радиусом объекта R):

$$\alpha = 4GM/c^2b \text{ (радиан)}, \quad (29)$$

где M – масса тела; b – прицельный параметр [10, с. 524].

НЗ массой $m_{\text{н}} \sim 1,5 M_{\odot}$ вызовет такой же эффект микролинзирования, как КК массой $m_{\text{дг}} \leq 0,4 M_{\odot}$, если пройдет вблизи светового луча на удалении, большем в $m_{\text{н}}/m_{\text{дг}} \geq 3,7$ раза.

Соответственно, при массе ЧД $m_{\text{ч}} \geq 3,2 M_{\odot}$ [25, с. 1213], имеющей гравитационный радиус $R_{\text{г}} = 2Gm_{\text{ч}}/c^2 \geq 9$ км, НЗ сравнимого радиуса $R_{\text{н}} \sim 10$ км [12, с. 281] проявится в карте микролинзирования так же, как ЧД массой $m_{\text{ч}}' \sim m_{\text{н}}^2/m_{\text{ч}} \approx 0,7 M_{\odot}$, что интерпретировалось в работе [44] как проявление в гало (короне) галактики первичных ЧД, чья масса меньше ЧД, которые могут возникать в процессе эволюции звезд при аккреции на НЗ.

Исходя из вклада других компонент МАСНО, наблюдаемых в гало (короне) галактики, массовая доля НЗ $\Omega_{\text{н}} \leq 0,07$ (табл. 2). В гало (коронах) галактик общей популяции могут находиться старые НЗ, порожденные звездами первого поколения (§ 6), в отличие от дисков галактик, где присутствуют НЗ, рожденные звездами последующих поколений (§ 5). При этом УДГ в войдах могут содержать малую долю НЗ $\Omega_{\text{нв}} < 3 \cdot 10^{-5}$ (§ 6). По другим оценкам доля первых НЗ $0,04 < \Omega_{\text{н}} \leq 0,05$ (§ 6), что позволяет оценить вероятную (усредненную) долю первых нейтронных звезд $\Omega_{\text{н}} \sim 0,05$ при их вкладе в массу гало (короны) галактики $\delta_{\text{н}} \approx 21\%$ согласно формуле (28).

По данным микролинзирования света сверхновых объекты малой $>0,01 M_{\odot}$ и большой массы $\sim M_{\odot}$ вносят сравнимый вклад в массу МАСНО [44]. Соответственно, вклад НЗ и темных карликов в скрытую массу может быть сравним, достигая 21 – 23% массы гало (короны) галактики соответственно.

Данные микролинзирования света звезд Магеллановых облаков [45–47] в сравнении с микролинзированием света сверхновых Ia [44] выявляют меньшую массовую долю МАСНО на величину $\Delta\Omega_m \sim 0,072$, часть которой не покрывает вероятный вклад НЗ (табл. 2). Данное расхождение $\Omega_0 \sim 0,022$ может быть обусловлено вкладом *облаков МАСНО*, содержащихся в *звездных потоках и эллиптических карликовых галактиках внутри короны галактики*.

Так, в работе [44] учитывается микролинзирование света сверхновых в других галактиках, проходящих сквозь всю корону нашей галактики. В работах [45–47] учитывается микролинзирование света звезд Магеллановых облаков, пролетающих сквозь часть короны нашей галактики на удалении 50 – 70 кпк [25, с. 1224]. Малые галактики, пролетая сквозь короны более крупных, постепенно растворяются [48], формируя звездные потоки, включая вытянутый Магелланов поток [49]. Присутствующие в данном потоке компоненты МАСНО не пересекут лучи звезд Магеллановых облаков, т.е. их доля в гало (короне) галактики в работах [45–47] заведомо занижена.

Доля МАСНО в звездных потоках в массе короны галактики:

$$\delta_0 = M_{\Gamma}(\Omega_m' + \xi\Omega_s)/M_k\Omega_s, \quad (30)$$

где M_k – масса короны галактики; M_{Γ} – масса звезд в галактиках в ней; Ω_m' – доля МАСНО в гало (короне) галактики.

Согласно предыдущим оценкам $\xi \sim 26\%$ (§ 5). $\Omega_m' = 0,11 \pm 0,005$ [44]; $\Omega_s = 0,0484 \pm 0,001$ [15]. Масса короны нашей галактики $1,1 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ [25, с. 1215]; масса звезд в Магеллановых облаках $1,9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ [25, с. 1224]. Доля МАСНО в Магеллановом потоке в массе короны галактики $\delta_{0m} \approx 4,4 \pm 1\%$.

Оценка (30) вдвое меньше предполагаемой доли облаков МАСНО $\delta_0 \sim 9\%$ (табл. 2.) Вместе с тем, корона нашей галактики содержит несколько эллиптических карликовых галактик [25, с. 1224], чья морфология близка к сфероидальной. При этом сфероидальные карликовые галактики окружает массивный ореол скрытой массы [8] (§ 1). Разница $\Delta\delta_0 = \delta_0 - \delta_{0m} \approx 4,6 \pm 1\%$ может приходиться на долю МАСНО в ореолах эллиптических карликовых галактик.

9. Компоненты скрытой массы в войдах

В силу ограничений, накладываемых космологической плотностью, при доле вещества в филаментах $\Omega_m = 0,31 \pm 0,012$ (усредненной по данным работ [15]; [16]), доля *вещества в войдах* $\Omega_v = 1 - \Omega_m \leq 0,69 \pm 0,012$ (§ 1).

Характеристики *быстрых радиовсплесков* (FRB) удаленных галактик указывают на долю *ионизованного водорода* в войдах $\Omega_{gv} = 0,05 \pm 0,025$ [20].

Массовая доля вещества, содержащегося в войдах помимо ионизованного газа $\Omega_{uv} = \Omega_v - \Omega_{gv} = 0,64 \pm 0,037$.

Соотношение масса-светимость УДГ $M_v/L_v \sim 10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$ [4] позволяет оценить *долю УДГ* в войдах $\Omega_{uv} \sim 0,6$ (§ 1).

Учет вклада УДГ в ФКИ в видимом диапазоне позволяет оценить *долю видимых звезд* в войдах $\Omega_{sv} \sim 0,006$ (§ 3).

Масса *межзвездного газа* в УДГ сравнима с массой видимых звезд [2]; [7] (§ 1), т.е. $\Omega_{gu} \sim \Omega_{sv} \sim 0,006$.

УДГ формируются в разреженной среде войдов и могут содержать в основном *темные карлики* (коричневые и красные) массой $\sim 0,07 M_{\odot}$ (§ 2).

УДГ в войдах могут содержать пренебрежимо малую долю *белых карликов* $\Omega_{wv} < 2 \cdot 10^{-4}$, а также *нейтронных звезд* $\Omega_{nv} < 6 \cdot 10^{-5}$ (§ 6).

Вероятное распределение компонент вещества галактик в войдах с учетом показателя функции Солпитера $\gamma = 3,85$ [18] приведено в табл. 3.

Таблица 3

Вероятные компоненты скрытой массы в войдах

Компоненты	Доля в массе Вселенной	Доля в массе войдов
Ультрадиффузные галактики	0,64	93%
темные карлики	0,6	87%
газовые планеты-гиганты	0,028	4%
видимые звезды	0,006	1%
межзвездный газ	0,006	1%
Межгалактический газ	0,05	7%
Всего:	0,69	100%

Доля газовых *планет-гигантов* в УДГ в войдах $\Omega_p \leq 0,03 - 0,06$ (§ 7) с учетом прочих компонент МАСНО может составлять $\Omega_p \sim 0,028$ (табл. 3).

Суммарная массовая доля МАСНО в войдах, включая темные (красные и коричневые) карлики и их планеты $\Omega_{mv} \sim 0,63$.

Доля скрытой массы в УДГ в войдах:

$$\delta_{cu} = (\Omega_{uv} - \Omega_{sv})/\Omega_{uv} \tag{31}$$

При массовой доле УДГ в войдах $\Omega_{uv} \sim 0,64$ и видимых звезд в них $\Omega_{sv} \sim 0,006$ (табл. 3), доля скрытой массы в УДГ $\delta_{cu} \approx 0,99$, что согласуется с принятыми оценками.

10. Проблема космологического дейтерия в оценке доли барионов

Обилие *дейтерия* по массе в галактике $X = (2 - 3) \cdot 10^{-5}$ [50] (если он синтезирован в горячей Вселенной) ограничивает долю *барионов* $\Omega_b \sim 0,03$ [11, с. 479]; по данным наблюдений за удаленным квазаром $\Omega_b = 0,0205 \pm 0,0018$ [51]. Подобное обилие дейтерия почти на два порядка выше, чем предсказывает космологический нуклеосинтез в модели горячей Вселенной при доле барионов $\Omega_b \sim 1$.

Так, доля дейтерия, синтезируемого в горячей Вселенной, падает с ростом ее плотности вследствие его выгорания. Дейтерий разрушается в реакциях типа $D + p \rightarrow He^3 + \gamma$. Скорость горения дейтерия пропорциональна плотности вещества, а скорость его синтеза в реакции $p + n \rightarrow D + \gamma$ экспоненциально уменьшается вследствие распада нейтронов [50].

Между тем *космологический дейтерий может выгорать в первых сверхгигантах*. Так, дейтерий выгорает в горячих звездах [50]. Напомним, что ионизовать водород в эпоху $z \sim 17$ [37] могли горячие звезды Вольфа – Райе, в которые эволюционируют сверхгиганты на стадии горения гелия (§ 6). Температура выгорания дейтерия в звездах $4 \cdot 10^6$ К [50] более чем на порядок выше температуры горения гелия в ядрах звезд $\sim 10^8$ К [12, с. 364]. В силу чего доля дейтерия, образованного в горячей Вселенной, должна понизиться, что не позволяет оценить долю барионов в ту эпоху.

Дейтерий может образовываться нейтронными звездами в процессе релаксации неравновесного слоя, возникающего при их образовании, что сопровождается выделением энергии и выбросом свободных нейтронов [50]; [52]. При этом $\sim 10^9$ НЗ в межзвездном газе галактики массой $\sim 10^{11} M_\odot$ могут обеспечить обилие дейтерия по массе $X \sim 10^{-5}$ [52]. С учетом формулы (20) оценим число НЗ в галактике исходя из обилия дейтерия:

$$N_n = \Omega_n M_{sg} / \Omega_{bmn}, \tag{32}$$

где M_{sg} – масса звезд в галактике; Ω_b – доля барионов в первичном газе.

Теория гравитационных неустойчивостей применительно к процессу формирования крупномасштабной структуры Вселенной свидетельствует в пользу доли барионов в первичном газе $\Omega_b \sim 1$ [11, с. 479]. Доля вещества в войдах (§ 9) в условиях ограничения на массу первых сверхгигантов (§ 6) также говорит в пользу доли барионов $\Omega_b \sim 1$.

Вероятная доля НЗ $\Omega_n \sim 0,05$ (§ 8). При типичной массе НЗ $m_n \sim 1,5 M_\odot$ [11, с. 69] и массе видимых звезд в диске галактики $M_{\text{зг}} \sim 10^{11} M_\odot$ [10, с. 387], согласно формуле (32) число нейтронных звезд в диске галактике $N_n \approx 3 \cdot 10^9$.

Данная оценка согласуется с оценкой, приведенной в работе [52], при обилии дейтерия $X \sim 3 \cdot 10^{-5}$. Наблюдаемое в галактике обилие дейтерия по массе $X = (2 - 3) \cdot 10^{-5}$ [50] подтверждает данную оценку.

Вместе с тем, от центра к периферии галактики доля дейтерия возрастает, что связывается с его выгоранием в звездах [50]. Наблюдения за удаленными квазарами низкой металличности $\sim 0,01$ солнечной указывают на обилие первичного дейтерия по числу частиц $d = D/H = (2,5 - 3) \cdot 10^{-5}$ [51].

Обилие дейтерия по массе X и числу частиц d связывает соотношение:

$$X = 2d(1 - Y/4), \quad (33)$$

где Y – массовая доля гелия [50].

При $Y \sim 0,25$ обилие дейтерия по массе в удаленных (молодых) галактиках с активными ядрами (квазарах) достигает $X \sim (5 - 6) \cdot 10^{-5}$.

С учетом данных по обилию дейтерия в квазарах [51], 10^9 НЗ в квазаре массой $\sim 10^{11} M_\odot$ способны образовать обилие дейтерия $X \sim 2 \cdot 10^{-5}$, что вдвое больше, чем в обычной галактике $X \sim 10^{-5}$ по данным работы [52].

Данную разницу может объяснять повышенная активность пульсаров в галактиках с активными ядрами (квазарах). Дейтерий может образовываться в условиях *аккреции на НЗ* [52]. Высокая светимость квазаров обусловлена процессами *аккреции* в их ядрах [11, с. 251]. При этом согласно одной из принятых моделей центры галактик (области повышенной звездной активности) содержат скопления *пульсаров* [10, с. 392].

С другой стороны, максимальное обилие дейтерия могло быть создано НЗ, рожденными первыми сверхгигантами при образовании галактик. Так, излучение рентгеновских пульсаров при $z \sim 17$ может объяснять особенности спектра ФКИ в длинноволновом радиодиапазоне и МИГИ (§ 6). При этом с увеличением возраста галактик обилие дейтерия в них могло снижаться за счет выгорания в звездах последующих поколений. Соответственно, вклад первых пульсаров в образование дейтерия также следует учитывать.

Литература

1. S.A. Pustilnik, A.L. Tepliakova, D.I. Makarov. Void galaxies in the nearby Universe – I. Sample description // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019. – V. 482. – Is. 4. – P. 4329–4345.
2. S.A. Pustilnik, J.-M. Martin, Y.A. Lyamina, A.Y. Kniazev. Properties of the most metal-poor gas-rich LSB dwarf galaxies SDSS J0015+0104 and J2354–0005 residing in the Eridanus void // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2013. – V. 432. – Is. 3. – P. 2224–2230.
3. M.A. Beasley, A.J. Romanowsky, V. Pota, I.M. Navarro, D.M. Delgado, F. Neyer, A. L. Deich. An overmassive Dark Halo around an Ultra-diffuse Galaxy in the Virgo Cluster // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – V. 819. – № 2. – L20. – 7pp.
4. J.D. Simon, M. Geha. The Kinematics of the Ultra-faint Milky Way Satellites: Solving the Missing Satellite Problem // The Astrophysical Journal. – 2007. – V. 670. – № 1. – P. 313–331.

5. A.Y. Kniazev, E.S. Egorova, S.A. Pustilnik. Study of galaxies in the Eridanus void. Sample and oxygen abundances // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2018. – V. 479. – Is. 3. – P. 3842–3857.
6. I.V. Chilingarian, A.V. Afanasiev, K.A. Grishin, D. Fabricant, S. Moran. Internal Dynamics and Stellar Content of Nine Ultra-diffuse Galaxies in the Coma Cluster Prove Their Evolutionary Link with Dwarf Early-type Galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – V. 884:79. – № 1. – № 2. – 12 pp.
7. А.В. Засов, А.С. Сабурова, А.А. Хоперсков, С.А. Хоперсков. Темная материя в галактиках // *Успехи физических наук*. – 2017. – Т. 187. – № 1. – С. 3-44.
8. S. Mashchenko, A. Sills, H.M. Couchman. Constraining Global Properties of the Draco Dwarf Spheroidal Galaxy // *The Astrophysical Journal*. – 2006. – V. 640. – № 1. – P. 252-269.
9. J. Clampitt, B. Jain. Lensing measurements of the mass distribution in SDSS voids // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – V. 454. – Is. 4. – P. 3357-3365.
10. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия, т. 1. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1988.
11. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия, т. 2. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998.
12. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия, т. 3. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1992.
13. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия, т. 4. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1994.
14. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия, т. 5. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998.
15. R. Adam, et al. Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results // *Astronomy and Astrophysics*. – 2016. – V. 594. – A1 – 38 pp.
16. М.Н. Abdullah, A. Klypin, G. Wilson. Cosmological Constraints on Ω_m and σ_8 from Cluster Abundances Using the GalWCat19 Optical-spectroscopic SDSS Catalog // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 901:90. – № 2 – 8 pp.
17. J. Román, M.A. Beasley, T. Ruiz-Lara, D. Valls-Gabaud. Discovery of a red ultra-diffuse galaxy in a nearby void based on its globular cluster luminosity function // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – V. 486. – Is. 1. – P. 823–835.
18. H. Lee, B.K. Gibson, C. Flynn, D. Kawata, M.A. Beasley. Is the initial mass function of low surface brightness galaxies dominated by low-mass stars? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2004. – V. 353. – Is. 1. – P. 113-117.
19. A. de Graaff, Y.-C. Cai, C. Heymans, J.A. Peacock. Probing the missing baryons with the Sunyaev-Zel'dovich effect from filaments // *Astronomy & Astrophysics*. – 2019. – V. 624. – A48. – 12 pp.
20. J.-P. Macquart, J.X. Prochaska, M. McQuinn, K.W. Bannister, S. Bhandari, C.K. Day, A.T. Deller, R.D. Ekers, C.W. James, L. Marnoch, S. Osłowski, C. Phillips, S.D. Ryder, D.R. Scott, R.M. Shannon, N. Tejos. A census of baryons in the Universe from localized fast radio bursts // *Nature*. – 2020. – V. 581. – P. 391- 408.
21. D.I. Dinescu, S.R. Majewski, T.M. Girard, K.M. Cudworth. The Absolute Proper Motion of Palomar 12: A Case for Tidal Capture from the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *The Astronomical Journal*. – 2000. – V. 120. – № 4 – P. 1892-1905.
22. P. Kroupa. On the variation of the initial mass function // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2001. – V. 322. – Is. 2. – P. 231-246.
23. K. Mužić, R. Schödel, A. Scholz, V.C. Geers, R. Jayawardhana, J. Ascenso, L.A. Cieza. The low-mass content of the massive young star cluster RCW 38 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2017. – V. 471. – Is. 3. – P. 3699–3712.
24. C. Reylé, K. Jardine, P. Fouqué, J. A. Caballero, R. L. Smart, A. Sozzetti. The 10 parsec sample in the Gaia era // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – V. 650. – A201. – 14 pp.

25. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. – Москва: Энергоатомиздат. – 1991.
26. E. Ricciardelli, A. Cava, J. Varela, V. Quilis. The star formation activity in cosmic voids // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – V. 445. – Is. 4. – P. 4045-4054.
27. L. Kaltenegger, W.A. Traub. Transits of Earth-like Planets // The Astrophysical Journal. – 2009. – V. 698. – № 1. – P. 519-527.
28. D.S. Spiegel, A. Burrows, J.A. Milsom. The Deuterium-Burning Mass Limit for Brown Dwarfs and Giant Planets // The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 727. – № 1. – 57. – 9 pp.
29. C.J. Conselice, A. Wilkinson, K. Duncan, A. Mortlock. The evolution of galaxy number density at $Z < 8$ and its implications // The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 830:83. – № 2. – 17 pp.
30. A.M. Swinbank, D. Sobral, I. Smail, J.E. Geach, P.N. Best, I.G. McCarthy, R.A. Crain, T. Theuns. The properties of the star-forming interstellar medium at $z = 0.84\text{--}2.23$ from HiZELS: mapping the internal dynamics and metallicity gradients in high-redshift disc galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2012. – V. 426. – Is. 2. – P. 935-950.
31. Поройков С.Ю. Генезис спектра космического микроволнового фона // Журнал естественнонаучных исследований. – 2020. – Т. 5. – № 4. – С. 71-96.
32. Зельдович Я.Б., Новиков Н.Д. Строение и эволюция Вселенной. – Москва: Наука. – 1975.
33. M.G. Hauser, E. Dwek. The Cosmic Infrared Background: Measurements and Implications // Annual Review of Astronomy & Astrophysics. – 2001. – V. 39. – P. 249-307.
34. R.C. Henry. Diffuse background radiation // The Astrophysical Journal Letters. – 1999. – № 516. – № 2. – L49-L52.
35. M. Kilic, N.C. Hambly, P. Bergeron, C. Genest-Beaulieu, N. Rowell. Gaia Reveals Evidence for Merged White Dwarfs // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2018. – V. 479. – Is. 1. – P. L113–L117.
36. Черпацук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах и ядрах галактик // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184. – № 4. – С. 387-407.
37. J.D. Bowman, A.E.E. Rogers, R.A. Monsalve, T.J. Mozdzen, N. Mahesh. An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum // Nature. – 2018. – V. 555. – P. 67-70.
38. S.C. Keller, et al. A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star SMSS J031300.36-670839.3 // Nature. – 2014. – V. 506. – P. 463-466.
39. Поройков С.Ю. Вклад в рентгеновский космический фон излучения вспыхивающих красных карликов в двойных системах в гало и короне галактики // Журнал естественнонаучных исследований. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 2-15.
40. K.L. Luhman, L. Adame, P. D'Alessio, N. Calvet, L. Hartmann, S.T. Megeath, G.G. Fazio. Discovery of a Planetary-Mass Brown Dwarf with a Circumstellar Disk // The Astrophysical Journal Letters. – 2005. – V. 635. – № 1. – L93–L96.
41. V. Joergens, A. Müller, S. Reffert. Improved radial velocity orbit of the young binary brown dwarf candidate Cha H α 8* // Astronomy & Astrophysics. – 2010. – V. 521. – A24. – 4 pp.
42. J.M. Shull, B.D. Smith, C.W. Danforth. The Baryon Census in a Multiphase Intergalactic Medium: 30% of the Baryons May Still be Missing // The Astrophysical Journal. – 2012. – V. 759. – № 1. – 15 pp.
43. M. Fukugita, C.J. Hogan, P.J.E. Peebles. The Cosmic Baryon Budget // The Astrophysical Journal. – 1998. – V. 503. – № 2. – P. 518-530.
44. M. Zumalacárregui, U. Seljak. Limits on Stellar-Mass Compact Objects as Dark Matter from Gravitational Lensing of Type Ia Supernovae // Physical Review Letters. – 2018. – V. 121. – Is. 14. – 141101 – 10 pp.

45. C. Alcock, et al. The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations // *The Astrophysical Journal*. – 2000. – V. 542. – № 1. – P. 281-307.
46. P. Tisserand, et al. Limits on the Macho content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds // *Astronomy & Astrophysics*. – 2007. – V. 469. – № 2. – P. 387-404.
47. L. Wyrzykowski, et al. The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds – IV. OGLE-III SMC data and final conclusions on MACHOs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – V. 416. – Is. 4. – P. 2949-2961.
48. F. Hammer, Y. Yang, F. Arenou, C. Babusiaux, J. Wang, M. Puech, H. Flores. Galactic Forces Rule the Dynamics of Milky Way Dwarf Galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 860:76. – № 1. – 19 pp.
49. M.E. Putman, L. Staveley-Smith, K.C. Freeman, B.K. Gibson, D.G. Barnes. The Magellanic Stream, High-Velocity Clouds, and the Sculptor Group // *The Astrophysical Journal*. – 2003. – V. 586. – № 1. – P. 170-194.
50. *Вайнер Б.В., Шекинов Ю.А.* Происхождение дейтерия // *Успехи физических наук*. – 1985. – Т. 146. – № 1 – С. 143-171.
51. J.M. O'Meara, D. Tytler, D. Kirkman, N. Suzuki, J.X. Prochaska, D. Lubin, A.M. Wolfe. The Deuterium to Hydrogen Abundance Ratio toward a Fourth QSO: HS 0105+1619 // *The Astrophysical Journal*. – 2001. – V. 552. – № 2. – P. 718-730.
52. *Бисноватый-Коган Г.С., Чечеткин В.М.* Неравновесные оболочки нейтронных звезд, их роль в поддержании рентгеновского излучения и нуклеосинтезе // *Успехи физических наук*. – 1979. – Т. 127. – № 2. – С. 263-296.