

Механизм формирования «странных радио-кругов»

The Mechanism of Formation of "Odd Radio Circles"

Поройков С.Ю.

Канд. физ-мат. наук МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: sporoykov@mail.ru

Poroykov S.Yu.

Ph. D. (Phys.-Math.) Lomonosov Moscow State University, Moscow

e-mail: sporoykov@mail.ru

Аннотация

Обнаружены «странные радио-круги» диаметром до 300 кпк, содержащие десятки сферических сгустков диаметром ~ 15 кпк. Теплый газ в радио-кругах излучает в УФ линиях ряда ионов (O, Mg, Ne) с температурой $\sim 10^4$ К, уширенных динамикой газа (~ 200 км/с), обусловленной ударной волной. Излучение в оптическом и ближнем ИК диапазоне связано со звездным континуумом. Радио-круг могут образовать ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в звездном потоке возрастом $\geq 10^9$ лет, содержащем $\geq 3 \cdot 10^8$ звезд, образованном галактикой массой $\sim 10^{10} M_{\odot}$. Звездообразование в звездном потоке может инициировать газ, нагребенный ударной волной (оттекающий в ее хвост), образуемой вокруг газовой короны галактики – спутника, движущейся в межгалактическом газе.

Ключевые слова: странные радио-круги, звездные потоки, сверхновые, звездный ветер.

Abstract

"Odd radio circles" up to 300 kpc in diameter, containing dozens of spherical clumps ~ 15 kpc in diameter were detected. Warm gas in the radio circles emits in the UV lines of a number of ions (O, Mg, Ne) with a temperature of $\sim 10^4$ K, broadened by the gas dynamics (~ 200 km/s) caused by the shock wave. Emission in the optical and near-IR ranges is associated with the stellar continuum. The radio circle may be formed by supernova shock waves amplified by the stellar wind of blue stars in a stellar stream $\geq 10^9$ years old, containing $\geq 3 \cdot 10^8$ stars, formed by a galaxy with a mass of $\sim 10^{10} M_{\odot}$. Star formation in a stellar stream can be initiated by gas raked by a shock wave (flowing into its tail) formed around the gas corona of a satellite galaxy moving in intergalactic gas.

Keywords: odd radio circles, star streams, supernovae, stellar wind.

Введение

В 2021 г. обнаружено несколько так называемых «странных радио-кругов» (Odd Radio Circles – ORCs), излучающих в радиодиапазоне в области ~ 1 ГГц, чей диаметр оценен в несколько сотен кпк [1]. Затем на частоте 944 МГц были обнаружены другие радио-круги диаметром ~ 300 кпк при красном смещении $z \sim 0,27$, если они связаны с эллиптической галактикой DES J010224.33–245039.5 [2]. Сообщается об обнаружении пяти ORCs диаметром от несколько десятков до несколько сотен кпк; в центрах половины из них находятся радиогалактики. От радио-кругов наблюдается УФ излучение ряда ионов (O и др.) с температурой $\sim 10^4$ К; уширение спектральных линий указывает на динамику газа ~ 200 км/с, обусловленную ударной волной [3]. Радио-круги выглядят как остатки сверхновых [2], а также связываются с околосветными оболочками массивных голубых звезд [4] (§ 1).

Радио-круги излучают в оптическом и ближнем ИК диапазоне, что связывается со слабым звездным континуумом [3]. Утолщения в головах изогнутых нитей радиоизлучения, центры которых ярко светят в оптическом диапазоне, могут указывать на галактики – спутники материнской галактики. Расчеты показывают, что радио-круг – замкнутую трубку толщиной ~15 кпк могут образовать ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в звездном потоке возрастом $\geq 10^9$ лет, содержащем $\geq 3 \cdot 10^8$ звезд, образуемых в газовом хвосте галактики – спутника массой $\sim 10^{10} M_{\odot}$, вращающейся в разреженном газе короны материнской галактики (§ 2).

Температура газа в радио-кругах близка к температуре теплой фракции газа $\sim 2 \cdot 10^4$ К, наблюдаемой в короне соседней галактики Андромеда радиусом ~150 кпк в линиях поглощения ряда ионов (O и др.) в спектрах квазаров. Теплый газ обладает динамикой (сравнимой с динамикой газа в радио-кругах), связываемой с ударными волнами сверхновых [5] (§ 3).

Сверхновые и *остатки взрывов сверхновых* (ОВС) проявляются в коронах многих галактик. Излучение ОВС в оптическом и радиодиапазоне, иногда в рентгеновском и γ -диапазоне [6, с. 485] объясняет целый ряд эффектов, наблюдаемых в коронах галактик и их скоплениях, таких как разогрев коронального газа и его обогащение тяжелыми элементами, излучение корон в радио- и оптическом диапазоне, рентгеновское и γ -излучение областей концентрации скрытой массы (проявляющейся в гравитационной массе корон галактик и их скоплениях), а также изменение спектрального индекса космических лучей в области $10^{18} - 10^{19}$ эВ (§ 4).

Согласно расчетам, взрывы ~30 сверхновых, усиленные звездным ветром ~300 голубых звезд в звездных потоках шириной ~10 кпк, могут сформировать в разреженном межгалактическом газе за $\sim 3 \cdot 10^7$ лет ударную волну размером ~15 кпк при средней плотности молодых звезд в звездном потоке $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ пк⁻³. Оболочки ОВС содержат теплый газ ($\sim 10^4$ К), имеющий волокнистую структуру, обусловленную локальными магнитными полями, вызывающими радиоизлучение релятивистских электронов синхротронной природы (§ 5).

При массе газа в хвосте галактики – спутника ($\sim 10^7 M_{\odot}$ на погонные ~10 кпк) сферические сгустки в звездных потоках могут воспроизводиться за счет нагребания ударными волнами в межгалактической среде сравнимой массы газа $\sim 10^7 M_{\odot}$, частично коллапсирующего в звезды. Замкнутый в пределах орбиты галактики – спутника радио-круг может формироваться при скорости звездообразования в звездном потоке ок. 0,4 звезд в год (§ 6).

1. Проявления «странных радио-кругов» в коронах галактик

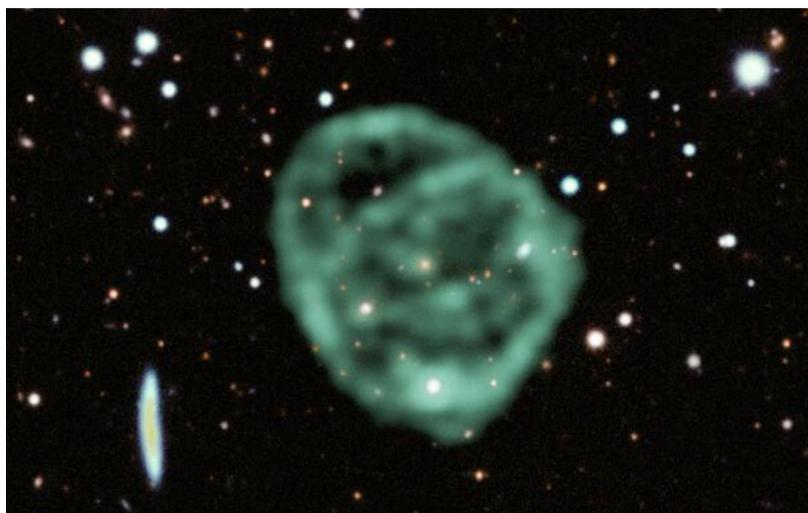


Рис. 1. Изображение ORC I по данным радиотелескопа MeerKAT

На рис. 1 представлено изображение радио-кругов (ORCs) по данным радиотелескопа MeerKAT, наложенное на соответствующий участок звездного неба в оптическом и ближнем ИК-диапазонах.

ORCs представляют собой «сетку» радио-кругов и дуг. Помимо радио-кругов наблюдаются изогнутые нити радиоизлучения – радио-трубки, утолщения в головах которых сопровождается яркое оптическое свечение (рис. 1). Диаметр радио-кругов достигает 300 кпк [2]. Это неоднородные по толщине кольца в виде замкнутой трубки толщиной ~ 10 кпк, на которой встречаются сферические сгустки диаметром ~ 15 кпк.

Радио-круги связываются с распространяющимися в разреженном межгалактическом газе сильными ударными волнами, связываемые со вспышками звездообразования, при которых образуются массивные голубые звезды, эволюционирующие в сверхновые. Подобное явление может происходить при столкновении галактик. Так, радиогалактики – эллиптические галактики [7, с. 213] образующиеся при слиянии галактик меньшей массы [8, с. 342].

Радио-круги выглядят как остатки сверхновых и могут быть сформированы гигантской взрывной волной [2]. Действительно, уширение спектральных линий указывает на динамику газа, обусловленную ударной волной [3]. Радио-круги также связываются с околозвездными оболочками массивных голубых звезд с сильным звездным ветром [4]. Так, ударные волны образуют сверхновые и звезды с сильным звездным ветром [9, с. 245].

От радио-кругов наблюдается УФ излучение ионов OII в сильных линиях $\lambda_{uv} = 3726$ и 3729 \AA и слабых линиях MgII 2796 и 2803 \AA и NeIII 3869 \AA [3], что позволяет оценить температуру газа. Длину волны излучения в области максимума энергетического спектра определяет закон Вина:

$$T = b/\lambda, \quad (1)$$

где b – постоянная Вина; T – температура звезд.

При $b = 0,29 \text{ см}\cdot\text{К}$ [8, с. 279] температура газа в радио-кругах $T \approx (0,7 - 1) \cdot 10^4 \text{ К}$, что соответствует температуре атомарного водорода в межоблачной среде галактик $(0,7 - 1) \cdot 10^4 \text{ К}$ (теплые области HI) [10, с. 86].

Спектральные линии ионов в радио-кругах уширены из-за динамики газа (градиент и дисперсия скорости $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ связываются с ударной волной). Также наблюдается свечение в оптическом и ближнем ИК диапазоне, связываемое со слабым звездным континуумом [3].

Расчеты показывают, что радио-круги (кольца теплого газа) могут формировать распространяющиеся в разреженном межгалактическом газе на 7 кпк ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в звездных потоках, образованных галактиками – спутниками массой $\sim 10^{10} \text{ М}_\odot$. Звездообразование в звездных потоках может инициировать газ, нагребенный ударной волной (оттекающий в ее хвост), образуемой газовой короной галактики, движущейся в межгалактическом газе (§ 5).

На это указывают утолщения в головах нитей радиоизлучения, центры которых ярко светятся в оптическом диапазоне. Так, галактики – спутники, движущиеся в короне материнской галактики, могут иметь протяженные газовые хвосты (из атомарного водорода); при этом ширина потока газа максимальна в его «голове» вокруг галактики [11]. На рис. 1 наблюдаются четыре выраженных утолщения, ассоциируемых с четырьмя галактиками – спутниками. При сближении галактики могут менять траекторию (гравитационный маневр), что объясняет изгиб нитей радиоизлучения.

Звездные потоки могут присутствовать в коронах многих галактик. При этом число звездных потоков в коронах галактик (КГ) может быть значительно. Например, в короне нашей Галактики по состоянию на 2023 г. выявлено ок. 60 карликовых галактик – спутников и более 30 связанных с ними звездных потоков.

Процесс звездообразования в звездных потоках позволяет обнаружить их спектроскопическими методами (§ 6). Так, радио-круги проявляются в оптическом и ближнем ИК диапазоне, что связывается со слабым звездным континуумом [3]. У некоторых радиогалактик протяженные оптические оболочки [7, с. 213]. При этом звезды в галактиках – спутниках и образуемых ими звездных потоках в КГ могут вносить вклад в фоновое космическое излучение.

ние (ФКИ) в оптическом диапазоне при красном смещении $z \geq 0,3$ включая ближний ИК диапазон в области ~ 1 мкм при $z \sim 1$, что связывается с активизацией оседания карликовых галактик в коронах более крупных [12]. При сравнимом красном смещении $z \sim 0,3 - 0,6$ обнаружены радио-круги [3].

ОВС (включая оптический и радио- диапазон) проявляются в коронах многих галактик (§ 4), т.е. связанные с ними радио-структуры синхротронной природы, являясь неразрешенными источниками на фоне ФКИ в соответствующем диапазоне, могут быть типичными.

2. Структура звездных потоков в коронах галактик

Корона Галактики содержит десятки карликовых галактик – спутников [13, с. 1224]; [14], формирующих звездные потоки галактических масштабов [11]. Звездные потоки в короне нашей Галактики содержат $10^4 - 10^8$ звезд [15]. Карликовые галактики – спутники более крупных галактик могут постепенно разрушаться в межгалактической среде КГ [16], образуя звездные потоки, обычно имеющие форму дуги. Разрушение галактик – спутников за счет приливных сил при сближении и столкновении может коррелировать со вспышками звездообразования [17]. Так, в галактиках с активным звездообразованием наблюдаются выбросы значительного массива газа ударными волнами сверхновых в корону. Например, в галактике SDSS J211824.06+001729.4 галактический ветер распространился в короне в масштабе ~ 100 кпк, что связывается со всплеском звездообразования [18].

Расчеты показывают, что звездные потоки может формировать газ, нагребенный ударной волной галактик – спутников (движущихся в корональном газе материнской галактики), оттекающий в ее хвост и частично коллапсирующий в звезды. Так, некоторые галактики – спутники имеют хвосты атомарного водорода. Например, в Магеллановом потоке шириной ~ 10 кпк плотность газа $0,1 - 1 \text{ см}^{-3}$ [11] сравнима с плотностью нейтрального водорода $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ в теплой межоблачной среде галактик [10, с. 86]. Газовые хвосты галактик – спутников могут быть на порядок протяженнее их корон и достигать ≤ 100 кпк; ширина потока газа сравнима с максимальной толщиной в его «голове» вокруг галактики [11].

Оценим массу галактики – спутника и связанного с ней звездного потока, при которой ударные волны, вызванные звездообразованием, сформируют замкнутый контур в виде радио-круга в пределах КГ.

В условиях постоянства отношения M/r для гало галактик [8, с. 389] первая космическая скорость для Галактики и ее короны:

$$v_0 = (2GM/r)^{1/2}, \quad (2)$$

где G – гравитационная постоянная; M – масса; r – радиус [6, с. 474].

Масса нашей Галактики (относящейся к типичным S-галактикам) $M \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [8, с. 389]; ее радиус $r \sim 15$ кпк [8, с. 387]. Первая космическая скорость для Галактики (и ее короны) $v_0 \approx 4 \cdot 10^5$ м/с.

Время пролета по круговой орбите в пределах КГ.

$$t_0 = 2\pi r_k / v_0, \quad (3)$$

где r_k – радиус короны; v_0 – первая космическая скорость для короны.

При $r_k \sim 150$ кпк [2]; $v_0 \sim 4 \cdot 10^5$ м/с (2) период орбиты $t_0 \approx 10^9$ лет, т.е. радио-круг мог формироваться в течение $\geq 10^9$ лет.

Заметим, что оценка (3) не превышает время остывания горячего ($\sim 10^6$ К) газа $10^9 - 10^{10}$ лет в короне плотностью $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [18, с. 402], т.е. корональный газ может сохраняться в пределах орбиты звездного потока.

Время расширения сферических сгустков в радио-кругах:

$$t \approx d/2v, \quad (4)$$

где d – диаметр сферических сгустков; v – скорость ударной волны.

Градиент и дисперсия скорости теплого газа в радио-кругах, связываемая с ударной волной $v \sim 2 \cdot 10^5$ м/с [3], что сравнимо с тепловой скоростью частиц коронального газа с температурой $\sim 10^6$ К.

Возраст сферических сгустков в радио-кругах $t \approx 3 \cdot 10^7$ лет.

Скорость теплого газа в радио-кругах $v \sim 2 \cdot 10^5$ м/с [3] вдвое меньше орбитальной скорости $v_0 \sim 4 \cdot 10^5$ м/с (2), т.е. теплый газ за фронтом ударной волны может оттекать в ее хвост.

Время оттеkania газа из оболочки ударной волны в ее хвост сравнимо с временем пролета сферического сгустка при орбитальной скорости $t' = d/v_0 \approx 3 \cdot 10^7$ лет, которое сравнимо с возрастом сферических сгустков $\sim 3 \cdot 10^7$ лет (4).

Как видно из рис. 1, замкнутая структура радио-кругов, включает сферические сгустки диаметром ~ 15 кпк, перемежающиеся более протяженными областями в виде «шеек» – трубок диаметром ~ 10 кпк длиной ~ 30 кпк (структура бус). Сравнимую ширину ~ 10 кпк имеет Магелланов поток – газовый хвост нейтрального водорода, образуемый галактикой *Большое Магелланово Облако* (БМО) [11] массой $1,4 \cdot 10^{10} M_\odot$ – спутника нашей Галактики, удаленного на ~ 50 кпк [13, с. 1224].

Согласно расчетам, число звезд в звездном потоке, способном сформировать радио-круг, может достигать $\geq 3 \cdot 10^8$ (6), что сравнимо с числом звезд в Магеллановом потоке $\sim 10^8$ [15].

Совпадение толщины радио-кругов с шириной Магелланова потока, а также сравнимость числа звезд в нем и звездном потоке в радио-круге свидетельствуют в пользу того, что *радио-круги могут формировать галактики массой $\sim 10^{10} M_\odot$* (имеющие газовую корону подобно БМО), вращающиеся в короне более крупной материнской галактики, либо несколько столкнувшихся галактик сравнимой массы $\geq 10^{10} M_\odot$, вращающихся в общей газовой короне вокруг центра масс.

Ширина потока газа максимальна в «голове» вокруг БМО – в ударной волне. Газовый хвост БМО длиной $d \leq 100$ кпк на порядок протяженнее его газовой короны [11], что для орбитальной скорости $v_0 \sim 4 \cdot 10^5$ м/с (2) соответствует времени пролета $t = d/v_0 \approx 3 \cdot 10^8$ лет – треть периода орбиты $\sim 10^9$ лет (3). БМО может формировать радио-дугу (для внешнего наблюдателя); при большем времени движения – радио-круг (эллипс).

Также оболочки ОВС, движущиеся в межгалактической среде с орбитальной скоростью, могут формировать ударные волны. За фронтом ударных волн ОВС образуются плотные области газа $(1 - 3) \cdot 10^2$ см⁻³ с температурой $(1 - 6) \cdot 10^4$ К [10, с. 478]. Нагретый газ, обтекая ударную волну, может формировать протяженный турбулентный хвост газа (§ 5).

Газ в оболочках ОВС, оттекающий в хвост ударной волны, может остывать за счет излучения в спектральных линиях. Остывший турбулентный газ, нагретый ударной волной, может частично коллапсировать в звезды, в том числе массивные голубые звезды, эволюционирующие в сверхновые. Так, ударные волны ОВС инициируют процесс звездообразования [10, с. 478].

Оценим число звезд в звездном потоке, формирующем радио-круг исходя из оценки числа звезд в пределах сферического сгустка на радио-круге с учетом начального распределения звезд по массам Солпитера (§ 6).

Число сферических сгустков на радио-круге при их плотной упаковке:

$$N_c \approx 2\pi r_k/d. \quad (5)$$

При $d \sim 15$ кпк; $r_k \sim 100$ кпк число *сферических сгустков в радио-круге* $N_c \approx 40$.

Если сферические сгустки образуют ОВС, усиленные звездным ветром, можно оценить число звезд в звездном потоке, при котором на его орбите сформируется замкнутая структура в виде радио-круга:

$$N_s \geq N_c N_g, \quad (6)$$

где N_c – число сферических сгустков на радио-круге; N_g – число звезд в сгустке.

За период орбиты $t_0 \sim 10^9$ лет (3) в пределах сферического сгустка на радио-круге образуется $N_g \sim 10^7$ звезд, включая красные карлики (§ 5).

При $N_c \sim 40$ (5) согласно оценке (6) число звезд в звездном потоке, формирующем радио-круг $N_s \geq 3 \cdot 10^8$.

Сравнимая оценка $N_s = U_{str} \geq 4 \cdot 10^8$ следует из скорости звездообразования в радио-круге $U_s \sim 0,4$ звезд в год (16) при возрасте радио-круга $t_r \geq 10^9$ лет (не менее периода орбиты).

Для сравнения, число звезд в звездных потоках в короне нашей Галактики $10^4 - 10^8$ [15] сопоставимо лишь в Магеллановом потоке.

Таким образом, ударные волны вокруг корон галактик – спутников массой $\sim 10^{10} M_\odot$, вращающихся в коронах материнских галактик, могут формировать протяженные облака газа (хвосты), формирующие звезды в звездных потоках. Взрывы сверхновых в звездном потоке, содержащем не менее $\geq 3 \cdot 10^8$ звезд, могут образовать замкнутый радио-круг за $\geq 10^9$ лет.

Соответственно, звездный поток, чей возраст менее периода орбиты $< 10^9$ лет, может сформировать дугу (радио-трубку), что иллюстрируют изогнутая нить радиоизлучения, соседствующая с радио-кругами (рис. 1).

Если концентрация и число молодых звезд звездных потоков в области сферических сгустков достигают критических величин, звездообразование (в т.ч. рождение голубых звезд, эволюционирующих в сверхновые), может реализоваться в них по периодическому принципу. Образующая ударная волна нагревает газ, $\sim 1\%$ которого может коллапсировать в звезды (§ 5), все более удаляющиеся от вращающейся галактики – спутника. Данный процесс может воспроизводиться, пока звездный поток не охватит всю орбиту (§ 6).

Время воспроизводства сферического сгустка $\Sigma t = t + t' + t_k$ включает его возраст $t \sim 3 \cdot 10^7$ лет (4), время оттекания газа от ударной волны $t' \sim 3 \cdot 10^7$ лет согласно предыдущей оценке, а также время коллапса газа в звезды.

Время коллапса газовых облаков в звезды:

$$t_k = (3\pi/32\alpha G\rho)^{1/2}, \quad (7)$$

где $\alpha \leq 1$ – коэффициент, учитывающий компенсацию сил гравитации силами давления газа; G – гравитационная постоянная; ρ – плотность газа [8, с. 529].

При $\alpha \sim 1$ давление газа не окажет заметного влияния на процесс его коллапса. Межзвездный газ с температурой $\leq 10^4$ К формирует межоблачную среду плотностью $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ (при $\alpha \sim 0$); более плотный газ с концентрацией $1 - 100 \text{ см}^{-3}$, охлаждаясь, концентрируется в облаках [10, с. 86] (при $\alpha \sim 1$), коллапсирующих в звезды [8, с. 531].

В ударной волне ОВС плотность газа $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ [10, с. 478], чему отвечает $\alpha \sim 1$. Так, теплый газ с температурой $\sim 10^4$ К (как в хромосфере Солнца) эффективно охлаждается за счет излучения в спектральных линиях при отсутствии внешней энергетической подпитки. В условиях обволакивания газового хвоста ударной волны в КГ горячим корональным газом, охлаждение теплой фракции газа реализуемо в хвосте ударной волны в наиболее плотных областях, образующихся за счет турбулентности (§ 5).

Время коллапса газа в оболочках ОВС плотностью $n_0 \sim (1 - 3) \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$ [10, с. 478] согласно формуле (7) $t_k \approx (2 - 3) \cdot 10^6$ лет.

Время воспроизводства сгустка $\Sigma t \approx 6 \cdot 10^7$ лет сравнимо с характерным временем динамических процессов в межзвездном газе $\leq 10^8$ лет [10, с. 86]. При орбитальной скорости $v_0 \sim 4 \cdot 10^5$ м/с (2) газ, нагретый ударной волной, отечет на расстояние $d = v\Sigma t \approx 30$ кпк, что вдвое превышает диаметр сферических сгустков в радио-кругах ~ 15 кпк и сравнимо с масштабом «шеек» ~ 30 кпк (рис. 1).

3. Структура газовых корон галактик

В газе КГ выделяются две фракции (теплая и горячая), отличающиеся не только температурой, но и масштабом, динамикой, а также обилием *тяжелых элементов* (ТЭ). Линии поглощения в спектрах квазаров в короне соседней галактики Андромеда (М31), подобной нашей Галактике, показывают, что теплый газ с температурой $\sim 10^4$ К присутствует во внут-

ренной короне радиусом ~ 150 кпк в областях, имеющих различную динамику; однородная горячая фракция с температурой $\sim 3 \cdot 10^5$ К (бедная ТЭ) проявляется в пределах внешней короны радиусом ~ 300 кпк [5].

В короне М31 выделяются 43 линии поглощения ионов, в том числе во внутренней короне – линии ионов Si II, Si III, Si IV, C II на УФ длинах волн $\lambda_{uv} = 1140 - 1800 \text{ \AA}$ [5]. Согласно закону Вина (1) температура теплой фракции газа во внутренней короне $T \approx (2 \pm 0,4) \cdot 10^4$ К.

Теплый газ динамичен, что связывается с ударными волнами сверхновых, которые могли обогатить газ внутренней короны ТЭ; несколько поглотителей излучения в линиях ТЭ пространственно и кинематически близки к карликовым галактикам – спутникам М31 [5].

ТЭ присутствуют во внутренней короне М31 радиусом $\sim 0,15$ Мпк; их концентрация во внешней короне радиусом $r_k \sim 0,3$ Мпк на удалении $> 0,15$ Мпк резко падает с высотой [5]. Из-за обедненности внешней короны ТЭ ее излучение трудно наблюдаемо (она проявляется лишь в линиях поглощения в спектрах квазаров), что занижает радиус КГ, определяемый обычными спектроскопическими методами $r_k' \sim 0,1$ Мпк [10, с. 81] в $r_k/r_k' \approx 3$ раза. Данный фактор следует учитывать при определении вклада межгалактического газа в скрытую массу (проявляющуюся в вириальной и гравитационной массе корон галактик).

Однородный горячий газ во внешней короне М31 (проявляющийся в линиях поглощения C IV и O VI в спектрах квазаров) имеет температуру $\sim 3 \cdot 10^5$ К [5]. Принятая оценка плотности горячего коронального газа исходя из излучения в спектральных линиях $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ и его температуры $\sim 5 \cdot 10^5$ К [18, с. 101]; [13, с. 1217], что близко к максимуму кривой радиационных потерь межзвездного газа $\sim 6 \cdot 10^5$ К [10, с. 477].

Остывшее газовое облако плотностью $n \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ согласно (7) осядет в Галактику за $t_k \approx 10^9$ лет. Время остывания горячего газа в КГ плотностью $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ достигает $10^9 - 10^{10}$ лет [18, с. 402], что превышает оценку (7) и сравнимо с возрастом галактик, т.е. горячий корональный газ не успеет осесть в галактику. Более того, эффект Зельдовича-Сюняева указывает на продолжающийся разогрев коронального газа; в межгалактическом газе (в скоплениях галактик) средняя температура электронов выросла втрое с $7 \cdot 10^5$ К в эпоху $z \sim 1$ до $2 \cdot 10^6$ К в настоящее время [21].

У 30% близких спиральных галактик обнаружено протяженное гало УФ излучения на расстояниях в несколько оптических радиусов от центра [22], т.е. несколько десятков кпк. Данное УФ излучение может вызывать свечение облаков теплого газа гало (внутренней короны). Так, в наиболее плотных внутренних областях гало газ охлаждается и теряет равновесие, что приводит к появлению потоков с температурой $\sim 10^4$ К, падающих на центр галактики [18, с. 402]. Сравнимая температура $\leq 10^4$ К у межоблачной среды (теплые области HI) межзвездного газа [10, с. 86].

Заметим, что тепло-горячий газ с температурой $(0,3 - 1,4) \cdot 10^5$ К, (сравнимой с температурой газа в гало Галактики $\sim 10^5$ К [10, с. 85]), излучающей согласно закону Вина в области максимума спектра на длинах волн $\lambda \approx 20 - 91$ нм (далекий УФ), практически полностью поглощает межзвездный водород (и гелий) [9, с. 221], из-за чего он трудно наблюдаем.

4. Проявления сверхновых в коронах галактик

Взрывы сверхновых наблюдаются не только в центре и диске галактик, но и на их периферии, а также в галактиках – спутниках, обращающихся в их коронах. Например, сверхновая SN 1987 A вспыхнула в 1987 в Большом Магеллановом Облаке [7, с. 434], т.е. галактике – спутнике нашей Галактики [13, с. 1224]. В эллиптических галактиках (образующихся при слиянии галактик [8, с. 342]) сверхновые Ia вспыхивают преимущественно на периферии [7, с. 433]. Сверхновые могут вспыхивать в звездных потоках, связанных с галактиками – спутниками, однако это достаточно редкое явление при частоте вспышек сверхновых $\sim 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ в обильном потоке (§ 6).

Оболочки ОВС включают систему аморфных волокон (проявляющихся в оптическом и радиодиапазоне, а также, возможно, в рентгеновском и γ -излучении), чье магнитное поле тормозит ультрарелятивистские электроны (космические лучи), генерируя синхротронное излучение [6, с. 485]. Оптическое изображение туманностей, образованных ударными волнами, имеет волокнистую структуру. Для них характерно нетепловое радиоизлучение (синхротронной природы) [9, с. 172].

На присутствие сверхновых в КГ указывает целый ряд эффектов. Во-первых, сверхновые обогащают корональный газ ТЭ. Так, присутствие в КГ элементов тяжелее гелия связывают со взрывами сверхновых [10, с. 81], в том числе во внутренней короне радиусом $\sim 0,15$ Мпк [5].

Во-вторых, сверхновые могут нагревать межгалактический газ [5], на что указывает сходство температуры $\sim 10^6$ К и концентрации газа $\sim 10^{-3}$ см $^{-3}$ в старых ОВС [10, с. 86] и КГ [10, с. 81]. Нагрев коронального газа – продолжающийся динамический процесс. Эффект Зельдовича-Сюняева показывает, что в межгалактическом газе температура растет с эпохи $z \sim 1$ по настоящее время [21]. Нагреву межгалактического газа начиная с эпохи $z \sim 1$ может способствовать оседание мелких галактик в коронах более крупных. Так, скопления галактик формируются в сравнимую эпоху $z \leq 1$ [7, с. 545].

Горячий газ внешней короны радиусом $\sim 0,3$ Мпк, бедной ТЭ [5], могут нагревать субкосмические лучи (низкоэнергетичные космические лучи с энергией до $< 10^5$ эВ), излучаемые галактикой, а также сверхновыми в ее короне. Межзвездный газ нагревают субкосмические лучи и ударные волны [10, с. 86], однако во внешней короне не наблюдаются движения газа, характерные для внутренней короны радиусом $\sim 0,15$ Мпк, связываемые с ударными волнами от взрывов сверхновых [5].

В-третьих, ударные волны, распространяющиеся в межгалактическом газе, приводят к доплеровскому сдвигу спектральных УФ линий ТЭ в теплом газе оболочек ОВС. Так, в короне галактики М31 теплый газ с температурой $\sim 2 \cdot 10^4$ К динамичен на удалении $\leq 0,15$ Мпк, что связывается с взрывами сверхновых [5]. От радио-кругов наблюдается УФ излучение ионов (О II, Mg II, Ne III), с температурой $\sim 10^4$ К, уширенное динамикой газа (градиент и дисперсия скорости $\sim 2 \cdot 10^5$ м/с обусловлены ударной волной) [3] (§ 3). Сравнимую температуру $(1 - 6) \cdot 10^4$ К и скорость $(1 - 4) \cdot 10^5$ м/с имеет газ (в виде конденсаций) за фронтом ударных волн ОВС [10, с. 478].

В-четвертых, оболочки ОВС включают систему аморфных волокон, проявляющихся в оптическом и радиодиапазоне. Напряженность магнитного поля в волокнах $\sim 10^{-3}$ Э тормозит ультрарелятивистские электроны, которые генерируют синхротронное излучение [6, с. 485].

В соответствующих диапазонах излучают КГ. Так, радиоизлучение присуще коронам радиогалактик. Некоторые радиогалактики (Е-галактики) имеют протяженные оптические оболочки (короны) [7, с. 213]. Радио-круги в коронах излучают в оптическом диапазоне [3].

В-пятых, ОВС могут излучать в рентгеновском и γ -диапазоне [6, с. 485]. ОВС – источники рентгеновского излучения с температурой $\sim 10^6$ К [10, с. 478]. Также в областях концентрации скрытой массы (проявляющейся в гравитационной массе корон галактик и их скоплений) наблюдается рентгеновское и γ -излучение [19]. Например, рентгеновская светимость корон крупных спиральных S-галактик (чья масса на порядок выше массы типичных галактик): NGC 266 $\sim 4 \cdot 10^{40}$ эрг/с [23]; у NGC 1961 и NGC 6753 светимость корон $\sim 6 \cdot 10^{40}$ эрг/с [24], что на порядок выше рентгеновской светимости нормальной спиральной галактики $\sim 3 \cdot 10^{39}$ эрг/с (оптической светимостью $\sim 10^{10} L_{\odot}$) [8, с. 390] и сравнима с мощностью генерации *космических лучей* (КЛ) в Галактике $10^{40} - 10^{41}$ эрг/с [9, с. 244].

В-шестых, одним из основных источников КЛ являются сверхновые [6, с. 474]. КЛ образуют ударные волны, порождаемые сверхновыми и оболочками звезд с сильным звездным ветром [9, с. 245]. КЛ – источник синхротронного радиоизлучения (электроны) и γ -излучения (протоны), индикатором которых служит γ -излучение, возникающее за счет распада

нейтральных пионов, образующихся при столкновении КЛ с частицами межгалактического газа [6, с. 474].

На присутствие источников КЛ в КГ указывает ряд эффектов. Так, имеется корреляция между распределением скрытой массы, проявляющейся в линзировании (концентрирующаяся в коронах галактик и их скоплениях), и γ -излучением в области 1 – 10 ГэВ, имеющим спектральный индекс $1,8 \pm 0,2$ [25]. Сравнимую энергию и спектральный индекс в области максимальной плотности потока 1 – 10 ГэВ имеют КЛ [6, с. 472].

Присутствие источников КЛ в КГ может проявляться в энергетическом спектре КЛ высоких энергий. Расширение ударных волн ОВС, усиленных звездным ветром голубых звезд в звездных потоках, в разреженной межгалактической среде может происходить с более высокой динамикой, чем в межзвездной среде галактик (§ 5). Тем самым КЛ, образуемые ударными волнами в КГ, могут ускоряться до более высокой энергии, что может проявляться в изменении их спектрального индекса. Так, в энергетическом спектре КЛ наблюдается излом в области $10^{18} - 10^{19}$ эВ [13, с. 1173] (рис. 2). Предполагается, что ультрарелятивистские КЛ с энергией $>10^{17}$ эВ имеют внегалактическое происхождение [6, с. 474].

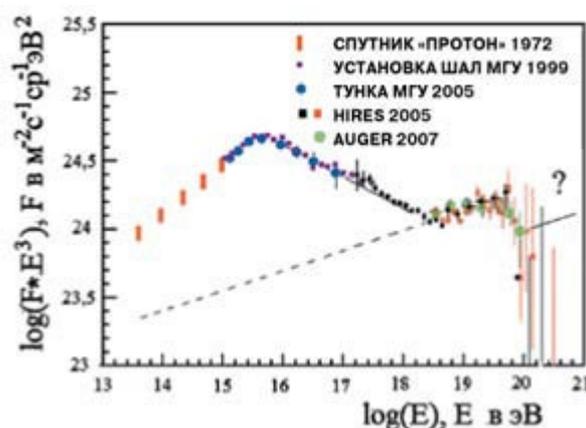


Рис. 2. Энергетический спектр космических лучей высоких энергий

Генерация КЛ ударными волнами сверхновых и звездным ветром голубых звезд [9, с. 245] в звездных потоках в разреженной межгалактической среде корон нашей и окружающих галактик, возможно, может объяснять наблюдение отдельных частиц КЛ с энергией $\geq 10^{20}$ эВ (рис. 2), превышающей предел Грайзена – Зацепина – Кузьмина $5 \cdot 10^{19}$ эВ, обусловленный взаимодействием КЛ с фотонами *микроволнового фонового излучения* (МФИ), сопряженным с рождением пионов. Средняя дистанция гашения энергии частиц выше данного предела – 50 Мпк сопоставима с масштабом сверхскоплений галактик 20 – 100 Мпк; наша Галактика расположена в Местном сверхскоплении [6, с. 530], т.е. КЛ с энергией $\geq 10^{20}$ эВ, образованные ударными волнами в коронах галактик в масштабе Местного сверхскопления, не успеют рассеять фотоны МФИ.

5. Ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром

Радио-круги связываются с ударными волнами сверхновых [3] и околозвездными оболочками массивных голубых звезд [4]. Так, ударные волны образуют сверхновые и звезды с сильным звездным ветром [9, с. 245]. В условиях звездообразования в звездных потоках в КГ реализуема комбинация данных факторов. С одной стороны, сверхновые выбрасывают значительную массу ТЭ. С другой стороны, УФ-излучение голубых звезд – гигантов, охватываемых фронтом ударной волны ОВС в звездных потоках, может ускорять обогащенный ТЭ газ за счет резонансного рассеяния света в линиях ионов.

Образование некоторых туманностей связывается с совокупным действием звездного ветра звезды или ассоциации звезд и взрывов сверхновых [9, с. 173]. В разреженном межгалактическом газе ударные волны медленнее нагребают газ (который их тормозит) и могут распространяться на большее расстояние ~ 10 кпк, проявляясь, в том числе в радиодиапазоне за счет синхротронного излучения (§ 4). Например, радиоизлучение S-галактики NGC 4217, похожей на Млечный Путь, выявило магнитное поле, простирающееся за пределы диска галактики на расстояние ~ 10 кпк, в том числе в виде двух шарообразных образований – так называемые «суперпузыри» (также наблюдаемые в других галактиках). «Суперпузыри» обнаружены в местах, где рождаются звезды взрываются сверхновые [26].

На периферии Галактики (в гало) наблюдаются т.н. галактические фонтаны, выбрасывающие горячий газ с температурой $\sim 10^6$ К на сотни парсек над галактической плоскостью, образуя долгоживущие ($\sim 10^7$ лет) полости разреженного горячего газа с температурой $\sim 10^6$ К с концентрацией $\sim 10^{-3}$ см $^{-3}$. При достаточной частоте взрывов сверхновых часть межзвездного газа может оттекать от галактик в межгалактический газ, образуя галактический ветер [10, с. 86]. Разреженный горячий газ внутри ОВС практически не остывает за время ее существования и поддерживает расширение оболочек на поздних стадиях [18, с. 303]. При этом пекулярные скорости межзвездного газа поддерживает звездный ветер [10, с. 87].

Межзвездный газ содержит туманности, образованные очень сильными (число Маха $\sim 10^4$) ударными волнами, созданные звездным ветром и вспышками сверхновых и новых звезд, где газ разогрет до $10^6 - 10^7$ К [10, с. 86]. Туманности, созданные ударными волнами, достигают диаметра 100 – 300 пк [9, с. 173]. Для них характерно нетепловое радиоизлучение (синхротронной природы) [9, с. 172]. Образование некоторых туманностей связывается с совокупным действием взрывов сверхновых и звездного ветра звезды или ассоциации звезд спектральных классов ОВ [9, с. 173].

Звезды спектральных классов О и В (голубые звезды – сверхгиганты светимостью $\sim 10^4 L_{\odot}$ с сильным звездным ветром [7, с. 425], образующим вокруг звезд оболочки [6, с. 67]), имеют эффективную температуру $(1 - 5) \cdot 10^4$ К [7, с. 611] с учетом излучения в спектральных линиях [7, с. 610]. Сравнимую температуру $(1 - 6) \cdot 10^4$ К имеют яркие волокна, образующиеся за фронтом ударной волны ОВС, проявляющиеся в оптических линиях ряда элементов [10, с. 478]; оптическое изображение туманностей, образованных ударными волнами, имеет волокнистую структуру [9, с. 172].

В данных условиях возможно резонансное рассеяние света голубых звезд в линиях ионов ТЭ в волокнах в оболочке ОВС, оказывающее давление на газ. Так, звездный ветер горячих звезд связывается с давлением света в спектральных линиях ионов ТЭ [6, с. 67].

Состав вещества в системе волокон в оболочке ОВС близок к составу образовавшей его сверхновой [10, с. 478], т.е. ударная волна ОВС распространяется в окружающем газе, перенося ТЭ, содержащиеся в системе волокон. Значительное энерговыделение голубых звезд позволяет их звездному ветру расширять радиус ОВС.

Согласно расчетам, ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в звездных потоках, могут охватывать в разреженном межгалактическом газе за $\sim 10^7$ лет области радиусом ≤ 7 кпк. Данные области могут содержать горячий корональный газ ($\sim 10^6$ К), окруженный оболочкой теплого газа ($\sim 10^4$ К), имеющей волокнистую структуру, обусловленную локальными магнитными полями, вызывающими радиоизлучение релятивистских электронов синхротронной природы. При этом обильные звездные потоки, наполняющие всю орбиту, могут формировать радио-круги (§ 2).

Сравним энерговыделение звезд массой $\sim 10 M_{\odot}$ светимостью $L \sim 10^4 L_{\odot}$ [7, с. 425] с временем жизни $t \sim 10^7$ лет [6, с. 68] со средней энергией сверхновой в расчете на сравнимое время расширения ОВС $\sim 10^7$ лет:

$$\Delta = L t_0 / W = W / W_0, \quad (8)$$

где W_0 – энерговыделение сверхновой; W – энерговыделение звезды.

За время жизни звезд массой $\geq 1 M_{\odot}$ энерговыделение $W \sim 10^{52}$ эрг [40].

При $W_0 \sim 3 \cdot 10^{50}$ эрг [10, с. 477] параметр $\Delta \approx 30$.

Для сравнения, при $L \sim 10^4 L_\odot$; $t \sim 10^7$ лет параметр $\Delta \approx 40$, т.е. энерговыделение массивной голубой звезды в 40 раз выше, чем сверхновой.

Заметим, что аналогичную светимость $L \sim 10^4 L_\odot$ обеспечат $\sim 10^4$ обычных звезд типа Солнца светимостью L_\odot . Вместе с тем, оценка (10) показывает, что вклад обычных звезд в формирование радио-кругов ок. 1%.

Оценим массу межгалактического газа, нагретого полусферической ударной волной ОВС (движущейся в короне галактики), ускоренной звездным ветром, и затем оттекшего в хвост ударной волны:

$$M_g = 2\pi r n r^3 / 3, \quad (9)$$

где n – концентрация газа; r – радиус ударной волны.

Плотность межгалактического газа $n \sim 10^{-3}$ см⁻³. В радио-кругах радиус сферических сгустков (ОВС) достигает $r \sim 7,5$ кпк (§ 1), чему соответствует масса нагретого вещества $M_g \approx 2 \cdot 10^7 M_\odot$.

Оценка (9) на 4 порядка выше оценки $M_g < 3 \cdot 10^3 M_\odot$ (12) для сверхновой, т.е. сферический сгусток на радио-круге могут образовать $N_{sn} \sim 10^4$ взрывов сверхновых или $N_b = N_{sn} / \Delta \approx 300$ голубых звезд при $\Delta \sim 30$ (8). Согласно начальному распределению звезд по массам Солпитера (§ 6) доля сверхгигантов массой $10 M_\odot$ (порождающих сверхновые) на порядок меньше, чем голубых гигантов массой $5 M_\odot$, что исключает оценку $N_{sn} \sim 10^4$.

Согласно распределению Солпитера (15) для межгалактического газа доля голубых сверхгигантов, эволюционирующих в сверхновые $\Delta_s \approx 0,1\%$ от числа звезд типа Солнца. Доля голубых гигантов, эволюционирующих в белые карлики (массой $0,9 M_\odot$) $\Delta_s \approx 1\%$.

За время расширения сферического сгустка на радио-круге $\sim 3 \cdot 10^7$ лет в его пределах могут сохраняться *молодые звезды* со сравнимым временем жизни массой до $\leq 10 M_\odot$.

Число массивных звезд массой $\sim 10 M_\odot$ (сверхгигантов), взрывающихся как сверхновые $N_{sn} \sim 30$.

Голубых звезд средней массой $\sim 5 M_\odot$ (гигантов) $N_b \sim 300$.

Звезд массой $\sim 1 M_\odot$ (типа Солнца) $N_b / \Delta_s \approx 3 \cdot 10^4$.

Звезд массой $\sim 0,5 M_\odot$ (красных карликов) $N_g = 10 N_b / \Delta_s \approx 3 \cdot 10^5$.

За период орбиты звездного потока $t_0 \sim 10^9$ лет (§ 2) сохранятся *старые звезды* массой $\leq 2 M_\odot$. Число звезд типа Солнца в сферическом сгустке возрастет в $t_0 / t \approx 30$ раз до 10^6 при числе красных карликов $N_g' = N_g t_0 / t \approx 10^7$.

Радиус ударной волны, распространяющейся в звездном потоке и достигающей ~ 15 кпк в сферическом сгустке, может ограничивать ширина звездного потока ~ 10 кпк, содержащего голубые звезды, чей звездный ветер поддерживает ударную волну. На это указывает диаметр трубок ~ 10 кпк, расположенных между сферическими сгустками на радио-кругах (§ 1).

Число обычных звезд (типа Солнца) в звездном потоке, охваченных расширяющимся ОВС, чей световой поток нагреет соответствующую массу вещества:

$$N_g = v^2 M_g / \delta_{uv} \Delta L L_\odot t, \quad (10)$$

где ΔL – доля света звезд, рассеиваемого ионами; δ_{uv} – доля УФ излучения в спектре звезды; L_\odot – светимость Солнца; t – время движения ударной волны.

Доля излучения звезд, которая может рассеиваться в линиях ионов в движущейся системе волокон ОВС:

$$\Delta L = \Delta v N_i / c, \quad (11)$$

где N_i – число линий ионов; Δv – градиент скорости в системе волокон; c – скорость света.

В динамичной теплой фракции газа во внутренней короне М31 (чьи характеристики сравнимы с теплым газом в радио-кругах) выделяются $N_i = 43$ линии поглощения ионов [5] (§ 3). Скорость расширения системы волокон ОВС (по доплеровскому смещению) $700 - 1500$ км/с [6, с. 485], т.е. градиент скорости $\Delta v \sim 8 \cdot 10^2$ км/с. Доля излучения звезд, рассеиваемого ионами $\Delta L \approx 10\%$, что соответствует принятой оценке доли нетеплового потока энергии звезд, связанной с ускорением звездного ветра $\sim 10\%$ полного потока [6, с. 67].

Диапазон спектральных линий в радио-кругах 280 – 387 нм [3] соответствует УФ диапазону, в котором излучается $\delta_{UV} \sim 0,2$ энергии Солнца [7, с. 594] светимостью $L_{\odot} = 3,9 \cdot 10^{26}$ Вт [7, с. 589]. При $v \sim 2 \cdot 10^5$ м/с [3]; $\Delta L \sim 10\%$ (11); $t \sim 3 \cdot 10^7$ лет (4) и $M_g \sim 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ (9).

Согласно оценке (10) число звезд типа Солнца, чье излучение способно сформировать сферический сгусток на радио-круге $N_g \approx 10^8$.

Данная оценка ($N_g \sim 10^8$) на 2 порядка выше предыдущей оценки числа старых звезд типа Солнца $\sim 10^6$, образующихся в сферическом сгустке за $\sim 10^9$ лет, т.е. вклад звезд типа Солнца в формирование радио-кругов $\sim 1\%$.

В разреженном межгалактическом газе рост массы вещества, нагребенного ударной волной ОВС, замедлен в сравнении с межзвездной средой галактик. Так, плотность газа в КГ $\sim 10^{-3}$ см $^{-3}$ на 3 порядка ниже, чем в межзвездной среде ~ 1 см $^{-3}$. Как следствие, радиус ОВС в условиях звездного ветра в корональном газе может достигать $r \sim 7$ кпк (как в сферическом сгустке в радио-круге), что на 2 порядка больше максимального радиуса ОВС в межзвездной среде галактик ~ 50 пк.

На радиус ОВС и время распространения ударной волны может влиять ряд факторов: масса вещества, нагребенного ударной волной ОВС, масса ТЭ, выброшенных взрывом сверхновой, светимость звезд, охваченных ОВС.

Скорость расширения старого ОВС возрастом $\sim 10^6$ лет падает до ~ 50 км/с [10, с. 477] что на порядок меньше скорости звездного ветра голубых звезд $v \sim 10^3$ км/с [6, с. 67], сравнимой со скоростью расширения ОВС плерионов (содержащих пульсар) $v \sim 10^3$ км/с [6, с. 485]. В данных условиях время расширения ударной волны сверхновой, усиленной звездным ветром $t = r/v \approx 10^7$ лет сравнимо с временем жизни долгоживущих полостей коронального газа в гало Галактики $\sim 10^7$ лет [10, с. 86], а также возрастом сферических сгустков в радио-кругах $\sim 3 \cdot 10^7$ лет (4) при скорости ударных волн в радио-кругах ~ 200 км/с [3], в несколько раз превышающей скорость расширения старых ОВС ~ 50 км/с.

Оценим массу межгалактического газа, нагребенного сферической ударной волной ОВС, исходя из кинетической энергии взрыва сверхновой с учетом ограничения, накладываемого затратами энергии на нагрев газа:

$$M_g < W_0/v^2. \quad (12)$$

Градиент и дисперсия скорости теплого газа в радио-кругах, связываемая с ударной волной $v \sim 2 \cdot 10^5$ м/с [3], что сравнимо с тепловой скоростью протонов $v = (3kT/m_p)^{1/2}$ в корональном газе с температурой $\sim 10^6$ К. При $W_0 \sim 3 \cdot 10^{50}$ эрг [10, с. 477] масса нагребенного газа $M_g < 3 \cdot 10^3 M_{\odot}$.

Оценка (12) на порядок выше массы вещества ОВС в туманности петля Лебедя $\sim 200 M_{\odot}$, нагребенного ударной волной с вдвое большей скоростью $v' \sim 4 \cdot 10^5$ м/с [10, с. 478], что эквивалентно массе $\sim 10^3 M_{\odot}$ при падении скорости v' до v (т.е. ок. 2/3 энергии сверхновой тратится на излучение).

Радиус ОВС, при котором вещество, выброшенное сверхновой, достигнет плотности коронального газа с учетом соотношения (9):

$$r = (3M_g/4\pi m_p n_g)^{1/3}, \quad (13)$$

где M_g – масса газа, выбрасываемого сверхновой; m_p – масса протона.

$M_g \sim 5 M_{\odot}$ [7, с. 435]. При $n_g \sim 10^{-3}$ см $^{-3}$ радиус ОВС $r \approx 60$ пк, что сравнимо с радиусом старых ОВС в межзвездной среде 54 пк [10, с. 477].

Оценка (13) на 2 порядка меньше радиуса сферических сгустков на радио-кругах $\sim 7,5$ кпк (§ 2). После достижения ОВС радиуса ~ 60 пк, при котором плотность и температура внутри и снаружи ОВС сравнимы, ударная волна может распространяться в корональном газе не за счет давления газа внутри ОВС, а за счет кинетической энергии ударной волны, переданной сверхновой, вплоть до достижения радиуса:

$$r' = r(M_g'/M_g)^{1/3}. \quad (14)$$

где M_g' – масса нагребенного газа; r – радиус ОВС при сравнимой плотности газа внутри и снаружи ударной волны.

При $M_g \sim 5 M_\odot$ [7, с. 435]; $M_g' < 3 \cdot 10^3 M_\odot$ (12) *радиус ОВС в межгалактической среде, достижимый при взрыве сверхновой $r' < 0,5$ кпк.*

Дальнейшее расширение ОВС может происходить за счет давления света голубых звезд, охваченных ударной волной, вплоть до радиуса сферического сгустка на радио-круге ~ 7 кпк. Соответственно, оценка (14) накладывает ограничение на концентрацию голубых звезд в звездном потоке в области сферических сгустков на радио-круге $n_b = 1/r'^3 \geq 10$ кпк $^{-3}$.

Согласно распределению Солпитера (15) для межгалактического газа доля голубых звезд среди всех рождающихся звезд $\Delta b \sim 10^{-3}$; требуемая для расширения ОВС *критическая концентрация молодых звезд в звездном потоке* (возрастом $\leq 3 \cdot 10^7$ лет) $n_s = n_b/\Delta b \geq 10^4$ кпк $^{-3}$, т.е. $n_s \geq 10^{-5}$ пк $^{-3}$ при концентрации всех звезд (в т.ч. возрастом $\geq 10^9$ лет) $n_s' \geq 3 \cdot 10^{-4}$ пк $^{-3}$. Для сравнения, на периферии диска Галактики (в окрестности Солнца) плотность звезд $n_s \sim 8$ пк $^{-3}$ [8, с. 387], что на 4 порядка выше.

Ширина звездного потока, образующегося в газовом хвосте галактики – спутника массой $\sim 10^{10} M_\odot$ составляет $d \sim 10$ кпк (§ 2). Сферический сгусток сравнимого диаметра ~ 15 кпк может содержать $N_g \sim 3 \cdot 10^5$ молодых звезд по предыдущей оценке. Средняя концентрация молодых звезд в звездном потоке $n_s = N_g/d^3 \approx 300$ кпк $^{-3}$ ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ пк $^{-3}$) в 30 раз меньше критической величины $n_s \geq 10^4$ кпк $^{-3}$. Расширение ОВС, усиленное излучением голубых звезд, реализуемо в областях повышенной концентрации молодых звезд. Так, газовый хвост, возникающий за ударной волной, имеет турбулентности (рис. 3). Звезды рождаются в уплотнениях газовых облаков (сгустках) плотностью $10^4 - 10^6$ см $^{-3}$ [7, с. 163] массой $1 - 100 M_\odot$ [10, с. 86], т.е. образуются кластеры звезд.

Турбулентности газа могут формироваться в хвосте ударной волны, образуемой как галактикой – спутником, так и сферическим сгустком в звездном потоке, движущимся в межгалактическом газе. В последнем случае возможно воспроизведение сферических сгустков в виде радио-круга (§ 6).

Оценки (12) и (13) также указывают на то, что при превышении радиусом ОВС > 60 пк за фронтом ударной волны (распространяющейся в корональном газе) сформируется область низкого давления, затягивающая газ из окружающей среды, способствуя образованию турбулентного газа в хвосте ударной волны.



Рис. 3 . Газовый хвост Мира А Кита, телескоп GALEX (2007 г.)

Процесс оттекания газа из фронта в хвост ударной волны вокруг движущегося астрофизического объекта иллюстрирует рис. 3. Так, галактики – спутники, движущиеся в корональном газе, имеют газовые хвосты из атомарного водорода (проявляющиеся в радиолинии водорода), которые на порядок протяженнее их газовых корон [11]. Также вокруг звезд с сильным истечением вещества формируется газовая оболочка [6, с. 67]. При движении таких звезд в разреженном газе гало образуется протяженный турбулентный хвост газа, излучающий в УФ диапазоне (рис. 3).

На рис. 3 представлена переменная звезда Мира А Кита массой $\sim 1,2 M_\odot$ светимостью $\sim 10 L_\odot$ [27] с сильным истечением вещества, относящаяся к сферической подсистеме Галактики, летящая в разреженном газе гало со скоростью 130 км/с. Вокруг газовой оболочки, образованной звездным ветром, формируется ударная волна радиусом $\sim 0,5$ пк; протяженность га-

зового хвоста летящей звезды ~ 4 пк (на порядок больше). Горячий газ гало с температурой $\geq 10^5$ К [10, с. 85] постепенно растворяет газовый хвост.

Переменные звезды содержат звездные *шаровые скопления* (ШС) [6, с. 65]. ШС – старые объекты возрастом $\sim 10^9$ лет, относящиеся к типичному населению сферической составляющей Галактики. ШС вращаются в гало Галактики по вытянутым и хаотически ориентированным орбитам [8, с. 387].

Масса ШС $10^4 - 10^6 M_{\odot}$ [6, с. 65]. Сравнимое число $\sim 10^6$ звезд типа Солнца по предыдущим оценкам, могут содержать сферические сгустки в радио-кругах. В процессе звездной динамики часть звезд в звездных потоках, возможно, группируется в звездные скопления. Диаметр ШС 20 – 150 пк [6, с. 65] минимум на 2 порядка меньше диаметра звездных потоков ~ 10 кпк. Так, за счет звездной динамики размер скоплений уменьшается при выбросе части звезд [6, с. 60]. Некоторые звездные скопления в области пересечения звездных потоков могут менять траекторию (гравитационный маневр), пополняя их число в сферической составляющей Галактики.

6. Условия формирования радио-кругов и радио-трубок

Радио-круги содержат сферические сгустки диаметром ~ 15 кпк и более протяженные трубки диаметром ~ 10 кпк длиной ~ 30 кпк (§ 1). Рассмотрим условия формирования сферических сгустков и трубок с учетом начального распределения звезд по массам.

Распределение рождающихся звезд по массам описывает начальная функция масс Солпитера, имеющая степенной вид:

$$N(M) \sim 1/M^{\gamma}, \quad (15)$$

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

В разреженной межгалактической среде показатель функции Солпитера может достигать $\gamma = 3,85$ (показатель стандартной функции Солпитера $\gamma = 2,35$) [20]. При $\gamma = 3,85$ вероятность рождения звезды обратно пропорциональна примерно четвертой степени ее массы.

Как следствие, среди звезд, рожденных в межгалактической среде, наиболее распространены звезды малой массы $\sim 0,5 M_{\odot}$ (красные карлики) низкой светимости $\sim 0,1 L_{\odot}$, чья доля на порядок выше, чем звезд типа Солнца. Так, у подавляющего числа звезд в сферической подсистеме (гало) Галактики масса $< 0,85 M_{\odot}$ [8, с. 387]. Микролинзирование выявило в гало Галактики (на удалении ≤ 50 кпк) объекты звездной массы $0,15 - 0,9 M_{\odot}$ средней массой $0,5 M_{\odot}$; их суммарная масса достигает $\sim 20\%$ массы гало [28].

Газ, нагретый ударной волной вокруг корон галактик – спутников или ОВС, усиленной звездным ветром голубых звезд, оттекая в хвост и охлаждаясь за счет излучения в спектральных линиях, может частично коллапсировать в звезды (§ 2). Напомним, что радио-круги излучают в оптическом и ближнем ИК диапазоне, что связывается со слабым звездным континуумом [3]. Среди рождающихся молодых звезд могут появляться голубые звезды, в том числе эволюционирующие в сверхновые (согласно распределению Солпитера).

Масса вещества, нагретого ударной волной сверхновой, усиленной звездным ветром голубых звезд (в пределах сферического сгустка) $\sim 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ превышает массу молодых звезд средней массой $\sim 0,5 M_{\odot}$, рождающихся в сферическом сгустке $\sim 1,5 \cdot 10^5 M_{\odot}$ при их числе $3 \cdot 10^5$ (§ 5) на 2 порядка, т.е. *ок. 1% газа, нагретого ударной волной ОВС, может коллапсировать в звезды*, которые могут перезапустить процесс расширения ОВС.

Тем самым, при достижении критической массы газового хвоста галактики – спутника ($\sim 10^7 M_{\odot}$ на погонные ~ 10 кпк) в процессе звездообразования *сферические сгустки в звездных потоках могут периодически воспроизводиться, образуя радио-круг*.

Если масса газа в хвосте галактики – спутника меньше критической величины ($< 10^7 M_{\odot}$ на погонные 10 кпк), концентрация молодых звезд в звездных потоках окажется меньше критической величины $n_s \geq 10^4$ кпк $^{-3}$, требуемой для усиления ударной волны сверхновой звездным ветром соседних голубых звезд (§ 5). В этом случае масштабные сферические сгустки

не смогут образоваться и размер звездного потока может ограничивать размер газовых хвостов галактики – спутника.

Например, корона нашей Галактики содержит десятки карликовых галактик – спутников [14]; некоторые имеют газовые хвосты, чья длина на порядок больше корон [11]. Размер карликовых галактик 1 – 3 кпк [8, с. 389]. При сравнимом масштабе газовых оболочек карликовые галактики могут иметь газовый хвост, образующий звездный поток длиной 10 – 30 кпк. Соответственно, диаметр радио-трубки может ограничивать ширина звездного потока в пределах 1 – 10 кпк, в зависимости от масштаба газовой оболочки галактики – спутника.

Оценим скорость звездообразования в звездных потоках, при которой сформируются радио-круги и радио-трубки. Скорость звездообразования в радио-круге:

$$U_s = N_g N_c / t, \quad (16)$$

где N_c – число сферических сгустков на радио-круге; N_g – число образующихся в нем молодых звезд; t – время образования звезд.

За время расширения ударной волны $t \sim 3 \cdot 10^7$ лет в пределах сферического сгустка на радио-круге образуется $N_g \sim 3 \cdot 10^5$ молодых звезд (включая красные карлики) (§ 5). Число сферических сгустков на радио-круге при их плотной упаковке $N_c \sim 40$ (5).

Скорость звездообразования в радио-круге согласно (16) $U_s \approx 0,4$ звезд в год; темп звездообразования в радио-трубке – менее $<0,4$ звезд в год.

Структуру ORCs могут формировать $N_r = 4$ радио-круга (Рис. 1) при суммарном темпе звездообразования $U_s N_r \approx 1,6$ звезд в год. Для сравнения, в Галактике образуется несколько звезд массой $\sim M_\odot$ в год [6, с. 68], что сравнимо по величине, т.е. *образование радио-кругов может сопровождать звездообразование в звездных потоках, сравнимое со звездообразованием в галактиках*. Так, радио-круги связываются со звездообразованием (§ 1).

Как следствие звездообразования в звездных потоках, несмотря на меньшее число звезд в них, чем в галактиках, светимость молодых звезд в звездных потоках может быть сопоставима со светимостью звезд в галактике. Так, галактики содержат преимущественно старые звезды невысокой массы и светимости (красные карлики [6, с. 489]), вследствие чего типичное соотношение масса – светимость галактик $M/L \approx 10 M_\odot/L_\odot$ [8, с. 389].

Оценим частоту вспышек сверхновых в звездных потоках, при которой может сформироваться радио-круг:

$$I_{sn} = N_{sn} N_c / t, \quad (17)$$

где N_{sn} – число сверхновых, образующих ударную волну; t – ее возраст.

За время расширения сферического сгустка $t \sim 3 \cdot 10^7$ лет в нем может вспыхнуть $N_{sn} \sim 30$ сверхновых (§ 5). При $N_c \sim 40$ (5) *частота вспышек сверхновых в звездном потоке*, образующем радио-круг $I_{sn} \approx 4 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Суммарно в звездных потоках, образующих ORCs, частота вспышек сверхновых $I_{sn} N_r \approx 10^{-4}$ год⁻¹, что почти на 3 порядка меньше средней частоты взрывов сверхновых в Галактике $\sim 0,05$ год⁻¹ [13, с. 1212]. Иными словами, обнаружение вспышки сверхновой в ORCs требует 10 тыс. лет наблюдений.

7. Выводы

1. Теплый газ в радио-круге радиусом $\sim 0,1$ Мпк излучает в УФ линиях, уширенных динамикой газа $\sim 10^5$ м/с. Сравнимую температуру и динамику имеет газ за фронтом ударных волн сверхновых, а также динамичная теплая фракция газа во внутренней короне галактики Андромеда сравнимым радиусом $\sim 0,15$ Мпк, связываемая с ударными волнами сверхновых.

2. Теплая фракция газа во внутренней короне ($\sim 10^4$ К) отличается от горячей ($\sim 10^6$ К) не только температурой и динамикой, но и масштабом, а также обилием тяжелых элементов, что также связывается с ударными волнами сверхновых. Некоторые области теплого газа пространственно и кинематически близки к карликовым галактикам – спутникам, что позволяет связать динамичный теплый газ с оболочками сверхновых, взорвавшихся в галактиках – спутниках и образуемых ими звездных потоках.

3. Взрывы сверхновых и образуемые ими оболочки (проявляющиеся в оптическом и радиодиапазоне; иногда в рентгеновском и γ -диапазоне), позволяет объяснить целый ряд эффектов, наблюдаемых в коронах галактик и их скоплениях, включая разогрев коронального газа и его обогащение тяжелыми элементами, излучение в радио- и УФ-диапазоне, рентгеновское и γ -излучение областей концентрации скрытой массы (вириальной и гравитационной массы корон галактик и их скоплениях), а также изменение спектрального индекса космических лучей в области энергии $10^{18} - 10^{19}$ эВ.

4. Радио-круги излучают в оптическом и ближнем ИК диапазоне, что связывается со светом звезд. Источником звезд в коронах могут являться галактики – спутники, образующие звездные потоки. Звздообразование в звездных потоках может инициировать газ, нагребенный ударной волной и оттекающий в ее хвост (атомарный водород), образуемый газовой короной галактики – спутника, движущейся в корональном газе.

5. Радио-круги сопровождают изогнутые нити радиоизлучения с утолщениями в головах, центры которых ярко светят в оптическом диапазоне, что может указывать на галактики – спутники материнской галактики. При сближении галактики – спутники могут менять траекторию (гравитационный маневр), что объясняет изгиб нитей радиоизлучения.

6. Радио-круги радиусом $\sim 0,1$ Мпк содержат сферические сгустки диаметром ~ 15 кпк, которые могут формировать ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в звездных потоках, охваченных фронтом ударной волны за $\sim 3 \cdot 10^7$ лет.

7. Сферический сгусток на радио-круге диаметром ~ 15 кпк могут сформировать ударные волны ~ 30 сверхновых, усиленные звездным ветром ~ 300 голубых звезд при суммарном числе охваченных ими звезд $\sim 10^7$ при ширине звездного потока ~ 10 кпк.

8. Ударная волна сверхновой, распространяющаяся в разреженном межгалактическом газе на расстояние $\leq 0,5$ кпк, охватит голубую звезду при критической плотности молодых звезд в звездном потоке $\geq 10^{-5}$ пк $^{-3}$, что в 30 раз меньше средней плотности таких звезд в звездном потоке $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ пк $^{-3}$. Усиление ударной волны сверхновой звездным ветром голубых звезд реализуемо в кластерах звезд, образующихся в уплотнениях (сгустках) турбулентного газа в хвосте ударной волны галактики – спутника или сферического сгустка, движущегося в межгалактическом газе.

9. Радио-круг могут сформировать ударные волны сверхновых, усиленные звездным ветром голубых звезд в протяженном звездном потоке возрастом $\geq 10^9$ лет, содержащем $\geq 3 \cdot 10^8$ звезд, образованный галактикой типичной массой $\sim 10^{10} M_{\odot}$. Звездный поток возрастом менее периода орбиты $< 10^9$ лет или массой $\leq 10^{10} M_{\odot}$ может формировать дугу (радио-трубку).

10. Радио-круги включают сферические сгустки диаметром ~ 15 кпк и более протяженные трубки диаметром ~ 10 кпк длиной ~ 30 кпк (структура бус). При превышении критической массы газа в хвосте галактики – спутника ($\geq 10^7 M_{\odot}$ на погонные ~ 10 кпк) в процессе звездообразования сферические сгустки в звездных потоках могут периодически воспроизводиться, образуя протяженный радио-круг. Если плотность газа в хвосте галактики – спутника меньше критической ($< 10^7 M_{\odot}$ на 10 кпк), может формироваться радио-трубка диаметром ≤ 10 кпк длиной ≤ 30 кпк.

11. Распределение звезд по массам в звездных потоках может описывать начальная функция масс Солпитера (для межгалактической среды показатель функции $\gamma = 3,85$), что подтверждают данные микролинзирования, выявившего в гало объекты звездной массы средней массой $\sim 0,5 M_{\odot}$.

12. Радио-круг может формироваться при скорости звездообразования в звездном потоке 0,4 звезд в год; в системе радио-кругов до 1,6 звезд в год, что сравнимо с темпом звездообразования в типичных галактиках.

Литература

1. R.P. Norris, J.D. Collier, R.M. Crocker, et al. MeerKAT uncovers the physics of an odd radio circle // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2022. – V. 513. – Is. 1. – P. 1300–1316.
2. B.S. Koribalski, R.P. Norris, H. Andernach, L. Rudnick, S. Shabala, M. Filipović, E. Lenc. Discovery of a new extragalactic circular radio source with ASKAP: ORC J0102–2450 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* – 2021. – V. 505. – Is. 1. – P. L11–L15.
3. A.L. Coil, S. Perrotta, D.S.N. Rupke, et al. Ionized gas extends over 40 kpc in an odd radio circle host galaxy // *Nature*. – 2024. – V. 625. – P. 459–462.
4. C. Bordiu, M. D. Filipović, G. Umana, et al. MeerKAT reveals a ghostly thermal radio ring towards the Galactic Centre // *Astronomy & Astrophysics*. – 2024. – V. 690. – A 53. – pp. 7.
5. N. Lehner, et al. Project AMIGA: The Circumgalactic Medium of Andromeda // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 900:9 – N 1. – 44 pp.
6. *А.М. Прохоров*. Физическая энциклопедия, т. 2. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 703 с.
7. *А.М. Прохоров*. Физическая энциклопедия, т. 4. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1994. – 704 с.
8. *А.М. Прохоров*. Физическая энциклопедия, т. 1. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1988. – 704 с.
9. *А.М. Прохоров*. Физическая энциклопедия, т. 5. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 784 с.
10. *А.М. Прохоров*. Физическая энциклопедия, т. 3. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1992. – 672 с.
11. M.E. Putman, L. Staveley-Smith, K.C. Freeman, B.K. Gibson, D.G. Barnes. The Magellanic Stream, High-Velocity Clouds, and the Sculptor Group. *The Astrophysical Journal*. – 2003. – V. 586. – № 1. – P. 170-194.
12. *С.Ю. Поройков*. Вклад звезд в гало (короне) галактик в оптическое фоновое космическое излучение // *Журнал естественнонаучных исследований*. – 2023. – Т. 8. – № 3. – С. 2-19.
13. *И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов*. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
14. A. Chiti, A. Fre, et al. An extended halo around an ancient dwarf galaxy // *Nature Astronomy*. 2021. – V. 5. – P. 392–400.
15. R. Ibata, B. Gibson. The Ghosts of Galaxies Past // *Scientific American Magazine*. – 2007. – V. 296. – № 4. – P. 40-45.
16. F. Hammer, Y. Yang, F. Arenou, C. Babusiaux, J. Wang, M. Puech, H. Flores. Galactic Forces Rule the Dynamics of Milky Way Dwarf Galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 860:76. – № 1. – 19 pp.
17. *А.В. Тутуков, С.В. Верещагин, М.Д. Сизова*. Разрушение галактик как причина появления звездных потоков // *Астрономический журнал*. – 2021. – Т. 98. – № 11. – С. 883-900.
18. D.S.N. Rupke, et al. A 100-kiloparsec wind feeding the circumgalactic medium of a massive compact galaxy // *Nature*. – 2019. – V. 574. – P. 643–646.
19. *А.В. Засов, К.А. Постнов*. Общая астрофизика. 2-е изд. испр. и дополн. Фрязино: Век 2. – 2011. – 576 с.
20. H. Lee, B.K. Gibson, C. Flynn, D. Kawata, M.A. Beasley. Is the initial mass function of low surface brightness galaxies dominated by low-mass stars? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2004. – V. 353. – Is. 1. – P. 113-117.
21. Yi-K. Chiang, R. Makiya, B. Ménard, E. Komatsu. The Cosmic Thermal History Probed by Sunyaev–Zeldovich Effect Tomography // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 902:56. – № 1. – 12 pp.

22. A. Gil de Paz, S. Boissier, B.F. Madore, M. Seibert, Y.H. Joe, A. Boselli, T.K. Wyder, D. Thilker, L. Bianchi, S.-C. Rey. The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2007. – V. 173. – № 2. – P. 185.
23. Á. Bogdán, W.R. Forman, R.P. Kraft, C. Jones. Detection of a luminous hot X-ray corona around the massive spiral galaxy NGC 266 // *The Astrophysical Journal*. – 2013. – V. 772:98. – № 2. – 5 pp.
24. Á. Bogdán, W.R. Forman, M. Vogelsberger, H. Bourdin, D. Sijacki, P. Mazzotta, R.P. Kraft, C. Jones, M. Gilfanov, E. Churazov. Hot X-ray coronae around massive spiral galaxies: a unique probe of structure formation models // *The Astrophysical Journal*. – 2013. – V. 772:97. – № 2. – 18 pp.
25. S. Ammazzalorso, et al. Detection of Cross-Correlation between Gravitational Lensing and γ Rays // *Physical Review Letters*. – 2020. – V. 124. – Is. 10. – 11 pp.
26. Y. Stein, R.-J. Dettmar, R. Beck, J. Irwin, T. Wiegert, A. Miskolczi, Q. D. Wang, J. English, R. Henriksen, M. Radica, J.-T. Li. Transport processes and the X-shaped magnetic field of NGC 4217: off-center superbubble structure // *Astronomy and Astrophysics*. – 2020. – V. 639. – A111. – 25 pp.
27. H.C. Woodruff, M. Eberhardt, T. Driebe, K.-H. Hofmann, K. Ohnaka, A. Richichi, D. Schert, M. Schöller, M. Scholz, G. Weigelt, M. Wittkowski, P. R. Wood. Interferometric observations of the Mira star α Ceti with the VLTI/VINCI instrument in the near-infrared // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – V. 421. – № 2. – P. 703-714.
28. C. Alcock, et al. The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations // *The Astrophysical Journal*. – 2000. – V. 542. – № 1. – P. 281-307.