

Проявления ударных волн вокруг гало галактик – спутников и высокоскоростных облаков в короне Галактики

Manifestations of shock waves around the halos of satellite galaxies and high-velocity clouds in the Galactic corona

Поройков С.Ю.

Канд. физ-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

e-mail: sporoykov@mail.ru

Poroykov S.Yu.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lomonosov Moscow State University", Moscow

e-mail: sporoykov@mail.ru

Аннотация

УФ линии поглощения в спектрах квазаров в короне галактики Андромеда показывают, что в пределах $\leq 0,15$ Мпк горячий газ ($\sim 3 \cdot 10^5$ К) содержит динамичную фракцию теплого газа ($\sim 10^4$ К), связанную с ударными волнами (УВ). УВ формируются вокруг гало галактик – спутников размером ≤ 15 кпк и образуемых ими высокоскоростных облаков размером 2 – 15 кпк суммарной массой $\sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$, оседающих в Галактику $\sim 10^9$ лет, покрывая до 37% неба. Суммарная мощность УВ $\sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с излучается в виде УФ, рентгеновского и γ -излучения, а также космических лучей, электроны в которых (≥ 100 МэВ) тормозит магнитное поле МГД турбулентностей УВ 3 – 7 мкГс, образуя ГГц синхротронное радиоизлучение. Субкосмические лучи (электроны ≤ 100 кэВ) могут нагревать корональный газ (излучающий в области $\sim 0,3$ кэВ) и формировать тормозное излучение в области ~ 30 кэВ. Данные виды излучения в эпоху оседания мелких галактик в коронах более крупных при $z \sim 0,45 \pm 0,15$ могут вносить вклад в фоновое космическое излучение с суммарной плотностью энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³.

Ключевые слова: короны галактик, высокоскоростные облака, ударные волны в плазме.

Abstract

UV absorption lines in the spectra of quasars in the corona of the Andromeda galaxy show that within ≤ 0.15 Mpc the hot gas ($\sim 3 \cdot 10^5$ K) contains a dynamic fraction of warm gas ($\sim 10^4$ K) associated with shock waves (SW). SW are formed around the halos of satellite galaxies ≤ 15 kpc in size and the high-velocity clouds they form, 2–15 kpc in size, with a total mass of $\sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$, settling into the Galaxy in $\sim 10^9$ years, covering up to 37% of the sky. The total power of the SW of $\sim 2 \cdot 10^{42}$ erg/s is emitted in the form of UV, X-ray and gamma radiation, as well as cosmic rays, the electrons in which (≥ 100 MeV) are braked by the magnetic field of MHD turbulences of the SW of 3 – 7 μ G, forming GHz synchrotron radio emission. Subcosmic rays (electrons ≤ 100 keV) can heat the coronal gas (emitting at ~ 0.3 keV) and form bremsstrahlung in the region of ~ 30 keV. These types of radiation from the era of settling of small galaxies in the coronas of larger ones at $z \sim 0.45 \pm 0.15$ can contribute to the background cosmic radiation with a total energy density of $\sim 10^{-4}$ eV/cm³

Keywords: galactic coronas, high-velocity clouds, plasma shock waves.

Введение

В *короне Галактики* (КГ) присутствуют галактики – спутники, как карликовые галактики массой $\leq 10^7 M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ – масса Солнца) [1, с. 389], так и средние галактики массой до $\leq 10^{10} M_{\odot}$ суммарной массой $\sim 2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ [2, с. 1224], которые постепенно разрушаются в межгалактической среде материнской Галактики [3]. Разрушение галактик – спутников происходит за счет приливных сил и может коррелировать со вспышками звездообразования, приводящими к образованию звездных потоков [4]. По состоянию на 2023 г. в КГ выявлено ок. 60 карликовых галактик и более 30 звездных потоков. В звездных потоках $10^4 - 10^8$ звезд [5].

Газ в гало галактик – спутников формирует *высокоскоростные облака* (ВСО) атомарного водорода (проявляющиеся в радиолинии водорода 21 см) суммарной массой $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ [6] размером 2 – 15 кпк, движущиеся со скоростью $v \sim 90 \pm 20$ км/с [6]; [7], сравнимой со скоростью звука в корональном газе $a \sim 70$ км/с (§ 1), чему соответствует число Маха $M = v/a \sim 1$, при котором аэродинамическое сопротивление максимально, что обусловлено переходом к турбулентному режиму течения [1, с. 165], т.е. ударные волны ВСО в корональном газе могут порождать турбулентности.

Турбулентности также могут возникать в «хвосте» ударных волн, образующихся вокруг газовых гало (корон) галактик – спутников, движущихся в газе КГ. Кинетическая энергия *магнитодинамических* (МГД) турбулентностей трансформируется в энергию *магнитного поля* (МП) с индукцией 3 – 7 мкГс (§ 1).

Рассеяние электронов *космических лучей* (КЛ) МП МГД-турбулентностей может генерировать синхротронное радиоизлучение в области максимума спектра 0,25 – 0,6 ГГц (0,5 – 1 м). Сравнимые параметры 0,1 – 1 ГГц имеет синхротронное радиоизлучение протяженных источников в радио-гало масштаба ~ 2 Мпк [8], обусловленное торможением релятивистских электронов в МП ~ 1 мкГс [9] (§ 1).

Ударные волны в КГ также связываются с остатками сверхновых, присутствие которых обосновывается присутствием в межгалактическом газе *тяжелых элементов* (ТЭ) [10]. Вместе с тем, источником ТЭ в КГ также могут являться планетарные туманности, возникающие в процессе эволюции звезд массой 0,8 – 5 $M_{\odot}$. Так, старые звезды и планетарные туманности относятся к типичному населению гало [1, с. 387]. Микролинзирование выявило в КГ объекты массой 0,15 – 0,9 $M_{\odot}$ [11], что соответствует массе старых звезд низкой светимости, включая красные карлики массой 0,15 – 0,5 $M_{\odot}$ и белые карлики массой 0,6 – 0,9 $M_{\odot}$ суммарной массой $\sim 10^{11} M_{\odot}$ [12], что позволяет объяснить обилие ТЭ в КГ (§ 6).

Исходя из суммарной массы ВСО $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ [6] при их оседании в Галактику может выделяться значительная гравитационная энергия $\sim 10^{60}$ эрг, трансформирующаяся в энергию ударных волн. Ударные волны ВСО в КГ могут ускорять КЛ мощностью $\sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с, а также субкосмические лучи ≤ 100 кэВ мощностью $\sim 10^{42}$ эрг/с, способные нагревать газ в КГ, образующий тепловой спектр излучения в области $\sim 0,3$ кэВ, а также формировать тормозное излучение (электронов) с экстремумом в области ~ 30 кэВ (§ 8).

Ударные волны ВСО в КГ могут ускорять КЛ, проявляющиеся в синхротронном радиоизлучении, и формировать широкий спектр излучения от оптического до γ -диапазона. Мощности излучения ударных волн в КГ достаточно для формирования *фонового космического излучения* (ФКИ) в соответствующих диапазонах. Так, оседание небольших галактик в коронах более крупных может коррелировать с формированием скоплений галактик в эпоху $z \leq 1$, что совпадает с разогревом электронного газа в КГ при $z \leq 1$, проявляющимся в эффекте Зельдовича – Сюняева. При этом излучение КГ в пределах красного смещения $z \geq 0,3$ способно формировать изотропное излучение, присущее ФКИ [12] (§ 9).

Излучение теплого газа ($\sim 10^4$ К) в области ударных волн в КГ в эпоху оседания мелких галактик в коронах более крупных при $z \sim 0,45$ может вносить вклад в ФКИ в УФ диапазоне с плотностью энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³. Ударные волны ВСО в КГ, ускоряющие КЛ, тормозимые МП, могут формировать радиоизлучение в области $\geq 0,7$ м с плотностью энергии $\sim 10^{-7}$ эВ/см³; при рассеянии КЛ частицами межгалактического газа КГ – рентгеновское излучение с плотностью энергии $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ эВ/см³ и γ -излучение с плотностью энергии $\sim 10^{-5}$ эВ/см³ (§ 9).

1. Магнитное поле МГД-турбулентностей в космической плазме

МП галактик (проявляющееся в синхротронном излучении) связано с динамикой межзвездного газа [13, с. 681] и ударными волнами в нем [13, с. 682]. В межгалактической среде наблюдаются источники синхротронного радиоизлучения, обусловленные турбулентными процессами и ударными волнами, возникающими в космической плазме. Например, обнаружено синхротронное радиоизлучение на частоте 0,14 ГГц от полосы межгалактической плазмы (радио-гребня) плотностью $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ см⁻³ в МП $\sim 10^{-6}$ Гс между двумя сближающимися скоплениями галактик Abell 0399 и Abell 0401, которые разделяют 3 Мпк [9].

В скоплении галактик Abell 523 находится протяженный диффузный синхротронный источник размером $\sim 1,8$ Мпк, излучающий в области 0,14 – 1,4 ГГц, классифицируемый как радио-гало. Наиболее мощные и протяженные радио-гало находятся в массивных и ярких рентгеновских скоплениях и демонстрируют корреляцию между излучением радио-гало, а также рентгеновской светимостью внутрикластерной среды и массой скопления галактик [8].

По современным представлениям формирование радио-гало скоплений галактик обусловлено турбулентными процессами и ударными волнами, возникающими в межгалактической плазме при слиянии скоплений галактик [8]. Синхротронное излучение обусловлено торможением релятивистских электронов в МП источников внутри межгалактической плазмы.

В процессе самоорганизации в плазме с *магнитодинамической* (МГД) турбулентностью генерируется МП, вмороженное с поток газа, что объясняется теорией Тейлора. В идеальной сверхпроводящей плазме сохраняются энергия и спиральность МП; топология магнитных силовых линий может изменяться в процессе их пересоединения [14, с. 168], ускоряющего *космические лучи* (КЛ) [13, с. 474].

МГД течения характерны для космической плазмы (в т.ч. межгалактической). Как МГД турбулентность плазмы можно рассматривать движение межзвездных облаков и остатки оболочек сверхновых [14, с. 184]. В разреженной плазме распространяются бесстолкновительные ударные волны; такая плазма избавляется от неравновесности путем возбуждения электромагнитных колебаний и волн, что приводит к тому, что мощность излучения космических объектов, содержащих бесстолкновительную плазму, намного превосходит мощность равновесного излучения; кроме того, плазма становится турбулентной [13, с. 470].

Скорость движения ВСО в КГ $v \sim 90 \pm 20$ км/с [6]; [7] сравнима со скоростью звука $a \sim 70$ км/с (1) в корональном газе, чему соответствует число Маха $M = v/a \sim 1$. Сравнимая скорость ~ 100 км/с у ударных волн старых *остатков вспышек сверхновых* (ОВС). При $M \sim 1$ аэродинамическое сопротивление максимально (волновой кризис), что обусловлено переходом от ламинарного режима обтекания к турбулентному [1, с. 165], т.е. *ударные волны ВСО и ОВС в корональном газе могут породить турбулентности, в которых возникает МП.*

Скорость звука в газе $a = (\gamma p / \rho)^{1/2}$ обусловлена его плотностью ρ и давлением p [15, с. 546]. С учетом уравнения состояния идеального газа $p = nkT$ [1, с. 377] скорость звука в водороде ($\rho = nmp$) представима в виде:

$$a = (\gamma kT / mp)^{1/2}, \quad (1)$$

где γ – показатель адиабаты; k – постоянная Больцмана; T – температура газа; m_p – масса протона.

Для одноатомного газа (ионизованного водорода) $\gamma = 5/3$ [1, с. 25]. В КГ температура газа $T \sim 5 \cdot 10^5$ К [2, с. 1217]; [16, с. 101]. Скорость звука в корональном газе $a \approx 70$ км/с.

Оценим МП, образуемое в оболочке ВСО при оседании в Галактику. В турбулентностях плазмы плотность энергии МП $\omega_m = B^2/2\mu_0$ сравнима с плотностью кинетической энергии ионизованного газа $\varepsilon = \rho v^2/2$ [14, с. 177]. В общем случае, с учетом аэродинамического сопротивления среды $\varepsilon = k_a \rho v^2/2$. С учетом $\rho = n m_p$ плотность энергии МП в оболочке ВСО:

$$\omega_m = k_a n m_p v^2/2, \quad (2)$$

где v – скорость газа; k_a – коэффициент аэродинамического сопротивления.

При $M \sim 1$ аэродинамическое сопротивление максимально [1, с. 165], чему для ударной волны может соответствовать $k_a \sim 2$ [17, с. 12].

В КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ [2, с. 1217]; [16, с. 101]. Плотность энергии магнитного поля в оболочке ВСО $\omega_m \approx 0,2 - 0,3$ эВ/см 3 .

Начальная скорость ВСО в период его формирования в окрестности галактики – спутника $v \leq 500$ км/с [6] может превышать первую космическую скорость для КГ ~ 300 км/с (§ 7), что соответствует числу Маха $M = v/a \leq 6$. При высоких числах Маха аэродинамическое сопротивление газа снижается [1, с. 165], чему может соответствовать $k_a \sim 1$. Плотность энергии магнитного поля в ударной волне вокруг галактики – спутника, а также на поверхности ВСО в период их формирования $\omega_m \approx 0,5 - 0,8$ эВ/см 3 .

Для сравнения, плотность кинетической энергии турбулентностей межзвездного газа в Галактике сравнима с плотностью энергии МП [13, с. 681] и КЛ ~ 1 эВ/см 3 [13, с. 471], что сопоставимо по величине.

Оценим индукцию МП в оболочке ВСО:

$$B = v(k_a \mu_0 n)^{1/2}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

При $v \sim 90 \pm 20$ км/с [6]; [7]; $k_a \sim 2$; $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ в КГ магнитное поле в оболочке ВСО $B \approx 3 \pm 0,6$ мкГс, что сравнимо с МП Галактики $2 - 3$ мкГс [13, с. 682]; $2,2 \pm 0,4$ мкГс [15, с. 181].

Начальная скорость ВСО в период формирования $v \leq 500$ км/с [6]. При $k_a \sim 1$ в КГ магнитное поле в ударной волне в окрестности галактики спутника $B \approx 7 \pm 1$ мкГс.

В чрезвычайно разреженной космической плазме возможно распространение бесстолкновительных ударных волн [14, с. 210]. Масштаб ширины бесстолкновительных ударных волн:

$$d = c/\omega_l, \quad (4)$$

где c – скорость света; ω_l – плазменная (ленгмюровская) частота [14, с. 210].

Частота ленгмюровских волн в плазме:

$$\omega_l = (4\pi n e^2 / \varepsilon_0 m_e)^{1/2}, \quad (5)$$

где m_e , e – масса и заряд электрона; n_e – концентрация электронов [1, с. 328]; ε_0 – электрическая постоянная.

В КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ [2, с. 1217]; [16, с. 101]. В ударных волнах в плазме концентрация электронов слабо меняется (в отличие от концентрации ионов) [14, с. 209], т.е. $n_e \approx n$.

Плазменная частота $\omega_l \approx 10$ кГц.

Согласно (4) ширина ударных волн в корональном газе $d \approx 30$ км.

Ударные волны в плазме ускоряют КЛ; при этом МП турбулентностей тормозит ультрарелятивистские электроны с образованием синхротронного излучения. Частота синхротронного излучения:

$$\nu_s = (3eH/4\pi mc)(E/mc^2)^2, \quad (6)$$

где H – напряженность магнитного поля; E – энергия частиц [15, с. 533].

Частота синхротронного излучения в области максимума спектра [15, с. 533]:

$$v_s = 0,29v_c = 4,6 \cdot 10^{-6} H E^2 [\text{ЭВ}]. \quad (7)$$

Энергия КЛ в области максимума энергетического спектра $E \sim 0,4 \pm 0,1$ ГэВ [13, с. 472], в т.ч. ультрарелятивистских электронов [2, с. 1176]. Индукция МП в МГД турбулентностях вокруг ВСО $B \sim (3 - 7) \cdot 10^{-6}$ Гс (3) соответствует напряженности поля $H \sim (3 - 7) \cdot 10^{-6}$ Э.

Частота синхротронного излучения ВСО в области максимума спектра $v_s \approx 0,25 - 0,6$ ГГц соответствует длине волны $\lambda = c/v_s \approx 0,5 - 1$ м. Сравнимые параметры имеет синхротронное радиоизлучение протяженных источников в радио-гало масштаба ~ 2 Мпк в диапазоне $0,1 - 1$ ГГц [8] обусловленное торможением релятивистских электронов в МП $\sim 10^{-6}$ Гс [9]. Оценка (7) соответствует диапазону излучения протяженных радиоисточников в коронах радиогалактик $0,1 - 10$ ГГц синхротронной природы [15, с. 214], а также связываемого с ним ФКИ в области $\geq 0,5$ м [14, с. 336] (§ 9).

1. Высокоскоростные облака в короне Галактики

Высокоскоростные облака (ВСО) (high-velocity clouds, HVC) – облака теплого газа с температурой $\sim 10^4$ К массой $\leq 10^7 M_\odot$ суммарной массой $7 \cdot 10^7 M_\odot$ (без учета Магеллановых Облаков) размером $2 - 15$ кпк, которые покрывают $\sim 15\%$ небесной сферы (Рис. 1) исходя из обзора неба Full Sky HI4PI Survey [7]. Самое крупное газовое облако – Магелланов Поток шириной ~ 10 кпк протяженностью ≤ 100 кпк имеет массу $7 \cdot 10^8 M_\odot$ [18].

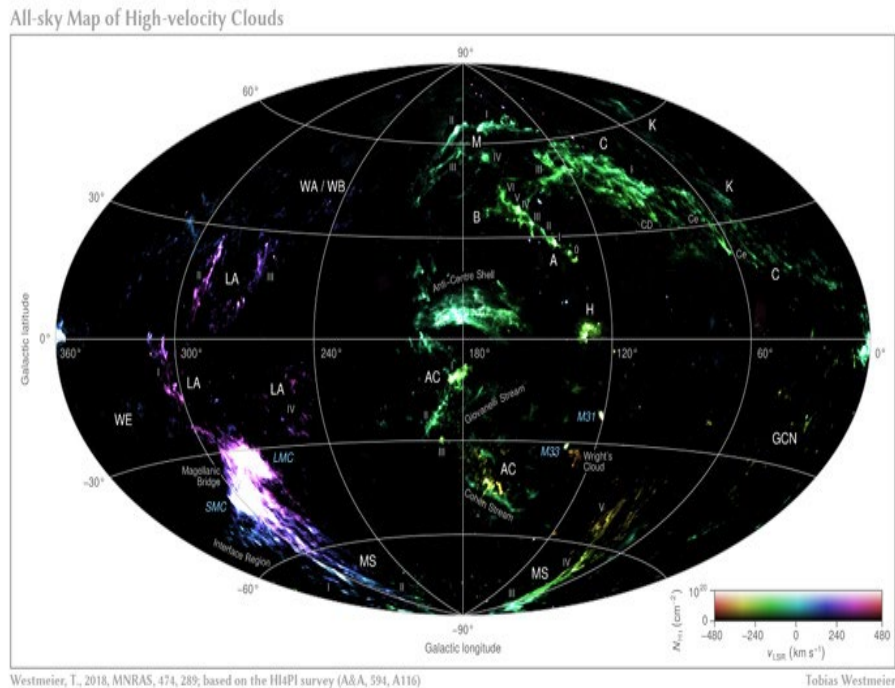


Рис. 1. Карта высокоскоростных облаков в короне Млечного Пути

На рис. 1 представлена карта ВСО Галактики [7], основанная на обзоре неба Full Sky HI4PI Survey и на данных радиотелескопа Effelsberg.

По оценке на основе обновленного каталога Galactic All Sky Survey (GASS) суммарная масса ВСО достигает $\Sigma m_v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ (предполагается, что большинство ВСО рождено Магеллановыми облаками) [6]. С учетом мелких облаков ВСО покрывают ок. 37% неба [19].

Для сравнения, в соседней галактике М31 (Андромеда) динамичная фракция теплого газа, связываемая с ударными волнами (в т.ч. коррелирующая с галактиками – спутниками) покрывает значительную часть небесной сферы в пределах радиуса КГ $\sim 0,15$ Мпк [10].

Облака газа обнаруживаются в радиолинии атомарного водорода 21 см. Ширина спектральных линий большинства облаков указывает на их температуру 9000 К; в областях конденсаций температура 500 К. Внешняя поверхность ВСО ионизована внешним излучением и ударной волной, образующейся при движении в корональном газе. Ионизованная компонента газа проявляется в УФ линиях поглощения ионов OVI, SiIV и CIV. Поскольку ВСО населяют галактические короны, их оболочки из теплого газа могут формировать УФ излучение в окрестности гало. Так, у 30% близких спиральных галактик обнаружено протяженное гало УФ излучения на расстояниях до нескольких оптических радиусов от центра [20].

ВСО движутся по хаотически ориентированным орбитам с лучевой скоростью 70 – 90 км/с [7]; по другим оценкам 90 – 100 км/с [6], что существенно меньше орбитальной скорости в гало (короне) Галактики ~ 300 км/с (38) и обусловлено торможением встречным потоком газа (§ 4). ВСО оседают в диске Галактики, внося вклад в звездообразование [19].

ВСО различаются обилием тяжелых элементов. Химический состав некоторых ВСО сравним с химическим составом окружающих звезд; облака низкой металличности рассматриваются как остатки газа галактик – спутников.

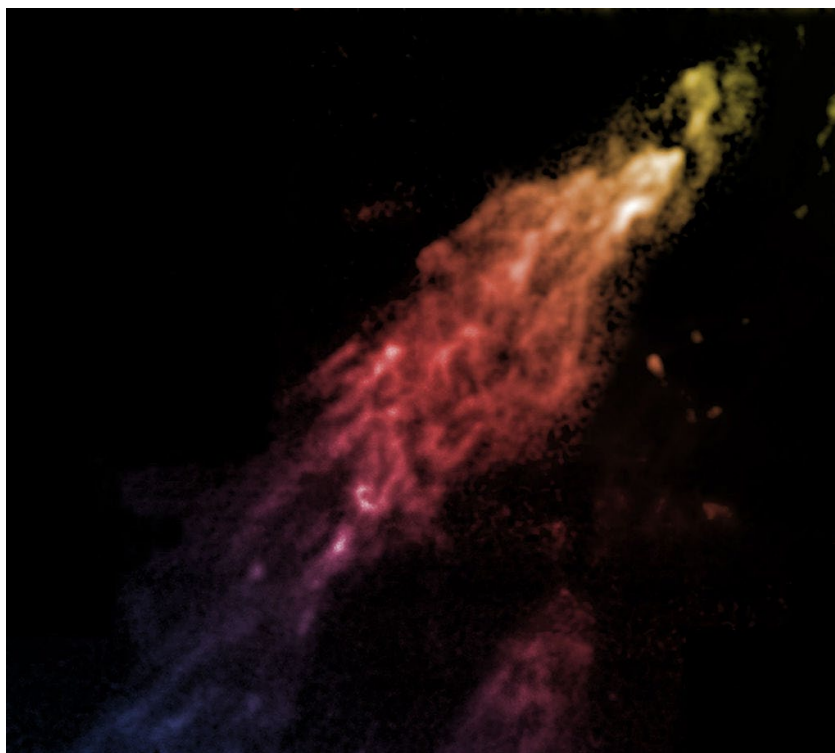


Рис. 2. Облако Смита (2008, телескоп Green Bank)

Крупные ВСО часто состоят из множества более мелких комплексов, что иллюстрирует рис. 2. На рис. 2 представлено облако Смита размером 3 кпк в длину и 1 кпк в ширину, содержащее атомарный водород массой $\sim 10^6 M_{\odot}$. Данное облако движется со скоростью 73 ± 26 км/с на удалении 12 ± 1 кпк от Земли; через 30 млн. лет оно столкнется с диском Млечного Пути под углом 45° , вызвав всплеск звездообразования [21]. Предполагается, что ранее облако Смита уже испытало столкновение с диском Галактики.

3. Вклад высокоскоростных облаков в процесс звездообразования

Столкновение ВСО с диском Галактики может вызывать всплеск звездообразования [19]; [21]. Звездообразование в Галактике носит очаговый характер в пределах областей размером 0,5 кпк [15, с. 648], сравнимым с размером облака Смита 1 кпк [21] и может быть вызвано падением ВСО.

Соотнесем суммарную массу газа ВСО с массой газа в гало (коронах) галактик – спутников и скоростью звездообразования в Галактике. Масса газа в гало галактик – спутников:

$$\Sigma M_g = \Sigma m v t_z / t_v, \quad (8)$$

где $\Sigma m v$ – суммарная масса ВСО; t_v – время их оседания в Галактику; t_z – период захвата галактик – спутников.

Время оседания ВСО в Галактику из ее короны:

$$t_v = R/v, \quad (9)$$

где v – скорость ВСО; R – средняя удаленность галактик – спутников.

При лучевой скорости ВСО $v \sim 90 \pm 20$ км/с [6]; [7] и удаленности Магеллановых Облаков (образующих большинство ВСО) [7] $R \sim 50 - 70$ кпк [2, с. 1224] *время оседания ВСО в Галактику* $t_v \approx (7 \pm 2) \cdot 10^8$ лет.

Захват галактик – спутников гравитацией корон более крупных галактик может коррелировать с временем образования скоплений галактик, происходившим в эпоху $z \leq 1$ [15, с. 545] (§ 9), т.е. $t_z \sim 10^{10}$ лет.

При $\Sigma m v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [6]; $t_v \sim (7 \pm 2) \cdot 10^8$ лет (9) согласно (8) *масса газа в гало (коронах) галактик – спутников* $\Sigma M_g \approx 10^{11} M_\odot$, что сравнимо с массой газа в горячей короне *Большого Магелланова Облака* (БМО) $\sim 10^{11} M_\odot$ [22].

Превышение массы газа над массой звезд в галактиках – спутниках:

$$\eta = \Sigma M_g / \Sigma M_s, \quad (10)$$

где ΣM_s , ΣM_g – суммарная масса звезд и газа в гало галактиках – спутниках.

$\Sigma M_s \sim 2 \cdot 10^{10} M_\odot$ [2, с. 1224]. При $\Sigma M_g \sim 10^{11} M_\odot$ (8) коэффициент $\eta \approx 5$, что сравнимо с известным соотношением долей барионов в межзвездном газе и галактиках – до 4 : 1 [17, с. 81], рассчитанном без учета массы газа во внешней КГ (обедненной ТЭ) радиусом $> 0,1$ Мпк, проявляющейся в линиях поглощения в спектрах квазаров [10].

Скорость потери газа гало (коронами) галактик – спутников:

$$Y_v = \Sigma m v / t_v, \quad (11)$$

где t_v – время оседания ВСО в Галактику.

При $\Sigma m v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [6]; $t_v \sim (7 \pm 2) \cdot 10^8$ лет (9) *скорость потери газа гало (корон) галактик – спутников* $Y_v \approx 10 \pm 2 M_\odot \text{ год}^{-1}$ (преимущественно Магеллановыми Облаками).

Время исчерпания газа в гало (коронах) галактик – спутников:

$$t = M_g / Y_v \delta_g, \quad (12)$$

где M_g – масса галактики – спутника; δ_g – ее весовой вклад в суммарную массу галактик – спутников; η – превышение массы газа над массой звезд.

Масса БМО $M_g \sim 1,4 \cdot 10^{10} M_\odot$ [2, с. 1224]. Параметр $\delta_g = M_g / \Sigma M_s = 0,7$ для $\Sigma M_s \sim 2 \cdot 10^{10} M_\odot$ [2, с. 1224]. При $\eta \sim 5$ (10); $Y_v \sim 10 \pm 2 M_\odot \text{ год}^{-1}$ (11) *время исчерпания газа в гало галактике – спутнике* $t \approx 10 \pm 2$ млрд. лет сравнимо с возрастом галактик ≥ 10 млрд. лет [1, с. 387].

Оценим скорость звездообразования исходя из числа звезд в Галактике $N_s \sim 10^{11}$ [1, с. 386], среди которых наиболее распространены звезды массой $\leq 0,8 M_\odot$ [13, с. 489]. При возрасте галактик $t_g \geq 10^{10}$ лет *средняя скорость звездообразования* $Y_s = N_s M_\odot / t_g \approx 8 M_\odot \text{ год}^{-1}$, что сравнимо со скоростью потери газа галактиками – спутниками $Y_v \approx 10 \pm 2 M_\odot \text{ год}^{-1}$ (11), т.е. подтверждает связь между ВСО и звездообразованием в Галактике.

Максимальная скорость звездообразования достигалась в начале существования галактик; в современной Галактике ежегодно образуется несколько звезд массой $\sim M_\odot$ [13, с. 68], что в несколько раз меньше оценок Y_s и Y_v и может указывать на то, что часть газа ВСО

испаряется в КГ. Так, динамическое давление встречного потока коронального газа может «обдирать» газ из оболочки ВСО (§ 4).

Из соотношения $Y_s = Y_v(1 - \delta_n)$ из (11) следует оценка доли газа ВСО, испаряющегося в процессе оседания в Галактику из ее короны:

$$\delta_n = 1 - tvY_s/\Sigma mv, \quad (13)$$

где Y_s – скорость звездообразования в Галактике; δ_n – доля газа ВСО, испаряющегося в короне Галактики.

При $\Sigma mv \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [6]; $tv \sim 7 \cdot 10^8$ лет (9); $Y_s \sim 2 - 3 M_\odot \text{ год}^{-1}$ [13, с. 68] *доля газа ВСО, испаряющегося в короне* $\delta_n \approx 0,7 \pm 0,07$.

Оценка (13) является максимальной, т.к. скорость звездообразования может понижать не только испарение части газа ВСО, но и испарение части межзвездного газа Галактики в ее гало за счет нагрева субкосмическими лучами, которые, в т.ч., могут генерировать ударные волны ВСО. Так, субкосмические лучи нагревают межзвездный газ [17, с. 86]. На рост температуры коронального газа с эпохи $z \leq 1$ указывает эффект Зельдовича – Сюняева (§ 8).

Напомним, что приведенные оценки рассчитаны исходя из суммарной массы ВСО $\sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ на основе каталога Galactic All Sky Survey [6]. Исходя из обзора неба Full Sky HI4PI Survey (с учетом массы Магелланова Потока) суммарная масса газа ВСО $\sim 7 \cdot 10^8 M_\odot$ [7] на порядок меньше. Скорость звездообразования в Галактике ограничивает суммарную массу оседающих ВСО, что позволяет предложить независимую оценку. Так, при $Y_s \sim 2 - 3 M_\odot \text{ год}^{-1}$ из (11) следует ограничение $\Sigma mv = Y_v tv \geq 2 \cdot 10^9 M_\odot$ при $\delta_n \geq 0$ согласно (13). Из чего следует, что оценка [6] может оказаться завышена в несколько раз; соответственно, оценка [7] – в несколько раз занижена.

4. Динамика торможения высокоскоростных облаков

ВСО размером $2 - 15$ кпк [7] может образовывать газ, нагребенный ударной волной вокруг гало галактик – спутников размером ≤ 15 кпк, движущихся в корональном газе (§ 2).

Оценим равновесную скорость, достигаемую при оседании ВСО в Галактику из ее гало (короны) в условиях равновесия силы гравитации $F_g = GM_g mv/R_g^2$ и динамического давления потока коронального газа $F_d = \kappa S \rho v^2$, где $S = \pi r v^2$; $\rho = n m_p$. Скорость оседания ВСО:

$$v = (1/rvR_g)(GM_g mv/\pi m_p \kappa n)^{1/2}, \quad (14)$$

где G – гравитационная постоянная; M_g , R_g – масса и радиус Галактики с учетом гало (короны) в пределах удаленности ВСО; mv , rv – масса и радиус ВСО; n – концентрация газа.

Поскольку скорость ВСО сравнима со скоростью звука в корональном газе, т.е. аэродинамическое сопротивление максимально при $\kappa \sim 2$ (§ 1).

Оценим скорость ВСО в гало. $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [1, с. 389]; радиус сферического гало $R_g \sim 15$ кпк [1, с. 387]; концентрация газа гало $n \sim 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ [17, с. 85]. Для ВСО Смиа $mv \sim 10^6 M_\odot$; $r \sim 0,5$ кпк [21]. *Равновесная скорость ВСО в гало* $v \approx 100 \text{ км/с}$.

Лучевая скорость облака Смиа $v \sim 73 \pm 26 \text{ км/с}$, движущегося в гало под углом $\theta \sim 45^\circ$ к диску Галактики [21], соответствует полной скорости $v = v/\sin \theta \approx 100 \text{ км/с}$, что сравнимо с оценкой (14).

Оценим скорость ВСО в КГ. Вириальная масса гало (корон) галактик пропорциональна их радиусу $M_k \approx M_g R_k/R_g$ [1, с. 342]. На удалении Магеллановых облаков $R_k \sim 60 \pm 10$ кпк [2, с. 1224] $M_k \approx 8 \cdot 10^{11} M_\odot$. Концентрация коронального газа $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [16, с. 101]. *Равновесная скорость ВСО в короне* $v \approx 100 \text{ км/с}$, что сравнимо с оценкой для гало (14), а также наблюдаемой лучевой скоростью других ВСО $90 - 100 \text{ км/с}$ [6].

ВСО могут формироваться в «хвосте» ударной волны, образуемой гало (короной) галактики – спутника, движущейся в корональном газе со скоростью, сравнимой с орбитальной. Так, например, Магелланово Облако имеет газовую корону [22]. Данный

участок траектории может быть сравним с длиной газового турбулентного «хвоста» ударных волн. В случае БМО радиус гало 15 кпк; газовый хвост ~100 кпк (Магелланов Поток). Радиус молодого ВСО достигает сравнимой величины $r \leq 7$ кпк. В газовом «хвосте» галактики – спутника ВСО могут двигаться в общем потоке газа, увлекаемого ударной волной. При выпадении из потока молодые ВСО могут быстро тормозиться. Для молодого ВСО радиусом $r \leq 7$ кпк массой $mv \leq 10^7 M_{\odot}$ [7] согласно (14) равновесная скорость в КГ $v \approx 100$ км/с.

Оценим время торможения газового облака за счет динамического давления коронального газа. ВСО обладает импульсом mvv , т.е. силе динамического давления коронального газа $F_d = k a S \rho v^2$ (где $S = \pi r^2$; $\rho = n m p$) противостоит сила инерционного торможения $F_i = mvv/\Delta t$.

Время торможения газового облака, движущегося в корональном газе:

$$\Delta t = mv / k a n p n v r^2, \quad (15)$$

где mv , r – масса и радиус облака.

Начальная скорость ВСО, образованного в окрестности галактики – спутника, может соответствовать числу Маха $M \sim 6$ при $ka \sim 1$ (§ 1).

Для облака, чья параметры сравнимы с ВСО Смита ($mv \sim 10^6 M_{\odot}$, $r \sim 0,5$ кпк [21]) в КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [16, с. 101] при движении по круговой орбите *время торможения* $\Delta t \approx 5 \cdot 10^7$ лет. В условиях зависимости $\Delta t \sim 1/v$ (15) за время оседания ВСО в Галактику $t_v \sim 10^9$ лет (9) облако может затормозить до скорости (горизонтальной) $v = v \Delta t / t_v \approx 20$ км/с, что в 5 раз меньше радиальной скорости ВСО ~100 км/с (14). Тем самым, *ВСО могут осесть в Галактику из короны по спиральной траектории.*

Угол наклона траектории ВСО (относительно радиального вектора) $\text{tg } \theta = v/v \approx 0,2$ ($\theta \sim 11^\circ$). При удалении Магеллановых Облаков $R_k \sim 60$ кпк ВСО могут пролетать на среднем расстоянии от центра Галактики $R = R_k \text{ tg } \theta \approx 10$ кпк, что сравнимо с радиусом диска Галактики 15 кпк [1, с. 387], т.е. *ВСО могут пролетать через диск Галактики*, что подтверждает траектория облака Смита (§ 2), способствуя звездообразованию в нем. Так, при прохождении спирального рукава ВСО деформируются и теряют значительную часть массы; маломассивные облака разрушаются [23]. При этом скорость ВСО снижается, и их спиральная траектория стягивается к центру. Максимальная интенсивность звездообразования наблюдается в диске Галактики в пределах кольца радиусом 4 – 8 кпк [1, с. 389], что меньше среднего расстояния первого пролета ВСО от центра Галактики ~10 кпк согласно предыдущей оценке.

Оседание ВСО в Галактику, с одной стороны, сопряжено с нагребанием газа ударной волной. С другой стороны, встречный поток газа, обтекая ВСО, уносит часть его вещества в хвост ударной волны, что иллюстрирует вытянутая форма облака Смита (Рис. 2). Первый процесс увеличивает массу ВСО; второй снижает. Оценим динамику данных факторов.

Масса вещества, нагребенного ударной волной эффективной площадью $S = k_s \pi r^2$ во фронте ВСО, оседающего в КГ по спиральной траектории:

$$M = \pi m p n k_s r^2 R / \cos \theta, \quad (16)$$

где R – исходная удаленность ВСО; θ – угол наклона траектории ВСО к вертикали; k_s – параметр эффективной площади нагребания вещества.

Параметр эффективной площади нагребания вещества зависит от аэродинамического сопротивления тела; в первом приближении $k_s \sim 1$.

Рассмотрим ВСО, сравнимое с облаком Смита радиусом $r \sim 0,5$ кпк [21] при изначальной удаленности, как у Магеллановых Облаков $R \sim 60$ кпк [2, с. 1224]. Концентрация коронального газа $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [16, с. 101]. При $\cos \theta \approx 0,98$ ($\theta \sim 11^\circ$ по предыдущей оценке) *масса нагребенного вещества* $M \approx 2 \cdot 10^6 M_{\odot}$, что сравнимо с массой облака Смита

$\sim 10^6 M_{\odot}$ [21]. Тем самым, часть встречного газа может оседать в оболочке ВСО, т.е. на содержание ТЭ в ВСО может влиять обилие ТЭ в окружающей среде.

Рассмотрим процесс выноса части оболочки ВСО встречным потоком коронального газа, создающим динамическое давление $p = \kappa n v^2$. Силе динамического давления коронального газа на часть оболочки ВСО $F_d = p S_0$ в виде трубки с площадью сечения S_0 противостоит сила гравитационного притяжения ВСО $F_g = G m v m / r^2$ данной части оболочки массой $m \approx \rho v r S_0$, из чего (при $\rho v / \rho = n v / n$) следует критерий радиуса устойчивости оболочки ВСО:

$$r \leq G m v n v / \kappa n v^2, \quad (17)$$

где $n v$ – концентрация газа ВСО; n – концентрация газа короны.

Исходя из параметров облака Смита оценим среднюю концентрацию газа в нем:

$$n v \approx 3 M / 4 \pi r^3. \quad (18)$$

При $m v \sim 10^6 M_{\odot}$; $r \sim 1$ кпк [21]; *концентрация атомарного водорода в облаке Смита* $n v \approx 10^{-2} \text{ см}^{-3}$, что сравнимо с плотностью газа гало $\leq 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ [17, с. 85], т.е. динамическое давление газа гало может его разрушать.

Скорость облака Смита $v \sim 73 \pm 26 \text{ км/с}$ [21] сравнима со скоростью звука в корональном газе $a \sim 70 \text{ км/с}$ (1), т.е. аэродинамическое сопротивление максимально и ударная волна формирует турбулентности, чему соответствует параметр $ka \sim 2$ (§ 1). При $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [16, с. 101] *критический радиус ВСО* $r \leq 1$ пк.

Оценка (17) на 3 порядка меньше радиуса облака Смита $\sim 0,5$ кпк [21], т.е. данное ВСО неустойчиво. Динамическое давление встречного потока газа может «обдирать» оболочку ВСО, что иллюстрирует вытянутая и рыхлая форма облака Смита (Рис. 2). Расчеты на основе темпа насыщения Галактики газом ВСО исходя из темпа звездообразования показывают, что в процессе оседания ВСО в Галактику из ее короны может испаряться до 70% газа (§ 2). Тем самым, *вынос газа из оболочки ВСО при оседании в Галактику из короны может доминировать над его нагребанием.*

5. Остатки вспышек сверхновых в короне Галактики

Остатки вспышек сверхновых (ОВС) содержат систему аморфных волокон, в которых напряженность МП достигает $\sim 10^{-3}$ Э; МП тормозит ультрарелятивистские электроны, генерируя синхротронное излучение [13, с. 485]. За фронтом ударной волны ОВС присутствует теплый газ с температурой $\sim 10^4$ К, излучающий в УФ диапазоне [17, с. 478]. УФ линии поглощения в спектрах квазаров в КГ М31 (Андромеда) показывают, что в пределах $\leq 0,15$ Мпк горячий газ КГ содержит динамичную фракцию теплого газа с температурой $\sim 10^4$ К, обусловленную ударными волнами, в т.ч. связываемую с ОВС, учитывая обогащение сверхновыми ТЭ газа КГ [10].

Действительно, сверхновые обогащают межзвездную среду ТЭ [15, с. 433]. Однако обогатить корону ТЭ могли ОВС, взорвавшиеся не в галактиках – спутниках, а в звездных потоках. Основной вклад в обогащение ТЭ коронального газа могли внести планетарные туманности, образуемые вращающимися в КГ старыми звездами (близкими к финальной стадии), выброшенными из галактик – спутников (§ 6). Тем самым, *ударные волны, проявляющиеся в короне галактики Андромеда, могут преимущественно формировать не сверхновые, а ВСО.*

Сверхновые взрываются в межгалактической среде достаточно редко и наблюдаются преимущественно в галактиках – спутниках, где продолжается процесс звездообразования. Например, сверхновая SN 1987 А вспыхнула в 1987 г. в БМО [15, с. 434], т.е. в галактике – спутнике. Частота вспышек сверхновых пропорциональна массе звезд в галактиках, что позволяет оценить суммарную частоту вспышек сверхновых в галактиках – спутниках:

$$v_{sn}' = v_{sn} \Sigma M_{\text{г}} / M_{\text{г}}, \quad (19)$$

где v_{sn} – частота вспышек сверхновых в Галактике; M_g – масса Галактики; ΣM_g – суммарная масса галактик – спутников.

В Галактике $v_{sn} \sim 0,05 \text{ год}^{-1}$ [2, с. 1212] $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [1, с. 389]; $\Sigma M_g \sim 2 \cdot 10^{10} M_\odot$ [2, с. 1224]. Частота вспышек сверхновых в галактиках – спутниках $v_{sn}' \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, т.е. ок. 10% числа сверхновых в Галактике.

Доля небесной сферы, покрываемая ОВС в галактиках – спутниках:

$$\delta_{sn} = v_{sn}' t_o (R_o/R_k)^2, \quad (20)$$

где v_{sn}' – частота вспышек сверхновых; t_o – время жизни остатка сверхновой; r_o – радиус остатка сверхновой; R_k – радиус короны Галактики.

В межзвездной среде радиус ОВС $r \sim 50 \text{ пк}$ [17, с. 477]; $R_k \sim 150 \text{ кпк}$ [10]; $t_o \sim 10^7 \text{ лет}$ [17, с. 86]. При $v_{sn}' \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ (19) *доля небесной сферы, покрываемая ОВС в галактиках – спутниках* $\delta_{sn} \approx 0,5\%$.

Радиус ОВС в межзвездной среде $r \sim 50 \text{ пк}$ минимум на порядок меньше радиуса карликовых галактик 1 – 3 кпк [1, с. 389] и их гало. Выброшенный сверхновыми газ, обогащенный ТЭ, останется в галактике, конденсируясь в звездах.

При достаточной частоте взрывов сверхновых часть межзвездного газа может оттекать из галактик в межгалактический газ на сотни пк над галактической плоскостью, образуя галактические фонтаны; при последующем охлаждении такой газ может падать назад в виде высокоширотных облаков [17, с. 86]. В КГ на высоту менее 1% ее радиуса может попасть незначительная часть ТЭ, выброшенных сверхновыми, вспыхнувшими в Галактике и галактиках – спутниках. Корону могут обогащать ТЭ сверхновые, вспыхнувшие в звездных потоках.

Оценим число сверхновых, взорвавшихся в КГ исходя из массы ТЭ в ней с учетом соотношения числа обычных звезд массой $\sim M_\odot$ и звезд, рождающих сверхновые массой $\geq 10 M_\odot$, на основе начального распределения звезд по массам Солпитера. Учтем, что в разреженной межгалактической среде показатель функции Солпитера может достигать $\gamma = 3,85$ (показатель стандартной функции Солпитера $\gamma = 2,35$) [20]. Согласно распределению Солпитера доля сверхновых в галактиках $\delta_{sn} \sim 1\%$ звезд типа Солнца; в звездных потоках $\delta_{sn} \sim 0,1\%$.

В БК эволюционируют старые звезды массой $\geq 1 M_\odot$; сверхновые порождают короткоживущие массивные звезды массой $\geq 10 M_\odot$ [14, с. 488]. Гало Галактики содержит старые маломассивные звезды массой $\leq 0,85 M_\odot$ [1, с. 387], а также продукты эволюции звезд большей массы (короткоживущих). Старые звезды могли быть выброшены в КГ при разрушении галактик – спутников за счет приливных сил [3]. Старые звезды, вращаясь в КГ, могут эволюционировать в БК с образованием планетарных туманностей, обогащая корональный газ ТЭ.

Молодые звезды могут рождаться в звездных потоках в процессе коллапса газа в турбулентностях в «хвосте» ударных волн вокруг гало галактик – спутников [24]. Звездные потоки в КГ суммарно содержат до $\sim 10^8$ звезд (в основном в Магеллановом Потоке) [5], в которых согласно распределению Солпитера для межгалактического газа могло вспыхнуть $\sim 10^5$ сверхновых; частота взрывов сверхновых в обильном звездном потоке $\sim 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ [24], что на 3 порядка меньше средней частоты взрывов сверхновых в Галактике, составляющей $\sim 0,05 \text{ год}^{-1}$ [2, с. 1212].

Критическое число ОВС, покрывающих всю площадь КГ:

$$N_o \approx (R_k/r_o)^2, \quad (21)$$

где R_k – радиус короны Галактики; r_o – радиус ОВС.

В разреженном межгалактическом газе рост массы вещества, нагребенного ударной волной ОВС, замедлен в сравнении с межзвездной средой галактик. Так, плотность газа в КГ $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ на 3 порядка ниже, чем в межзвездной среде $\sim 1 \text{ см}^{-3}$. Как следствие, радиус оболочки одиночной сверхновой в корональном газе может достигать $\sim 300 \text{ пк}$ (22), что на

порядок больше, чем в межзвездной среде галактик (~ 50 пк). Время распространения ударной волны может достигать $t \sim 10^7$ лет (26), что на порядок больше, чем в галактиках ($\sim 10^6$ лет).

Оценим радиус ОВС в короне. Энергия сверхновой трансформируется в кинетическую и тепловую энергию газа. Радиус ОВС коррелирует с массой вещества, нагретого ударной волной [17, с. 477]. Из зависимости массы нагретого вещества от радиуса ОВС $M \sim \pi r^3$ следует оценка:

$$r \approx r_0(n_0/n)^{1/3}, \quad (22)$$

где r_0 , r – радиус ОВС в Галактике и ее короне; n_0 , n – концентрация газа в Галактике и ее короне соответственно.

Для характерных значений энергии сверхновой $\sim 3 \cdot 10^{50}$ эрг при плотности газа в галактиках $\rho \sim 10^{-24}$ г/см ($n_0 \sim 1$ см $^{-3}$) старый ОВС возрастом $\sim 10^6$ лет достигает радиуса $r_0 \sim 54$ пк [17, с. 477]. В КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ [2, с. 1217]; [16, с. 101]. Радиус ОВС в корональном газе $r \approx 350$ пк. Действительно, взрывы сверхновых вблизи разреженного гало Галактики выбрасывают межзвездный газ на сотни пк над галактической плоскостью [17, с. 86].

Расширение ОВС в корональном газе не требует затрат энергии на нагрев окружающего газа из-за схождения температуры $\sim 10^6$ К и концентрации газа $\sim 10^{-3}$ см $^{-3}$ в старых ОВС [17, с. 86] и коронах галактик [17, с. 81]. Оценим массу межгалактического газа, нагретого сферической ударной волной ОВС, исходя из кинетической энергии взрыва сверхновой с учетом ограничения, накладываемого затратами энергии на излучение:

$$Mg = \delta k W_{sn} / v^2, \quad (23)$$

где W_{sn} – энергия сверхновой; δk – доля кинетической энергии взрыва сверхновой с учетом излучения; v – скорость ударной волны.

По завершении адиабатической стадии расширения излучается ок. 50% тепловой энергии ОВС [17, с. 477], т.е. $\delta k \sim 0,5$. Скорость ударной волны старого ОВС $v \sim 4 \cdot 10^5$ м/с [17, с. 478]. При $W_{sn} \sim 3 \cdot 10^{50}$ эрг [17, с. 477] масса нагретого газа $Mg \approx 300 M_\odot$. Оценка (23) сравнима с массой вещества старого ОВС в туманности петля Лебедя $\sim 200 M_\odot$, нагретого ударной волной, имеющей скорость $\sim 4 \cdot 10^5$ м/с [17, с. 478].

Оценим массу газа внутри ОВС. Масса сферического газового облака:

$$Mg = 4\pi r^3 n \rho / 3. \quad (24)$$

В КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ [2, с. 1217]; [16, с. 101]; $r \sim 0,3$ кпк (22) масса газа внутри ОВС $Mg \approx 10^4 M_\odot$. Сходная оценка следует для радиуса ОВС $r \sim 54$ пк в межзвездной среде плотностью $n \sim 1$ см $^{-3}$ [17, с. 477]: масса газа $Mg \approx 10^4 M_\odot$, что на порядок больше массы нагретого вещества $\sim 300 M_\odot$ (23).

Оценим время жизни ОВС в корональном газе. Радиус старого ОВС (на радиативной стадии) связан с временем расширения зависимостью:

$$r \sim t^{2/7} (1/\rho)^{1/4}, \quad (25)$$

где ρ – плотность окружающего газа; t – время расширения ОВС [17, с. 477].

Зависимость (25) позволяет оценить время расширения ОВС в КГ:

$$t = t_0 (r/r_0)^{7/2}, \quad (26)$$

где t_0 – время расширения ОВС радиусом r_0 .

При $r_0 \sim 54$ пк для $t_0 \sim 10^6$ лет [17, с. 477]; $r \sim 0,3$ кпк (22) время распространения ударной волны ОВС в корональном газе $t \approx 10^7$ лет, что сравнимо с временем жизни ($\sim 10^7$ лет) полостей ОВС (галактических фонтанов) в гало, содержащих корональный газ [17, с. 86].

При $r \sim 0,3$ кпк (22) и радиусе КГ $R_k \sim 100$ кпк [17, с. 81] критическое число одиночных ОВС в КГ согласно (21) $N_0 \approx 10^5$, что сравнимо с оценкой числа сверхновых, вспыхнувших в

обильном звездном потоке $N_{sn} \sim 10^5$ [24]. Вместе с тем, время жизни ОВС намного меньше возраста галактик.

Доля небесной сферы, покрываемая оболочками одиночных сверхновых, вспыхнувших в звездных потоках:

$$\delta_{sn} = N_{snto}/N_{otr}, \quad (27)$$

где t_g – возраст галактик; N_o – критическое число ОВС; N_{sn} – число ОВС.

В звездных потоках $N_{sn} \sim 10^5$ [24]; $t_o \sim 10^7$ лет [17, с. 86]; $t_g \sim 10^{10}$ лет при $N_o \sim 10^5$ (21) доля небесной сферы, покрываемой оболочками одиночных сверхновых в звездном потоке $\delta_{sn} \approx 0,1\%$, что меньше оценки $\delta_{sn} \sim 0,5\%$ (20) для галактик – спутников. Тем самым, *оболочки одиночных сверхновых в галактиках – спутниках и звездных потоках суммарно покрывают менее $<1\%$ небесной сферы.*

Заметим, что при формировании обильных звездных потоков, содержащих $\geq 3 \cdot 10^8$ звезд, может происходить слияние оболочек сверхновых в условиях их ускорения звездным ветром голубых звезд (на порядок более многочисленных) при формировании ударных волн диаметром $d \sim 15$ кпк. Подобные процессы могут приводить к образованию «странных радиокругов» синхротронного излучения в КГ [24]. БМО формирует звездный поток, содержащий $\sim 10^8$ звезд [5], т.е. он может быть обильным.

Доля небесной сферы, покрываемая ударными волнами слившихся ОВС в звездных потоках, усиленных звездным ветром голубых звезд:

$$\delta_{sn} = dD/\pi R_k^2, \quad (28)$$

где d – диаметр ударных волн; D – протяженность звездного потока.

Длина Магелланова Потока $D \sim 100$ кпк [25]; $R_k \sim 100$ кпк [17, с. 81]; $d \sim 15$ кпк [24]. *Доля небесной сферы, покрываемой ударными волнами сверхновых в обильном звездном потоке $\delta_{sn} \approx 5\%$.*

Оценим вклад сверхновых в звездных потоках в обогащение коронального газа ТЭ. Сверхновые I типа (начальная масса звезд $8 - 10 M_\odot$) выбрасывают массу вещества $\sim 5 M_\odot$, включая массу ТЭ $M_{sn} \sim 1 M_\odot$. В случае сверхновых II типа (масса звезд $\geq 10 M_\odot$) основная масса ТЭ аккумулируется в образующейся нейтронной звезде массой $\sim 1,4 M_\odot$ [15, с. 434]. Доли сверхновых I и II типа сравнимы. Сверхновые в звездных потоках могли выбросить в КГ ТЭ массой $M_{t'} \sim 10^5 M_\odot$. Масса ТЭ в короне М31 (Андромеда), сравнимой с нашей Галактикой $M_t \geq 10^8 M_\odot$ [10], что в $M_t/M_{t'} \geq 10^3$ раз больше, т.е. *сверхновые в звездных потоках могли обогатить газ в короне Галактики тяжелыми элементами на $\leq 0,1\%$ их наблюдаемого обилия.*

6. Нейтронные звезды и белые карлики в короне Галактики

Столкновение галактик – спутников в гало (короне) Галактики, с одной стороны, стимулировало в них звездообразование. С другой стороны, это привело к их разрушению и выбросу звезд. Так, галактики – спутники распадаются в межгалактической среде при сближении за счет приливных сил [3], способствуя образованию звездных потоков [4]. Как следствие, гало содержит старые маломассивные звезды массой $\leq 0,85 M_\odot$ [1, с. 387], а также продукты эволюции звезд большей массы (короткоживущих), такие как старые *белые карлики* (БК) и *нейтронные звезды* (НЗ) – труднонаблюдаемые объекты, если они не входят в состав двойных систем.

В процессе эволюции звезд массой $\leq 5 M_\odot$ в БК [1, с. 185] образуются *планетарные туманности* (ПТ) – одни из основных источников ТЭ [17, с. 619]. ПТ относятся к населению II гало [1, с. 387] и могут обогащать ТЭ газ в сферической подсистеме Галактики.

За время существования галактик ПТ образуют звезды массой $\geq 0,8 M_\odot$, что позволяет оценить число старых звезд в КГ, эволюционировавших в БК, исходя из массы ТЭ в корональном газе:

$$N_w = M_t/\delta_{пт}M_{пт}, \quad (29)$$

где M_T – масса ТЭ в короне Галактики; $M_{ПТ}$ – масса планетарной туманности; $\delta_{ПТ}$ – массовая доля ТЭ в планетарной туманности.

Средняя масса ПТ $M_{ПТ} \sim 0,2 M_{\odot}$ [17, с. 620]. Химический состав ПТ близок к солнечному [17, с. 619]. Массовая доля ТЭ в атмосфере Солнца $\delta_{ПТ} \sim 2\%$ [15, с. 589]; масса ТЭ в ПТ $\delta_{ПТ} M_{ПТ} \sim 4 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$.

Масса ТЭ в короне М31 (Андромеда), сравнимой с нашей Галактикой $M_T \geq 10^8 M_{\odot}$ [10], т.е. число белых карликов в короне Галактики $N_w \geq 3 \cdot 10^{10}$.

По другим оценкам, в т.ч. с учетом данных микролинзирования, число старых БК в КГ может достигать $N_w \sim 10^{11}$ [12]. Так, микролинзирование выявило в КГ объекты массой $0,15 - 0,9 M_{\odot}$ [11], что соответствует массе старых звезд низкой светимости $\leq 10^{-2} L_{\odot}$, включая красные карлики массой $0,15 - 0,5 M_{\odot}$ и БК массой $0,6 - 0,9 M_{\odot}$; суммарное число звезд (маломассивных) в КГ может достигать $\sim 10^{11} M_{\odot}$ [12], что предполагает присутствие в КГ $< 10^{11}$ БК. С учетом продуктов эволюции первых звезд сравнимой массы (образованных однородным первичным газом) число БК в КГ может достигать $\sim 10^{11}$ при невысоком числе НЗ [26].

В Галактике число БК ок. 10% числа звезд [1, с. 185]. При числе звезд в Галактике $\sim 10^{11}$ [1, с. 386] число БК $\sim 10^{10}$, что в 3 – 10 раз меньше.

Оценим число НЗ в КГ. В звездных потоках в межзвездном газе КГ могло взорваться $\sim 10^5$ сверхновых, порождая НЗ (§ 7). БК образуют звезды массой $\geq 1 M_{\odot}$; НЗ порождают звезды массой $\geq 10 M_{\odot}$ [14, с. 488]. Согласно начальному распределению звезд по массам Солпитера (§ 5) при числе БК в КГ $N_w \sim (3 - 10) 10^{10}$ число старых нейтронных звезд в короне Галактики $N_n \sim 3 \cdot 10^8 - 10^9$. Для сравнения, число НЗ в Галактике $\sim 10^9$ [17, с. 282].

БК и НЗ обладают сильным МП. Оценим долю небесной сферы, покрываемую МП НЗ и БК в КГ. Плотность энергии дипольного МП НЗ падает с расстоянием по закону:

$$\omega_m \sim B^2 \sim 1/r^6, \quad (30)$$

где B – индукция магнитного поля [15, с. 359].

Из соотношения (30) следует зависимость индукции дипольного МП от расстояния $B \sim 1/r^3$. При известном МП на поверхности источника (НЗ или БК) известного радиуса можно определить удаление, на котором МП достигнет определенной величины B :

$$r = r_0 (B_0/B)^{1/3}, \quad (31)$$

где r_0 – радиус звезды; B_0 – магнитное поле на поверхности звезды.

Оценим расстояние, при котором МП НЗ и БК может искажать МП Галактики ~ 2 мкГс [15, с. 181] или ее короны, т.е. достигнет ≥ 1 мкГс, подобно протяженным радио-структурам в коронах радиогалактик, генерирующих синхротронное излучение [15, с. 213]. Индукция МП:

$$B = (2\mu_0 \omega_m)^{1/2}, \quad (32)$$

где ω_m – плотность энергии магнитного поля [17, с. 587].

Плотность энергии МП Галактики $\omega_m \sim \epsilon_k$ сравнима с плотностью энергии КЛ [13, сс. 471, 681], составляющей $\epsilon_k \sim 1$ эВ/см³ [13, с. 471]. НЗ рассеет галактические КЛ при индукции МП $B \approx 6$ мкГс.

Плотность энергии межгалактических КЛ может быть сравнима с плотностью энергии излучения галактик, усредненной по всему пространству Вселенной. Энерговыделение звезд (преимущественно на стадии красных гигантов) сформирует излучение с плотностью энергии, усредненной по всему пространству Вселенной $\sim 10^{-2}$ эВ/см³ [12], что сравнимо с плотностью энергии ФКИ в ИК диапазоне $\sim 10^{-2}$ эВ/см³ [2, с. 1228]. Если плотность энергии КЛ в КГ $\sim 10^{-2}$ эВ/см³, НЗ рассеет их при индукции МП $B \approx 0,6$ мкГс.

На поверхности активных НЗ (пульсаров) радиусом $r_n \sim 10$ км МП $10^6 - 10^9$ Тл [2, с. 1212], что эквивалентно напряженности их МП $H_n \sim 10^{10} - 10^{13}$ Э [17, с. 282]. Время

жизни пульсаров $3 \cdot 10^6$ лет (за исключением двойных систем) [15, с. 181] намного меньше возраста галактик $\sim 10^{10}$ лет, т.е. в КГ преобладают старые НЗ с МП $B_n \ll 10^6$ Тл. Согласно (31) МП старых НЗ достигнет уровня $B \sim 1$ мкГс на удалении $r = r_n(B_n/B)^{1/3} \ll 10^9$ м, что до 3 порядков больше радиуса магнитосферы пульсаров (границы области аккреции) $\leq 10^6$ м [15, с. 358].

На поверхности БК радиусом $r_w \leq 10^7$ м МП $10^2 - 10^4$ Тл [2, с. 1212], т.е. $10^6 - 10^8$ Гс; у большинства $\sim 10^4$ Гс [1, с. 185]. На поверхности старых БК $B_w \sim 4 \cdot 10^4$ Гс [27]. Согласно (31) МП поле БК достигнет $B \sim 1$ мкГс на удалении $r = r_w(B_w/B)^{1/3} \approx 10^{11}$ м, что на 2 порядка выше оценки для НЗ.

Площадь покрытия МП БК выше чем НЗ на 4 порядка. Доля небесной сферы, покрываемой МП звезд в гало (короне) Галактики:

$$\delta_i = N_i(r_i/R_k)^2, \quad (33)$$

где N_i – число носителей МП; r_i – их радиус; R_k – радиус короны Галактики.

Число сверхновых в галактиках – спутниках ок. 10% числа сверхновых в Галактике (§ 5), т.е. НЗ в КГ $N_n \sim 10^8$. Для старых НЗ $r_i \ll 10^9$ м (31). При радиусе КГ $R_k \sim 150$ кпк [10] доля небесной сферы, покрываемой МП НЗ в короне $\delta_n \ll 10^{-17}$, что пренебрежимо мало.

В случае БК $r_i \sim 10^{11}$ м (31) при их числе $N_w \sim 10^{11}$ параметр $\delta_w \approx 10^{-10}$, что также пренебрежимо мало. Вместе с тем, *магнитные поля БК могут покрывать на 6 порядков большую часть небесной сферы, чем НЗ.*

Для Галактики формула (33) сводится к виду:

$$\delta_i = N_i r_i^2 / R_g R_d, \quad (34)$$

где R_g – радиус Галактики; R_d – радиус ее диска.

$R_g \sim 15$ кпк [1, с. 387]; $R_d \sim 1$ кпк [15, с. 648]. Число НЗ, как и число БК в Галактике и ее короне сравнимо [12]. Доля небесной сферы, покрываемой МП НЗ в Галактике $\delta_n \leq 10^{-13}$.

Для БК $\delta_n \leq 10^{-7}$, что на 3 порядка выше, чем для КГ согласно (33). Вместе с тем, оценки (33) и (34) пренебрежимо малы. Тем самым, *влияние МП продуктов эволюции звезд на МП Галактики и ее короны несущественно.*

Искажения в МП Галактики связывают с МП НЗ; при этом МП Галактики ~ 2 мкГс однородно в масштабе > 1 кпк [15, с. 181], что сравнимо с радиусом газовых облаков. По-видимому, *МП Галактики искажает МП облаков водорода – остатков разрушенных ВСО.* Так, МП ВСО в гало может составлять сравнимую величину $B \approx 3 \pm 0,6$ мкГс (§ 1).

7. Энерговыведение ударных волн в короне Галактики

Оценим суммарное энерговыведение ВСО в процессе оседания в Галактику из ее короны под действием гравитации:

$$\Sigma L_v \approx K G M_g \Sigma m_v / R_g t_v, \quad (35)$$

где R_g – радиус Галактики, M_g – ее масса; Σm_v – суммарная масса ВСО; t_v – время оседания ВСО; K – параметр, учитывающий гравитацию короны.

Оценим параметр K , учитывающий гравитацию как Галактики, так и ее короны. Энергия гравитации $U = F \Delta R = \int G M(R) m \cdot dR / R^2$. Вириальная масса гало спиральных галактик $M(R)$ пропорциональна радиусу при постоянном отношении $M(R)/R$ [1, сс. 342, 389], т.е. $U \sim \int dR / R = \ln |R|$ в границах от радиуса Галактики (гало) R_g до ее короны $R_k \sim 10 R_g$ при $K = \ln 10 \approx 2,3$.

По оценке на основе каталога GASS $\Sigma m_v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [6]; $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [1, с. 389]; $R_g \sim 15$ кпк [1, с. 387]; $t_v \sim 7 \cdot 10^8$ лет (9). Согласно (35) *суммарная мощность излучения ВСО* $\Sigma L_v \approx 10^{42}$ эрг/с, что составляет 2% светимости Галактики $\sim 5 \cdot 10^{43}$ эрг/с [2, с. 1214].

Оценим суммарное энерговыведение ВСО при оседании в Галактику из ее короны со времени захвата галактик – спутников:

$$\Sigma W_v \approx KGM_g \Sigma M_g / R_g, \quad (36)$$

где ΣM_g – суммарная масса газа в гало галактик – спутников.

После захвата галактик – спутников мог осесть газ суммарной массой $\Sigma M_g \sim 10^{11} M_\odot$ (8), что сравнимо с массой звезд в Галактике $\sim 10^{11} M_\odot$ [1, с. 386]. При $K \sim 2,3$ суммарное энерговыделение ВСО, образованных из газа гало галактик – спутников $\Sigma W_v \approx 3 \cdot 10^{59}$ эрг.

Суммарное энерговыделение ВСО в «хвосте» ударных волн вокруг гало галактик – спутников при их торможении в корональном газе:

$$\Sigma W'_v \approx \Sigma M_g v^2 / 2, \quad (37)$$

где v – скорость галактик – спутников.

Галактики – спутники движутся со скоростью ≤ 500 км/с [6], сравнимой с орбитальной скоростью 300 км/с для гало Галактики (38). Так, в условиях постоянства отношения M/R для гало галактик [1, сс. 342, 389] первая космическая скорость для гало и короны Галактики:

$$v_0 = (GM/R)^{1/2}, \quad (38)$$

где M – масса космического объекта; r – его радиус [13, с. 474].

При $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [1, с. 389]; $R_g \sim 15$ кпк [1, с. 387] орбитальная скорость в гало и короне Галактики $v_0 \approx 300$ км/с.

При $\Sigma M_g \sim 10^{11} M_\odot$ (8); $v \sim 500$ км/с [6] со времени захвата галактик – спутников согласно (37) суммарное энерговыделение ВСО в хвосте ударных волн вокруг галактик – спутников $\Sigma W'_v \sim 3 \cdot 10^{59}$ эрг.

Суммарное энерговыделение ударных волн ВСО в процессе торможения и оседания в Галактику из ее короны $\Sigma W_v + \Sigma W'_v \approx 6 \cdot 10^{59}$ эрг, что соответствует $\sim 6\%$ энерговыделения Галактики $L_{tr} \sim 10^{61}$ эрг за время ее существования ($t_g \sim 10^{10}$ лет) при светимости $L_g \sim 5 \cdot 10^{43}$ эрг/с [2, с. 1214].

В энерговыделение КГ вносят вклад сверхновые, взорвавшиеся в галактиках – спутниках, а также вспыхнувшие в звездных потоках. Оценим энерговыделение сверхновых в Галактике и ее короне. В Галактике вспыхнуло $N_{sn} \sim 10^9$ сверхновых [17, с. 282]. При типичном энерговыделении сверхновых $W_{sn} \sim 3 \cdot 10^{50}$ эрг [17, с. 477] суммарное энерговыделение $\Sigma W_{sn} = N_{sn} W_{sn} \sim 3 \cdot 10^{59}$ эрг при средней мощности $L_{sn} = N_{sn} W_{sn} / t_g \approx 10^{42}$ эрг/с. Современная скорость звездообразования на порядок ниже, т.е. $L_{sn} \sim 10^{41}$ эрг/с. По другим оценкам, мощность генерации сверхновыми КЛ в Галактике $10^{40} - 10^{42}$ эрг/с [13, с. 474]; $10^{40} - 10^{41}$ эрг/с [14, с. 244].

Масса галактик – спутников составляет ок. 10% массы Галактики, т.е. число сверхновых, взорвавшихся в КГ $N_{sn}' \sim 10^8$ (§ 5). Энерговыделение сверхновых в галактиках – спутниках $\Sigma W_{sn}' = N_{sn}' W_{sn} \approx 3 \cdot 10^{58}$ эрг при средней мощности $L_{sn}' = N_{sn}' W_{sn} / t_g \approx 10^{41}$ эрг/с.

В обильном звездном потоке (типа Магелланова Потока) могло взорваться $N_{sn} \sim 10^5$ сверхновых, чьи оболочки мог ускорить звездный ветер более многочисленных горячих голубых звезд, чье энерговыделение в 300 раз превышает энерговыделение сверхновых, формируя «странные радио-круги» [24]. Суммарная энергия ударных волн в обильном звездном потоке эквивалентна взрывам $N_{sn} \sim 3 \cdot 10^7$ сверхновых при $\Sigma W_{sn}' \sim 10^{58}$ эрг, т.е. ок. 30% энерговыделения сверхновых в галактиках – спутниках.

Суммарное энерговыделение ударных волн в КГ:

$$W_k = \Sigma W_{sn}' + \Sigma W_v + \Sigma W'_v, \quad (39)$$

где $\Sigma W_{sn}'$ – энерговыделение сверхновых в короне Галактики; $\Sigma W'_v$, ΣW_v – энерговыделение ВСО при торможении и оседании в Галактику из ее короны.

При $\Sigma W_v + \Sigma W'_v \approx 6 \cdot 10^{59}$ эрг вклад сверхновых $\Sigma W_{sn}' \sim 4 \cdot 10^{58}$ эрг до 7%. Суммарное энерговыделение ударных волн в короне Галактики $W_k \approx 6 \cdot 10^{59}$ эрг.

Подобное энерговыделение обеспечит мощность ударных волн в КГ:

$$L_k = W_k/t_g, \quad (40)$$

где W_k – энергосодержание ударных волн в короне.

При $W_k \sim 6 \cdot 10^{59}$ эрг (39) за время существования галактик $t_g \sim 10^{10}$ лет *мощность ударных волн в короне Галактики* $L_k \approx 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с.

Оценка (40) на порядок меньше светимости Галактики $\sim 5 \cdot 10^{43}$ эрг/с [2, с. 1214] и других нормальных спиральных галактик $\sim 4 \cdot 10^{43}$ эрг/с [1, с. 390], однако она на порядок превышает мощность генерации КЛ сверхновыми в Галактике $\sim 10^{41}$ эрг/с по предыдущей оценке.

В процессе торможения ВСО за счет давления окружающего газа КГ формируется ударная волна, в которой возникают турбулентности (§ 1), способные ускорять КЛ. Так, КЛ образуют ударные волны [14, с. 245]. Тем самым, *основным источником генерации космических лучей мощностью $2 \cdot 10^{42}$ эрг/с могут являться турбулентности вокруг ВСО*, возникающие в процессе оседания в Галактику из ее короны. Соответственно, спектр межгалактических КЛ может влиять на спектр галактических КЛ.

Ударные волны могут ускорять как космические, так и субкосмические лучи с энергией < 100 кэВ, электроны в которых могут разогревать корональный газ и генерировать тормозное излучение (§ 8).

8. Рассеяние субкосмических лучей в короне Галактики

По данным рассеяния фотонов *микроволнового фонового излучения* (МФИ) на горячих электронах (эффект Зельдовича – Сюняева) средняя температура электронов в КГ выросла втрое с $\sim 7 \cdot 10^5$ К в эпоху $z \sim 1$ до $\sim 2 \cdot 10^6$ К в настоящее время [28]. Температура электронов в КГ $T_e \sim 2 \cdot 10^6$ К в $T_e/T_i \approx 4$ раза выше, чем ионов $T_i \sim 5 \cdot 10^5$ К, проявляющихся в спектральных линиях [2, с. 1217]; [16, с. 101], т.е. теряющих энергию на излучение, что может поддерживать неравновесное распределение температур данных компонентов коронального газа. Повышению температуры электронов также может способствовать рассеяние корональным газом (плазмой) субкосмических лучей (преимущественно электронов).

Нагреву коронального газа в эпоху $z \leq 1$ могло способствовать оседание карликовых галактик в короны более крупных (§ 9). Ударные волны ВСО в КГ могут ускорять как КЛ (§ 7), так и субкосмические лучи с энергией < 100 кэВ, способные нагревать корональный газ. Напомним, межзвездный газ нагревают, в т.ч. субкосмические лучи [17, с. 86].

Рассмотрим рассеяние субкосмических лучей (электронов и протонов) на электронах и протонах сильно ионизованного газа (плазмы) короны. Газ в КГ беден ТЭ [17, с. 81], т.е. вклад ионов в рассеяние субкосмических лучей не существен. В случае рассеяний $p + p^*$ и $e + e^*$ (частицы газа отмечены знаком *) обе частицы покинут КГ, за исключением лобового столкновения и рассеяния под малым углом, когда одну из них удержит гравитация короны в условиях роста сечения рассеяния частиц со снижением энергии субкосмических лучей согласно зависимости $\sigma \sim 1/E^2$ (43). Подобные рассеяния могут разогревать плазму КГ.

Согласно оценке (45) КГ могут покидать субкосмические лучи с энергией > 30 кэВ, слабо рассеиваемые плазмой. Расчеты показывают, что подобные субкосмические лучи могут наполнять пространство между КГ (включая войды) с плотностью энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³, внося малый вклад в скрытую массу $\sim 0,1\%$.

Рассеяние $p + e^*$ не передает эффективно энергию и импульс из-за значительной разницы масс сталкивающихся частиц ($m_p/m_e \sim 1800$).

Рассеяние $e + p^*$ генерирует тормозное излучение, а также разогревает газ. Спектр ФКИ в рентгеновском диапазоне содержит два подъема в области $\sim 0,3$ кэВ и ~ 30 кэВ, чьи спектры резко отличаются при сравнимой плотности энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ [16, с. 55]; [29] (§ 9). Энергетический спектр мягкого рентгеновского ФКИ в области $\sim 0,3$ кэВ близок к тепловому [29]; согласно закону Вина его может формировать тепловое излучение газа с температурой $\sim 5 \cdot 10^5$ К, что соответствует температуре газа КГ $\sim 5 \cdot 10^5$ К [2, с. 1217]; [16, с. 101].

В спектре жесткого рентгеновского ФКИ (1 – 1000 кэВ), близком к линейному, в области ~30 кэВ наблюдается излом под углом ок. 90° [29]; данный экстремум может быть обусловлен тормозным излучением электронов с энергией ~30 кэВ в кулоновском поле ядер (протонов). Так, пологий спектр фотонов тормозного излучения резко ограничен начальной энергией электронов [14, с. 149]. При этом излучение КГ может формировать изотропное излучение при невысоком красном смещении $z \geq 0,3$ [12] (§ 9).

Сравнимость плотности энергии пиков ФКИ в области ~0,3 кэВ и ~30 кэВ может указывать на единый источник их формирования, которым могут являться субкосмические лучи, ускоренные ударными волнами в КГ.

Оценим тепловую энергию газа в КГ:

$$U_T = 3kTM_g/2m_p, \quad (41)$$

где M_g – масса газа в короне Галактики.

С учетом данных [10] масса газа может составлять значительную часть массы КГ: $M_g \sim M_k$. Масса короны Галактики $M_k \sim 1,1 \cdot 10^{12} M_\odot$ [2, с. 1215]. При $T = (T_e + T_i)/2 \approx 10^6$ К для $T_e \sim 2 \cdot 10^6$ К [28], $T_i \sim 5 \cdot 10^5$ К [2, с. 1217]; [16, с. 101], *тепловая энергия газа в короне Галактики* $U_T \approx 3 \cdot 10^{59}$ эрг.

Оценим мощность излучения, способного нагреть газ в КГ в условиях малых потерь на излучение. Так, время остывания разреженного межгалактического газа в КГ $\leq 10^{10}$ лет может быть сравнимо с возрастом галактик [16, с. 402]. При этом рост температуры КГ не приводит к росту их светимости, поскольку температура газа в КГ $\sim 5 \cdot 10^5$ К [2, с. 1217]; [16, с. 101] близка к максимуму кривой радиационных потерь межзвездного газа $\sim 6 \cdot 10^5$ К [17, с. 477]. При дальнейшем росте температуры из-за «обдирки» ионов интенсивность излучения газа в спектральных линиях снижается [13, с. 109].

Энерговыделение, требуемое для нагрева газа в КГ:

$$L_T = U_T/\chi t_g, \quad (42)$$

где U_T – тепловая энергия газа; χ – параметр баланса между нагревом и излучением.

Если потери на излучение газа малы $\chi \sim 1$. При $U_T \sim 3 \cdot 10^{59}$ эрг (41); $t_g \sim 10^{10}$ лет *мощность излучения, нагревающего корону* $L_T \approx 10^{42}$ эрг/с, при $\delta t = L_T/L_k \approx 50\%$ суммарной мощности ударных волн в КГ $L_k \approx 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с (40), т.е. *на ускорение электронов в виде субкосмических лучей может расходоваться до половины энергии ударных волн в короне Галактики*.

Рентгеновская светимость корон ряда крупных спиральных галактик $(4 - 6) \cdot 10^{40}$ эрг/с [30]; [31] при средней светимости $L_T \sim 5 \cdot 10^{40}$ эрг/с составляет $L_r/L_T \sim 5\%$ мощности излучения, нагревающего КГ $L_T \sim 10^{42}$ эрг/с (42). С одной стороны, это подтверждает корректность оценки (42), которая предполагает, что потери на излучение газа малы. Смещение баланса между нагревом и излучением КГ в сторону нагрева объясняет рост температуры электронов в КГ на основе эффекта Зельдовича – Сюняева по данным [28].

С другой стороны, это может указывать на занижение оценок [30]; [31] для рентгеновской светимости корон других галактик вследствие трудности ее выделения на фоне рентгеновского излучения короны Млечного Пути, которое в пределах Галактики может быть близко к изотропному (§ 9).

Оценим энергию частиц, рассеиваемых межгалактическим газом в пределах КГ. При упругом рассеянии заряженной частицы на расстоянии r от другой энергия кулоновского взаимодействия $E = e^2/4\pi\epsilon_0\epsilon r$ перейдет в кинетическую, т.е. $r = e^2/4\pi\epsilon_0\epsilon E$. Полное эффективное сечение столкновения частиц $\sigma = 4\pi r^2$ [1, с. 704] представимо в виде:

$$\sigma = 4e^4/\pi(4\epsilon_0\epsilon E)^2, \quad (43)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость; E – энергия частицы.

Длина свободного пробега частиц до столкновения:

$$l_a = 1/n\sigma, \quad (44)$$

где σ – полное эффективное сечение столкновения частиц.

При $la = \beta R_k$ из (43) и (44) следует величина энергии заряженных частиц, при которой они эффективно рассеиваются плазмой:

$$E = (e^2/2\epsilon_0\epsilon) \cdot (n\beta R_k/\pi)^{1/2}, \quad (45)$$

где β – параметр удлинения траектории частиц.

Заряженные частицы субкосмических лучей может рассеивать МП ВСО и ОВС. ВСО покрывают до 37% небесной сферы [19]; ОВС могут покрывать до 5% неба (§ 5); в пределах диаметра КГ степень покрытия может достигать $\leq 84\%$, т.е. *рассеяние субкосмических лучей МП в короне Галактики может быть достаточно эффективно*, при $\beta \sim 2$.

В КГ $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [2, с. 1217]; [16, с. 101]; $R_k \sim 0,15 \text{ Мпк}$ [10]. При $\epsilon \sim 1$ в разреженном газе (вакууме) *энергия эффективного рассеяния частиц* $E \approx 30 \text{ кэВ}$.

Оценка (45) сравнима с энергией фотонов 30 кэВ в области экстремума спектра ФКИ в жестком рентгеновском диапазоне 1 кэВ – 1 МэВ [16, с. 55]; [29]. Снижение плотности энергии рентгеновских фотонов ФКИ в области от $>30 \text{ кэВ}$ до $<1 \text{ МэВ}$ [16, с. 55]; [29] может быть обусловлено квадратичным снижением сечения рассеяния частиц с ростом энергии $\sigma \sim 1/E^2$ (43), т.е. падением эффективности рассеяния. Тем самым, при рассеянии $e + p^*$ *субкосмические лучи (электроны), ускоряемые ударными волнами в короне Галактики, могут генерировать тормозное излучение с экстремумом в области $\sim 30 \text{ кэВ}$.*

9. Вклад корон галактик в фоновое космическое излучение

Радиус галактик на порядок меньше радиуса их корон, вследствие чего излучение КГ сформирует ФКИ при красном смещении $z \geq 0,3$ [12]. Например, свет старых звезд в КГ в эпоху $z \sim 0,3$ на стадии красных гигантов может формировать подъем в спектре ФКИ в ИК области $\sim 1 \text{ мкм}$ с плотностью энергии $\sim 10^{-2} \text{ эВ/см}^3$ [12]. Так, при столкновении галактик – спутников приливные силы могли их разрушать [3], рассеивая содержащиеся в них звезды в пределах короны материнской галактики, и способствуя образованию звездных потоков [4].

Плотность энергии излучения КГ исходя из средней концентрации галактик во Вселенной:

$$\epsilon_k = W_k n_g / (z + 1), \quad (46)$$

где W_k – энерговыделение в короне галактики; n_g – концентрация галактик во Вселенной; z – красное смещение в эпоху интенсивной светимости корон.

Оценим красное смещение, при котором излучение КГ могло достигать наибольшей интенсивности. Захват галактик – спутников гравитацией корон более крупных галактик может коррелировать с временем образования скоплений галактик, происходившим в эпоху $z \leq 1$ [15, с. 545], а также разогревом электронного газа в КГ в эпоху $z \leq 1$, проявляющимся в эффекте Зельдовича – Сюняева [28] (§ 8).

Так, среди галактик с $z > 3 - 4$ много галактик малого размера с интенсивным звездообразованием [16, с. 458]. Их последующее оседание в коронах более крупных галактик с формированием ВСО стимулировало звездообразование (§ 3), в т.ч. в звездных потоках, проявляющееся в виде «странных радио-кругов» [24], наблюдаемых при $z \sim 0,3 - 0,6$ [32] при среднем $z \sim 0,45 \pm 0,15$, что соответствует красному смещению $z \geq 0,3$, при котором может формироваться изотропное излучение, присущее ФКИ [12].

Мощность излучения типичных галактик сравнима со светимостью Галактики. Млечный Путь содержит $\sim 10^{11}$ звезд [1, с. 386] характерной массой $\leq 0,8 M_\odot$ [13, с. 489] при светимости $\sim 5 \cdot 10^{43} \text{ эрг/с}$ ($\sim 10^{10} L_\odot$) [2, с. 1214] относится к типичным S-галактикам. Так, к типичным относят галактики массой $10^{10} - 10^{11} M_\odot$ [33, с. 444] светимостью $\sim 10^{10} L_\odot$ [1, с. 390].

Концентрация галактик во Вселенной $n_g \sim 0,01 \text{ Мпк}^{-3}$ [16, с. 457]. Если энерговыделение корон окружающих галактик сравнимо с энерговыделением короны Млечного Пути $W_k \sim 6 \cdot 10^{59} \text{ эрг}$ (39), согласно (46) они сформируют *плотность энергии изотропного излучения КГ* $\epsilon_k \approx 10^{-4} \text{ эВ/см}^3$.

Оценка $\epsilon_k \sim 10^{-4}$ эВ/см³ (46) сравнима с плотностью энергии ФКИ в УФ области ~ 100 нм [29]. Так, у 30% близких спиральных галактик обнаружено протяженное гало УФ излучения на расстояниях до нескольких оптических радиусов от центра [20].

Ударные волны в плазме могут являться источником излучения в целом ряде диапазонов. Например, ударные волны в остатках сверхновых – источник γ -излучения. Кроме того, ОВС включают систему аморфных волокон, проявляющихся в оптическом и радиодиапазоне. Напряженность МП в волокнах $\sim 10^{-3}$ Э тормозит ультрарелятивистские электроны, которые генерируют синхротронное излучение [13, с. 485].

Ударные волны сверхновых ускоряют КЛ [14, с. 245] – источник синхротронного радиоизлучения (электроны) и γ -излучения (протоны). Индикатором КЛ служит γ -излучение, возникающее при столкновении КЛ с частицами межгалактического газа [13, с. 474].

Скорость ВСО в корональном газе ~ 100 км/с сравнима со скоростью ударных волн старых ОВС (§ 1), т.е. спектр ОВС, формируемый в окрестности ударной волны, может быть подобен спектру излучения в окрестности ударных волн вокруг гало (корон) галактик – спутников и образуемых ими ВСО. Оценим долю излучения ударных волн в радио- и γ -диапазонах исходя из спектра ОВС. При доле излучения в оптической (УФ) области $\delta_{\text{UV}} \sim 1$, в рентгеновском $\delta_x \sim 0,3 - 0,1$ и γ -диапазоне $\delta_\gamma \sim 0,1$; в радио-области (синхротронной природы) ~ 1 ГГц ($0,3$ м) $\delta_r \sim 10^{-3}$ (Рис. 3).

Согласно (46) энерговыделение ударных волн в удаленных КГ образует рентгеновское излучение в области 1 кэВ – 1 МэВ с плотностью энергии $\epsilon_x = \epsilon_k \delta_x \approx (1 - 3) \cdot 10^{-5}$ эВ/см³, что составляет до 30% плотности энергии ФКИ в рентгеновском диапазоне $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ в области >1 кэВ [2, с. 1228].

Энерговыделение ударных волн в КГ может формировать γ -излучение в области 1 – 10 МэВ с плотностью энергии $\epsilon_\gamma = \epsilon_k \delta_\gamma \approx 10^{-5}$ эВ/см³, что составляет 30% плотности энергии ФКИ в γ -диапазоне $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ эВ/см³ в области >1 МэВ при показателе $\sim 10^{-5}$ эВ/см³ в области >10 МэВ [2, с. 1228].

В радио-области ~ 1 ГГц ($\sim 0,3$ м) $\epsilon_r = \epsilon_k \delta_r \approx 10^{-7}$ эВ/см³, что соответствует плотности энергии ФКИ в длинноволновом радиодиапазоне $\sim 10^{-7}$ эВ/см³ ($\geq 0,5$ м) [2, с. 1228], которую при $z \sim 0,45$ может обеспечить радио-светимость корон типичных галактик $\sim 10^{39}$ эрг/с, что сравнимо со радио-светимостью нормальной S-галактики $\sim 5 \cdot 10^{38}$ эрг/с [1, с. 390].

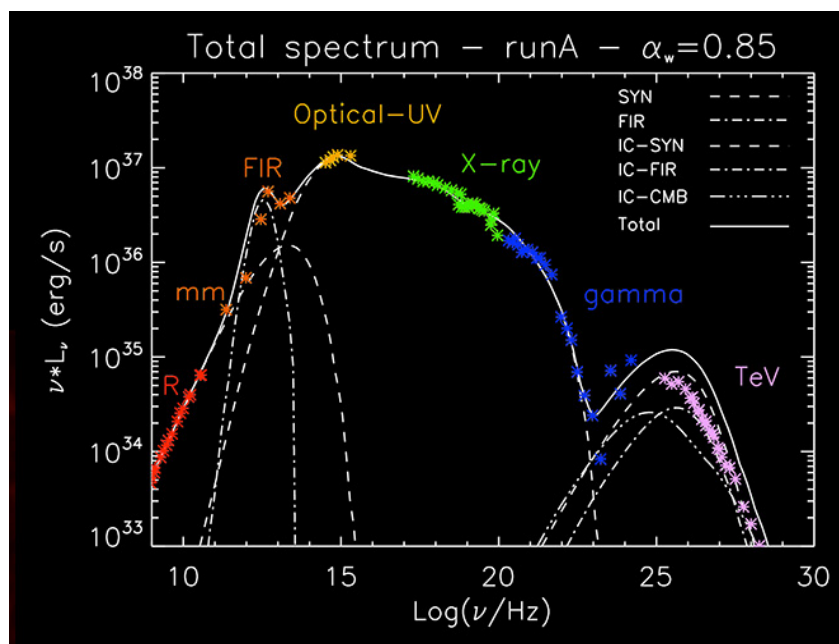


Рис. 3. Спектр излучения Крабовидной туманности

На рис. 3 представлен широкий спектр излучения ОВС Крабовидная туманность от радио- до γ -диапазона [34]. В спектр ОВС в жестком γ -диапазоне (порядка ТэВ) вносит вклад рентгеновский пульсар светимостью $5 \cdot 10^{38}$ эрг/с, чья энергия излучения трансформируется в кинетическую энергию ОВС [13, с. 485]; в далеком ИК диапазоне излучают частицы пыли.

Энерговыделение ударных волн в КГ ограничивает ФКИ соответствующих диапазонов:

$$W \leq \epsilon v(z + 1)/\delta_{\text{инг}}, \quad (47)$$

где δ_i – доля излучения в определенном диапазоне; ϵv – плотность энергии ФКИ в соответствующем диапазоне.

При $z \sim 0,45$ по предыдущей оценке и показателях $\delta_x \sim 0,3 - 0,1$ в рентгеновской области (1 кэВ – 1 МэВ); в γ -диапазоне $\delta_\gamma \sim 0,1$ (≥ 1 МэВ); в радио-области ~ 1 ГГц $\delta_r \sim 10^{-3}$; плотность энергии ФКИ в γ -диапазоне (≥ 1 МэВ) $\epsilon_\gamma \sim 3 \cdot 10^{-5}$ эВ/см³; в радиодиапазоне ($\geq 0,5$ м) $\sim 10^{-7}$ эВ/см³ [2, с. 1228] следует ограничение на *среднее энерговыделение КГ* $W \leq 2 \cdot 10^{60}$ эрг.

Оценка (47) до 3-х раз выше энерговыделения ударных волн в КГ за время ее существования $W_k \sim 0,6 \cdot 10^{60}$ эрг (39). Напомним, что наша Галактика относится к типичным, что обосновывает возможность формирования излучением КГ ФКИ в соответствующих диапазонах при повышенной интенсивности формирования ВСО и обусловленной ими скорости звездообразования, вызванного захватом малых галактик гравитацией корон более крупных в эпоху $z \sim 0,45 \pm 0,15$. С другой стороны, характеристики МФИ в ряде диапазонов (в рентгеновском и γ -диапазоне) могут быть завышены вследствие излучения короны Млечного Пути.

Так, спектр ФКИ в рентгеновском диапазоне содержит два экстремума в области $\sim 0,3$ кэВ и ~ 30 кэВ сравнимой плотности энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ [16, с. 55]; [29]. Пик в области $\sim 0,3$ кэВ, согласно закону Вина, может формировать тепловое излучение ионов в КГ с температурой $5 \cdot 10^5$ К. Подъем в области ~ 30 кэВ может быть обусловлен тормозным излучением электронов сравнимой энергии в кулоновском поле протонов в КГ (§ 8).

Формирование фотонов ФКИ в рентгеновской области ~ 50 кэВ обычно связывается с комптоновским рассеянием электронов КЛ на фотонах МФИ [13, с. 431]. Вместе с тем, в КЛ с энергией > 1 ГэВ (которые способны вызвать подобный эффект) доля электронов не превышает $\leq 1\%$ [2, с. 1176]; [13, с. 472], что недостаточно для формирования ФКИ в рентгеновской области, даже если плотность энергии межгалактических КЛ сравнима с плотностью энергии галактических КЛ ~ 1 эВ/см³ [13, с. 471], т.е. превышает плотность энергии МФИ $\sim 0,25$ эВ/см³ [17, с. 135]. Кроме того, в области максимума спектр МФИ (тепловой) имеет округлую форму [17, с. 134], как и спектр КЛ [13, с. 472], в то время как форма спектра ФКИ в жестком рентгеновском диапазоне 1 кэВ – 1 МэВ в области экстремума близка к прямому углу [29], подобно спектру тормозного излучения (§ 8).

Поскольку радиус галактик на порядок меньше радиуса их корон, рентгеновское излучение короны Млечного Пути в пределах Галактики при однородном распределении горячего коронального газа может быть близко к изотропному. Так, спектр теплового и тормозного излучения в центре облака однородной плазмы будет однородным (диффузным) и изотропным. Также изотропным может быть γ -излучение. Напомним, γ -излучение возникает за счет распада нейтральных пионов, образующихся при столкновении КЛ с частицами межгалактического газа [13, с. 474]. Это может затруднять выделение излучения окружающих галактик на фоне излучения короны нашей Галактики в этих диапазонах. При этом *рентгеновское и γ -излучение короны Млечного Пути может завышать спектр ФКИ в данных диапазонах.*

Оценим плотность энергии излучения, которую сформирует в Галактике излучение газа в ее короне. Объем короны $V \approx 4\pi R_k^3/3$; время распространения в ней излучения $t \approx R_k/c$, т.е. плотность энергии излучения в Галактике $\epsilon_g \approx L_{kt}/V$ в общем виде представима:

$$\varepsilon_{\text{г}} \approx 3\Delta i \delta i \delta t L_{\text{к}} / 4\pi c R_{\text{к}}^2, \quad (48)$$

где $L_{\text{к}}$ – светимость КГ; Δi – доля излучения, направленного внутрь КГ; δt – доля излучения, нагревающего корональный газ.

На нагрев коронального газа может тратиться $\delta t \sim 50\%$ мощности ударных волн в КГ (§ 8), составляющей $L_{\text{к}} \sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с (40). $R_{\text{к}} \sim 150$ кпк [10]; в рентгеновском и γ -диапазоне параметр $\delta i \sim 0,1 - 0,3$ (Рис. 3). Для излучающего куба $\Delta i \sim 1/2$; с учетом соотношения объемов куба и вписанной в него сферы $6/\pi$ параметр $\Delta i \sim 1/4$; *плотность энергии рентгеновского излучения газа короны в ее центре (Галактике)* $\varepsilon_{\text{г}} \approx (0,3 - 1) \cdot 10^{-4}$ эВ/см³.

Оценка (48) сравнима с плотностью энергии ФКИ в рентгеновской области $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ и γ -диапазоне $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ эВ/см³ [2, с. 1228]; [16, с. 55]; [29], т.е. характеристики ФКИ в данных диапазонах может заметно завышать излучение короны Млечного Пути.

Турбулентные оболочки ВСО могут генерировать МП, тормозящее ультрарелятивистские электроны (КЛ), генерируя синхротронное излучение на длине волны $\lambda_{\text{г}} \sim 0,5 - 1$ м в области максимума спектра (§ 1). Данное радиоизлучение, согласно предыдущей оценке, может формировать ФКИ в длинноволновом радиодиапазоне. Так, ФКИ в радиодиапазоне на длинах волн $\geq 0,5$ м связано с радиоизлучением слабых удаленных радиоисточников синхротронной природы [14, с. 336].

В спектре яркости МФИ в радиодиапазоне $\geq 0,7$ м выражен подъем (Рис. 4) [17, с. 135]; при этом флуктуации излучения в несколько раз выше, чем в области максимума спектра МФИ (~ 1 мм), что может указывать на наложение на спектр МФИ существенно более неоднородного излучения иной природы, вероятно, более позднего генезиса.

ВСО покрывают до 37% неба [19] (§ 2); кроме того, ударные волны в КГ связываются с остатками сверхновых [10], которые могут покрывать до 5% небесной сферы (§ 5), что не позволяет данным локальным источникам сформировать изотропное излучение, присущее ФКИ. Излучение КГ сформирует ФКИ при среднем красном смещении $z \sim 0,45$. Тем самым, *синхротронное излучение ударных волн в коронах галактик может исказить спектр МФИ в длинноволновой области $\lambda = \lambda_{\text{г}}(z + 1) \geq 0,7$ м*, что соответствует длине волны радиоизлучения, искажающего тепловой спектр МФИ (Рис. 4).

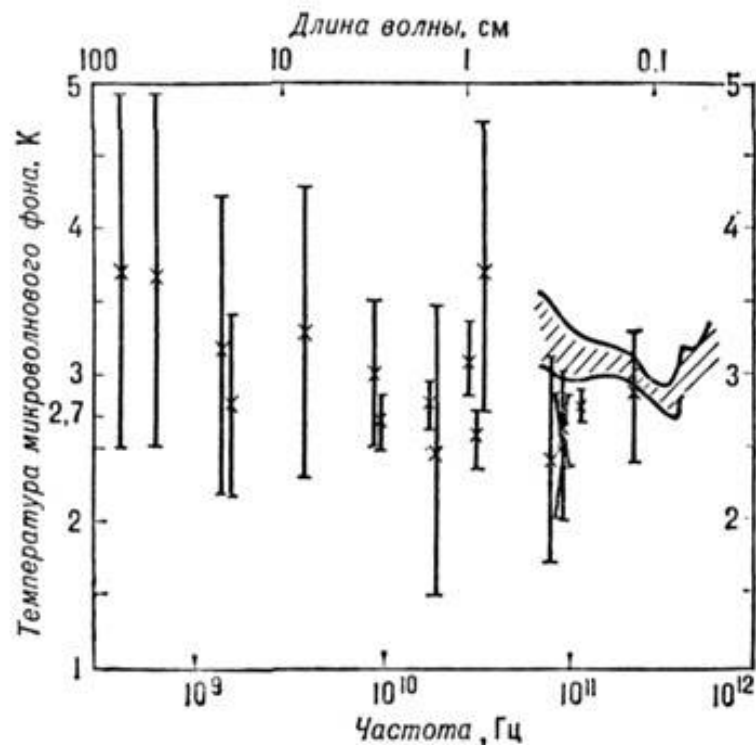


Рис. 4. Распределение яркости микроволнового фонового излучения

ВСО в короне как нашей, так и других галактик содержат атомарный водород, излучающий в радиолнии водорода $\lambda_n = 21$ см. Суммарная масса ВСО могла достигать максимальной величины в эпоху оседания мелких галактик в коронах более крупных, определяемую красным смещением $z \sim 0,45 \pm 0,15$, излучая на длине волны $\lambda = \lambda_n(z + 1) \approx 0,3$ м, что сравнимо с длиной волны излучения $\geq 0,7$ м, искажающего спектр МФИ (Рис. 4). Вместе с тем, мощность излучения КГ в радиолнии водорода весьма мала и не может заметно искажать спектр МФИ.

Мощность излучения атомарного водорода, содержащегося в ВСО в КГ:

$$W_n = E_n \Sigma n \nu / m p t_n, \quad (49)$$

где E_n – энергия фотона; t_n – период излучения атома водорода.

У фотона с длиной волны $\lambda_n = 21$ см энергия $W_n = hc/\lambda_n \approx 7 \cdot 10^{-18}$ эрг. Для радиолнии водорода $t_n \sim 10^7$ лет [15, с. 216]. При $\Sigma n \nu \sim 7 \cdot 10^9$ М $\odot$ [6] *мощность радиоизлучения атомарного водорода ВСО в короне* $W_n \approx 3 \cdot 10^{35}$ эрг/с.

Оценка (49) достигает лишь $\sim 10^{-4}$ радио-светимости КГ синхротронной природы $\delta r L_k \approx 2 \cdot 10^{39}$ эрг/с при $L_k \sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с (40); $\delta r \sim 10^{-3}$ (Рис. 3), что не существенно.

10. Выводы

1. Типичная скорость *высокоскоростных облаков* (ВСО) ~ 90 км/с, сравнима со скоростью звука в корональном газе ~ 70 км/с при числе Маха $M \sim 1$, при котором возникают турбулентности. Турбулентности также могут возникать в хвосте ударных волн вокруг гало (корон) галактик – спутников.

2. В *магнитодинамических* (МГД) турбулентностях ВСО *магнитное поле* (МП) может достигать 3 – 7 мкГс. Рассеяние МП ВСО *космических лучей* (КЛ) – электронов с энергией $\sim 0,4$ ГэВ в области максимума энергетического спектра может генерировать синхротронное излучение на длине волны 0,5 – 1 м в области максимума спектра.

3. Исходя из скорости звездообразования в Галактике, а также массы и динамики оседания ВСО (насыщающих ее газом) в короне в оболочках ВСО может испаряться до 70% газа.

4. ВСО могут оседать в Галактику из ее короны по спиральной траектории при угле наклона траектории (относительно радиального вектора) $\sim 11^\circ$, так что ВСО могут пролетать через диск Галактики, способствуя звездообразованию в нем.

5. Ударные волны в *короне Галактики* (КГ) преимущественно могут формировать не остатки сверхновых, а ВСО. При этом основной вклад в обогащение коронального газа тяжелыми элементами могли внести планетарные туманности, образуемые старыми звездами, выброшенными из галактик – спутников приливными силами.

6. МП продуктов эволюции звезд – нейтронных звезд и белых карликов падает до ~ 1 мкГс на удалении $\ll 10^9$ м и $\sim 10^{11}$ м соответственно. Их МП покрывает $\ll 10^{-17}$ и $\sim 10^{-10}$ небесной сферы соответственно, что пренебрежимо мало. Также мало их влияние на МП Галактики $\leq 10^{-13}$ и $\leq 10^{-7}$. МП Галактики ~ 2 мкГс, однородное в масштабе > 1 кпк, может искажать МП ~ 3 мкГс облаков водорода – остатков ВСО сравнимого размера ~ 1 кпк.

7. Ударные волны ВСО могут ускорять КЛ мощностью $\sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с и субкосмические лучи (в т.ч. электроны) ≤ 100 кэВ мощностью $\sim 10^{42}$ эрг/с, способные нагревать корональный газ, образующий тепловой спектр в области $\sim 0,3$ кэВ, а также формировать тормозное излучение с экстремумом в области ~ 30 кэВ.

8. Излучение КГ, обусловленное ударными волнами ВСО, могло быть интенсивным в период формирования скоплений галактик при $z \leq 1$, нагревая электронный газ согласно эффекту Зельдовича – Сюняева, но в пределах красного смещения $z \geq 0,3$, при котором излучение КГ могло формировать изотропное *фоновое космическое излучение* (ФКИ). В КГ в сравнимый период $z \sim 0,3 - 0,6$ наблюдаются «странные радио-круги».

9. Кинетическая энергия ВСО, при оседании в Галактику из ее короны трансформирующаяся в энергию излучения теплого газа ($\sim 10^4$ К), может формировать ФКИ в УФ области с плотностью энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³.

10. Ударные волны ВСО в КГ, ускоряющие КЛ (электроны), тормозимые МП, могут формировать ФКИ в радиодиапазоне синхротронной природы в области $\geq 0,5$ м с плотностью энергии $\sim 10^{-7}$ эВ/см³.

11. Рассеяние ускоряемых ударными волнами КЛ и субкосмических лучей частицами газа КГ может порождать рентгеновское излучение (в области 0,3 и 30 кэВ) с плотностью энергии $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ и γ -излучение ≥ 1 МэВ с плотностью энергии $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ эВ/см³.

12. Плотность энергии рентгеновского и γ -излучения КГ в ее центре – Галактике $(0,3 - 1) \cdot 10^{-4}$ эВ/см³ сравнима с плотностью энергии ФКИ в соответствующих диапазонах, что может завышать его характеристики.

Литература

1. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 1. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1988. – 704 с.
2. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
3. F. Hammer, Y. Yang, F. Arenou, et al. Galactic Forces Rule the Dynamics of Milky Way Dwarf Galaxies // The Astrophysical Journal. – 2018. – V. 860:76. – № 1. – 19 pp.
4. 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.
5. R. Ibata, B. Gibson. The Ghosts of Galaxies Past // Scientific American Magazine. – 2007. – V. 296. – № 4. – P. 40-45.
6. N. Tahir, M. López-Corredoira, F. De Paolis. The baryonic mass estimates of the Milky Way halo in the form of high-velocity clouds // New Astronomy. – 2025. – V. 115. – Art. 102328.
7. T. Westmeier. A new all-sky map of Galactic high-velocity clouds from the 21-cm HI4PI survey // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – V. 474. – Is. 1. – P. 289–299.
8. V. Vacca, T. Shimwell, R.A. Perley, et al. Spectral study of the diffuse synchrotron source in the galaxy cluster Abell 523 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – V. 511. – Is. 3. – P. 3389–3407.
9. F. Govoni, E. Orrù, A. Bonafede, et al. A radio ridge connecting two galaxy clusters in a filament of the cosmic web // Science. – 2019. – V. 364. – Is. 364(6444). – P. 981-984.
10. N. Lehner, et al. Project AMIGA: The Circumgalactic Medium of Andromeda // The Astrophysical Journal. – 2020. – V. 900:9 – N 1. – 44 pp.
11. 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.
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. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 2. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 703 с.
14. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 5. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 784 с.
15. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 4. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1994. – 704 с.
16. А.В. Засов, К.А. Постнов. Общая астрофизика. 2-е изд. испр. и дополн. Фрязино: Век 2. – 2011. – 576 с.
17. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 3. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1992. – 672 с.

18. 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.
19. M.E. Putman, J.E.G. Peek, M.R. Joung. Gaseous Galaxy Halos // *Review Article*. – 2012. – V. 50. – P. 491–529.
20. Gil de Paz, S. Boissier, B.F. Madore, et al. The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2007. – V. 173. – № 2. – P. 185.
21. F.J. Lockman, R.A. Benjamin, A.J. Heroux, G.I. Langston. The Smith Cloud: A High-Velocity Cloud Colliding with the Milky Way // *The Astrophysical Journal*. – 2008. – V. 679. – № 1. – L21 – L24.
22. D. Krishnarao, et al. Observations of a Magellanic Corona // *Nature*. – 2022. – V. 609. – P. 915–918.
23. А.В. Земляков, М.А. Еремин, И.Г. Коваленко, Е.В. Жукова. О прохождении межзвездных облаков через спиральный рукав дисковой галактики // *Моделирование, информатика и управление*. – 2020. – Т. 23. – № 2. – С. 41-56.
24. С.Ю. Поройков. Механизм формирования «странных радио-кругов» // *Журнал естественнонаучных исследований*. – 2024. – Т. 9. – № 4. – С. 82-99.
25. 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.
26. С.Ю. Поройков. Характеристики первых звезд и продуктов их эволюции // *Журнал естественнонаучных исследований*. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 22-48.
27. S. Bagnulo, J.D. Landstreet. New insight into the magnetism of degenerate stars from the analysis of a volume-limited sample of white dwarfs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2021. – V. 507. – Is. 4. – P. 5902–5951.
28. Yi-Kuan Chiang, Ryu Makiya, Brice Ménard, Eiichiro Komatsu. The Cosmic Thermal History Probed by Sunyaev–Zeldovich Effect Tomography // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 902:56. – № 1. – 12 pp.
29. R.C. Henry. Diffuse background radiation // *The Astrophysical Journal Letters*. – 1999. – № 516. – № 2. – L49-L52.
30. 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.
31. Á. Bogdán, W.R. Forman, M. Vogelsberger, et al. 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.
32. 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.
33. Я.Б. Зельдович, Н.Д. Новиков. *Строение и эволюция Вселенной*. – М.: Наука. – 1975. – 736 с.
34. D. Volpi, L. Del Zanna, E. Amato, N. Bucciantini. Non-thermal emission from relativistic MHD simulations of pulsar wind nebulae: from synchrotron to inverse Compton // *Astronomy & Astrophysics*. – 2008. – V. 485. – № 2. – P. 337-349.