

УДК 524.6+524.35

ИНДИКАТОРЫ РАННИХ ЭТАПОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

© 2026 И. А. Ачарова^{1*}, М. Е. Шарина²¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 июля 2025 года; после доработки 22 сентября 2025 года; принята к публикации 13 октября 2025 года

В работе представлен анализ условий образования шаровых скоплений (ШС) в окологалактических облаках. Детально обосновано сходство распределений количества объектов от металличности для ШС в ближней Вселенной и окологалактических облаков в широком диапазоне красных смещений, от 0.2 до 5.9. В распределениях количества окологалактических облаков и ШС присутствует последовательность четырех локальных максимумов на значениях металличности $[X/H] \simeq -2.6, -2.0, -1.4, -0.5$. Рассчитано последовательное обогащение металлами окологалактического облака массой $10^8 M_\odot$, начиная с экстремально низкой металличности, $[X/H] < -2.3$, далее через стадии $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$ и $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$ до высокой металличности, $[X/H] \geq -0.9$, где границы указанных диапазонов совпадают с локальными минимумами числа объектов в распределениях. Показано, что для воспроизводства таких распределений достаточно, чтобы на каждой стадии обогащения части облака металлами образовывалось одно или несколько ШС суммарной массой $3 \times 10^6 M_\odot$. Выявлено, что максимальная масса звезд, способных приводить к взрыву сверхновых, увеличивается с ростом металличности. Рассчитаны возможные значения этой массы для показателей металличности, соответствующих максимумам в распределениях облаков и ШС.

Ключевые слова: *Галактика: гало — (Галактика:) шаровые скопления: общие сведения — (звезды:) сверхновые: общие сведения*

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ распределения металличности окологалактических облаков в широком диапазоне красных смещений, от 0.2 до 5.9, и шаровых скоплений в ближней Вселенной позволяет прояснить процессы, происходящие на начальных этапах формирования галактик. Поскольку в тексте будут использоваться понятия «содержание железа» и «металличность», отметим, что $[Fe/H]$ обозначает именно содержание железа. Металличность будем обозначать $[X/H]$, где $[X/H] = [\alpha/H]$ или $[X/H] = [Fe/H] + \Delta$, при этом Δ принимает разные значения, от 0.3 до 0.5, в зависимости от элемента, на основе которого определяется металличность (Pritzl et al., 2005; Lehner et al., 2019; Nuñez et al., 2022).

В качестве нижнего предела металличности, при котором происходит образование звезд малой массы, естественно использовать наблюдаемый нижний порог металличности звезд гало Галактики, который приходится на $[X/H] \sim -3.5$ dex, что соответствует $[Fe/H] \sim -4.0$ dex (Cohen et al.,

2013; Roederer and Kirby, 2014). Это пороговое значение согласуется со значениями, полученными в работах Wise and Abel (2008) и Chiaki and Wise (2019), в которых было показано, что сверхновая, произошедшая от звезды населения III, может обогатить газ массой 10^5 – $10^6 M_\odot$ металлами до содержания $10^{-4} Z_\odot$ (Z_\odot — солнечное значение металличности), если это был взрыв одиночной звезды массой до $130 M_\odot$, и до содержания $10^{-3} Z_\odot$, если взрыв сверхновой произошел вследствие парно-нестабильного механизма (возможен для звезд с массами от $130 M_\odot$ до $250 M_\odot$, когда гамма-излучение, возникающее при коллапсе их ядра, способно производить электрон-позитронные пары) (Heger et al., 2003). Как отмечается в статье Shchekinov et al. (2023), неполное перемешивание металлов в обогащенном газе, приводит к тому, что самые старые маломассивные звезды имеют существенный, более чем на порядок величины, разброс металличности.

Нижний предел металличности звезд, найденный в цитируемых выше работах, хорошо согласуется с наименьшим значением металличности звезд всех исследованных ультраслабых карли-

*E-mail: iaacharova@sfedu.ru

ковых галактик (UFDs) (Simon, 2019; Fu et al., 2023) вблизи $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -4.0$ dex, но заметно ниже (примерно на 0.7 dex) наименьшей наблюдаемой металличности ШС в ближней Вселенной (Beasley et al., 2019).

Формирование ШС и UFDs начинается раздельно друг от друга в разных областях пространства в одно и то же время, около 13 млрд лет назад, с учетом ошибки определения возраста (Chattopadhyay et al., 2012). Их свойства сильно отличаются. UFDs — это объекты с очень низкой звездной плотностью и преобладанием темной материи, в то время как ШС — это, в большинстве случаев, плотные звездные конгломераты без темной материи. Металличность ШС и окологалактических облаков является мультимодальной, то есть показывает максимумы и минимумы на распределении числа объектов по металличности (Harris, 2010; Shapiro et al., 2010; Kruijssen, 2015; Gratton et al., 2019). Согласно приведенным в данной работе оценкам (см. раздел 2), локальные максимумы приходятся на значения $[\text{X}/\text{H}] \simeq -2.6, -2.0, -1.4, -0.5$, а локальные минимумы — на значения $[\text{X}/\text{H}] \simeq -2.3, -1.7, -1.0$. С учетом масс окологалактических облаков (10^8 – $10^9 M_\odot$) и ШС (порядка $10^6 M_\odot$), такое распределение является показателем трех стадий быстрого, по сравнению с характерным временем звездообразования, обогащения тяжелыми элементами, что возможно только в результате когерентного взрыва сотен тысяч сверхновых звезд (см. раздел 4).

В данной работе выполнено исследование условий звездообразования в окологалактических облаках на этапе образования ШС. Выводы делаются на основе анализа последовательного обогащения облаков альфа-элементами, основными источниками которых являются сверхновые звезды, происходящие от массивных (с массой больше $8 M_\odot$) звездных предшественников — коллапсирующие сверхновые (Woosley and Weaver, 1995; Smartt, 2009).

Массы облаков в разных диапазонах металличности можно считать пропорциональными частоте встречаемости облаков одинаковой плотности в этих диапазонах. Например, если частота встречаемости одинаковая, то и характерный размер облаков в разных диапазонах металличности одинаков. Так как луч зрения на квазар пересекает облака случайным образом. Значит, в данном случае массы обогащенной и необогащенной частей облака в первом приближении равны.

2. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОКОЛОГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

В статье Acharova et al. (2022) было обосновано, что окологалактические облака вплоть до красного

смещения $z = 5$, вероятно, являются остатками родительских облаков, в которых были сформированы ШС. Кратко напомним основные предпосылки такого вывода. Окологалактические облака и ШС нашей и других галактик в области $[\text{X}/\text{H}] \geq -1.7$ демонстрируют разделение на подгруппы с высокой и низкой металличностью, с двумя четко выраженными максимумами в распределении количества облаков от металличности на $\langle [\text{X}/\text{H}] \rangle = -0.5 \pm 0.3$ и $\langle [\text{X}/\text{H}] \rangle = -1.4 \pm 0.3$ и дефицитом облаков вблизи $[\text{X}/\text{H}] \sim -0.9$. Обогащение металлами в 15 раз произошло быстро: возраст ШС в обеих группах одинаков (в пределах ошибки его измерения). Как показано в исследованиях Acharova and Sharina (2018) и Acharova et al. (2022), столь резкое и быстрое обогащение можно объяснить только когерентным, то есть произошедшим за очень короткое время, по сравнению с характерным временем индуцированного звездообразования, взрывом сотен тысяч сверхновых звезд.

В этом исследовании мы расширили изучение распределения по металличности окологалактических облаков до диапазона чрезвычайно низкой (extremely low) металличности, $[\text{X}/\text{H}] < -1.7$ ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$) (Nuñez et al., 2022). Компонент с чрезвычайно низкой металличностью был проявлен в облаках низкой плотности (partial Lyman limit systems, pLLSs) с линейной плотностью нейтрального водорода в диапазоне $16.1 < \lg N_{\text{HI}} < 17.2$ (см., например, рис. 1–3 в Acharova et al. (2022), где отчетливо видно больше двух максимумов на гистограммах), причем при любом красном смещении. Для иллюстрации связи окологалактических облаков и ШС во всем наблюдаемом диапазоне металличности приводим гистограммы на рис. 1 и 2. Статистика показанных на данных рисунках распределений представлена в таблице 1. На рис. 1a представлено распределение содержания кремния в плотных облаках (damped Lyman limit systems, линейная плотность нейтрального водорода для них в диапазоне $\lg N_{\text{HI}} > 20.3$) для красных смещений $5 < z < 2$ (Nuñez et al., 2022). В Nuñez et al. (2022) исследовались окологалактические облака только с чрезвычайно низкой металличностью, $[\text{X}/\text{H}] < -1.7$ ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$). На рис. 1b отображено распределение металличности окологалактических облаков pLLSs (Lehner et al., 2019). Металличность определялась в основном по ионам кислорода (комбинация O II, O III, O IV, иногда O I и O VI), магния и/или кремния. Рисунок 1c демонстрирует распределение, построенное по наименьшим значениям металличности ШС из 28 галактик (см. таблицу 2 из Beasley et al., 2019). Поясним: внутри галактики встречаются ШС разных металличностей и для построения гистограммы мы

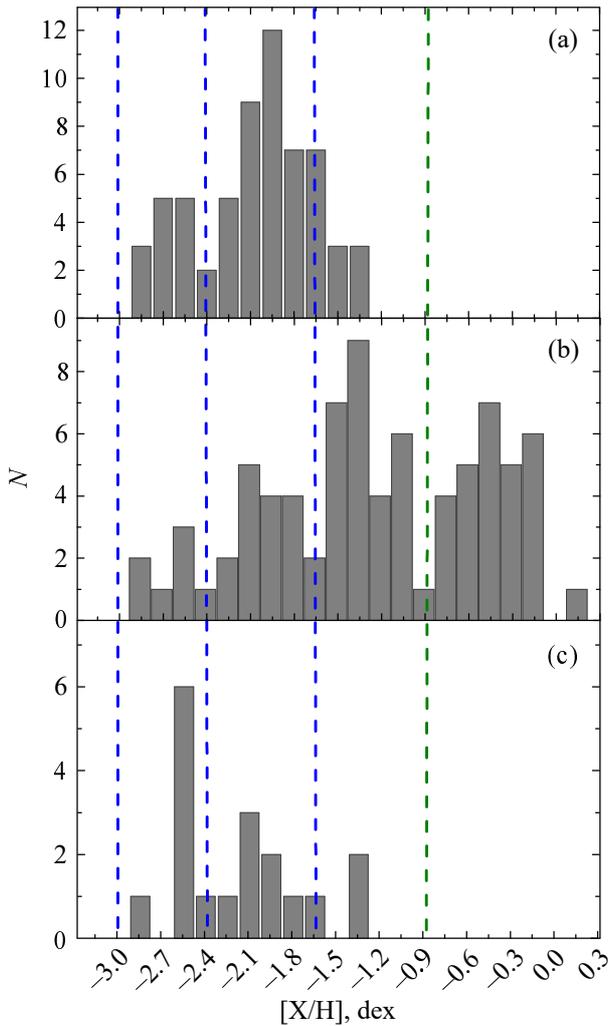


Рис. 1. Гистограммы распределения по металличности следующих объектов: на панелях (a) и (b) — окологалактических облаков высокой и низкой плотности из Nuñez et al. (2022) и Lehner et al. (2019) соответственно; на панели (c) — ШС из 28 галактик, взятых по минимальным значениям металличности (Beasley et al., 2019). Вертикальные штриховые линии проведены через значения минимумов на распределении окологалактических облаков pLLSs по металличности (b) для облегчения сравнения всех приведенных на рисунке гистограмм.

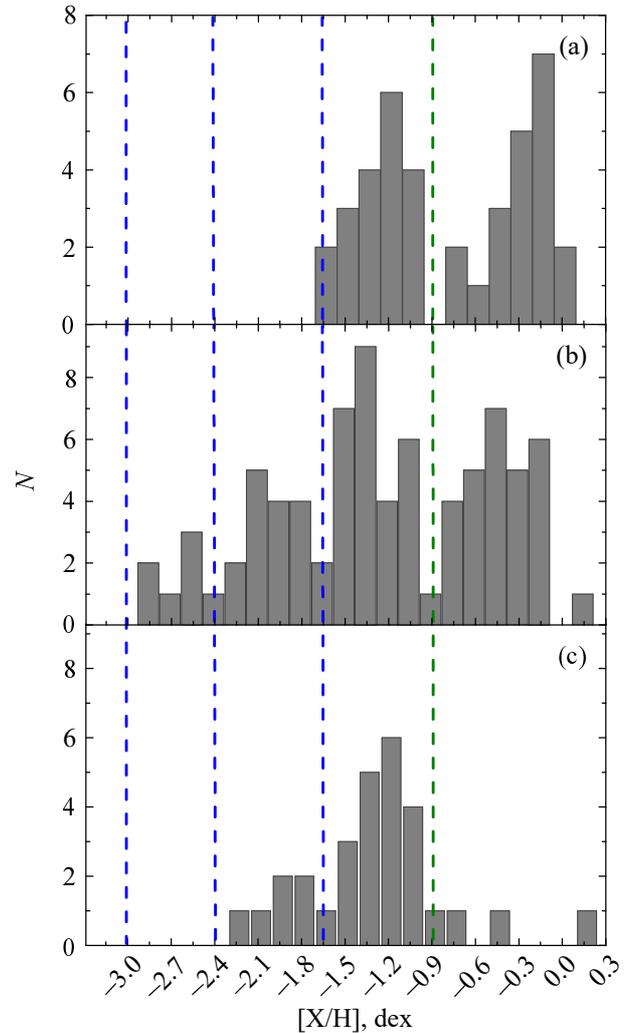


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для следующих объектов: (a) — шаровых скоплений, расположенных в диске нашей Галактики (Dias et al., 2016); (b) — окологалактических облаков низкой плотности из Lehner et al. (2019) (такой же график, как на рис. 1b, повторен здесь для облегчения сравнения); (c) — ШС, расположенных в гало, в том числе в самых внешних его частях (Pritzel et al., 2005). Видно, что значения максимумов в различных выборках совпадают в пределах среднеквадратичного отклонения.

использовали одно, самое низкометалличное скопление из каждой галактики, чтобы гарантировать его образование из окологалактического газа.

На рис. 2a приведена гистограмма распределения $[X/H]$ для ШС диска Галактики из исследования Dias et al. (2016), металличность которых определялась по содержанию магния; на рис. 2b — для окологалактических облаков pLLSs из работы Lehner et al. (2019) (тот же график, что и на Рис. 1b, для облегчения сравнения с распределениями ШС); на рис. 2c — для ШС гало Галактики из Pritzel et al. (2005).

Исходя из анализа гистограмм на рис. 1 и 2

можно выделить несколько диапазонов металличности:

- 1) чрезвычайно низкая ($[X/H] < -1.7$),
- 2) низкая ($-1.7 \leq [X/H] < -0.9$),
- 3) высокая ($[X/H] \geq -0.9$).

При этом область чрезвычайно низкой металличности, по-видимому, в свою очередь, разделяется на две подобласти с минимумом примерно на $[X/H] \simeq -2.3$. В своем изложении мы тоже решили придерживаться терминологии, используемой в Lehner et al. (2019); Nuñez et al. (2022). Для экстремально низкометалличного диапазона будем конкретизировать подгруппу указанием металличности.

Таблица 1. Средние значения $[X/H]$, среднеквадратичные отклонения $\sigma([X/H])$ и количества N ШС и окологалактических облаков в различных диапазонах металличности, в соответствии с данными Pritzl et al. (2005), Dias et al. (2016), Beasley et al. (2019), Lehner et al. (2019), Nuñez et al. (2022)

Объект	Ссылка	$\langle [X/H] \rangle$	$\sigma([X/H])$	N	$\langle [X/H] \rangle$	$\sigma([X/H])$	N
		$[X/H] < -2.3$			$-2.3 \leq [X/H] < -1.7$		
pLLSs	Lehner et al. (2019)	-2.63	0.17	7	-1.98	0.16	16
DLAs	Nuñez et al. (2022)	-2.66	0.29	33	-2.11	0.12	28
ШС	Beasley et al. (2019)	-2.5	0.12	8	-2.0	0.16	7
ШС	Pritzl et al. (2005)	—	—	—	-1.93	0.10	6
ШС	Dias et al. (2016)	—	—	—	—	—	—
		$-1.7 \leq [X/H] < -0.9$			$[X/H] \geq -0.9$		
pLLSs	Lehner et al. (2019)	-1.31	0.19	28	-0.42	0.22	28
DLAs	Nuñez et al. (2022)	—	—	—	—	—	—
ШС	Beasley et al. (2019)	-1.42	0.18	3	—	—	—
ШС	Pritzl et al. (2005)	-1.25	0.18	20	—	—	—
ШС	Dias et al. (2016)	-1.28	0.20	19	-0.28	-0.20	20

Перейдем к анализу статистики показанных на рис. 1 и 2 распределений, построенных в соответствии с наблюдениями Pritzl et al. (2005), Dias et al. (2016), Beasley et al. (2019), Lehner et al. (2019), Nuñez et al. (2022), которая приведена в таблице 1 для различных диапазонов металличности. Отметим, что подгруппы облаков всех четырех диапазонов металличности представлены только в Lehner et al. (2019). При этом средние значения в различных выборках объектов внутри каждого диапазона металличности совпадают в пределах среднеквадратичного отклонения. Поэтому будем считать выборку Lehner et al. (2019) близко отражающей реальную картину распределения окологалактических облаков и ШС по металличности. Как видно из статистического анализа данных Lehner et al. (2019), число облаков в рассматриваемых диапазонах металличности составляет 7 : 16 : 28 : 28. Однако в диапазоне $[X/H] < -2.3$ Lehner et al. (2019) удалось еще для 13 облаков определить только верхнюю границу металличности. Они не вошли в наш статистический анализ, но с их учетом число облаков достигает 20 : 16 : 28 : 28. Таким образом, в экстремально низкометалличной группе ($[X/H] < -1.7$) облака практически поровну распределены по подгруппам. Число окологалактических облаков в подгруппах с низкой и высокой металличностью одинаково (Acharova et al., 2022). В дальнейшем будет показано (см. раздел 4), что точное значение пропорции облаков не критично. Например, недооценка или переоценка в два раза количества облаков в любом из рассматриваемых диапазонов металличности приведет к соответствующей

оценке недооценке или переоценке в два раза массы произведенных металлов сверхновыми. Но выводы о количестве сверхновых звезд останутся неизменными. Заметим, что при этом набор величин максимальных масс звезд, способных взорваться как сверхновые, полученный для средних значений металличности внутри каждого диапазона, изменится согласно измененной пропорции производства металлов (см. раздел 4).

Сравнивая гистограммы распределения числа объектов от металличности двух подгрупп окологалактических облаков при $[X/H] \leq -1.7$, а также наименьшей металличности ШС в ближайших карликовых галактиках из Beasley et al. (2019) (см. рис. 1), приходим к выводу, что ШС могут формироваться в облаках с $[X/H] \geq -3.0$. В гигантских галактиках MW, M31, Cep A, M87, как видно из рис. 7 Beasley et al. (2019), не сохранились ШС с $[X/H] \leq -2.3$, а при $-2.3 < [X/H] \leq -1.7$ сохранились лишь единицы ШС. В любом случае частота встречаемости ШС при $[X/H] < -1.7$ в гигантских галактиках значительно ниже частоты встречаемости облаков: 20 : 16 : 28 : 28. Причину этого еще предстоит выяснить. Поскольку если придерживаться иерархической теории формирования галактик, то, например, около 50% ШС нашей Галактики образовались в карликовых галактиках и впоследствии были аккрецированы (Kruijssen et al., 2019; Massari et al., 2019; Forbes, 2020). Интересно отметить, что все известные ультраслабые карликовые галактики начали формироваться при металличности меньше -3.0 dex (Fu et al., 2023), то есть

пороговая металличность UFDs лежит левее всех гистограмм, приведенных на рис. 1 и 2. Рассмотрим отдельно свойства UFDs и ШС как представителей объектов, сформированных в одну эпоху.

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1. Ультраслабые карликовые галактики: свойства и формирование

Ультраслабые карликовые галактики — старейшие звездные объекты. Их звездообразование закончилось 12 млрд лет назад (Brown et al., 2014) и протекало в условиях, аналога которым нет в современную эпоху: разреженный газ, вероятно, практически полностью фрагментировался на звезды благодаря гравитационному влиянию темной материи. В поддержку такого вывода приведем следующие оценки. Масса звездного компонента UFDs составляет 10^2 – $10^3 M_\odot$ при характерном размере около 100 пк, а значения вириальной массы — от 10^7 до $10^9 M_\odot$ (Fu et al., 2023). Согласно НФМ Солпитера (Salpeter, 1955), на звезды с массами от $0.1 M_\odot$ до $0.8 M_\odot$, которые сохранились в UFDs, приходится около 56% массы первоначального звездного скопления, то есть начальная масса звезд была всего лишь вдвое больше. Сделаем оценку сверху: допустим, что масса газа до звездообразования в UFDs на порядок превышала сформированную им звездную. Получим поверхностную плотность газа не выше $10 M_\odot \text{ пк}^{-2}$. С другой стороны, современные наблюдения карликовых галактик и окраин гигантских галактик показывают, что при поверхностной плотности газа ниже $10 M_\odot \text{ пк}^{-2}$ эффективность звездообразования настолько мала, что характерное время исчерпания газа составляет 10^{10} лет и даже 10^{11} лет (Bigiel et al., 2008). При этом, как правило, образуются рассеянные скопления типа Плеяд (Bigiel et al., 2008), которые не содержат звезд с массой больше $8 M_\odot$, способных стать сверхновыми. В UFDs наблюдаемая плотность звезд свидетельствует о том, что образовывались похожие на Плеяды скопления (Simon, 2019; Fu et al., 2023), но основной эпизод звездообразования длился около 100 млн лет (Jones et al., 2025). Такое резкое отличие времени звездообразования можно объяснить, если учесть, что на скорость звездообразования влияет не только газовая плотность, но и полная поверхностная плотность, что впервые было обосновано в работе Talbot and Arnett (1975). В исследовании Portinari and Chiosi (1999) выполнено сравнение влияния различных законов звездообразования на результаты моделирования эволюции диска Галактики, включая его химическую эволюцию. В результате продемонстрировано, что значение коэффициента пропорциональности ν , используемого в законе

Шмидта (Schmidt, 1959) $\psi = \nu \mu_g^k$ (μ_g — поверхностная плотность газа, k — показатель степени), неявно содержит вклад полной поверхностной плотности вещества и, строго говоря, является функцией радиуса галактики. Заметим, что только в UFDs масса темной материи на 5–6 порядков превосходит массу видимого барионного вещества (Simon, 2019; Fu et al., 2023). Другими словами, есть обоснованные предположения считать, что в UFDs происходит кратковременная вспышка звездообразования в условиях пониженной газовой плотности под влиянием именно темной материи. При вспышечном звездообразовании обычно наблюдается почти полное, до 100%, исчерпание звездообразующего газа (Kennicutt and Evans, 2012).

Детального моделирования эволюции UFDs под влиянием доминирующего вклада темной материи пока нет. Тем не менее, с учетом вышесказанного, UFDs не рассматриваются нами как объекты, способные внести заметный вклад в обогащение экстремально низкометаллического компонента окологалактических облаков.

3.2. Шаровые скопления: формирование и свойства

Эпоха начала формирования ШС совпала по времени с формированием UFDs: около 13 млрд лет назад. Свойства этих двух типов объектов диаметрально отличаются: ШС характеризуются очень высокой звездной плотностью и не обнаруживают присутствия в них темной материи. Имеется обширное количество литературы по поводу формирования ШС (например, Kruijssen, 2015; Li et al., 2017; Pfeffer et al., 2018; Forbes, 2020). Основной вывод исследований состоит в том, что для формирования ШС плотность газа и скорость звездообразования должны быть достаточно высокими.

Распределение по металличности наименее металлических ШС из 28 галактик, согласно таблице 2 Beasley et al. (2019), совпадает с распределением по металличности экстремально низкометаллической подгруппы облаков $[X/H] < -1.7$ (см. рис. 1 и таблицу 1 данной статьи). Поскольку выборка представлена в основном карликовыми галактиками, можно увидеть, что ШС начали формироваться в экстремально низкометаллическом газе, в двух его поддиапазонах: $[X/H] < -2.3$ и $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$. Некоторые карликовые галактики, например Sextant A, Pegasus dIrr, WLM, могут содержать только одно ШС. Другие могут содержать и несколько ШС. Например, в

NGC 147 и NGC 6822 ШС попадают в обе подгруппы экстремально низкометаллического диапазона $[X/H] \leq -1.7$. Такое распределение может являться портретом металличности среды, из которой формировались ШС, то есть оно отражает степень перемешивания металлов внутри газового облака, из которого сформировалась карликовая сфероидальная галактика. Распределение металличности внутри карликовой галактики уже на ранних этапах могло быть сильно неоднородным. Нахождение рядом двух очагов звездообразования с экстремально высокой плотностью газа бывает в оболочках, сформированных расширяющимся газом взорвавшихся сверхновых (Vasiliev et al., 2017; Barnes et al., 2023). Однако подробное обсуждение последнего вопроса выходит за рамки данной работы.

ШС, принадлежащие нашей Галактике и M31, находятся преимущественно в диапазоне $[Fe/H] \geq -1.7$ (Carretta et al., 2010; Dias et al., 2016; Wang et al., 2021). Единицы из них попадают в область $-2.3 \leq [Fe/H] < -1.7$. Налицо несоответствие с распределением по металличности ШС в карликовых галактиках (Beasley et al., 2019).

В настоящее время массы большинства ШС в Млечном Пути находятся в диапазоне $10^5 M_{\odot} - 10^6 M_{\odot}$ (Gratton et al., 2019). Но, согласно ряду исследований (например, Winter and Clarke (2023) и ссылки в этой работе), ШС при взаимодействии с нашей Галактикой к настоящему времени потеряли до 90% своей массы. То есть масса многих из них изначально могла быть порядка $10^7 M_{\odot}$. В статье Kruijssen et al. (2019) сделан вывод, что пороговое значение металличности ШС на уровне $[X/H] = -2.5$ является результатом наблюдаемого соотношения «масса–металличность» родительских галактик (чем меньше галактика, тем ниже металличность населяющих ее звезд). Необходимо отметить, что вывод Kruijssen et al. (2019) сделан с помощью экстраполяции, а не из прямых наблюдений. В противовес ему можно указать на исследование Beasley et al. (2019). Иногда в галактиках наблюдается одно ШС, образовавшееся на начальном этапе формирования галактики, и его металличность не коррелирует со средней массой звезд современной галактики. Понятно, что галактики большей массы способны образовать большее количество ШС, в том числе из вещества, обогащенного первыми ШС. Среднее значение металличности нескольких поколений ШС будет выше, чем ШС первого поколения. Зависимости «масса–металличность» также не подчиняются ультракомпактные карликовые галактики и некоторые карликовые сфероидальные галактики Местной группы (рис. 9 и 11 в статье Chattopadhyay et al., 2012).

Чтобы оценить свойства шаровых скоплений в разных диапазонах металличности, обратимся к расчетам химической эволюции окологалактических облаков.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА КОЛЛАПСИРУЮЩИХ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД, СФОРМИРОВАВШИХ НАБЛЮДАЕМУЮ МЕТАЛЛИЧНОСТЬ ОБЛАКОВ

Вычисление количества коллапсирующих сверхновых звезд (то есть происходящих от звезд с массой больше $8 M_{\odot}$), способных обогатить облака от среднего значения в одном диапазоне металличности до среднего значения в соседнем диапазоне металличности, как будет показано в данном разделе, может дать информацию о массе родительских звездных скоплений и о зависимости максимальной массы предсверхновой от металличности.

Начнем наши рассуждения с того момента, когда в результате взрывов первых сверхновых звезд окологалактические облака уже достигли экстремально низкого уровня металличности. Единственные звездные системы, которые имеют металличность $[X/H] < -3$, — это ультраслабые карликовые галактики (UFDs). ШС были сформированы в диапазоне $-3 \leq [X/H] < -2.3$, и механизм такого различия металличности UFDs и ШС остается за рамками этого исследования.

Качественно обсудим процесс обогащения окологалактических облаков тяжелыми элементами. Сначала в экстремально низкометаллическом газе ($-3 \leq [X/H] < -2.3$) образовались шаровые скопления. В течение короткого промежутка времени коллапсирующие сверхновые (на которые, согласно начальной функции масс Солпитера (Salpeter, 1955), приходится примерно 10% массы шарового скопления) взрываются. В результате газ, окружающий шаровые скопления, сжимается ударной волной и обогащается тяжелыми химическими элементами. Затем некоторый процент массы этого газа, 10% и выше (Kennicutt and Evans, 2012), становится веществом шаровых скоплений с металличностью $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$. Процессы звездообразования в оболочках пузырей, окружающих массивные звездные скопления, наблюдаются по сей день (Watkins et al., 2023 и ссылки в этой работе). Далее, в результате аналогичного процесса, идет образование еще двух поколений шаровых скоплений при металличностях $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$ и $[X/H] \geq -0.9$. Распределение металличности облаков и шаровых скоплений с четко выраженными максимумами свидетельствует о том, что обогащение газа происходило последовательно от экстремально

низкой металличности до высокой. Это, в свою очередь, позволяет утверждать, что в разных местах Вселенной происходили схожие процессы с когерентными взрывами сотен тысяч сверхновых.

Далее, проанализируем процесс обогащения одного облака. Для более четкого изложения наших рассуждений предположим, что в настоящее время облака поровну распределены по подгруппам в разных диапазонах металличности. Иллюстрация последовательного обогащения окологалактического облака показана на Рис. 3. Исходим из того, что первоначально весь газ, участвующий в образовании ШС, имел металличность $-3 \leq [X/H] < -2.3$. Шаровые скопления, образовавшиеся в этом газе, обогатили 3/4 массы облака до состояния $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$. Затем сверхновые, взорвавшиеся в облаках с металличностью $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$, обогатили 2/3 массы этого газа до $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$. Наконец, сверхновые низкометаллических облаков обогатили половину массы и создали высокометаллическую подгруппу $[X/H] \geq -0.9$. Облака сохранили ту металличность, которая осталась от когерентных взрывов сверхновых в ШС.

Будем рассматривать обогащение газового облака с массой, например, $10^8 M_\odot$. Как показано в Nagakura et al. (2009), $10^8 M_\odot$ — это критическая масса, начиная с которой могут происходить индуцированные сверхновыми вспышки звездообразования. В исследовании Lehner et al. (2019) облака занимают весь анализируемый диапазон металличностей: от экстремально низкометаллического до высокометаллического. Поэтому используем средние значения металличности всех четырех подгрупп облаков из данного исследования Lehner et al. (2019). В остальных исследованиях, приведенных на рис. 1 и 2, рассматриваемый диапазон металличностей узок и проявляются только два максимума на гистограмме распределения.

Металличность окологалактических облаков в Lehner et al. (2019) определялась в основном по содержанию ионов кислорода и магния. Оценим массу кислорода, необходимую для обогащения облака от средней металличности -2.63 диапазона $[X/H] < -2.3$ до средней металличности -1.98 диапазона $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$ (см. таблицу 1). По определению массовая доля кислорода рассчитывается по формуле:

$$Z_O = 10^{\lg Z_{O_\odot} + [X/H]},$$

где $\lg Z_{O_\odot} = -3.27$ (Asplund et al., 2009).

Соответственно средним значениям металличности $\langle [X/H] \rangle = -2.63$ и $\langle [X/H] \rangle = -1.98$ имеем два значения массовой доли кислорода: $Z = 10^{-2.63-3.27} = 10^{-5.90}$ и $Z = 10^{-1.98-3.27} = 10^{-5.25}$.

С учетом приведенных выше рассуждений о том, что сверхновые первого поколения ШС обогатили 75% окологалактического облака, можно утверждать, что обогащенная часть облака приобрела следующую массу кислорода:

$$M_O = 0.75 \times 10^8 (10^{-5.25} - 10^{-5.90}) M_\odot \approx 10^{2.52} M_\odot.$$

Понятно, что средние значения $[O/H]$ определяются на основе имеющейся выборки облаков и могут отличаться от истинного среднего значения вследствие ограниченности используемой нами выборки.

Далее оценим массу кислорода, необходимую для обогащения половины массы исходного облака от состояния со средним значением $\langle [X/H] \rangle = -1.98$ до состояния со средним значением $\langle [X/H] \rangle = -1.31$. Она составляет

$$M_O = 0.5 \times 10^8 (10^{-4.58} - 10^{-5.25}) M_\odot \approx 10^{3.01} M_\odot.$$

И наконец, оценим массу кислорода, необходимую для обогащения четвертой части массы исходного облака от состояния со средним значением $\langle [X/H] \rangle = -1.31$ до состояния со средним значением $\langle [X/H] \rangle = -0.42$:

$$M_O = 0.25 \times 10^8 (10^{-3.59} - 10^{-4.58}) M_\odot \approx 10^{3.65} M_\odot.$$

То есть налицо тенденция к росту требуемой массы кислорода для обогащения все меньшей части исходного газового облака, в котором последовательно образовались четыре поколения ШС.

Как видно из полученных оценок, изменение массы облака, то есть использование вместо $10^8 M_\odot$ другого значения, приведет к изменению массы кислорода в одинаковой пропорции в каждой из трех групп, но не приведет к изменению пропорции. Приведенные в таблице 2 массы рассчитаны для значения массы облака $10^8 M_\odot$.

Как видно из анализа таблицы 2, с ростом металличности части исходного облака доля произведенного кислорода увеличивается в 3 и 4.4 раза. При этом зависимости массы ШС от металличности нет, что согласуется с наблюдательными данными (Harris, 2010; Krause et al., 2016). Следовательно, нет оснований ожидать такого же роста количества сверхновых звезд второго типа, происходящих от одиночных звезд. Рассмотрим, могут ли дать сверхновые типа Ib/c, происходящие от двойных звезд, необходимый вклад. Наблюдательных ограничений на долю разного типа коллапсирующих сверхновых звезд в ШС не существует. Для галактик наблюдается большой разброс отношения количества сверхновых типа II к количеству сверхновых типа Ib/c (Heger et al., 2003) — от 1.2



Рис. 3. Схема, объясняющая обогащение исходного газового облака в предположении, что сейчас наблюдается равновероятное распределение числа окологалактических облаков по диапазонам металличности. Первоначально все облако имело металличность $[X/H] < -2.3$. Затем 3/4 массы облака обогатилось до состояния $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$, из которой 2/3, в свою очередь, до $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$. И наконец, половина массы с металличностью $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$ обогатилась до $[X/H] \geq -0.9$.

Таблица 2. Расчеты обогащения окологалактических облаков кислородом

Средняя металличность	$\langle [X/H] \rangle = -2.63 \div -1.98$	$\langle [X/H] \rangle = -1.98 \div -1.31$	$\langle [X/H] \rangle = -1.31 \div -0.42$
Масса кислорода, M_{\odot}	$10^{2.52}$	$10^{3.01}$	$10^{3.65}$

до 16. Но звездные плотности в современных очагах звездообразования на три порядка ниже, чем в ШС. Как обсуждается, например, в Gratton et al. (2019), в условиях повышенной звездной плотности происходит эффективное разрушение тесных двойных звездных систем. На долю двойных звезд в ШС приходится менее 10%, и это отношение не зависит от металличности. Поэтому нет очевидных причин ожидать увеличения темпа образования сверхновых звезд в 3–4 раза за счет вклада сверхновых типа Ib/c. Единственная возможность роста произведенной массы кислорода при взрывах коллапсирующих сверхновых в ШС состоит в увеличении максимальной массы звезд, способных взорваться как сверхновые, с ростом металличности исходного газа.

Как видно из рис. 4, на котором показана средняя масса кислорода в расчете на одну сверхновую, полученная с учетом начальной функции масс Солпитера, согласно расчетам нуклеосинтеза (Tsujiimoto et al., 1995; Nomoto et al., 2006), для увеличения массы произведенного кислорода в три раза достаточно увеличить максимальную массу звезд в скоплении, способных взорваться как сверхновые, например, с $11.5 M_{\odot}$ до $13 M_{\odot}$ (Nomoto et al., 2006). При дальнейшем росте металличности, чтобы увеличить массу произведенного кислорода в 4.4 раза, максимальную массу предсверхновой надо увеличить до $20 M_{\odot}$. При этом средняя масса кислорода в расчете на одну сверхновую изменяется от $0.012 M_{\odot}$ до $0.036 M_{\odot}$ и $0.16 M_{\odot}$ соответственно (Nomoto et al., 2006). Как можно заметить по рис. 4, только из информации о пропорции произведенного кислорода нельзя однозначно указать максимальные массы предсверхновых звезд для разных диапазонов металличности: заданной пропорции соответствует произвольный выбор других значений масс, например $12.5 M_{\odot}$, $15 M_{\odot}$, $25 M_{\odot}$ (при этом средняя масса кислорода в расчете на одну сверхновую, согласно

Nomoto et al. (2006), изменяется от $0.025 M_{\odot}$ до $0.075 M_{\odot}$ и $0.33 M_{\odot}$ соответственно). Ограничением на максимальную массу предсверхновой в этой тройке значений может быть теоретический предел, полученный из исследований звездной эволюции, чувствительный к модельным параметрам и находящийся вблизи $25 M_{\odot}$ (Fryer and Kalogera, 2001; Heger et al., 2003). Близкое значение, $23 M_{\odot}$, получается при моделировании химической эволюции Галактики (Acharova et al., 2013). Учитывая это ограничение, получаем, что набор возможных значений максимальной массы предсверхновой для разных диапазонов металличности можно зафиксировать сверху. Расчеты Tsujimoto et al. (1995), показанные на рис. 4, демонстрируют более крутую зависимость средней массы кислорода в расчете на одну сверхновую от максимальной массы предсверхновой. Поэтому диапазон масс предсверхновых для разных металличностей, согласно Tsujimoto et al. (1995), будет немного уже, чем для данных из работы Nomoto et al. (2006). Аналогичные рассуждения справедливы и для производства магния.

Зависимость максимальной массы предсверхновой от металличности уже рассматривалась в литературе. Ответственные за ее изменение физические механизмы выявлены, хотя значение этой массы остается модельно зависимым. Например, в Heger et al. (2003) отмечено, что при низких металличностях звезды с массой выше $25 M_{\odot}$ не взрываются как сверхновые, а происходит прямой коллапс вещества звезды в черную дыру. С повышением металличности увеличивается звездный ветер, который влияет на массу звезды и тем самым опосредованно влияет на массу звездного ядра, приводя к состоянию, при котором вероятен именно взрыв сверхновой. Такой вывод косвенно подтверждается тем, что, как известно, гамма-всплески чаще наблюдаются в низкометаллических системах, и этот факт находит теоретиче-

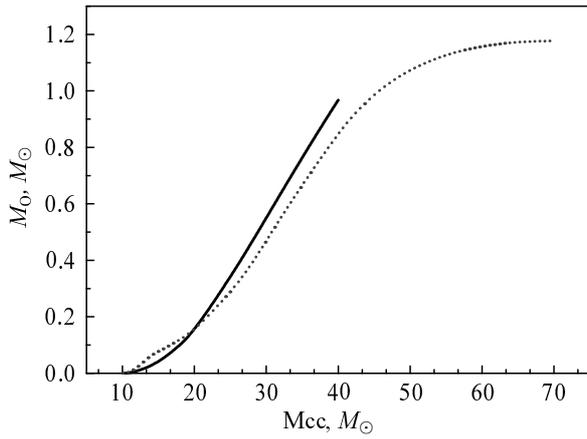


Рис. 4. Средняя масса кислорода, произведенная в расчете на одну сверхновую, в зависимости от максимальной массы звезд в звездном скоплении, способных взорваться как сверхновые, полученная согласно данным нуклеосинтеза: Tsujimoto et al. (1995) — сплошная линия, Nomoto et al. (2006) — пунктирная линия.

ское обоснование в Woosley and Heger (2006). В этих случаях, как правило, выброс обогащенной оболочки сверхновой в окружающее пространство не происходит (Fryer et al., 1999). Представленное в данной работе исследование представляет собой самостоятельный метод определения зависимости максимальной массы предсверхновой от металличности.

Теперь мы имеем достаточно информации для того, чтобы приступить к исследованию звездообразования в околоскопических облаках. Поскольку зависимость массы ШС от металличности не наблюдается (Harris, 2010; Krause et al., 2016), на первом шаге будем исходить из того, что массы ШС в разных диапазонах металличности одинаковы. Следовательно, они содержат равное количество звезд с массой больше $8 M_{\odot}$, и это означает, что число сверхновых в разных диапазонах металличности совпадает. Предположим, что в диапазоне металличности от $\langle [X/H] \rangle = -1.98$ до $\langle [X/H] \rangle = -1.31$ максимальная масса предсверхновой равна найденному выше значению $15 M_{\odot}$. Тогда требуемое число сверхновых: $10^{3.01} M_{\odot} / 0.075 M_{\odot} = 10^{4.13}$.

Средняя масса сверхновой $\langle M_{sc} \rangle$ в предположении, что максимальная масса предсверхновой равна $15 M_{\odot}$, определяется по формуле:

$$\langle M_{sc} \rangle = \frac{\int_8^{15} m \varphi(m) dm}{\int_8^{15} \varphi(m) dm} \approx 11 (M_{\odot}),$$

где m — масса звезд, $\varphi(m)$ — начальная функция масс Солпитера.

Таким образом, масса сверхновых в звездном скоплении $10^{4.13} \times 11 = 10^{5.18} (M_{\odot})$. Доля массы

сверхновых в звездном скоплении в этом случае составляет

$$\int_8^{15} m \varphi(m) dm \approx 0.05.$$

Значит, сверхновые суммарной массой $10^{5.18} M_{\odot}$ образуются в ШС массой $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

Следовательно, из приведенных выше расчетов следует, что для обогащения облака начальной массой $10^8 M_{\odot}$ кислородом, так, чтобы по окончании процесса последовательного обогащения оно состояло из четырех равных по массе областей металличности, исследуемых в работе, $[X/H] < -2.3$, $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$, $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$, $[X/H] \geq -0.9$, достаточно, чтобы в каждой из этих областей образовалось одно или несколько ШС суммарной массой $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

Расчеты показывают, что при массе ШС меньше критического значения $2 \times 10^5 M_{\odot}$ оно будет разрушено за время порядка 10 млрд лет при движении в гравитационном поле Галактики (Kruijssen, 2015; Gratton et al., 2019). Есть указания, что первоначальные массы ШС, сохранившихся до настоящего времени в нашей Галактике, были на порядок больше современных (Harris, 2010; Kruijssen, 2015; Gratton et al., 2019). То есть массы самых массивных ШС могли быть порядка $10^7 M_{\odot}$. Из этого следует, что массы облаков, их образовавших, были в 2–3 раза больше, чем $10^8 M_{\odot}$ (это значение найдено в Nagakura et al. (2009) в качестве критического, начиная с которого вспышки звездообразования могут индуцироваться сверхновыми). Если в облаке образовалось 15 ШС массой $2 \times 10^5 M_{\odot}$ (суммарной массой $3 \times 10^6 M_{\odot}$), то они по большей части разрушились при движении в гравитационном поле нашей Галактики, но могли сохраниться, как мы видим, в карликовых галактиках (Beasley et al., 2019 и ссылки в этой работе).

Из вышеизложенного вытекает логичный вопрос: почему в Галактике, как видно из рис. 2с, в гало наблюдаются ШС при металличности из диапазона $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$, но не наблюдаются при $[X/H] < -2.3$? Этот вопрос пока остается открытым. При этом нет видимых ограничений предполагать, что в экстремально низкометаллических областях условия звездообразования были более благоприятны для образования нескольких ШС, суммарная масса которых соответствовала массе одного ШС из более металличного диапазона. Можно отметить, что ШС возрастом 10–12 млрд лет, расположенные в карликовых галактиках и не испытывающие заметных разрушений, имеют массу, близкую к критической: $2 \times 10^5 M_{\odot}$ (Krause

et al., 2016). Поэтому ШС, аккрецированные вместе с родительскими карликовыми галактиками около 10 млрд лет назад, скорее всего, разрушились.

Предположим, что среднее значение металличности облаков одной из подгрупп было смещено на 0.3 dex в большую или меньшую сторону (из-за ограниченности выборки или из-за ошибки метода определения содержания). Это приведет к изменению производства кислорода в $10^{0.3}$ раз и повлияет на набор значений максимальных масс звезд, способных взорваться как сверхновые. Но выводы о количестве сверхновых звезд останутся неизменными, как следует из приведенных выше рассуждений.

5. ВЫВОДЫ

В работе выполнен анализ условий звездообразования шаровых скоплений в окологалактических облаках. Детально обосновано сходство распределений количества объектов от металличности для ШС в ближней Вселенной и окологалактических облаков в широком диапазоне красных смещений, от 0.2 до 5.9. Эти распределения представляют собой последовательность четырех локальных максимумов количества окологалактических облаков и ШС на разных значениях металличности: $[X/H] \simeq -2.6, -2.0, -1.4, -0.5$. Выполнено вычисление процесса последовательного обогащения металлами окологалактического облака массой $10^8 M_{\odot}$ от экстремально низкой металличности, $[X/H] < -2.3$, через стадии $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$, $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$ до высокой металличности, $[X/H] \geq -0.9$, где границы указанных диапазонов совпадают с локальными минимумами числа объектов. Показано, что для воспроизводства таких распределений достаточно, чтобы на каждой стадии обогащения части облака металлами образовывалось одно или несколько ШС суммарной массой $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

Если первоначальная масса наиболее массивных наблюдаемых в Галактике ШС была на порядок больше современной, то есть достигала $10^7 M_{\odot}$ (Kruijssen, 2015; Li et al., 2017; Gratton et al., 2019; Forbes, 2020), то необходимая масса их родительского окологалактического облака — около $3 \times 10^8 M_{\odot}$, иначе не будет удовлетворена наблюдаемая статистика распределения облаков и ШС по металличности.

Имеющиеся наблюдения распределения металличности ШС в галактиках Млечный Путь и М 31 (Beasley et al. (2019) и ссылки в этой работе) позволяют предположить, что в экстремально низкометаллических областях, $[X/H] < -2.3$, условия звездообразования были более благоприятны для

образования нескольких ШС, суммарная масса которых соответствовала массе одного ШС из более металлического диапазона.

Анализ особенности обогащения окологалактического облака кислородом показал, что максимальная масса звезд, способных взорваться как сверхновые, зависит от металличности. Продемонстрирован метод детализации такой зависимости. Для рассматриваемых в работе металличностей ШС возможны следующие значения максимальной массы предсверхновой: $12.5 M_{\odot}$, $15 M_{\odot}$, $25 M_{\odot}$, согласно расчетам нуклеосинтеза в сверхновой (Nomoto et al., 2006).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента и редакционную коллегию журнала «Астрофизический бюллетень».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организаций. Работа Ш.М.Е. выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. A. Acharova, B. K. Gibson, Y. N. Mishurov, and V. V. Kovtyukh, *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A107 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220944
2. I. A. Acharova and M. E. Sharina, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481** (2), 2074 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty2419
3. I. A. Acharova, M. E. Sharina, and E. A. Kazakov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (1), 800 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac141
4. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 481 (2009). DOI:10.1146/annurev.astro.46.060407.145222
5. A. T. Barnes, E. J. Watkins, S. E. Meidt, et al., *Astrophys. J.* **944** (2), id. L22 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/aca7b9
6. M. A. Beasley, R. Leaman, C. Gallart, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (2), 1986 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1349
7. F. Bigiel, A. Leroy, F. Walter, et al., *Astron. J.* **136** (6), 2846 (2008). DOI:10.1088/0004-6256/136/6/2846
8. T. M. Brown, J. Tumlinson, M. Geha, et al., *Astrophys. J.* **796** (2), article id. 91 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/796/2/91

9. E. Carretta, A. Bragaglia, R. G. Gratton, et al., *Astron. and Astrophys.* **516**, id. A55 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/200913451
10. T. Chattopadhyay, M. Sharina, E. Davoust, et al., *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 91 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/750/2/91
11. G. Chiaki and J. H. Wise, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 3933 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2984
12. J. G. Cohen, N. Christlieb, I. Thompson, et al., *Astrophys. J.* **778** (1), article id. 56 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/778/1/56
13. B. Dias, B. Barbuy, I. Saviane, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, id. A9 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201526765
14. D. A. Forbes, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (1), 847 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa245
15. C. L. Fryer and V. Kalogera, *Astrophys. J.* **554** (1), 548 (2001). DOI:10.1086/321359
16. C. L. Fryer, S. E. Woosley, and D. H. Hartmann, *Astrophys. J.* **526** (1), 152 (1999). DOI:10.1086/307992
17. S. W. Fu, D. R. Weisz, E. Starkeburg, et al., *Astrophys. J.* **958** (2), id. 167 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/ad0030
18. R. Gratton, A. Bragaglia, E. Carretta, et al., *Astron. and Astrophys.* **27** (1), article id. 8 (2019). DOI:10.1007/s00159-019-0119-3
19. W. E. Harris, arXiv e-prints astro/ph:1012.3224 (2010). DOI:10.48550/arXiv.1012.3224
20. A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley, et al., *Astrophys. J.* **591** (1), 288 (2003). DOI:10.1086/375341
21. M. G. Jones, D. J. Sand, P. Bennet, et al., arXiv e-prints astro/ph:2508.00984 (2025). DOI:10.48550/arXiv.2508.00984
22. R. C. Kennicutt and N. J. Evans, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012). DOI:10.1146/annurev-astro-081811-125610
23. M. G. H. Krause, C. Charbonnel, N. Bastian, and R. Diehl, *Astron. and Astrophys.* **587**, id. A53 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201526685
24. J. M. D. Kruijssen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454** (2), 1658 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv2026
25. J. M. D. Kruijssen, J. L. Pfeffer, M. Reina-Campos, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (3), 3180 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty1609
26. N. Lehner, C. B. Wotta, J. C. Howk, et al., *Astrophys. J.* **887** (1), article id. 5 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab41fd
27. H. Li, O. Y. Gnedin, N. Y. Gnedin, et al., *Astrophys. J.* **834** (1), article id. 69 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/834/1/69
28. D. Massari, H. H. Koppelman, and A. Helmi, *Astron. and Astrophys.* **630**, id. L4 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201936135
29. T. Nagakura, T. Hosokawa, and K. Omukai, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399** (4), 2183 (2009). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.15423.x
30. K. Nomoto, N. Tominaga, H. Umeda, et al., *Nuclear Physics A* **777**, 424 (2006). DOI:10.1016/j.nuclphysa.2006.05.008
31. E. H. Nuñez, E. N. Kirby, and C. C. Steidel, *Astrophys. J.* **927** (1), id. 64 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac470e
32. J. Pfeffer, J. M. D. Kruijssen, R. A. Crain, and N. Bastian, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **475** (4), 4309 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx3124
33. L. Portinari and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys.* **350**, 827 (1999). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9908326
34. B. J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin, *Astron. J.* **130** (5), 2140 (2005). DOI:10.1086/432911
35. I. U. Roederer and E. N. Kirby, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (3), 2665 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu491
36. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955). DOI:10.1086/145971
37. M. Schmidt, *Astrophys. J.* **129**, 243 (1959). DOI:10.1086/146614
38. K. L. Shapiro, R. Genzel, and N. M. Förster Schreiber, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403** (1), L36 (2010). DOI:10.1111/j.1745-3933.2010.00810.x
39. J. D. Simon, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **57**, 375 (2019). DOI:10.1146/annurev-astro-091918-104453
40. S. J. Smartt, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 63 (2009). DOI:10.1146/annurev-astro-082708-101737
41. R. J. Talbot, Jr. and W. D. Arnett, *Astrophys. J.* **197**, 551 (1975). DOI:10.1086/153543
42. T. Tsujimoto, K. Nomoto, Y. Yoshii, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **277** (3), 945 (1995). DOI:10.1093/mnras/277.3.945
43. Y. A. Shchekinov, E. O. Vasiliev, and B. M. Shustov, *Physics-Uspekhi*, **66** (11), 1071-1094 (2023). DOI:10.3367/UFNe.2022.12.039295
44. E. O. Vasiliev, Y. A. Shchekinov, and B. B. Nath, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468** (3), 2757 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx719
45. S. Wang, B. Chen, and J. Ma, *Astron. and Astrophys.* **645**, id. A115 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039531
46. E. J. Watkins, A. T. Barnes, K. Henny, et al., *Astrophys. J.* **944** (2), id. L24 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/aca6e4
47. A. J. Winter and C. J. Clarke, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **521** (2), 1646 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad312
48. J. H. Wise and T. Abel, *Astrophys. J.* **685** (1), 40 (2008). DOI:10.1086/590417
49. S. E. Woosley and A. Heger, *Astrophys. J.* **637** (2), 914 (2006). DOI:10.1086/498500
50. S. E. Woosley and T. A. Weaver, *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 181 (1995). DOI:10.1086/192237

Indicatives of Early Stages of Star Formation in the Universe**I. A. Acharova¹ and M. E. Sharina²**¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The paper analyzes formation conditions for globular clusters (GCs) in circumgalactic clouds. The similarity between the metallicity distributions of GCs in the nearby Universe and of circumgalactic clouds is substantiated in detail over a wide range of redshifts: from 0.2 to 5.9. The distributions of the number of circumgalactic clouds and GCs both contain a sequence of four local maxima at the metallicity values: $[X/H] \simeq -2.6, -2.0, -1.4, -0.5$. The sequential enrichment of a circumgalactic cloud with a mass of $10^8 M_{\odot}$ is calculated starting the extremely low metallicity $[X/H] < -2.3$, then following through the stages of $-2.3 \leq [X/H] < -1.7$ and $-1.7 \leq [X/H] < -0.9$ to the high metallicity $[X/H] \geq -0.9$, where the boundaries of these ranges coincide with the local minima of the number of objects in the distributions. It is shown that for the reproduction of such distributions, it is sufficient that at each stage of enrichment of a part of a cloud in metals, one or more GCs with a total mass of $3 \times 10^6 M_{\odot}$ are formed. It is shown that the maximum mass of stars capable of leading to supernova explosions increases with the increase of metallicity. Possible values of this mass are calculated for the metallicities corresponding to the maxima in the distributions of clouds and GCs.

Keywords: *Galaxy: halo; globular clusters: general; supernovae: general*