

УДК 524.7-323NGC4068:520.86

МЕТАЛЛИЧНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД ГАЛАКТИКИ NGC 4068

© 2024 Н. А. Тихонов^{1*}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 РоссияПоступила в редакцию 22 февраля 2023 года; после доработки 4 октября 2023 года;
принята к публикации 18 октября 2023 года

На основе архивных снимков космического телескопа им. Хаббла проведена звездная фотометрия галактики NGC 4068. На полученной диаграмме Герцшпрунга–Рессела (СМ-диаграмма) видны ветви молодых и старых звезд. Для оценки металличности молодых звезд использованы изохроны разного возраста и металличности. Совмещение изохрон и СМ-диаграммы звезд показывает, что молодые звезды NGC 4068 имеют высокую металличность, вплоть до металличности Солнца ($Z = 0.02$). Поскольку звезды высокой металличности наблюдаются по всему телу галактики, то можно говорить о высокой металличности всей галактики, а не одного локального объема. Показано положение NGC 4068 среди 105 иррегулярных галактик разной металличности на диаграмме зависимости между металличностями старых и молодых звезд. Почти линейная зависимость между этими параметрами указывает на отсутствие процессов быстрого обогащения галактик металлами на современном этапе их эволюции. Полученные результаты не подтверждают заключение о низкой металличности NGC 4068, сделанное Яровой и др. в работе об обнаружении в этой галактике массивной низкометаллической звезды с повышенным содержанием азота. Рассматривается вариант прямых измерений металличности NGC 4068: представлены координаты и области отождествления трех наиболее ярких сверхгигантов с большим показателем цвета ($V - I$), который указывает на их высокую металличность.

Ключевые слова: *методы: фотометрия — галактики: карликовые — галактики: отдельные: NGC 4068 — звезды: сверхгиганты — металличность*

1. ВВЕДЕНИЕ

В недавней публикации Yarovova et al. (2023) было объявлено об открытии массивной низкометаллической звезды с высоким содержанием азота в карликовой галактике NGC 4068, металличность которой авторы статьи оценили примерно в 0.1 металличности Солнца.

Галактика NGC 4068 неоднократно входила в наши списки исследуемых объектов (Tikhonov, 2018a; b), но не привлекала внимания каким-либо отклонением металличности от среднего значения (обычно $Z = 0.004$ – 0.008), характерного для иррегулярных галактик. Поэтому для выяснения причины оценки столь низкой металличности NGC 4068 мы более детально изучили звездный состав этой галактики.

Эволюционный путь звезды зависит от трех параметров: начальной массы, химического состава и присутствия близких соседей. Для близких и ярких звезд на основе спектральных наблюдений получены значения составляющих масс разных химических элементов (H, He, O, C, Fe, Ne, N,

и др.) Химический состав звезд представляется в виде соотношения: $X + Y + Z = 1$, где X, Y, Z указывают долю водорода, гелия и всех остальных элементов тяжелее гелия в массе звезды. В астрофизике принято называть металлами все элементы тяжелее гелия, хотя многие из них настоящими металлами не являются. Измерения показали, что Солнце содержит примерно 2% металлов, то есть $Z = 0.02$ (Anders and Grevesse, 1989; Grevesse and Sauval, 1998; Vagnozzi et al., 2017), хотя в некоторых измерениях (Asplund et al., 2006; 2009) получалась более низкая металличность: ($Z = 0.012$ и $Z = 0.013$). Эти измерения показывают, что металличность Солнца находится в интервале от $Z = 0.012$ до $Z = 0.02$, с большой вероятностью ближе к значению $Z = 0.02$.

Параметр Z используют также для обозначения среднего значения металличности звездных скоплений или даже целых галактик. В гигантских спиральных галактиках наблюдается значительный градиент металличности вдоль радиуса диска, поэтому возникает неопределенность при представлении значения металличности этих галактик. В иррегулярных галактиках градиент металличности вдоль радиуса галактики также существует,

*E-mail: ntik@sao.ru

Таблица 1. Параметры галактики NGC 4068

| RA (J2000) | Dec (J2000) | v_h , км с ⁻¹ | A_V , mag | I_{TRGB} , mag | $(m - M)$, mag | D , Мпк | [Fe/H] | B_T , mag | M_B , mag |
|--|--------------|----------------------------|-------------|-------------------------|-----------------|-----------|--------|-------------|-------------|
| 12 ^h 04 ^m 00 ^s .8 | +52° 35' 18" | 206 | 0.058 | 24.11 | 28.06 | 4.10 | -1.82 | 13.15 | -15.0 |

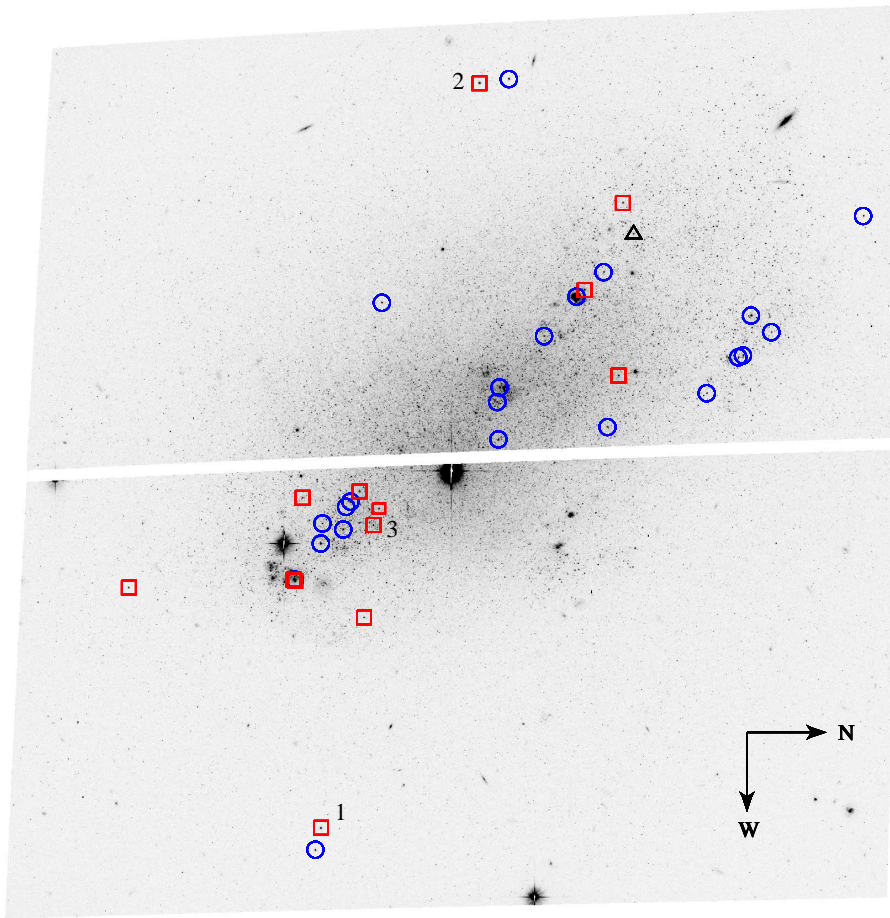


Рис. 1. Изображение галактики NGC 4068 в фильтре $F606W$ на ACS/WFC-снимке космического телескопа им. Хаббла. Размер снимка 3.5×3.5 . Север справа, восток вверх. Обозначения следующие: красные квадраты — красные сверхгиганты высокой металличности, синие кружки — голубые сверхгиганты, яркость которых превышает яркость сверхгиганта с эмиссионными линиями; черный треугольник — голубая звезда с эмиссионными линиями, которую изучали Yarovova et al. (2023). Можно отметить, что высокометаллические звезды не концентрируются в одной области, а распределены по всему телу галактики. Цифры 1, 2 и 3 маркируют звезды, которые обсуждаются далее (см. рис. 10 и раздел 4).

но он значительно меньше, чем в спиральных, поэтому обычно его не принимают во внимание. Измерения разных по массе спиральных и иррегулярных галактик показали, что существует корреляция между светимостью или массой галактики и ее металличностью. После первого сообщения о такой зависимости (Lequeux et al., 1979) появилось много аналогичных исследований. Очень важно отметить, что во всех публикациях на диаграммах зависимости между светимостью галактик и их металличностью наблюдается очень большое рассеяние точек. Частично это связано с неопределенностью в измерениях светимости или массы галактик, но основная причина состоит в различиях

истории звездообразования галактик, что приводит к различиям в насыщенности металлами газопылевой среды и в конечном счете к различиям в металличности звезд.

Галактика NGC 4068 по морфологии и физическим параметрам ничем не отличается от среднего представителя иррегулярных галактик. Ее характеристики даны в таблице 1. Расстояние, измеренное TRGB-методом, и CM-диаграмма ее звезд были представлены в статье Karachentsev et al. (2006). На CM-диаграмме, приведенной в этой статье, не показаны самые яркие звезды NGC 4068, но резко выделяется яркая голубая звезда с большим отрицательным показателем цвета, которая и была объ-

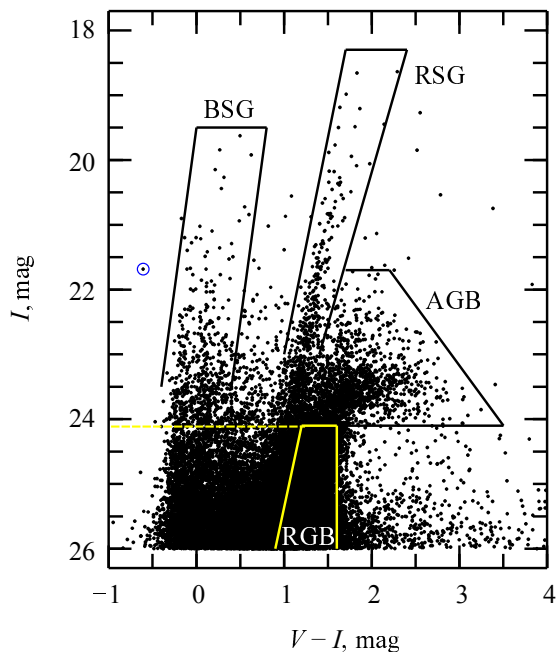


Рис. 2. CM-диаграмма звезд галактики NGC 4068. Выделены области со звездами разных типов: голубых (BSG) и красных сверхгигантов (RSG), AGB-звезд (AGB) и красных гигантов (RGB). Кружком отмечена звезда с большим отрицательным показателем цвета, которую изучили Yarovova et al. (2023).

ектом исследования у Yarovova et al. (2023). По нашим измерениям эта звезда имеет показатель цвета $(V - I) = -0^m61$ и блеск $I = 21^m68$. Такое значение показателя цвета может быть только у молодой звезды с сильными эмиссионными линиями, которые попадают в полосу фильтра $F606W$ (V) и уменьшают значение показателя цвета звезды $(V - I)$.

2. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Снимки из архива космического телескопа Хаббла были получены с камерой ACS/WFC в фильтрах $F814W$ и $F606W$ с экспозициями 900 с и 1200 с соответственно. Изображение галактики NGC 4068 с фильтром $F606W$ (V) представлено на рис. 1. Размер снимка равен $3'5 \times 3'5$.

Звездная фотометрия галактики выполнялась пакетом программ DOLPHOT 2.0 (Dolphin, 2016). Пакет DOLPHOT 2.0 использовался в соответствии с рекомендациями А. Долфина¹, а процедура фотометрии состояла из предварительного маскирования плохих пикселей, удаления следов космических частиц и дальнейшей PSF-фотометрии. Результаты фотометрии звезд прошли селекцию

¹<http://americano.dolphinssim.com/dolphot/dolphot.pdf>

по параметрам «CHI» и «SHARP», что позволило удалить из таблицы фотометрии все диффузные объекты и изображения тесно расположенных звезд в центральных областях NGC 4068. Фотометрический предел используемых снимков равен примерно $I = 27^m0$, а звездные величины ярких красных сверхгигантов и гигантов NGC 4068 равны $I = 19^m0$ и $I = 24^m1$, то есть они находятся далеко от фотометрического предела HST-снимков, и точность их фотометрии равна примерно 0^m02 .

Полученная при фотометрии звезд диаграмма Герцшпрунга–Рессела (CM-диаграмма) представлена на рис. 2. На диаграмме хорошо видны ветви голубых (BSG) и красных (RSG) сверхгигантов, а также ветвь старых звезд — красных гигантов (RGB) и область AGB-звезд (AGB). Вид распределения красных гигантов по всему полю снимка показывает, что размер звездного гало NGC 4068 значительно превосходит размер снимка HST (рис. 3а), но тонкий диск с молодыми звездами не выходит за пределы HST-снимка (рис. 3б).

3. ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ

Расстояние до NGC 4068 измерялось неоднократно с использованием TRGB-метода (Jacobs et al., 2009; Karachentsev et al., 2006, и другие публикации). Метод дает хорошие результаты при условии правильного выбора нужных звезд. Дело в том, что красные гиганты, необходимые для TRGB-метода, чаще всего выбирают по телу всей галактики, чтобы увеличить численность выборки. Но при таком подходе в выборку попадают звезды разной металличности, которые имеют различные значения TRGB-скачка. Кроме того, звезды, выбранные по всему телу галактики, могут иметь разные величины поглощения света газопылевыми облаками из-за их клочковатого распределения в галактике. Свой вклад в увеличение ошибки измерения положения TRGB-скачка вносят концентрирующиеся в центральных областях галактики AGB-звезды, которые по яркости превосходят красные гиганты, но имеют аналогичные показатели цвета (рис. 2). Чтобы уменьшить влияние всех указанных причин, мы провели выборку звезд на периферии NGC 4068, где находятся только звезды гало. Число красных гигантов при этом уменьшилось, но в выборке исчезли ненужные красные сверхгиганты и значительно сократилось число AGB-звезд.

Для объективного измерения положения TRGB-скачка мы использовали функцию Собеля (Madore and Freedman, 1995), максимумы которой соответствуют резким изменениям численности звезд, что наблюдается на границе ветви красных гигантов и определяется как TRGB-скачок (рис. 4).

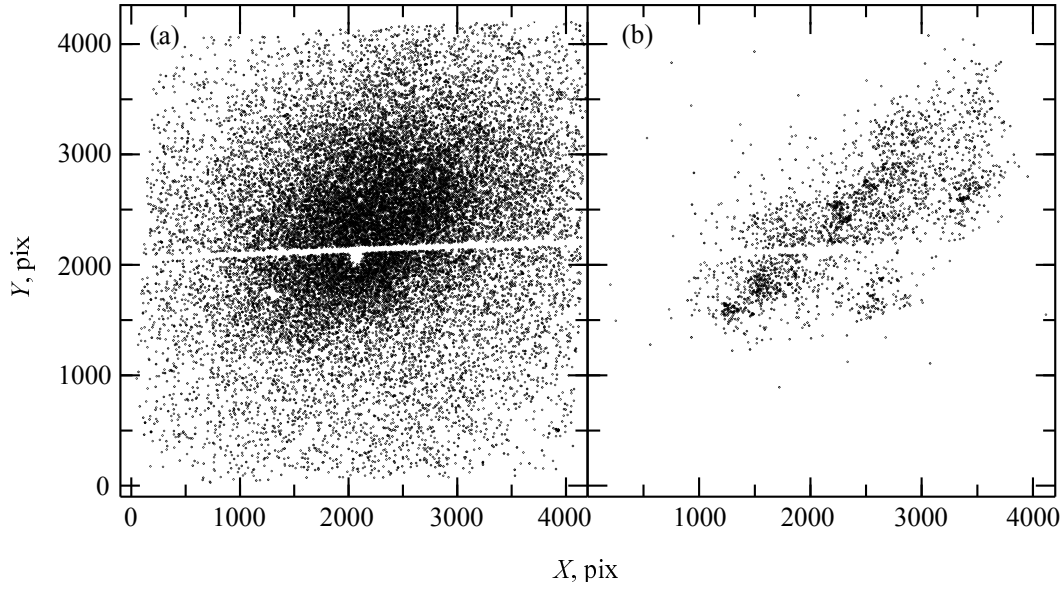


Рис. 3. Вид распределения по полю HST-снимка старых звезд — красных гигантов (a) и молодых звезд — голубых гигантов и сверхгигантов (b). Видно, что гало галактики из красных гигантов простирается за пределы HST-снимка.

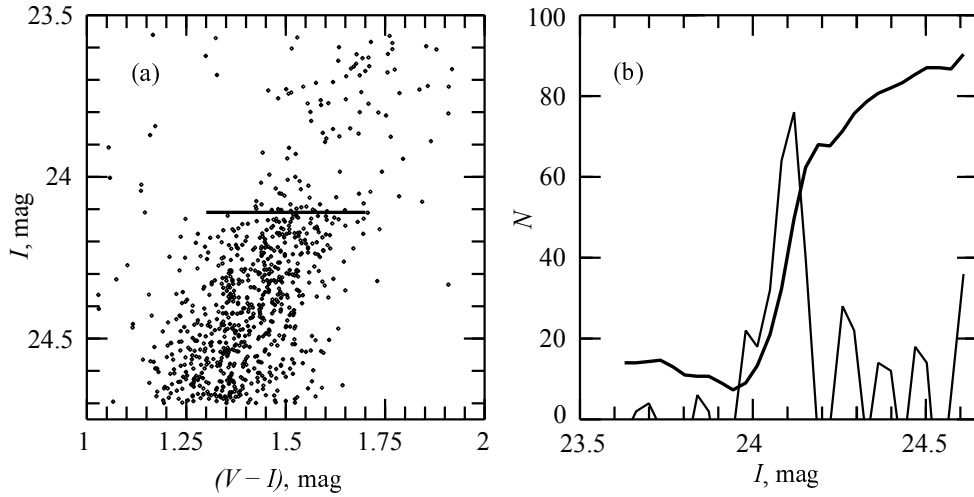


Рис. 4. CM-диаграмма звезд гало NGC 4068 и функция светимости этих звезд с TRGB-скачком при $I = 24^{\text{m}}1$. Горизонтальной линией отмечено положение TRGB-скачка на CM-диаграмме.

Для определения расстояния мы измерили положение TRGB-скачка ($I_{\text{TRGB}} = 24^{\text{m}}11$), показатель цвета вершины ветви красных гигантов $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}51$ и показатель цвета ветви гигантов $(V - I)_{-3.5} = 1^{\text{m}}33$ на уровне $M_I = -3^{\text{m}}5$. Величина поглощения света в направлении на галактику принималась из работы Schlafly and Finkbeiner (2011): $A_B = 0^{\text{m}}078$, $A_V = 0^{\text{m}}058$, $A_I = 0^{\text{m}}032$.

Используя уравнения из работы Lee et al. (1993), мы определили расстояние $D = 4.10 \pm 0.25$ Мпк, модуль расстояния $(m - M) = 28^{\text{m}}06$ и металличность красных гигантов гало $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.82$. Следует отметить, что эта низкая оценка металличности звезд относится только к старым красным гигантам гало и не может

служить показателем низкой металличности всей галактики.

Полученное значение расстояния до NGC 4068 ($D = 4.1$ Мпк) в пределах ошибок измерений соответствует имеющимся в NED результатам других авторов ($D = 4.3$ Мпк), однако очевидно, что меньшее значение расстояния нашего измерения является результатом выбора звезд на периферии галактики, где поглощение света самой галактикой NGC 4068 практически отсутствует.

Итоговые результаты приведены в таблице 1, где: RA и Dec — прямое восхождение и склонение галактики, v_h — лучевая скорость, A_V — величина экстинкции в фильтре V, I_{TRGB} — положение TRGB-скачка на функции светимости в фильтре I, $(m - M)$ — модуль расстояния до галактики, D —

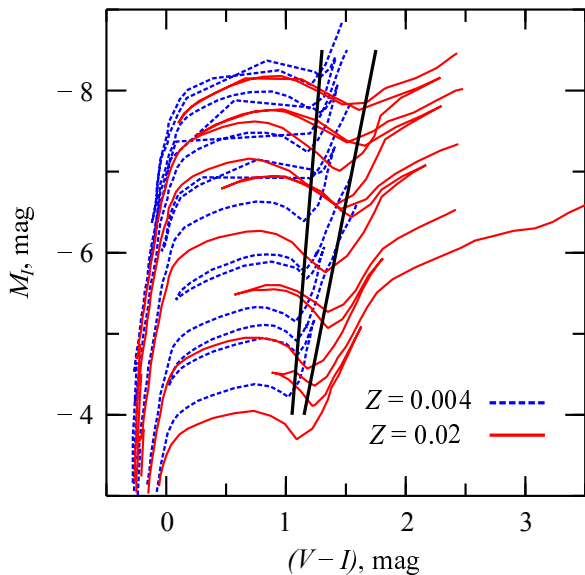


Рис. 5. Изохроны Bertelli et al. (1994) для звезд возраста от 10 до 100 млн лет (сверху вниз) с металличностью $Z = 0.004$ и $Z = 0.02$. Две наклонные линии указывают положения ветвей красных сверхгигантов. При изменении металличности звезд ветви красных сверхгигантов изменяют свое положение и наклон.

расстояние до галактики в мегапарсеках, $[Fe/H]$ — металличность красных гигантов гало, B_T — видимая звездная величина, M_B — абсолютная звездная величина галактики в фильтре B .

4. МЕТАЛЛИЧНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД NGC 4068

Построенная СМ-диаграмма NGC 4068 позволяет определить металличность некоторых типов звезд путем вписывания в диаграмму теоретических изохрон. Например, ветвь красных сверхгигантов изменяет свое положение на СМ-диаграмме при увеличении металличности звезд. Особенно большие изменения видны на участке звезд наивысшей светимости. Указанная зависимость позволяет применять теоретические изохроны для оценки металличности этих молодых звезд. При увеличении металличности звезд наблюдаются возрастание показателя цвета и увеличение наклона ветви красных сверхгигантов на СМ-диаграмме. На рис. 5 показаны изохроны звезд с металличностью $Z = 0.004$ и $Z = 0.02$, дающие наглядное представление об этом эффекте.

Для сравнения наблюдений с теоретическими работами можно использовать изохроны из базы данных PARSEC (Bressan et al., 2012) либо изохроны Bertelli et al. (1994). Первые более детально представляют эволюционные изменения звезд, а вторые более удобны для практического применения. Каких-либо принципиальных различий между

ними нет, поэтому в дальнейшем мы будем использовать изохроны Bertelli et al. (1994). Результаты сравнения изохрон и полученной СМ-диаграммы представлены на рис. 6.

В работе Bertelli et al. (1994) нас интересуют изохроны с металличностью $Z = 0.004$, 0.008 и 0.02 . Из статьи Yagovova et al. (2023) следует, что металличность NGC 4068 в 10 раз ниже металличности Солнца и должна быть равна примерно $Z = 0.002$. Однако изохроны такой металличности не имеет смысла использовать, поскольку результат виден даже по изохронам более высокой металличности. На рис. 6а представлена СМ-диаграмма звезд NGC 4068 и система изохрон возраста от 8 до 40 млн лет с металличностью $Z = 0.004$ (в пять раз ниже металличности Солнца). Видно, что эти изохроны совершенно не описывают ветвь красных сверхгигантов NGC 4068. На рис. 6б в СМ-диаграмму вписаны изохроны $Z = 0.008$ (в 2.5 раза меньше металличности Солнца). Кажется, что изохроны хорошо вписываются в ветвь красных сверхгигантов, но самые молодые и яркие сверхгиганты расположены за пределами изохрон. Однако именно у звезд самой высокой светимости, но разной металличности, наблюдаются различия в показателях цвета ($V - I$). Поэтому тот факт, что красные сверхгиганты высокой светимости находятся за пределами изохрон $Z = 0.008$, указывает на еще более высокую металличность этих звезд. И наконец, на рис. 6с показаны изохроны с металличностью Солнца ($Z = 0.02$). На диаграмме видно, что на эти изохроны попадают все красные сверхгиганты высокой светимости.

Представленные на рис. 6 диаграммы и изохроны показывают, что молодые звезды NGC 4068 с возрастом до 40 млн лет имеют металличность, почти равную металличности Солнца, поэтому вывод авторов статьи (Yagovova et al., 2023) о низкой металличности галактики является ошибочным. Металличность NGC 4068 равна не 0.1 металличности Солнца, а почти равна солнечной. Конечно, очень старые красные гиганты гало этой галактики имеют низкую металличность, но речь идет о современном значении металличности звезд NGC 4068, которая определяется по молодым звездам.

Рассмотрим возможность локального понижения металличности звезд именно в месте расположения изучаемой голубой звезды. На рис. 7 представлена СМ-диаграмма всей галактики и СМ-диаграмма звезд в небольшом поле радиусом $R = 20''$ вокруг голубой звезды. Естественно, из-за малых размеров поля на СМ-диаграмме отсутствуют очень яркие красные сверхгиганты, но даже по имеющимся сверхгигантам можно уверенно определить положение ветви этих звезд. Две одинаковые наклонные линии на двух диаграммах точно соответствуют положениям ветвей красных

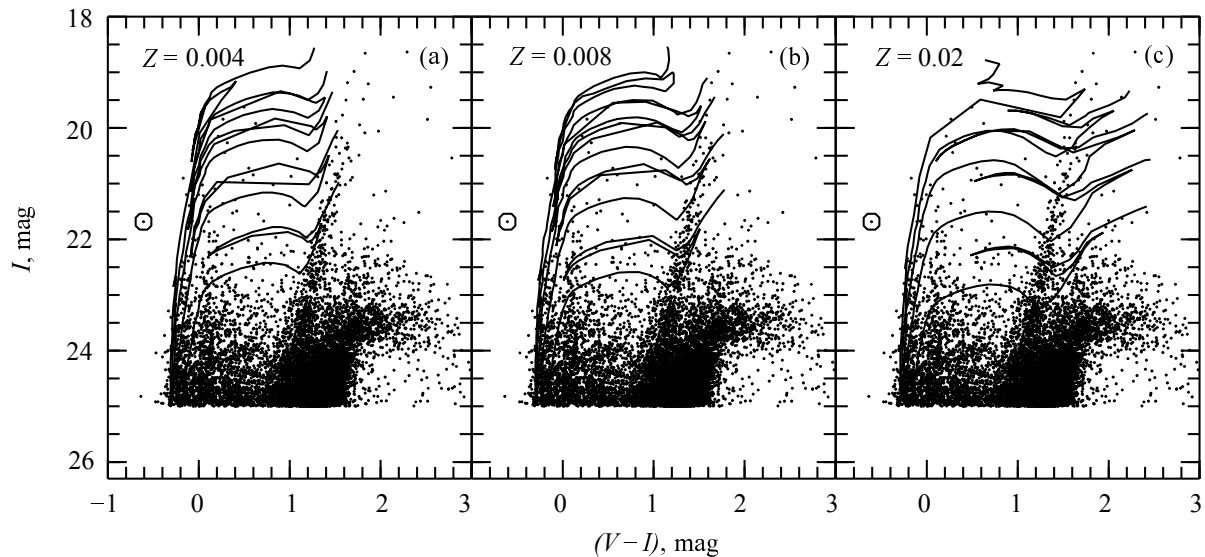


Рис. 6. CM-диаграммы всех звезд NGC 4068 и вписанные изохроны Bertelli et al. (1994) возраста от 8 до 40 млн лет и с металличностью $Z = 0.004$, 0.008 и 0.02 . Изохроны с металличностью $Z = 0.004$ и 0.008 не описывают положения ярчайших красных сверхгигантов при $(V - I) > 1.7$ и при $I < 20$, поскольку эти звезды имеют более высокую металличность. Только у изохрон с металличностью Солнца ($Z = 0.02$) видно хорошее совпадение с положением этих звезд.

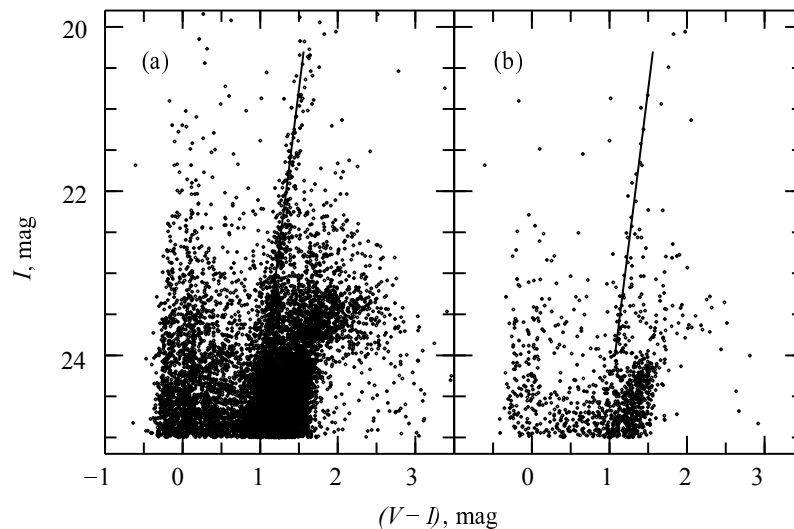


Рис. 7. CM-диаграммы для звезд галактики NGC 4068 и для участка поля радиусом $R = 20''$ (400 пк) вокруг голубой звезды. Наклонные линии показывают положения ветвей красных сверхгигантов. Отсутствие каких-либо различий в положениях ветвей красных сверхгигантов на двух CM-диаграммах указывает на равенство металличностей звезд обеих CM-диаграмм.

сверхгигантов. Это значит, что звезды малого поля ($R = 20''$) имеют ту же самую металличность, что и звезды всей галактики. В противном случае наблюдалось бы различие в положениях ветвей красных сверхгигантов, как это видно на рис. 5. Идентичность положений ветвей красных сверхгигантов доказывает, что в NGC 4068 отсутствует какое-либо локальное понижение металличности звезд в месте расположения голубой звезды.

Большое различие в металличностях галактики NGC 4068 и ее яркой звезды можно было бы объяснить быстрым повышением металличности

галактики на современном этапе эволюции, в то время как в теле галактики осталась какая-то область с малым значением металличности, в которой и образовалась голубая звезда. Возможен ли такой процесс?

Сравним галактику NGC 4068 с другими иррегулярными галактиками по скорости обогащения межзвездной среды галактик за время их эволюции. Для этого достаточно сопоставить металличность молодых и старых звезд этих галактик. Допустим, что среди галактик выборки будут найдены галактики с высокой металличностью молодых звезд при низкой металличности старых, что

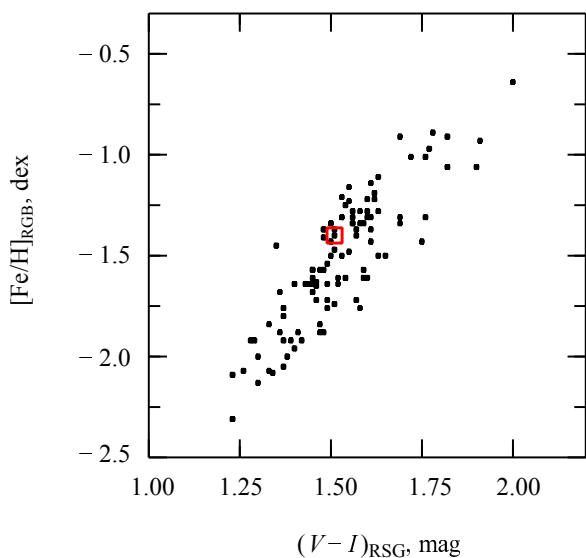


Рис. 8. Диаграмма зависимости между металличностями красных сверхгигантов и красных гигантов для 105 иррегулярных галактик. Квадратом отмечено положение галактики NGC 4068. Видно хорошее соответствие между металличностями старых и молодых звезд, то есть основной процесс насыщения галактик металлами происходил несколько миллиардов лет назад.

доказало бы возможность быстрого и сравнительно недавнего увеличения металличности галактик. Работа по измерению металличности звезд разного возраста была выполнена нами ранее (Тихонов, 2018а), поэтому здесь мы воспользовались ее результатами.

На рис. 8 для 105 иррегулярных галактик показана зависимость между металличностями старых и молодых звезд, красных гигантов и сверхгигантов. В качестве параметра металличности сверхгигантов использовался их показатель цвета $(V - I)$, который увеличивается при повышении металличности звезд. На рис. 8 видно, что галактики с низкой металличностью старых звезд имеют низкую металличность и молодых звезд, а высокая металличность старых звезд соответствует высокой металличности молодых. Следует заметить, что, во-первых, в галактиках металличность молодых звезд всегда выше металличности старых звезд, то есть наблюдается повышение металличности межзвездной среды за время эволюции галактик. Во-вторых, слова «высокая металличность старых звезд» не означают, что их металличность имеет такое же значение, как и у высокометаллических молодых звезд. Сравнение металличности относится только к определенному типу звезд — гигантам или сверхгигантам.

Почти линейную зависимость на рис. 8 можно объяснить тем, что основное насыщение межзвездной среды галактик металлами происходило миллиарды лет назад. Каждая галактика получила в тот

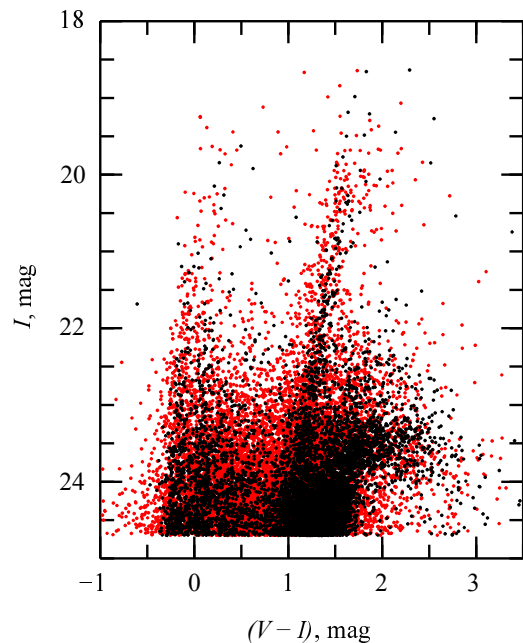


Рис. 9. CM-диаграмма звезд части галактики NGC 1569 (красные точки) и звезд NGC 4068 (черные точки). При более высокой светимости и интенсивности процессов звездообразования NGC 1569 обладает меньшей металличностью звезд, чем более слабая галактика NGC 4068, что видно по положению ветви красных сверхгигантов NGC 1569 слева от ветви NGC 4068.

период свое значение металличности, в зависимости от первичной интенсивности процессов звездообразования, которые, в свою очередь, зависели от многих условий. В ходе дальнейшей эволюции галактики повышали свою металличность, но с меньшей скоростью. В противном случае не возникла бы так хорошо видимая на рис. 8 зависимость между металличностями молодых и старых звезд. Если бы у некоторых галактик произошло резкое увеличение металличности в недавнем прошлом, то на диаграмме рис. 8 появились бы отклонения этих галактик от общей зависимости.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что на современном этапе эволюции галактик нельзя ожидать появления молодых высокометаллических звезд в галактиках с низкой металличностью, поскольку отсутствуют условия для очень бурного звездообразования, которые существовали при рождении галактик. В первую очередь это относится к наличию в галактиках действительно больших масс водорода. Вероятно, что наблюдаемые в настоящее время в галактиках вспышки звездообразования являются только бледным подобием тех бурных процессов звездообразования, которые происходили при рождении галактик. Для примера можно привести галактику NGC 1569, где красные сверхгиганты имеют меньшую металличность, чем сверхгиганты NGC 4068. На рис. 9 красными точками показана CM-диаграмма NGC 1569,

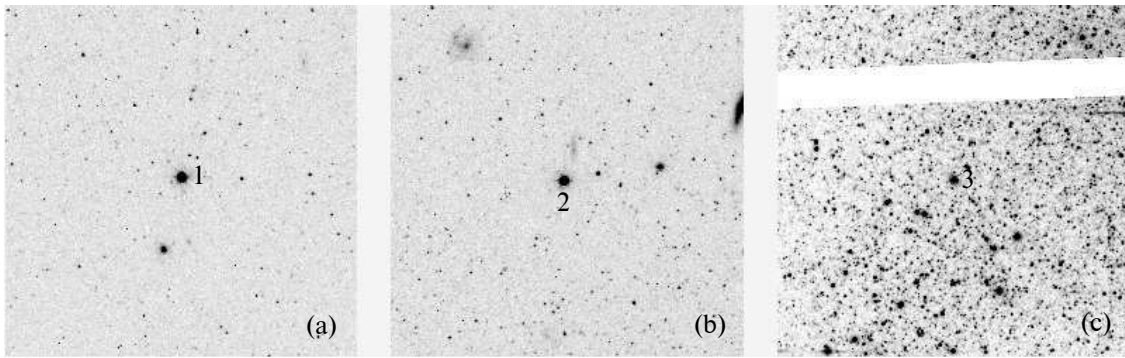


Рис. 10. На панелях (a), (b) и (c) представлены области ($20'' \times 20''$) вокруг трех (см. рис. 1) красных сверхгигантов с большим показателем цвета, что указывает на высокую металличность этих звезд.

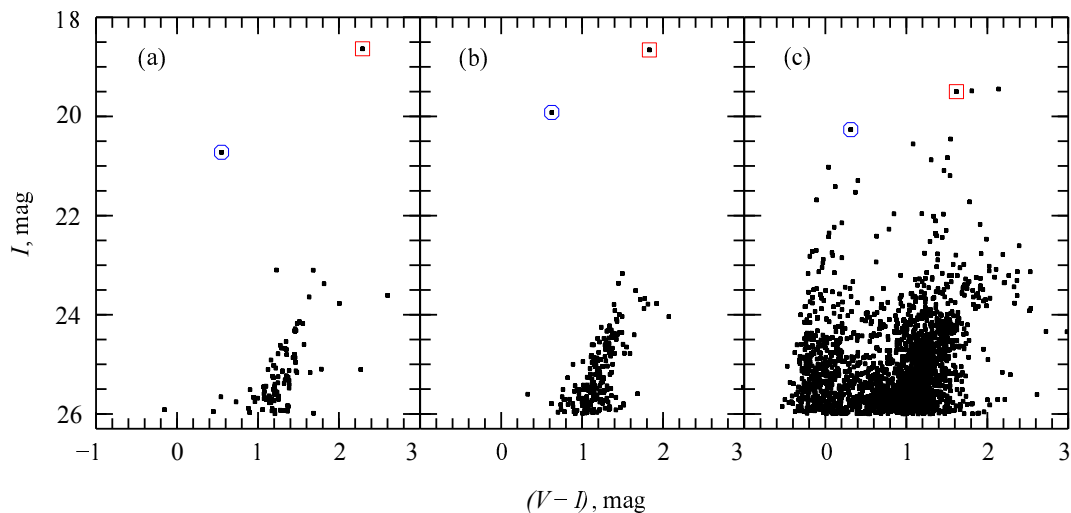


Рис. 11. CM-диаграммы звезд трех областей, изображения которых представлены на рис. 10. Можно отметить, что вблизи каждого красного сверхгиганта находится голубой сверхгигант. Сверхгиганты областей N1 и N2 удалены от областей звездообразования, а вокруг сверхгигантов области N3 расположена обширная область звездообразования.

а черными — NGC 4068. Совмещение двух диаграмм проводилось по значению TRGB-скачка (вертикальная ось) и положению ветвей голубых сверхгигантов (горизонтальная ось). На совмещенной диаграмме (рис. 9) видно, что положения ветвей красных сверхгигантов не совпадают, то есть галактики имеют разные значения металличности молодых звезд. Более яркая ($M_B = -17^m7$) галактика NGC 1569 с очень интенсивными процессами звездообразования обладает меньшей металличностью, чем более слабая ($M_B = -15^m0$) NGC 4068. Такая инверсия светимости и металличности подтверждает предположение о том, что основной уровень металличности иррегулярные галактики получили в далеком прошлом, когда условия для звездообразования были совершенно иными для каждой галактики. Кроме того, диаграмма (рис. 9) указывает на возможность появления большой ошибки при использовании зависимости «светимость — металличность» при измерении металличности по светимости галактики, как было сделано в работе Yarova et al. (2023).

На CM-диаграмме (рис. 6) выделяются несколько ярких звезд с показателем цвета примерно $(V - I) \sim 2$. Можно прямым методом решить вопрос о металличности галактики NGC 4068, если получить спектры нескольких таких звезд. Чтобы свести к минимуму аппаратные ошибки, следует использовать для наблюдений на 6-м телескопе БТА САО РАН ту же аппаратуру, которую использовали Yarova et al. (2023) при наблюдениях эмиссионного объекта. Координаты наиболее представительных красных сверхгигантов на эпоху J2000.0 следующие:

- 1) $12^h 03^m 51^s78 + 52^\circ 34' 46''8$,
- 2) $12^h 04^m 10^s70 + 52^\circ 35' 24''7$,
- 3) $12^h 03^m 59^s90 + 52^\circ 35' 00''8$.

Первые две звезды расположены на окраине галактики, а третья входит в состав области звездообразования с голубыми и красными сверхгигантами. Для удобства отождествления на рис. 10 представлены области этих звезд на основе

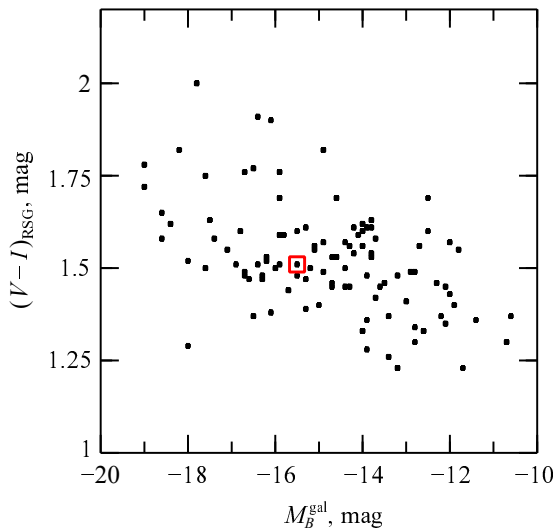


Рис. 12. Зависимость между светимостью галактики и показателем цвета ее молодых звезд — красных сверхгигантов, что можно принять как эквивалент металличности. Квадратом отмечено положение галактики NGC 4068. Следует отметить большое рассеяние точек в представленной зависимости, которое делает практически невозможным измерение металличности галактики на основе ее светимости.

HST-снимка в фильтре $F814W$, а на рис. 11 показаны CM-диаграммы звезд этих областей. Можно отметить, что в близком соседстве к красным сверхгигантам в областях N1 и N2 находятся голубые сверхгиганты, при отсутствии ветви голубых звезд более низкой светимости.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе снимков с космического телескопа им. Хаббла получена CM-диаграмма звезд иррегулярной галактики NGC 4068, на которой видны молодые звезды — голубые и красные сверхгиганты, а также старое звездное население — красные гиганты. Для звезд гало найдены положение верхней границы ветви красных гигантов и показатель цвета ветви гигантов, что позволило нам определить расстояние до NGC 4068 и металличность звезд периферии. Сравнение теоретических изохрон Bertelli et al. (1994) с CM-диаграммой звезд NGC 4068 показало, что красные сверхгиганты имеют высокую металличность, сравнимую с металличностью Солнца. Возраст сверхгигантов составляет несколько десятков миллионов лет, и распределены они по всему телу галактики. Это означает, что межзвездные газопылевые облака галактики уже были насыщены металлами десятки миллионов лет назад. Полученные результаты противоречат возможности появления малометаллической звезды в NGC 4068, о чем сообщается в работе Yarovova et al. (2023).

При обсуждении зависимости металличности звезд от светимости галактики уже говорилось о большом рассеянии точек на этой зависимости. Аналогичное рассеяние наблюдается на нашей диаграмме (рис. 12), где показана зависимость между светимостью галактики и показателем цвета $(V - I)$ ветви красных сверхгигантов. Показатель цвета увеличивается с ростом металличности звезд, поэтому его можно принимать за эквивалент металличности. Точность определения показателя цвета красных сверхгигантов не хуже $0^m.03$, поэтому рассеяние точек на диаграмме обусловлено не плохой точностью в измерениях светимости галактик или показателя цвета звезд, а реальными различиями металличности галактик. Зависимость между величинами на рис. 12 можно представить в виде линейного уравнения. Однако если мы будем использовать это уравнение без учета рассеяния исходных данных, то результат может оказаться очень далек от реального. Yarovova et al. (2023) оценивали металличность галактики NGC 4068 по ее светимости, но не учли большой разброс результатов для отдельных галактик, поэтому полученная ими и наша оценка металличности NGC 4068 существенно различаются.

Заметим, что обычно за металличность всей галактики принимают металличность ее H II-областей из-за легкости их наблюдений. Вероятно, в большинстве случаев это действительно так. Однако следует принимать во внимание возможность падения на галактику межгалактических облаков газа, в результате которого может понизиться металличность межзвездной среды в отдельной области, хотя металличность всей галактики может быть высокой. И такие случаи требуют отдельного рассмотрения. Мы полагаем, что при отсутствии спектральных измерений многих звезд определение металличности галактики по положению ее молодых звезд на CM-диаграмме является наиболее верным решением, при условии использования для измерения не одной звезды, а всей ветви красных сверхгигантов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа основана на наблюдениях с космического телескопа им. Хаббла NASA/ESA, полученных в Научном институте космического телескопа, который управляется AURA, Inc. по контракту № NAS5-26555. Эти наблюдения связаны с заявкой ID 9771. В настоящей работе были использованы базы данных NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>), HyperLeda (<https://leda.univ-lyon1.fr/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа по изучению карликовых галактик выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Anders and N. Grevesse, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53** (1), 197 (1989). DOI:10.1016/0016-7037(89)90286-X
2. M. Asplund, N. Grevesse, and A. Jacques Sauval, *Nuclear Physics A* **777**, 1 (2006). DOI:10.1016/j.nuclphysa.2005.06.010
3. 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
4. G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **106**, 275 (1994).
5. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (1), 127 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x
6. A. Dolphin, DOLPHOT: Stellar photometry, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1608.013 (2016).
7. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Space Science Reviews* **85**, 161 (1998). DOI:10.1023/A:1005161325181
8. B. A. Jacobs, L. Rizzi, R. B. Tully, et al., *Astron. J.* **138** (2), 332 (2009). DOI:10.1088/0004-6256/138/2/332
9. I. D. Karachentsev, A. Dolphin, R. B. Tully, et al., *Astron. J.* **131** (3), 1361 (2006). DOI:10.1086/500013
10. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993). DOI:10.1086/173334
11. J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, et al., *Astron. and Astrophys.* **80**, 155 (1979).
12. B. F. Madore and W. L. Freedman, *Astron. J.* **109**, 1645 (1995). DOI:10.1086/117391
13. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 103 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/103
14. N. A. Tikhonov, *Astrophysical Bulletin* **73** (1), 22 (2018a). DOI:10.1134/S1990341318010029
15. N. A. Tikhonov, *Astronomy Reports* **62** (10), 637 (2018b). DOI:10.1134/S1063772918100086
16. S. Vagnozzi, K. Freese, and T. H. Zurbuchen, *Astrophys. J.* **839** (1), article id. 55 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa6931
17. A. D. Yarovova, O. V. Egorov, A. V. Moiseev, and O. V. Maryeva, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **518** (2), 2256 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac2949

Metallicity of Young Stars of the NGC 4068 Galaxy

N. Tikhonov¹

¹Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Based on archival images from the Hubble Space Telescope, stellar photometry of the galaxy NGC 4068 was carried out. The resulting Hertzsprung–Russell diagram (CM diagram) shows branches of young and old stars. To estimate the metallicity of young stars, isochrones of different ages and metallicities were used. A combination of isochrones and the CM diagram of stars shows that the young stars of NGC 4068 have high metallicity, up to the metallicity of the Sun ($Z = 0.02$). Since stars of high metallicity are observed throughout the body of the galaxy, we can talk about high metallicity of the entire galaxy, and not just one local region. The position of NGC 4068 among 105 irregular galaxies of different metallicities is shown on a diagram of the dependence between the metallicities of old and young stars. The almost linear dependence between these parameters indicates the absence of processes of rapid enrichment of galaxies with metals at the present stage of their evolution. The obtained results do not confirm the conclusion about the low metallicity of NGC 4068 reported by Yarovova et al. in the paper on their unveiling a nitrogen-rich massive low-metallicity star in this galaxy. For direct measurements of the metallicity of NGC 4068, the coordinates and fields of identification of the three brightest supergiants with a high color index ($V - I$), which indicates their high metallicity, are presented.

Keywords: *techniques: photometric—galaxies: dwarf—galaxies: individual: NGC 4068—stars: supergiants—metallicity*