

УДК 524.7-36:524.352

## МАССИВНЫЕ СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ И ГРАНИЦА МЕТАЛЛИЧНОСТИ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК

© 2026 Н. А. Тихонов<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия  
Поступила в редакцию 9 октября 2025 года; после доработки 30 декабря 2025 года; принята к публикации 22 января 2026 года

Повышение металличности межзвездной среды галактик происходит при участии многих физических процессов. Эти процессы различаются по массе и химическому составу вещества, поставляемого в межзвездное пространство. Массивные сверхновые звезды имеют массы от 8 до  $100 M_{\odot}$  и при взрыве выбрасывают в окружающее пространство максимальное количество тяжелых элементов. Последствия таких вспышек легче всего обнаружить в галактиках самых малых масс. На основе зависимости между светимостью галактик и их ярчайших звезд, а также теоретических моделей массивных сверхновых и изохрон звезд с массой  $8.3\text{--}8.7 M_{\odot}$ , мы определили, что в галактиках со светимостью ниже  $M_B = -12^m5$  должны отсутствовать звезды с массой более  $8 M_{\odot}$ . Это означает, что в таких галактиках не могут появиться массивные сверхновые звезды и галактики лишены основного источника обогащения металлами. Такое ограничение должно наблюдаться как падение металличности галактик при  $M_B = -12^m5$ . По данным из литературных источников была построена диаграмма «светимость — металличность», на которой действительно виден скачок металличности при значении светимости  $M_B = -12^m5$ . В галактиках еще меньшей светимости массивные сверхновые звезды никогда не вспыхивали и повышение металличности межзвездной среды происходило за счет звездного ветра и тепловых пульсаций AGB (TP-AGB)-звезд.

Ключевые слова: галактики: фотометрия — галактики: карликовые — галактики: металличность — звезды: сверхновые

### ВВЕДЕНИЕ

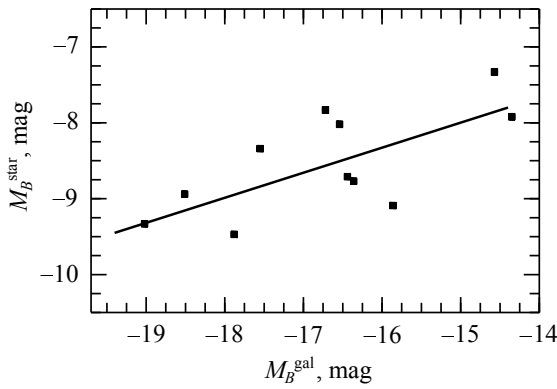
Каждая галактика уникальна и единственна, но всего несколько основных параметров — морфология, масса, состав звездного населения и химический состав межзвездной среды — позволяют рассортировать все галактики по группам. Для более детального изучения галактик эти группы также можно разбить на более мелкие подгруппы, используя для этого какие-либо свойства галактик. Полученное разделение не является абсолютным, поскольку параметры могут быть зависимы между собой, хотя определяют разные свойства галактик. Например, существует корреляция между морфологией галактики и ее массой, а также между морфологией и звездным составом. Выявление имеющихся связей и зависимостей между физическими параметрами галактик позволяет более точно описать их рождение и эволюцию.

В 1936 году Эдвин Хаббл определил светимости ярчайших звезд близких галактик, что в дальнейшем послужило основой метода ярчайших звезд для определения расстояний до галактик. Но реально этот метод стал активно ис-

пользоваться только после работы Sandage and Tammann (1974), в которой были представлены результаты фотографической фотометрии ярких звезд в нескольких галактиках Местной группы и группы M 81. Расстояния до галактик были измерены на основе различных методов, в том числе по цефеидам, что позволило вычислить абсолютные звездные величины ярчайших звезд этих галактик. Кроме того, Sandage and Tammann (1974) нашли, что существует зависимость между светимостью галактик и их ярчайших звезд (рис. 1). Этот эффект был известен и Э. Хабблу, но его величина была очень неопределенной из-за больших ошибок, которые получил Хаббл при определении расстояний до галактик.

По архивным снимкам космического телескопа им. Хаббла (HST) мы выполнили звездную фотометрию 180 галактик разной светимости, морфологии и металличности и TRGB-методом измерили расстояния до них (Tikhonov et al., 2021, 2024). Полученные результаты мы использовали для определения зависимости между светимостью галактик и их ярчайших голубых звезд (рис. 2). В указанных работах мы представили доказательства того, что данная зависимость между светимостью галактик и

\*E-mail: ntik@sao.ru



**Рис. 1.** Диаграмма зависимости между светимостью галактик и светимостью ярчайших звезд для галактик Местной группы и группы М 81 из работы Sandage and Tammann (1974).

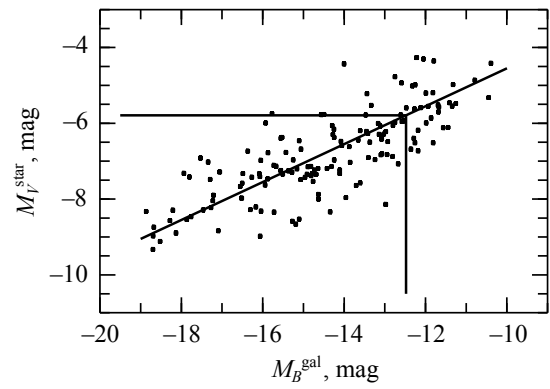
звезд возникает не из-за эффекта статистики, как это полагали Sandage and Tammann (1974), а отражает физическую закономерность. Это означает, что звездный состав суммы многих карликовых иррегулярных галактик не будет соответствовать звездному составу большой спиральной галактики, чья масса или светимость будет равна массе всех иррегулярных галактик, так как яркие массивные звезды, видимые в больших галактиках, не рождаются в карликовых галактиках. При изучении звездообразования в нашей Галактике Larson (1982) выявил зависимость между массой молекулярного водородного облака и максимальной массой звезды, рождающейся в этом облаке. Для карликовых галактик Hunter et al. (2019, 2021) установили связь между массой галактики и массой ее водородных облаков. В совокупности эти результаты позволяют объяснить наблюдаемую зависимость между светимостью галактик и светимостью их ярчайших звезд.

На диаграмме (рис. 2) видна концентрация галактик вблизи средней линии этой зависимости. Уравнения этой линии:

$$M_V^{\text{star}} = 0.50(\pm 0.03) M_B^{\text{gal}} + 0.45(\pm 0.41) \quad (1),$$

$$M_B^{\text{gal}} = 2.00(\pm 0.06) M_V^{\text{star}} - 0.90(\pm 0.65) \quad (2).$$

Вероятно, что зависимость между светимостями звезд и галактик более точно описывается параболой, однако в пределах ошибок измерений допустимо использовать простую линейную аппроксимацию. На рис. 2 видны галактики, положение которых отклоняется от средней линии. Величина некоторых отклонений значительно превосходит возможные погрешности измерения светимости галактик и звезд. Причину таких отклонений подробно объяснил Larson (1982), хотя в этом исследовании рассматривались не галактики, а облака молекулярного водорода и звезды нашей Галактики.



**Рис. 2.** Диаграмма зависимости между светимостью галактик (фильтр  $B$ ) и средней светимостью их ярчайших трех голубых звезд (фильтр  $V$ ), полученная по фотометрии звезд в 150 галактиках (Tikhonov et al., 2021). Горизонтальный отрезок прямой линии показывает минимальное значение светимости ярчайших голубых звезд перед их вспышкой как сверхновых (рис. 3), а вертикальный отрезок — светимость галактики ( $M_B = -12^m 5$ ), которая соответствует таким звездам.

В его работе показано, что наиболее массивные звезды возникают не в диффузных облаках (даже если они обладают значительной массой), а в компактных с высокой концентрацией молекулярного водорода. Дополнительную информацию для интерпретации диаграммы на рис. 2 дают работы Hunter et al. (2019, 2021), в которых продемонстрировано, что карликовые галактики различаются по числу водородных облаков. Поэтому некоторые галактики могут содержать лишь одно, но массивное компактное облако, в котором формируются звезды ярче среднего значения, показанного наклонной линией на рис. 2 и представленного уравнением (1). Аналогично, если в галактике все водородные облака диффузные, то самые яркие звезды окажутся слабее среднего значения для галактик той же светимости. Разнообразие масс и морфологических характеристик водородных облаков приводит к появлению как более ярких, так и более слабых звезд относительно средней линии зависимости светимости галактик и звезд (рис. 2). Несмотря на разнообразие физических параметров газовых облаков, они — хотя и с отклонениями для отдельных галактик — подчиняются общей зависимости между светимостью (или массой) галактики и массой (и, следовательно, светимостью) ярчайших звезд (Larson, 1982). При звездообразовании среднему значению массы облака будет соответствовать среднее значение светимости родившихся ярчайших звезд. В результате возникает физическая зависимость между светимостью галактик и светимостью их ярчайших звезд (рис. 2). На диаграмме заметно большое рассеяние точек. Причины этих отклонений были рассмотрены выше.

## МЕТАЛЛИЧНОСТЬ КАРЛИКОВЫХ ИРРЕГУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК

Металличность межзвездной среды иррегулярных галактик чаще всего измеряют по эмиссионным спектрам областей звездообразования, где линии излучения наиболее яркие. Считается, что полученная таким способом металличность, отражает металличность всей галактики. В 1979 году была найдена зависимость между светимостью галактики и металличностью ее межзвездной среды (Lequeux et al., 1979). Последующие исследования подтвердили и уточнили эту зависимость (Mateo, 1998; Pilyugin et al., 2004; de Naray et al., 2004; Tremonti et al., 2004; Lamareille et al., 2004; Shi et al., 2005; Lee et al., 2006; van Zee and Haines, 2006; Saviane et al., 2008; Zhao et al., 2010; Berg et al., 2012; и многие другие). Во всех перечисленных публикациях было подтверждено существование зависимости между светимостью или массой галактики и металличностью межзвездной среды. Основная цель этих исследований состояла не только в определении коэффициента корреляции между указанными параметрами, но и в объяснении причин наблюдаемой зависимости. Следует отметить, что на полученных авторами диаграммах наблюдается значительный статистический разброс данных, который не может быть полностью объяснен погрешностью измерений. Кроме того, поскольку авторы указанных выше работ использовали различные методы измерения металличности и исследовали галактики в разных интервалах светимости, то полученные результаты не всегда соответствовали друг другу.

На диаграммах «светимость–металличность» видно, что маломассивные галактики имеют самую низкую металличность. Для объяснения причин данного явления были предложены различные модели эволюции галактик. Одна из двух наиболее популярных моделей объясняет наблюдаемую зависимость потерей маломассивными галактиками газа, обогащенного металлами. Другая модель связывает это явление с падением на галактики межгалактических малометаллических облаков водорода. В результате происходит разбавление межзвездной среды поступившим извне газом, и галактики становятся малометаллическими (Kobayashi et al., 2007; Finlator and Davé, 2008; Spitoni et al., 2010; ; Sánchez Almeida et al., 2014; Ma et al., 2016; Pillepich et al., 2018; Sharda et al., 2021; del Valle-Espinosa et al., 2023). Анализ некоторых моделей галактик, представленных в публикациях до 2018 года, можно найти в работе Blanc et al. (2019); там же рассмотрены их основные проблемы.

## ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В МЕЖЗВЕЗДНУЮ СРЕДУ ГАЛАКТИК

В межзвездную среду галактик металлы (здесь и далее имеются в виду элементы тяжелее гелия) попадают в результате множества разнообразных процессов. Условно мы разделили их на пять групп. Наибольшая масса металлов попадает в межзвездное пространство при взрыве массивных сверхновых звезд с коллапсом железного ядра: SN II, SN IIL, SN IIP, SN Ib и SN Ic, массы которых находятся в интервале от 8 до  $100 M_{\odot}$ . Далее по тексту статьи, чтобы каждый раз не перечислять все типы массивных сверхновых звезд, будем указывать только SN II, как наиболее ярких представителей, имея в виду и других представителей этого типа. Массивная звезда быстро эволюционирует и за время от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов лет заканчивает свою жизнь взрывом, при котором огромные массы тяжелых элементов разлетаются на большие расстояния. Смесь этих металлов с водородом межзвездной среды служит основой для следующего поколения звезд с более высокой начальной металличностью.

Поставщиком металлов в межзвездную среду могут быть также вспышки сверхновых звезд первого типа (SN Ia). На определенном этапе эволюции двойной системы белый карлик накапливает водород от соседней звезды, и при достижении предела Чандрасекхара происходит термоядерный взрыв (Blanc and Greggio, 2008). Масса взорвавшейся звезды составляет  $1.4 M_{\odot}$ , при этом в межзвездную среду выбрасывается практически все вещество, что подтверждается теоретическими моделями полного распада объекта.

Атмосфера массивных звезд подвергается действию светового давления, и возникает так называемый звездный ветер. Потеря массы звезды при этом процессе может быть весьма значительной. Особенно интенсивно теряют свой газ самые массивные звезды. Однако интересующие нас звезды имеют массу примерно  $8 M_{\odot}$ . Звездный ветер уменьшает их массу не более чем на 10% от исходной, что подтверждается теоретическими изохронами PARSEC (Bressan et al., 2012).

Нестационарные звезды разных типов также обогащают межзвездную среду металлами за счет вспышек светимости или возникающей нестабильности при эволюции двойных звезд. Для каждого типа нестационарных звезд характерны свои оценки потери массы газа. Очень большую массу газа, более  $40 M_{\odot}$ , выбросила в период извержения система из двух массивных звезд  $\eta$  Carinae (Gomez et al., 2010), однако такие объекты уникальны (Khan et al., 2015). Кроме того,  $\eta$  Car можно отнести к предсверхновым SN II. Как видно на рис. 2, в маломассивных галактиках отсутствуют подобные

звезды высокой светимости из-за недостаточной массы водородных облаков. Масса газа, выбрасываемого менее массивными нестационарными звездами — эруптивными, катаклизмическими и другими, не превосходит массу Солнца (а чаще всего значительно меньше).

Звезды с  $M < 8 M_{\odot}$  не взрываются как сверхновые SN II, но они проходят стадию AGB (Asymptotic Giant Branch), во время которой возможны выбросы металлов (Herwig, 2005). Особенно интересна стадия TP-AGB: на этом этапе в звезде происходят термические пульсации, что приводит к выбросу в межзвездное пространство кислорода, углерода и других элементов (Siess, 2007; 2010). При завершении AGB-стадии верхние слои отрываются от звезды. Образовавшаяся планетарная туманность медленно расширяется и рассеивается в межзвездной среде, обогащая ее металлами (Kwitter and Henry, 2022). Масса газа, которую теряет такая звезда за время эволюции до конечного перехода на стадию белого карлика, зависит от первоначальной массы объекта и может равняться нескольким массам Солнца (Doherty et al., 2015). Поскольку объектов с массами  $4-8 M_{\odot}$  значительно больше, чем массивных звезд, то общая масса металлов, выброшенных TP-AGB-звездами, может быть сравнима с массой металлов от массивных сверхновых. Прямые доказательства выброса металлов из AGB-звезд получены при наблюдениях на радиотелескопе ALMA семнадцати богатых кислородом AGB-звезд. В оболочках вокруг звезд найдено присутствие CO, HCN, SO, SiO и других молекул (Wallström et al., 2024). Все эти элементы были выброшены из звезд и при понижении температуры образовали молекулярные соединения.

Недавние наблюдения на инфракрасном телескопе JWST трех достаточно массивных ( $10^{10} M_{\odot}$ ) молодых галактик с возрастом примерно 1 млрд лет показали присутствие в спектрах галактик линий кислорода, углерода, ванадия и, возможно, циркония (Blanc et al., 2019). Такой набор линий характерен для TP-AGB-звезд, что подтверждает их вклад в обогащение межзвездной среды металлами. Полученные для трех галактик результаты не означают, что TP-AGB-звезды всегда являются главными поставщиками тяжелых элементов, но показывают: такие процессы возможны даже в массивных галактиках, в которых имеются условия для появления массивных сверхновых SN II. При изучении еще более массивной галактики, с  $z = 1.88$  (Bevacqua et al. 2025), был сделан другой вывод: вклад TP-AGB-звезд в ее металличность не очень значимый. Указанные примеры относятся к массивным галактикам, в которых есть условия для рождения массивных сверхновых звезд. Если же галактика маломассивная, то массивные звезды, а

значит и SN II, в ней не появятся, и источником металлов, в том числе кислорода (по которому происходит измерение металличности галактики), могут стать звезды малых масс на стадии TP-AGB.

Необходимо отметить, что химический состав разлетающегося газа различается в зависимости от происходящего процесса. При взрыве сверхновой звезды SN II в межзвездную среду попадают самые разнообразные химические элементы, вплоть до урана (Arnould and Goriely, 2003; Kobayashi et al., 2007). Звездный ветер и термические пульсации уносят в межзвездную среду с поверхности звезд углерод, азот и кислород, а сам взрыв сверхновой SN Ia обогащает межзвездную среду элементами группы железа (Iwamoto et al., 1999; Kobayashi et al., 2007). Эруптивные, катаклизмические и другие нестационарные звезды дают малый вклад в обогащение межзвездной среды металлами.

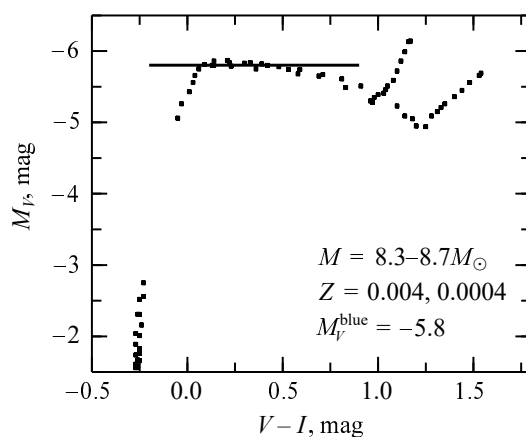
### МИНИМАЛЬНЫЕ МАССЫ И СВЕТИМОСТИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД SN II

Самые большие массы имеют сверхновые звезды с коллапсом железного ядра. Их яркие вспышки привлекают к себе внимание мощностью взрыва. В настоящее время именно эти объекты считаются основными поставщиками металлов в галактиках. Поскольку вспышки даже нескольких сверхновых данного типа способны существенно повысить металличность маломассивной галактики, изучение таких галактик представляет особый интерес для оценки влияния сверхновых на изменение химического состава межзвездной среды. Естественным критерием для оценки такого влияния служит металличность галактик. Следует отметить, что связь металличности с другими параметрами галактик — массой, светимостью и радиусом — изучалась во многих работах как на основе наблюдательных данных, так и с использованием теоретических моделей галактик (Chemerynska et al., 2024; Foster et al., 2012; Ho et al., 2015; Kudritzki et al., 2015; Nanni et al., 2020; Zahid et al., 2012; 2014, а также цитируемые выше статьи). В представляемой работе для поиска влияния вспышек массивных сверхновых на металличность карликовых галактик мы использовали зависимость между светимостью галактик и их ярчайших голубых звезд (Tikhonov et al., 2021), которая никогда раньше для этой цели не применялась.

На основе теоретических моделей звезд Heger et al. (2003) показали, что минимальная масса предсверхновой составляет  $9 M_{\odot}$ . Наблюдательные данные свидетельствуют, что минимальная масса предсверхновой звезды с коллапсом ядра (SN II, SN IIP, SN IIL, SN Ib, SN Ic) равна примерно  $(8 \pm 1) M_{\odot}$  (Smartt, 2009). Позднее Ibeling and Heger (2013) установили, что минимальная

масса предсверхновой зависит от ее металличности и изменяется от  $8.3$  до  $9.5 M_{\odot}$  при изменении металличности от  $0.01$  до  $1.0$  металличности Солнца. Аналогичные результаты получили Doherty et al. (2015): при металличности звезды  $Z = 0.02$  минимальная масса предсверхновой равна  $9.8 M_{\odot}$ ; при металличности  $Z = 0.001$  —  $8.3 M_{\odot}$ . Металличность Солнца измерялась неоднократно, но, как оказалось, существуют принципиальные расхождения в конечных результатах. Anders and Grevesse (1989), Grevesse and Sauval (1998) и Vagnozzi et al. (2017) получили значение металличности Солнца  $Z_{\odot} = 0.02$ ; в работах Asplund et al. (2006, 2009, 2021) представлены более низкие значения ( $Z = 0.012, 0.013$  и  $0.014$ ). Таким образом, диапазон оценок металличности Солнца составляет  $0.014$ – $0.02$ . Самое последнее измерение дает значение  $Z = 0.014$ , но такое значение входит в противоречие с выводами гелиосейсмологии (расчетами размеров конвективных зон и скоростью звуковых волн на Солнце), в то время как  $Z = 0.02$  согласуется с этими расчетами. Teplitskaya and Grigoryeva (2011) предполагают, что низкие значения металличности в работе Asplund et al. (2009) относятся только к узким слоям нижней хромосферы, тогда как общая металличность Солнца может быть выше. Результаты регистрации солнечных нейтрино (Kunitomo et al., 2022) также указывают на необходимость увеличения оценки металличности по сравнению с  $Z = 0.014$ . Таким образом, вопрос о точном значении металличности Солнца требует дальнейших исследований. В нашей работе мы принимаем  $Z = 0.02$ , учитывая, что эта величина может быть несколько завышена. Однако для наших последующих расчетов это не имеет принципиального значения.

Низкометаллические карликовые галактики имеют общепринятое значение металличности от  $0.1$  до  $0.02$  металличности Солнца, то есть от  $Z = 0.002$  до  $0.0003$ . На основе работ Ibeling and Heger (2013) и Doherty et al. (2015) мы нашли, что при таком значении металличности минимальная масса предсверхновой звезды будет находиться в интервале от  $8.3$  до  $8.7 M_{\odot}$ . Поскольку масса и светимость звезд взаимосвязаны и нам известна масса и интервал металличности предсверхновых звезд, то их светимость на стадии горения водорода или гелия в ядре можно найти по эволюционным трекам или изохронам (Bertelli et al., 1994; Bressan et al., 2012). Для звезд в галактиках с низкой металличностью мы выбрали изохроны Bertelli et al. (1994) с металличностью  $Z = 0.0004$  и  $0.004$ . Поскольку массивные звезды превращаются в сверхновые за время не более чем несколько десятков миллионов лет, то мы ограничили изохроны интервалом времени до  $100$  млн лет. На рис. 3 показаны изохроны Bertelli



**Рис. 3.** Изохроны Bertelli et al. (1994) для звезд с массой ( $8.3$ – $8.7 M_{\odot}$ ) и металличностью  $Z = 0.0004$  и  $0.004$ . Горизонтальным отрезком отмечено среднее значение светимости голубых звезд ( $M_V^{\text{blue}} = -5.8$ ), которое они имеют до их взрыва как сверхновых SN II.

et al. (1994) с указанными выше параметрами. Горизонтальной линией на диаграмме рис. 3 отмечено среднее значение светимости ярких голубых звезд  $M_V = -5.8$  с начальными массами  $8.3$ – $8.7 M_{\odot}$ , до стадии взрыва этих звезд как сверхновых SN II.

#### СКАЧОК МЕТАЛЛИЧНОСТИ ГАЛАКТИК ПРИ ОТСУТСТВИИ СВЕРХНОВЫХ SN II

После того как мы получили оценки светимости предсверхновых звезд минимальной массы, можно использовать зависимость между светимостью галактик и ярчайших звезд (см. рис. 2) для определения предела минимальной светимости галактики, в которой еще возможно образование массивных звезд — будущих сверхновых SN II и дальнейшего обогащения межзвездной среды взрывами этих звезд. В галактиках со светимостью ниже установленного предела звезды с массами более  $8.3 M_{\odot}$  не образуются, поэтому не следует ожидать в таких галактиках вспышек массивных сверхновых звезд. Отсутствие таких звезд ведет к закрытию источника накопления металлов в карликовых галактиках от сверхновых типа SN II. Как отмечалось ранее, металлы в том числе кислород и углерод, могут попадать в межзвездную среду при эволюции звезд на стадии TP-AGB. Однако если массивные сверхновые являются основным поставщиком металлов, то должен существовать скачок металличности вблизи определенного нами значения минимальной светимости галактики, необходимой для появления в ней массивной сверхновой.

Мы определили, что светимость минимальной по массе сверхновой звезды составляет  $M_V^{\text{star}} = -5.8$ . Ей соответствует светимость галактики  $M_B^{\text{gal}} = -12.5$  (см. рис. 2 и уравнение (2)).

Таким образом, в галактиках со светимостью слабее, чем  $M_B = -12^m5$ , сверхновые типа SN II будут отсутствовать и накопление металлов в этих галактиках будет идти за счет других, указанных выше процессов, в первую очередь за счет TP-AGB-звезд, массы которых меньше  $8 M_\odot$ .

На рис. 2 указано значение светимости галактик  $M_B^{\text{gal}} = -12^m5$ , разделяющее галактики с наличием массивных сверхновых SN II и без них. Чтобы увидеть изменения в галактиках из-за отсутствия основного источника поступления металлов, нужны однородные и как можно более многочисленные результаты измерения металличности галактик вблизи указанной границы светимости  $M_B = -12^m5$ .

### ГАЛАКТИКИ В ВОЙДАХ

Значительное число галактик низкой светимости исследовано в войдах — больших космических объемах с низкой концентрацией галактик. Неравномерность пространственного распределения галактик — скопления, волокна и войды — можно увидеть, например, в работе (Springel et al., 2006). Много лет велись дискуссии о влиянии войда на физические свойства галактик. Среднее расстояние между галактиками в войдах значительно больше, чем между галактиками в группах, поэтому процессы взаимодействия меньше влияют на эволюцию галактик в войдах. Это значит, что появляется возможность изучать процессы звездообразования, распределение газа и звезд по телу галактики только на основе действия внутренних процессов в галактике без привлечения внешнего воздействия. Имеется много публикаций по изучению галактик в войдах. В некоторых из них говорится об особых свойствах галактик в войдах, в других утверждается, что эти галактики ничем не отличаются от обычных. Перешагнем через исторические дискуссии и не будем рассматривать старые публикации в поддержку или против особых свойств галактик в войдах — обратимся к публикациям последних лет, чтобы познакомиться с самой последней информацией о войдах. Исследование более десяти тысяч галактик в войдах, волокнах и стенках показало, что металличность галактик в войдах немного (на 0.1 dex) меньше металличности галактик в волокнах и на 0.4 dex меньше, чем у галактик в скоплениях (Domínguez-Gómez et al., 2023). Это вполне ожидаемые результаты, поскольку взаимодействие галактик, вероятность которого выше в скоплениях, инициирует звездообразование и повышение металличности межзвездной среды. Изучение распределения молекулярного водорода, исходного материала для рождения звезд, привело к следующему выводу: в пределах ошибок измерений не наблюдается существенных различий в содержании молекулярного

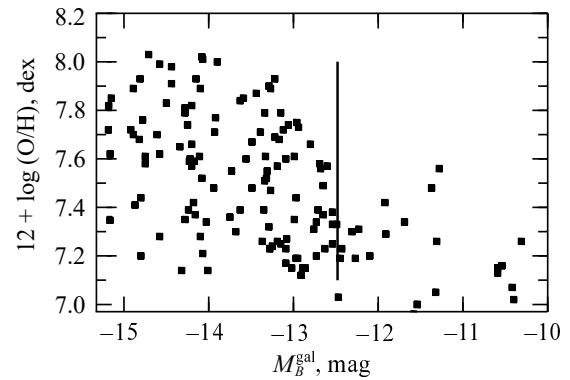


Рис. 4. Диаграмма «светимость — металличность» для карликовых галактик по данным Kniazev et al., 2018; Pustilnik et al., 2016, 2020, 2021, 2024. Вертикальным отрезком отмечена граница светимости галактик  $M_B = -12^m5$ . Более яркие галактики могут иметь массивные сверхновые звезды, а более слабые не содержат массивных сверхновых типа SN II.

газа в галактиках войдов и контрольных галактиках вне войдов (Rodríguez et al., 2024). Отсутствие взаимодействий влияет на эволюцию галактик в войдах. Они эволюционируют более медленно и в среднем имеют более голубой показатель цвета по сравнению с галактиками в других структурах — волокнах, стенках или группах (Congrado et al., 2024). В то же время не найдено никакой корреляции между морфологией галактик в войдах и параметрами самих войдов — размером войда или плотностью галактик внутри войда (Argudo-Fernández et al., 2024). Из этого следует вполне очевидный вывод: на эволюцию галактик влияет присутствие близких соседей, а не расположение галактики в войде или вне его.

После проведения нескольких целевых программ по изучению войдов в публикациях появилось значительное количество данных по измерению физических параметров слабых карликовых галактик, светимость которых близка к установленной нами границе  $M_B = -12^m5$ . Конечно, аналогичные галактики есть и вне войдов, однако в публикациях они упоминаются существенно реже.

Мы использовали однородные измерения из ряда работ, посвященных изучению металличности слабых галактик в войдах (Pustilnik et al., 2016, 2020, 2021, 2024; Kniazev et al., 2018). Обобщенная диаграмма результатов измерения металличности галактик, построенная на основе этих работ, показана на рис. 4. Ценность использованных данных заключается в их единообразии, что повышает точность выводов. Авторы указанных выше публикаций пишут о селекции галактик на основе морфологии, однако на рис. 4 приводится информация о химическом составе галактик, а не об их морфологических особенностях. Поэтому мы

считаем, что полученный результат не может быть следствием каких-либо селекций галактик по их внешнему виду.

На рис. 4 хорошо видно, что у галактик вблизи указанной нами границы  $M_B = -12^m5$  наблюдается резкое падение металличности. Этот скачок соответствует границе между отсутствием и появлением массивных сверхновых звезд в карликовых галактиках, то есть является границей между разными процессами обогащения межзвездной среды галактик металлами. Для лучшего представления диаграммы рис. 4 мы разделили весь диапазон светимостей галактик на десять интервалов и вычислили среднее и медианное значения металличности в каждом из них. Результат такого разделения представлен на рис. 5. Вертикальными штрихами около каждого значения обозначены среднеквадратичные ошибки измерений. Из-за больших размеров интервалов деления ( $0^m5$ ) на рис. 5 уменьшился градиент скачка металличности, но появилась возможность указать точность ее измерения в каждом интервале. Линейный участок диаграммы до  $M_B = -13^m25$  можно представить уравнением:

$$[O/H] = -0.083(\pm 0.011) M_B^{\text{gal}} + 6.44(\pm 0.16) \quad (3).$$

На рис. 5 хорошо видно, как на линейной зависимости появляется излом примерно при  $M_B = -13^m25$ . Максимальная величина изменения металличности достигается между  $M_B = -13^m0$  и  $M_B = -12^m0$ , то есть вблизи указанной нами границы  $M_B = -12^m5$ .

Отметим, что найденная нами граница не является абсолютным барьером, разделяющим галактики на наличие или отсутствие массивных сверхновых. В работах Hunter et al. (2019, 2021) было показано, что некоторые галактики могут иметь только одно или два водородных облака. Если в карликовой галактике весь водород сконцентрирован в одном компактном облаке, то в такой галактике возможно рождение массивных звезд, которые в будущем превратятся в сверхновые SN II. То есть отдельные галактики могут преодолеть указанную границу, но у большинства галактик со светимостью ниже указанной границы массивные сверхновые звезды будут отсутствовать.

Граница светимости галактик (см. рис. 4) получена при совместном использовании результатов измерения разных физических величин: звездной фотометрии HST-снимков, светимости галактик из базы данных NED, теоретических изохрон Bertelli et al. (1994) и выводов из теоретических моделей эволюции массивных звезд. Естественно, что возникает вопрос о точности определения этой границы. Рассмотрим отдельные составляющие полученного результата. Модели эволюции сверхновых и теоретические изохроны мы оставим без обсуждения. Можно только отметить, что

светимость предсверхновой звезды зависит от ее массы. Неопределенность массы предсверхновой в  $0.1 M_{\odot}$  вызывает изменение ее светимости на  $0^m05$ . Ошибка фотометрических измерений звезд не превышает  $0^m03$ , а ошибка интегральной фотометрии галактик из базы данных NED в среднем равна  $0^m1$  (для некоторых галактик она может быть больше). Аналогичная точность фотометрии ( $0^m1$ ) указана для карликовых галактик из списков Pustilnik et al. (2016, 2020, 2021, 2024). Наибольшую ошибку в определении границы дает использование зависимости между светимостями галактик и звезд. Диаграмма на рис. 4 получена при помощи фотометрии звезд на HST-снимках и значений светимости галактик из базы данных NED. Однако точность результата при использовании этой диаграммы обусловлена не ошибками измерений светимости звезд и галактик, а зависимостью светимости ярчайших звезд от массы и морфологии родительских газовых облаков. Этот факт вызывает разброс точек на диаграмме рис. 2. Программа вычисления регрессии дает для рис. 2 ошибку измерения в  $0^m71$ . Это значение намного больше, чем ошибки измерения других величин, поэтому можно считать, что точность определения границы светимости галактик при наличии или отсутствии сверхновых звезд равна  $0^m7$ . Вклад остальных измерений в указанную точность оказался существенно меньше, поэтому его можно не учитывать.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование зависимости между светимостью галактик и их ярчайших голубых звезд позволило нам впервые определить границу, которая разделяет карликовые галактики на две группы. В первую многочисленную группу входят более яркие галактики, в которых возможно рождение и взрыв массивных сверхновых звезд. Вторая малочисленная группа состоит из самых слабых галактик, в которых должны отсутствовать массивные звезды и вспышки сверхновых SN II не могут происходить.

Как указывалось выше, в повышении металличности межзвездной среды галактик могут участвовать много физических процессов. Однако видимое на диаграмме рис. 4 падение металличности галактик при  $M_B = -12^m5$  показывает, что основным поставщиком металлов в галактиках являются массивные сверхновые звезды. В последние десятилетия идет усиленный поиск галактик с минимальной металличностью, но до сих пор не найдены галактики с металличностью ниже чем, например,  $12 + \log(O/H) = 6.5$ . Почему все найденные минимальные значения этого параметра обрываются при значении  $12 + \log(O/H) = 7$ ? На этом же значении металличности на рис. 4 останавливаются

самые слабые галактики, что указывает на существование других источников, кроме SN II, которые обогащают межзвездную среду. В первую очередь это TP-AGB-звезды, о которых говорилось выше. Поскольку в любых, даже самых малых галактиках всегда есть маломассивные звезды, которые могут обогащать галактики металлами, становится ясным, что невозможно отыскать галактику с возрастом более 1–2 млрд лет и значением металличности, близким к нулю.

На диаграммах рис. 4 и 5 видно, что падение металличности галактик начинается при  $M_B = -13^m5$ , то есть при более высокой светимости, чем значение найденной нами границы при  $M_B = -12^m5$ . Значению светимости  $M_B = -13^m5$  соответствует и более высокая средняя металличность. Вероятно, что здесь наблюдается действие зависимости минимальной массы предсверхновой от ее металличности (Ibeling and Heger, 2013; Doherty et al., 2015). При наличии достаточно большой выборки галактик этот эффект можно использовать для определения минимальной массы сверхновых звезд разной металличности, что позволит на основе наблюдательных данных проверить выводы теоретических моделей. Водородные облака в карликовых галактиках различаются по массе и морфологии; их количество в галактике неодинаково. При уменьшении массы галактики уменьшается и средняя масса облаков, но может произойти и инверсия этой закономерности из-за появления в малой галактике одного массивного облака. Это приведет к тому, что на рис. 4 будет видно не ступенчатое резкое уменьшение металличности галактик вблизи границы светимости, а сглаженное изменение, что возможно и наблюдается. В работах Pustilnik et al. (2016, 2020, 2021, 2024) указана точность измерения металличности каждой галактики. В этих же публикациях дана ошибка измерения светимости при интегральной фотометрии галактик:  $0^m1$ . Мы определили среднюю ошибку измерения металличности ( $12 + \log(O/H)$ ) исследованных нами галактик, она равна 0.08. Полученные точности измерений дают нам основания считать, что наблюдаемое падение металличности от  $M_B = -13^m5$  до  $-12^m5$  не является следствием ошибок измерения металличности и светимости галактик, а показывает действительное изменение параметра.

Карликовые галактики, которые мы использовали для построения диаграммы рис. 4, взяты из наблюдений пустот (войдов) вокруг Местной группы. Эти галактики эволюционируют в условиях малой пространственной плотности галактик и чаще всего при отсутствии соседей. Но зависимость между светимостью галактик и их ярчайших голубых звезд (рис. 2) была получена при фотометрии

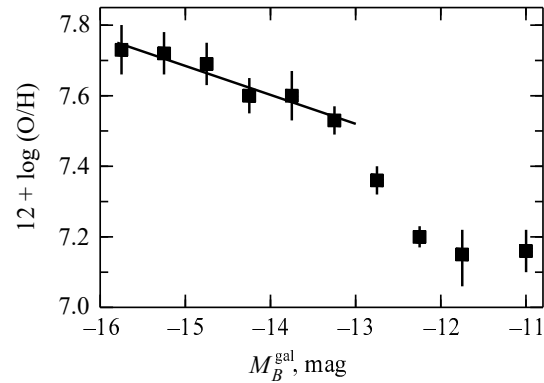


Рис. 5. Усредненная по интервалам в  $0^m5$  диаграмма «светимость – металличность». Вертикальными линиями указаны ошибки измерения средней металличности галактик в каждом интервале.

галактик, независимо от их изолированности или вхождения в состав групп. Диаграмма рис. 4 показывает, что положение скачка металличности, найденное при совместном использовании теоретических изохрон, моделей сверхновых звезд и данных о светимости звезд и галактик в группах и поле совпадает с положением скачка у галактик в войдах. Таким образом, один из основных параметров галактик — их металличность — мало зависит от того, где расположены галактики: в пустотах или вне их. В противном случае мы бы не получили согласованного результата при использовании разных моделей и измерений. Полученное Domínguez-Gómez et al. (2023) различие металличностей у галактик в войдах, волокнах и скоплениях частично объясняет рассеивание точек на диаграмме рис. 2, но не изменяет основные результаты и выводы представляемой работы. Светимость галактик сильно зависит от протекающих процессов звездообразования, в то время как масса галактики более устойчива к изменению. Поэтому было бы интересно получить диаграмму рис. 4 для масс галактик. Но в этом есть свои проблемы. Массу галактики можно измерить по кривым вращения, для этого необходимы радиоизмерения, которых пока нет. Второй метод определяет массу по фотометрии в нескольких фильтрах. Для части галактик такие измерения можно получить из базы данных HyperLeda. Однако результат будет зависеть от ошибок фотометрии и точности уравнения перехода от фотометрии к массе. Суммарные ошибки могут сильно исказить вид зависимости на рис. 4. Совершенно непонятна роль невидимой материи, существование которой предполагают именно в маломассивных галактиках. Поскольку диаграммы рис. 2 и 4 построены идентичным способом — с помощью интегральной фотометрии галактик, то невидимая материя не должна каким-либо образом влиять на результаты.

Большой интерес для изучения представляют галактики со светимостью выше найденного предела, но все же с низкой металличностью. По всей видимости, в этих галактиках водородные облака имеют диффузную структуру, которая препятствует появлению массивных сверхновых звезд. На диаграмме рис. 4 видно, что при повышении светимости галактик уменьшается число малометаллических галактик, то есть среди диффузных газовых облаков этих галактик появляются компактные облака, в которых рождаются массивные звезды.

### БЛАГОДАРНОСТИ

При выполнении работы были использованы сведения из базы данных NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>). Работа выполнена на основе наблюдений космического телескопа им. Хаббла (NASA/ESA), полученных в Институте космических телескопов (STSI), который эксплуатируется компанией AURA, Inc. по контракту № NAS5-26555.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор 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. Argudo-Fernández, C. Gómez Hernández, S. Verley, et al., *Astron. and Astrophys.* **692**, id. A258 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202450809
3. M. Arnould and S. Goriely, *Physics Reports* **384** (1-2), 1 (2003). DOI:10.1016/S0370-1573(03)00242-4
4. M. Asplund, A. M. Amarsi, and N. Grevesse, *Astron. and Astrophys.* **653**, id. A141 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202140445
5. M. Asplund, N. Grevesse, and A. Jacques Sauval, *Nuclear Physics* **777**, 1 (2006). DOI:10.1016/j.nuclphysa.2005.06.010
6. 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
7. D. A. Berg, E. D. Skillman, A. R. Marble, et al., *Astrophys. J.* **754** (2), id. 98 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/754/2/98
8. G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, et al., *Astron. and Astrophys.* **106**, 275 (1994).
9. D. Bevacqua, P. Saracco, F. La Barbera, et al., *Astron. and Astrophys.* **699**, id. A203 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202553736
10. G. Blanc and L. Greggio, *New Astronomy* **13** (8), 606 (2008). DOI:10.1016/j.newast.2008.03.010
11. G. A. Blanc, Y. Lu, A. Benson, et al., *Astrophys. J.* **877** (1), article id. 6 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab16ec
12. 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
13. I. Chemerynska, H. Atek, P. Dayal, et al., *Astrophys. J.* **976** (1), id. L15 (2024). DOI:10.3847/2041-8213/ad8dc9
14. A. M. Conrado, R. M. González Delgado, R. García-Benito, et al., *Astron. and Astrophys.* **687**, id. A98 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202449414
15. M. G. del Valle-Espinosa, R. Sánchez-Janssen, R. Amorín, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **522** (2), 2089 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1087
16. C. L. Doherty, P. Gil-Pons, L. Siess, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446** (3), 2599 (2015). DOI:10.1093/mnras/stu2180
17. J. Domínguez-Gómez, I. Pérez, T. Ruiz-Lara, et al., *Nature* **619** (7969), 269 (2023). DOI:10.1038/s41586-023-06109-1
18. K. Finlator and R. Davé, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385** (4), 2181 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.12991.x
19. C. Foster, A. M. Hopkins, M. Gunawardhana, et al., *Astron. and Astrophys.* **547**, id. A79 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201220050
20. H. L. Gomez, C. Vlahakis, C. M. Stretch, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401** (1), L48 (2010). DOI:10.1111/j.1745-3933.2009.00784.x
21. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **85**, 161 (1998). DOI:10.1023/A:1005161325181
22. A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley, et al., *Astrophys. J.* **591** (1), 288 (2003). DOI:10.1086/375341
23. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43** (1), 435 (2005). DOI:10.1146/annurev.astro.43.072103.150600
24. I.-T. Ho, R.-P. Kudritzki, L. J. Kewley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **448** (3), 2030 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv067
25. D. A. Hunter, B. G. Elmegreen, H. Archer, et al., *Astron. J.* **161** (4), id. 175 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abe1c0
26. D. A. Hunter, B. G. Elmegreen, and C. L. Berger, *Astron. J.* **157** (6), article id. 241 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab1e54
27. D. Ibeling and A. Heger, *Astrophys. J.* **765** (2), article id. L43 (2013). DOI:10.1088/2041-8205/765/2/L43
28. K. Iwamoto, F. Brachwitz, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **125** (2), 439 (1999). DOI:10.1086/313278

29. R. Khan, S. M. Adams, K. Z. Stanek, et al., *Astrophys. J.* **815** (2), article id. L18 (2015). DOI:10.1088/2041-8205/815/2/L18
30. A. Y. Kniazev, E. S. Egorova, and S. A. Pustilnik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479** (3), 3842 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty1704
31. C. Kobayashi, V. Springel, and S. D. M. White, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376** (4), 1465 (2007). DOI:10.1111/j.1365-2966.2007.11555.x
32. R.-P. Kudritzki, I.-T. Ho, A. Schrubba, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450** (1), 342 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv522
33. M. Kunitomo, T. Guillot, and G. Buldgen, *Astron. and Astrophys.* **667**, id. L2 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202244169
34. R. Kuzio de Naray, S. S. McLaugh, and W. J. G. de Blok, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **355** (3), 887 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.08364.x
35. K. B. Kwitter and R. B. C. Henry, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** (1032), id. 022001 (2022). DOI:10.1088/1538-3873/ac32b1
36. F. Lamareille, M. Mouhcine, T. Contini, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **350** (2), 396 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07697.x
37. R. B. Larson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **200**, 159 (1982). DOI:10.1093/mnras/200.2.159
38. H. Lee, E. D. Skillman, J. M. Cannon, et al., *Astrophys. J.* **647** (2), 970 (2006). DOI:10.1086/505573
39. J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, et al., *Astron. and Astrophys.* **80**, 155 (1979).
40. X. Ma, P. F. Hopkins, C.-A. Faucher-Giguère, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (2), 2140 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2659
41. M. L. Mateo, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 435 (1998). DOI:10.1146/annurev.astro.36.1.435
42. A. Nanni, D. Burgarella, P. Theulé, et al., *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A168 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202037833
43. A. Pillepich, V. Springel, D. Nelson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473** (3), 4077 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2656
44. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, *Astron. and Astrophys.* **425**, 849 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20034522
45. S. A. Pustilnik, E. S. Egorova, A. Y. Kniazev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 944 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2084
46. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, Y. A. Perepelitsyna, and E. S. Egorova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (1), 830 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa215
47. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. L. Tepliakova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527** (4), 11066 (2024). DOI:10.1093/mnras/stad3926
48. S. A. Pustilnik, Y. A. Perepelitsyna, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463** (1), 670 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw2039
49. M. I. Rodríguez, U. Lisenfeld, S. Duarte Puertas, et al., *Astron. and Astrophys.* **692**, id. A125 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202451482
50. J. Sánchez Almeida, A. B. Morales-Luis, C. Muñoz-Tuñón, et al., *Astrophys. J.* **783** (1), article id. 45 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/783/1/45
51. A. Sandage and G. A. Tammann, *Astrophys. J.* **194**, 223 (1974). DOI:10.1086/153238
52. I. Saviane, V. D. Ivanov, E. V. Held, et al., *Astron. and Astrophys.* **487** (3), 901 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:20077617
53. P. Sharda, M. R. Krumholz, E. Wisnioski, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (1), 53 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab868
54. F. Shi, X. Kong, C. Li, and F. Z. Cheng, *Astron. and Astrophys.* **437** (3), 849 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20041945
55. L. Siess, *Astron. and Astrophys.* **476** (2), 893 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20078132
56. L. Siess, *Astron. and Astrophys.* **512**, id. A10 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/200913556
57. S. J. Smartt, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 63 (2009). DOI:10.1146/annurev-astro-082708-101737
58. E. Spitoni, F. Calura, F. Matteucci, and S. Recchi, *Astron. and Astrophys.* **514**, id. A73 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/200913799
59. V. Springel, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Nature* **440** (7088), 1137 (2006). DOI:10.1038/nature04805
60. R. Teplitskaya and S. Grigoryeva, *Geomagnetism and Aeronomy* **51**, 873 (2011). DOI:10.1134/S0016793211070231
61. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and G. M. Karataeva, *Astrophysical Bulletin* **79** (3), 361 (2024). DOI:10.1134/S199034132460073X
62. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, G. M. Karataeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 381 (2021). DOI:10.1134/S1990341321040143
63. C. A. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann, et al., *Astrophys. J.* **613** (2), 898 (2004). DOI:10.1086/423264
64. S. Vagnozzi, K. Freese, and T. H. Zurbuchen, *Astrophys. J.* **839** (1), article id. 55 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa6931
65. L. van Zee and M. P. Haynes, *Astrophys. J.* **636** (1), 214 (2006). DOI:10.1086/498017
66. S. H. J. Wallström, T. Danilovich, H. S. P. Müller, et al., *Astron. and Astrophys.* **681**, id. A50 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202347632
67. H. J. Zahid, F. Bresolin, L. J. Kewley, et al., *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 120 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/750/2/120
68. H. J. Zahid, G. I. Dima, R.-P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **791** (2), article id. 130 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/791/2/130
69. Y. Zhao, Y. Gao, and Q. Gu, *Astrophys. J.* **710** (1), 663 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/710/1/663

## Massive Supernovae and Metallicity Boundary in Dwarf Galaxies

N. A. Tikhonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The increase of metallicity in the galactic interstellar medium occurs via the interaction of many physical processes. These processes differ by mass and chemical composition of the matter delivered into the interstellar medium. Massive supernovae have masses from 8 to  $100 M_{\odot}$  and, during their explosions, eject the maximum amount of heavy elements into the surrounding space. The consequences of such outbursts are most easily detected in galaxies having the lowest masses. Based on the relationship between the luminosities of galaxies and their brightest stars, as well as theoretical models of massive supernovae and isochrones of stars with masses of  $8.3\text{--}8.7 M_{\odot}$ , we determined that galaxies with luminosities below  $M_B \geq -12^m5$  should be devoid of stars with masses greater than  $8 M_{\odot}$ . This means that massive supernovae cannot form in such galaxies. Hence, the galaxies are deprived of their main source of metal enrichment. This constraint should be observed as a metallicity drop in galaxies at  $M_B = -12^m5$ . Based on the published data, a “luminosity–metallicity” diagram has been constructed, which indeed shows a metallicity jump at luminosities above  $M_B = -12^m5$ . In galaxies of even lower luminosity, massive supernovae never flare up and the metallicity of the interstellar medium increases due to the stellar wind and thermal pulsations of AGB (TP-AGB) stars.

Keywords: *galaxies: photometry; galaxies: dwarf; galaxies: metallicity; stars: supernovae*