

Формирование внутри высокоскоростных облаков гигантских молекулярных облаков и их проявления в Галактике и ее гало

Formation of giant molecular clouds inside high-velocity clouds and their manifestations in the Galaxy and its halo

Поройков С.Ю.

Канд. физ-мат. наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва
e-mail: sporoykov@mail.ru

Porojcov S.Yu.

Candidate of Physics and Mathematics. Sciences, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow
e-mail: sporoykov@mail.ru

Аннотация

Высокоскоростные облака (ВСО) суммарной массой $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$, оседая в Галактику из ее короны $\sim 10^9$ лет, могут образовывать галактические фонтаны ($T \sim 10^6$ К). Внутри ВСО могут формироваться гигантские молекулярные облака (ВМО). Пересекая вращающуюся Галактику ~ 5 раз, ВМО могут выбрасывать фонтаны газа ($T \sim 10^5$ К), а также воспроизводить 5 спиральных ветвей и цепочки молодых звезд, способствуя звездообразованию $3 \pm 1 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Большая часть ВМО оседает на удалении 4 – 8 кпк от центра Галактики, образуя молодые звезды, чья большая светимость может завышать оценку массы данной области (влияющей на кривую вращения Галактики) до 30%. ВМО и ВСО образуют ударные волны размером 0,3 – 1 кпк мощностью $\sim 4 \cdot 10^{41}$ эрг/с, ускоряющие космические лучи (КЛ) до $\leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Цепочки ВСО в короне Галактики, сжимающиеся в комплексы ВСО в ее гало, ускорят КЛ до $\leq 10^{18}$ эВ; ансамбль $2,5 \cdot 10^3$ ВМО в гало ускорят КЛ до $\leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ, Магелланов Поток – до $\leq 10^{20}$ эВ.

Ключевые слова: высокоскоростные облака, гигантские молекулярные облака, галактические фонтаны, космические лучи.

Abstract

High-velocity clouds (HVC) with a total mass of $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$, settling into the Galaxy from its corona for $\sim 10^9$ years, can emit galactic fountains ($T \sim 10^6$ K). Giant molecular clouds (HMC) can form inside HVC. Crossing the rotating Galaxy ~ 5 times, HMC can eject fountains of gas ($T \sim 10^5$ K), as well as reproduce 5 spiral branches and chains of young stars, promoting star formation at $3 \pm 1 M_{\odot} \text{ year}^{-1}$. Most of the HMC settles at a distance of 4–8 kpc from the Galactic center, forming young stars whose high luminosity can overestimate the mass of this region (affecting the Galactic rotation curve) by up to 30%. HMC and HVC form shock waves with a size of 0.3 – 1 kpc with a power of $\sim 4 \cdot 10^{41}$ erg/s, accelerating cosmic rays (CR) to $\leq 3 \cdot 10^{15}$ eV. Chains of HVC in the corona of Galaxy, collapsing into HVC complexes in its halo, can accelerate CR to $\leq 10^{18}$ eV; an ensemble of $2.5 \cdot 10^3$ HMC can accelerate CR to $\leq 3 \cdot 10^{19}$ eV, Magellanic Stream – to $\leq 10^{20}$ eV.

Keywords: high-velocity clouds, giant molecular clouds, galactic fountains, cosmic rays.

Введение

Галактики – спутники образуют в короне Галактики *высокоскоростные облака* (ВСО) атомарного водорода суммарной массой $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (M_{\odot} – масса Солнца) [1]. За время оседания ВСО в Галактику из короны $\sim 10^9$ лет [2] внутри них могут формироваться молекулярные облака. При пересечении Галактики ВСО разрушаются [3]; из них могут выделяться более компактные *высокоскоростные молекулярные облака* (ВМО), движущиеся по эллиптическим орбитам. После нескольких пересечений Галактики ВМО могут осесть в ее диске, пополнив число *гигантских молекулярных облаков* (ГМО), стимулирующих звездообразование.

В настоящей работе анализируется динамика ВСО и ВМО в диске и гало Галактики и на этой основе рассматриваются их возможные проявления.

Оценено число ВМО в гало $\sim 2,5 \cdot 10^3$, их суммарная масса $\sim 10^9 M_{\odot}$ и время оседания в Галактику из гало $\sim 6 \cdot 10^8$ лет (§ 1).

Цепочки ВСО длиной ~ 30 кпк при оседании в Галактику из короны за счет гравитации могут формировать комплексы масштаба ~ 10 кпк (§ 2).

Показано, что внутри ВСО могут формироваться ГМО массой $\sim 4 \cdot 10^5 M_{\odot}$, выделяющиеся из них в процессе пересечения диска Галактики (§ 3).

Анализируется динамика оседания ВСО и ВМО в Галактику; оценена их равновесная скорость в гало ~ 100 км/с и ~ 300 км/с соответственно (§ 4).

Рассматривается возможность образования ВСО и ВМО галактических фонтанов при пересечении Галактики. Оценена средняя масса галактического фонтана ВСО $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$, а также его время жизни $\sim 4 \cdot 10^8$ лет (§ 5).

Оценена скорость звездообразования $3 \pm 1 M_{\odot}$ год $^{-1}$, достижимая при оседании в Галактику ВСО с учетом испарения $\sim 70\%$ их газа в гало галактическими фонтанами (§ 6).

Обсуждается возможность воспроизведения 5-ти спиральных ветвей, а также цепочек молодых звезд, звездных скоплений и газовых облаков длиной ≤ 2 кпк при оседании части ВСО ($\sim 1\%$) вдоль плоскости диска Галактики (§ 7).

Анализируется влияние на кривую вращения Галактики локализации ГМО (на удалении 4 – 8 кпк от ее центра), образующих молодые звезды повышенной светимости, что повышает отношение масса – светимость данной области относительно среднего значения для Галактики до 30% (§ 8).

Оценена мощность ударных волн ВСО и ВМО в Галактике и ее гало $\sim 4 \cdot 10^{41}$ эрг/с и энергия ускоряемых ими *космических лучей* (КЛ) $\leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ (в рамках механизма Ферми); цепочки ВСО в короне Галактики, сжимающиеся в комплексы ВСО в ее гало, могут ускорять КЛ до $\leq 10^{18}$ эВ, ансамбль ВМО в гало до $\leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ, Магелланов Поток до $\leq 10^{20}$ эВ (§ 9).

Оценена температура газа в галактических фонтанах, образуемых ВСО ($0,4 - 1 \cdot 10^6$ К) и ВМО ($0,3 - 1,7 \cdot 10^5$ К), а также плотность коронального газа $\geq 6 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$, при которой встречные ударные волны могут образовать облака атомарного водорода, в том числе в виде ВСО (§ 10).

1. Высокоскоростные облака в гало Галактики

Галактики – спутники образуют в короне Галактики ВСО, содержащие атомарный водород (проявляющийся в радиолинии водорода 21 см) суммарной массой $\sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ [1] размером 2 – 15 кпк, движущиеся (на луче зрения) со скоростью 70 – 90 км/с [4]; по другим данным 90 – 100 км/с [1].

На рис. 1 представлено облако Смита массой $\sim 10^6 M_{\odot}$, движущееся с лучевой скоростью 73 ± 26 км/с на удалении 12 ± 1 кпк от Земли; через $\sim 3 \cdot 10^7$ лет оно столкнется с диском Млечного Пути под углом 45° [5].

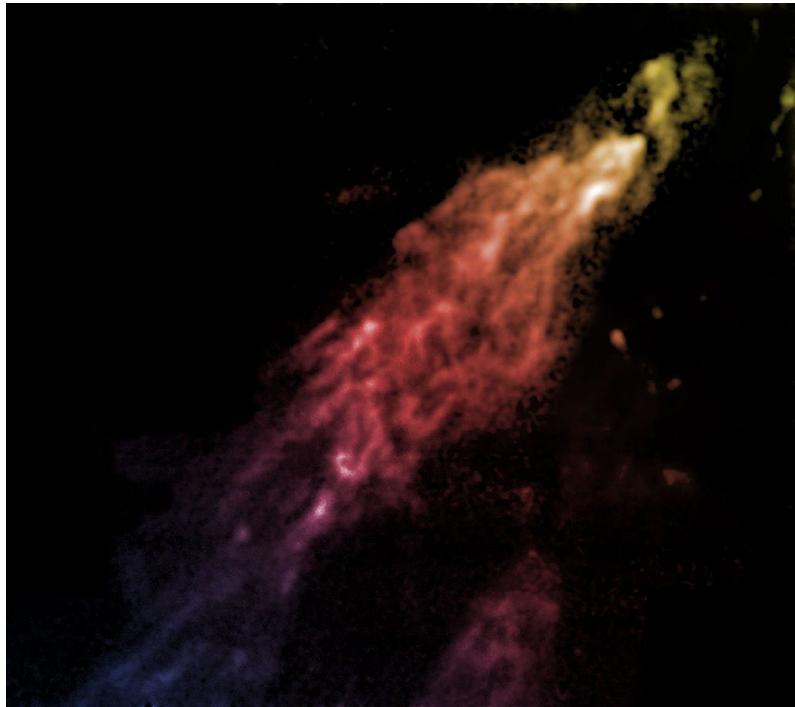


Рис. 1. Облако Смита (2008, телескоп Green Bank)

Оценим среднюю концентрацию атомарного водорода в облаке газа:

$$n_v \approx 3m_v/4\pi m_p r_v^3, \quad (1.1)$$

где r_v – радиус газового облака; m_v – его масса; m_p – масса протона.

При $m_v \sim 10^6 M_\odot$; $r_v \sim 0,5$ кпк [5] концентрация газа в облаке Смита $n_v \approx 0,1 \text{ см}^{-3}$, что сравнимо с плотностью атомарного водорода $0,1 - 1 \text{ см}^{-3}$ в Магеллановом Потоке [20] (рис. 3), образующем большую долю ВСО [1].

Среди ВСО (HVC) выделяют компактные ВСО (CHVC) [1]. Так, в гало Галактики присутствует более тысячи компактных объектов размером $\sim 0,3$ кпк; их шлейфы сравнимой ширины вытянуты на ≤ 2 кпк перпендикулярно направлению на центр Галактики (рис. 2), что может указывать на *вращение компактных ВСО в гало по эллиптическим орбитам*.

В компактных областях атомарного водорода ряда ВСО размером ~ 100 пк с температурой $(1,6 - 2,5) \cdot 10^4 \text{ К}$ обнаружены следы молекулярного водорода в УФ полосах Лаймана ($140 - 165 \text{ нм}$) и Вернера ($116 - 130 \text{ нм}$) [6]. Сравнимый размер ≤ 50 пк у ГМО в Галактике [7, с. 85].

В молекулярных облаках тяжелые элементы образуют частицы космической пыли [7, с. 84], являющиеся хладагентом [7, с. 83]. Газ внутри ВСО, охлаждаемый излучением пыли, может сжиматься в ГМО (§ 3), окруженное оболочкой более разреженного теплого атомарного водорода, чей радиус на порядок выше. Например, масса облака Смита $\sim 10^6 M_\odot$ размером ~ 1 кпк [5] в 3 раза больше типичной массы ГМО $\sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$, чей размер ~ 50 пк [7, с. 85]; [9, с. 1217] в 20 раз меньше.

Облака теплого газа в гало Галактики обычно связывают с ВСО и планетарными туманностями [7, с. 85], однако средний радиус планетарных туманностей $\sim 0,03$ пк [7, с. 619] на 4 порядка меньше масштаба ~ 300 пк, который могут иметь ВМО в виде оболочек ГМО (масштаб ГМО ≤ 50 пк).

ВСО, а также оболочки ВМО, состоящие из атомарного водорода с температурой $\sim 10^4 \text{ К}$, излучают в УФ диапазоне ($\sim 0,3 \text{ мкм}$). Ок. 30% близких S-галактик имеют протяженное гало УФ излучения, превышающее их радиус [15], что указывает на фракцию теплого газа в горячем корональном газе, т.е. распространенность ВСО и ВМО в гало галактик. Эмиссионные УФ линии накладываются на сплошной спектр излучения в оптической области (включая ближний УФ), который создается процессом радиационного прилипания

электрона к атому водорода $e + H \rightarrow H^+ + h\nu$, протекающим, в том числе в фотосфере Солнца ($T \sim 6 \cdot 10^3$ К) [7, с. 515].

Присутствие ГМО в центральных областях ВСО может объяснить тот факт, что в окрестности так называемых пузырей Ферми ВСО обладают широким диапазоном металличности – от менее $\leq 20\%$ солнечной до $\sim 320\%$ солнечной [8]. Высокая металличность ряда ВСО объясняется оседанием тяжелых элементов в их центре.

В 2010 г. гамма-телескоп «Ферми» в диапазоне 1 – 10 ГэВ обнаружил гигантские структуры в виде пары пузырей (пузыри Ферми) магнитного поля до 15 мкГс [10], расположенных перпендикулярно плоскости Галактики и простирающихся на ~ 10 кпк каждый, окруженные многочисленными образованиями меньшего масштаба 0,1 – 1 кпк (рис. 2).

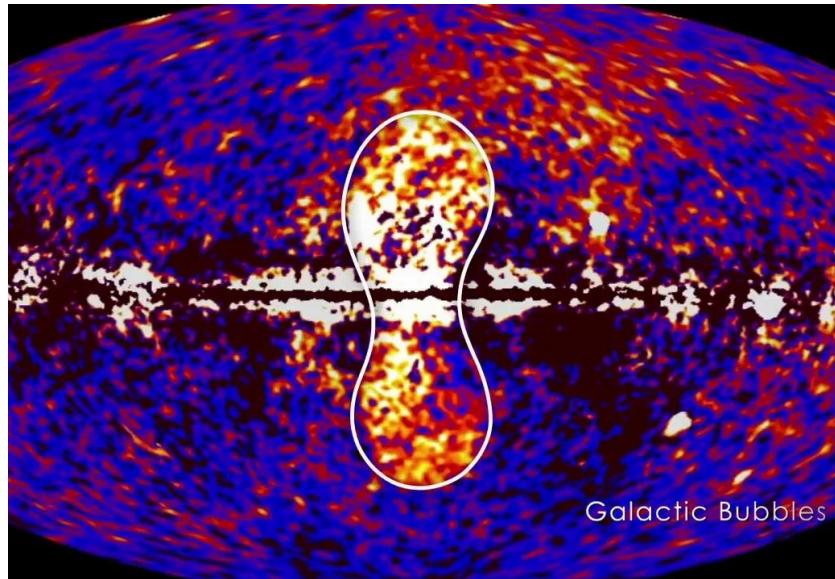


Рис. 2. Обзор Галактики (гамма-телескоп Fermi)

В 2020 г. рентгеновский телескоп eROSITA выявил суперпузыри большего размера 14 кпк, излучающие мягкие рентгеновские лучи; резкие границы пузырей указывают на бесстолкновительные ударные волны, по-видимому, связанные с пузырями Ферми [11].

Спектроскопические наблюдения пузырей Ферми в радио-, УФ- и оптическом диапазонах выявили многофазные газовые облака внутри пузырей Ферми – так называемых ВСО пузырей Ферми (FB HVC) [8]. Напомним, γ -излучение может возникать, в том числе за счет распада нейтральных пинов, образующихся при столкновении космических лучей (КЛ) с частицами межгалактического газа [12, с. 474], т.е. в формирование пузырей Ферми, могут вносить вклад облака газа, рассеивающие частицы КЛ.

На рис. 2 видны более сотни клочковатых образований размером ~ 1 кпк, сравнимым по масштабу с ВСО, большая часть которых группируется в комплексы масштаба ~ 10 кпк, в том числе в области пузырей Ферми. При этом магнитное поле пузырей Ферми искажает магнитное поле ВСО [8]. Подобные «суперпузыри» радиусом ~ 10 кпк (источник радиоизлучения синхротронной природы) обнаружены в ряде галактик в тех местах, где образуются новые звезды [13]. Так, газ ВСО, оседающих в галактику, способствует звездообразованию [14].

При пересечении диска Галактики ВСО разрушаются [3]; из них могут выделяться ВМО; при этом средняя масса ВМО $\sim 4 \cdot 10^5 M_\odot$ (4.5) сравнима с массой ГМО $\sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ (§ 5). При радиусе оболочки ВМО $r_0 \sim 150$ пк (рис. 2) согласно (1.1) их плотность $n_0 \sim 1 \text{ см}^{-3}$. Данная плотность оболочки ВМО сравнима со средней плотностью газа в диске Галактики $n \sim 0.6 \pm 0.1 \text{ см}^{-3}$ [9, с. 1217] и плотностью межзвездных облаков атомарного водорода $n_0 \geq 1 \text{ см}^{-3}$ [7, с. 86] с температурой $T_0 \leq 2000$ К [16, с. 163], т.е. межзвездные облака могут

являться фрагментами оболочек ВМО и ВСО, разрушенных в диске Галактики (§ 5). Так, например, динамическое давление межзвездного газа могло частично разрушить облако Смита (ранее пересекшее Галактику), на что указывает его клочковата форма (рис. 1).

Оценим число ВМО в гало Галактики. Число ВМО ограничивает суммарная масса ВСО с учетом динамики оседания ВСО и ВМО в Галактику:

$$N_M = (1 - \delta_h) \Sigma m_v \Delta t_m / m_m^* \Sigma t_v, \quad (1.2)$$

где m_m^* – средняя масса ВМО; Σm_v – суммарная масса ВСО; δ_h – доля газа ВСО, испаряющегося в гало; Σt_v – время оседания ВСО в Галактику из короны; Δt_m – время оседания ВМО в Галактику из гало.

Оценим время оседания в Галактику ВМО, движущихся в ее гало:

$$\Delta t_m = N t_0 / 2, \quad (1.3)$$

где t_0 – галактический год; N – число пересечений ВМО диска Галактики.

При $t_0 = 2,5 \cdot 10^8$ лет [17, с. 387]; $N \sim 5$ (§ 4) время оседания ВМО в Галактику из гало $\Delta t_m \approx 6 \cdot 10^8$ лет.

Время оседания ВСО в гало из короны $t_v \sim 7 \cdot 10^8$ лет [2]. Время оседания ВСО в Галактику из гало $t_v' \sim \Delta t_m \approx 6 \cdot 10^8$ лет при сравнимом числе пересечений Галактики ВСО и ВМО (§ 5), т.е. $\Sigma t_v = t_v + t_v' \approx 1,3 \cdot 10^9$ лет.

При $\Sigma m_v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [1]; $m_m^* \sim 4 \cdot 10^5 M_\odot$ (4.5); $\delta_h \sim 0,7$ (6.3) согласно (1.2) *число ВМО в гало* $N_M \approx 2,4 \cdot 10^3$, что сравнимо с наблюдаемым числом компактных объектов $N_M = (2,5 \pm 0,5) \cdot 10^3$ масштаба $\sim 0,3$ кпк в гало (Рис. 2). Число ГМО в Галактике $5 \cdot 10^3$ [7, с. 85] вдвое меньше.

Оценим суммарную массу ВМО в гало Галактики:

$$\Sigma m_m = N_M m_m^*, \quad (1.4)$$

где N_M – число ВМО в гало; m_m^* – средняя масса ВМО.

$N_M \sim 2,5 \cdot 10^3$; $m_m^* \sim 4 \cdot 10^5 M_\odot$ (4.5); *суммарная масса ВМО в гало Галактики* $\Sigma m_m \approx 10^9 M_\odot$.

Оценим долю ВМО в массе ВСО:

$$\delta_m = \Sigma m_m \Sigma t_v / \Sigma m_v \Delta t_m. \quad (1.5)$$

При $\Sigma m_m \sim 10^9 M_\odot$ (1.4); $\Sigma m_v \sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [1]; $\Delta t_m \sim 6 \cdot 10^8$ лет (1.3); $\Sigma t_v \sim 1,3 \cdot 10^9$ лет по предыдущей оценке *вклад ВМО в массу ВСО* $\delta_m \approx 0,3$.

Оценка (1.5) позволяет оценить среднюю массу ВСО:

$$m_{vo} = m_m^* / \delta_m. \quad (1.6)$$

При $\delta_m \sim 0,3$ (1.5); $m_m^* \sim 4 \cdot 10^5 M_\odot$ (4.5) *средняя масса ВСО* $m_{vo} \approx 1,3 \cdot 10^6 M_\odot$, что сравнимо с массой облака Смита $\sim 10^6 M_\odot$ [5].

Образование ГМО внутри ВСО актуально, в том числе в контексте оценки их вклада в скрытую массу. Так, наиболее распространенные в межзвездной среде молекулы водорода H_2 не имеют удобных для наблюдения линий в видимом и радиодиапазоне и их содержание обычно оценивается косвенными методами [7, с. 193]. Оценим долю ВМО в массе Галактики:

$$\delta_\Gamma = \Sigma m_m / M_\Gamma, \quad (1.7)$$

где M_Γ – масса Галактики.

При $M_\Gamma \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [17, с. 389]; $\Sigma m_m \sim 10^9 M_\odot$ (1.4) *доля ВМО в массе Галактики* $\delta_\Gamma \sim 0,5\%$, т.е. ее скрытая масса объяснима иным фактором (§ 8).

Оценим вероятность столкновения в гало ВМО и ГМО внутри них. Длина свободного пробега ВМО $l_m = 1/n\sigma$, где $\sigma = \pi r_m^2$; $n = 3N_c/4\pi R_\Gamma^3$. Расчеты показывают, что до оседания в Галактике ВМО может $N \sim 5$ раз пересекать диск при числе периодов вращения в гало $N/2$ (§ 4), т.е. $l_m = \pi N R_\Gamma$. Из чего следует оценка критического числа ВМО в гало Галактики:

$$N_c = (4/3\pi N) \cdot (R_\Gamma/r_m)^2, \quad (1.8)$$

где R_Γ – радиус Галактики; r_m – радиус ВМО; N – число пересечений ВМО Галактику.

$R_\Gamma \sim 15$ кпк [17, с. 387]; радиус ГМО $r_m \sim 20$ пк [9, с. 1217]; $N \sim 5$ (§ 4). *Критическое число ВМО в гало Галактики* $N_c \approx 4 \cdot 10^4$ на порядок больше числа ВМО в гало $N_m \sim 2,5 \cdot 10^3$,

т.е. основная часть ГМО (внутри ВСО) не сталкивается в гало и может осесть в диске Галактики.

Оценим вероятность столкновения ГМО (внутри ВСО) в гало:

$$p_m = N_m / N_c, \quad (1.9)$$

где N_m – число ВМО в гало; N_c – их критическое число.

При $N_c \approx 4 \cdot 10^4$ (1.8); $N_m \sim (2,5 \pm 0,5) \cdot 10^3$ вероятность столкновения ГМО (внутри ВСО) в гало $p_m \approx 0,06 \pm 0,01$.

ГМО, столкнувшись в гало, могут оседать в балдже Галактики. Так, масса балджа $M_b \sim 4,4 \cdot 10^9 M_\odot$ выше массы диска $M_d \sim 7,7 \cdot 10^{10} M_\odot$ [9, с. 1215] при отношении $M_b/M_d \approx 0,06$, сравнимом с $p_m \sim 0,06 \pm 0,01$ (1.9).

Для оболочек ВМО радиусом $r_o \sim 150$ пк (Рис. 2) согласно (1.8) $N_c \approx 7 \cdot 10^2$, что в $N_m/N_c \approx 3,5$ раза меньше N_m . Вероятность столкновения ВМО в гало $p_m \sim 1$ достижима при $N \sim 1,5$ (более половины эллиптической орбиты ВМО в гало), т.е. за время оседания ВМО в Галактику их оболочки могут испытать 3 – 4 столкновения.

Столкновение оболочек ВМО может приводить к образованию Y- и X-образных шлейфов газа, наблюдаемых на рис. 2. Плотность ГМО $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ [7, с. 85] на 2 порядка выше плотности оболочек ВСО $\sim 1 \text{ см}^{-3}$, т.е. столкновение оболочек ВМО не будет приводить к разрушению ГМО внутри них. Так, скорость ВМО в гало $\leq 300 \text{ км/с}$ (§ 4) на два порядка превышает вторую космическую скорость вблизи их поверхности $\sim 2 \text{ км/с}$ (1.10), т.е. гравитационный захват ВМО, чьи траектории пересекутся, невозможен.

Вторая космическая скорость:

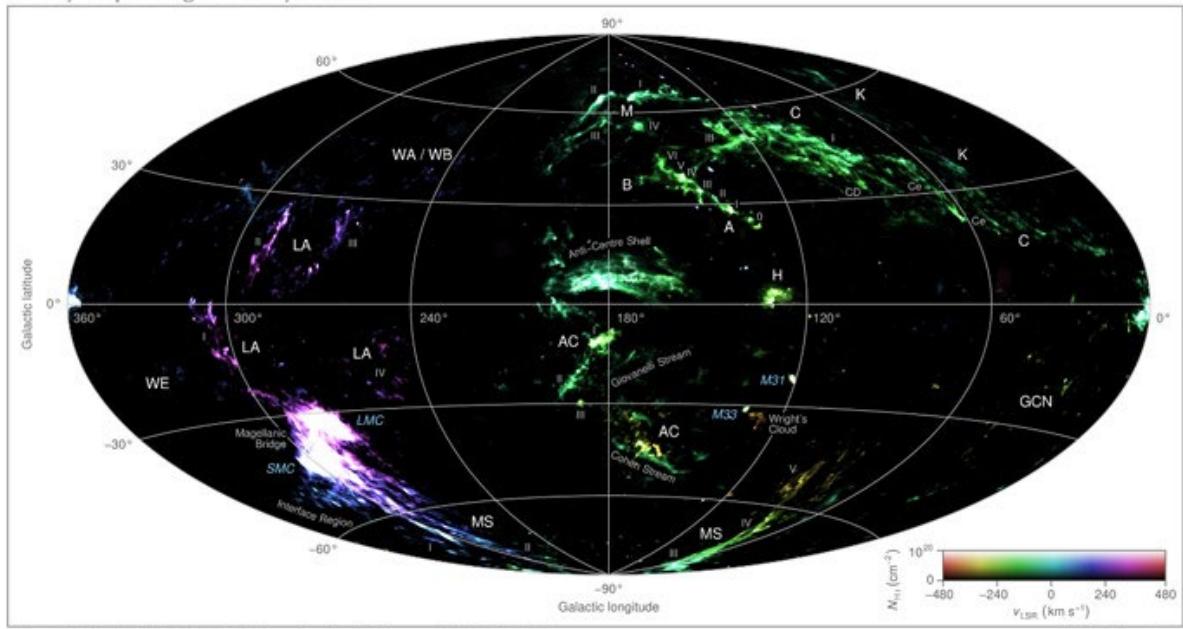
$$v_{II} = (2Gm/r)^{1/2}, \quad (1.10)$$

где G – гравитационная постоянная; m – масса; r – радиус [12, с. 474].

Средняя масса ВМО $m_m^* \sim 4 \cdot 10^5 M_\odot$ (4.5) сравнима с массой ГМО $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ [7, с. 85]. При радиусе оболочек ВМО $r_m \sim 150$ пк (Рис. 2) вторая космическая скорость вблизи их поверхности $v_{II} \approx 2 \text{ км/с}$.

2. Образование комплексов высокоскоростных облаков

All-sky Map of High-velocity Clouds



Westmeier, T., 2018, MNRAS, 474, 289; based on the HI4PI survey (A&A, 594, A116)

Tobias Westmeier

Рис. 3. Карта высокоскоростных облаков в короне Млечного Пути

На рис. 3 представлена карта ВСО Галактики, основанная на обзоре неба Full Sky HI4PI Survey и на данных радиотелескопа Effelsberg [4]. Как видно из данной карты, ВСО в короне

образуют ок. десятка образований в виде цепочек облаков, вытянутых на 10 – 30 кпк. ВСО в короне Галактики образуют галактики – спутники [1]. ВСО, вероятно, могут образовываться в «хвосте» ударной волны в окрестности гало галактик – спутников [2].

Размер ВСО в короне 2 – 15 кпк [4] за счет сил гравитации (§ 3) сжимается до ~1 кпк при средней массе $\sim 10^6 M_\odot$ (1.6). Как видно из рис. 2, ВСО в гало образуют квазисферические комплексы масштаба ~10 кпк, формированию которых может способствовать их взаимное гравитационное притяжение.

Оценим длину цепочки ВСО, при которой они за время оседания в Галактику могут взаимно притянуться с образованием квазисферического комплекса на основе соотношения, следующего из уравнения (3.2):

$$\Delta r = 2 \cdot [8G\Sigma m_v'(t_v/\pi)^2]^{1/3}, \quad (2.1)$$

где $\Sigma m_v'$ – суммарная масса ВСО, образующих цепочку; t_v – время оседания ВСО из короны в Галактику.

При $t_v \sim 7 \cdot 10^8$ лет [2] цепочка ВСО массой $\Sigma m_v' \sim 10^9 M_\odot$, равной 10% суммарной массы ВСО в короне Галактики $\sim 7 \cdot 10^9 M_\odot$ [1] может иметь длину $\Delta r \approx 30$ кпк, что втрое выше размера комплексов ВСО ~10 кпк (Рис. 3) и сравнимо с типичной длиной цепочек ВСО в короне ≤ 30 кпк (Рис. 3) и в 1,5 раза выше размера ВСО в короне ≤ 15 кпк [4]. Тем самым, *при оседании в Галактику из ее короны цепочки ВСО длиной ~30 кпк могут формировать в гало комплексы ВСО масштаба ~10 кпк.*

Дальнейшему сближению и слиянию ВСО в комплексах могут препятствовать обтекающие их ударные волны, содержащие турбулентности. ВСО имеют вытянутую форму (Рис. 1), т.е. область их соприкосновения при сближении невелика. Оценим долю δ_s площади сечения ВСО $S = \pi r^2$, при которой сила динамического давления газа $F = p\delta_s S$, ($p = m_p n$) компенсирует силу гравитационного притяжения ВСО $F_g = Gm_v^2/D_v^2$ к другому ВСО, удаленному на расстояние их удвоенного радиуса $D_v \sim 2r_v$:

$$\delta_s = Gm_v^2/4\pi m_p n v_v^2 r_v^4, \quad (2.2)$$

где n – концентрация коронального газа; v_v – скорость ВСО; m_v – его масса.

Масса ВСО типа облака Сmita $m_v \sim 10^6 M_\odot$ радиусом $r_v \sim 0,5$ кпк [5]; $v_v \sim 100$ км/с [4]; [5]. Концентрация коронального газа $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см⁻³ [9, с. 1217]; [18, с. 101] доля площади давления $\delta_s \approx 1\%$, что для каплевидной формы ВСО является реалистичной оценкой. Таким образом, *ударные волны вокруг ВСО, содержащие турбулентности, могут препятствовать слиянию ВСО в комплексах, оседающих в Галактику.*

Оседание комплекса ВСО в Галактику может вызывать всплеск звездообразования, способствующий формированию галактического ветра и «суперпузырей» типа пузырей Ферми. Так, оседание ВСО в Галактику способствует звездообразованию [14]. Действительно, «суперпузыри» магнитного поля радиусом ~10 кпк обнаружены в тех местах галактик, где происходит всплеск звездообразования [13]. Вспышка звездообразования может сопровождаться оттеканием от Галактики в межгалактическую среду части межзвездного газа с формированием галактического ветра [7, с. 86].

Галактики, где оседают комплексы ВСО, активизируя рождение молодых, в том числе ярких короткоживущих звезд (§ 8), могут проявляться как сейфертовские галактики (SyG). Так, SyG – галактики с активными ядрами, имеющие повышенную поверхностную яркость, рассматриваются, в т.ч., как фаза в эволюции обычных спиральных галактик [16, с. 484].

3. Формирование в высокоскоростных облаках гигантских молекулярных облаков

ВСО, содержащие атомарный водород, образуют галактики – спутники в короне Галактики (§ 1). Нагребенный ударной волной газ остывает в основном за счет излучения в спектральных линиях. Газ в короне плотностью $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см⁻³ [9, с. 1217] разрежен. Ударные волны уплотняют газ (плазму) [19, с. 208] (§ 10), вследствие чего горячий газ интенсивнее излучает $\sim n^2$ [12, с. 109] и резко охлаждается за фронтом ударной волны [19, с. 209].

В компактных областях атомарного водорода ряда ВСО размером ~ 100 пк обнаружены следы молекулярного водорода [6]; сравнимый размер ≤ 50 пк имеют ГМО (§ 1). Оценим радиус облака атомарного водорода, при котором центр ВСО (куда оседают тяжелые элементы) может сжаться в ГМО.

Плотность гравитационной энергии на периферии сферического газового облака $\epsilon_g = 2\pi G(\rho R)^2/9$ уравновесит давление слабо ионизованного теплого газа $p = nkT$ при $p = \epsilon_g$. С учетом $n = \rho/m_p$ радиус газового облака:

$$r_v = (3/m_p) \cdot (kT/2\pi G n)^{1/2}, \quad (3.1)$$

где k – постоянная Больцмана.

В Магеллановом Потоке (рис. 3) плотность атомарного водорода $0,1 - 1 \text{ см}^{-3}$ [20] не ниже плотности облака Смита $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ (1.1) и межоблачной среды $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ с температурой $(0,7 - 1) \cdot 10^4 \text{ К}$ [7, с. 86]; [9, с. 1217]. При $n_v \geq 0,1 \text{ см}^{-3}$; $T \leq 10^4 \text{ К}$ радиус облака теплого газа $r_v \leq 3 \text{ кпк}$, что, как правило, не превышает радиус ВСО в короне Галактики $2 - 15 \text{ кпк}$ [4] (Рис. 3).

Оценим время сжатия теплого газа (нейтрального водорода) в ВСО. Время гравитационного коллапса сферического газового облака:

$$t_k = (3\pi/32\alpha G m_p n)^{1/2}, \quad (3.2)$$

где $\alpha \leq 1$ – параметр, учитывающий компенсацию сил гравитации давлением газа [17, с. 529].

В ВСО размером $< 3 \text{ кпк}$ (3.1) тепловое давление атомарного водорода, уплотняющегося к центру, охлаждаясь за счет излучения, существенно не затормозит его гравитационный коллапс, т.е. $\alpha \sim 1$. При $n_v \geq 0,1 \text{ см}^{-3}$ [20] атомарный водород сожмется за $t_k \leq 2 \cdot 10^8 \text{ лет}$.

Альтернативная оценка времени сжатия газового облака:

$$t_k = (\pi/2) \cdot (r_g^3/2\alpha GM_g)^{1/2}, \quad (3.3)$$

где M_g – масса газового облака; r_g – его радиус [17, с. 529].

Для ВСО типа облака Смита: $M_g \sim 10^6 M_\odot$; $r_g \sim 0,5 \text{ кпк}$ [5]. При $\alpha \sim 1$ облако теплого газа сожмется за $t_k \approx 2 \cdot 10^8 \text{ лет}$, что соответствует оценке (3.2).

Время оседания ВСО из короны в гало Галактики $t_v \sim (7 \pm 2) \cdot 10^8 \text{ лет}$ [2] в несколько раз выше оценок (3.2) и (3.3). Тем самым, за время оседания ВСО в Галактику из короны газ в их центре может сжаться в ГМО.

4. Динамика высокоскоростных облаков в Галактике и ее гало

ВСО, пролетая сквозь диск Галактики, деформируются и теряют часть своей массы; маломассивные облака разрушаются [3]. Более компактные и плотные ВМО (содержащие ГМО) могут потерять треть массы, содержащейся в их газовой оболочке (§ 5).

Сравним скорость ВСО и ВМО со скоростью звука в теплом межзвездном газе и горячем корональном газе. Скорость звука в газе $a = (\gamma p/\rho)^{1/2}$ обусловлена его плотностью ρ и давлением p [16, с. 546]. С учетом уравнения состояния идеального газа $p = nkT$ [17, с. 377] скорость звука в водороде ($\rho = nm_p$) представима в виде:

$$a = (\gamma k T / m_p)^{1/2}, \quad (4.1)$$

где γ – показатель адиабаты.

Для одноатомного газа (ионизованного водорода) $\gamma = 5/3$ [17, с. 25]. В короне Галактики температура $T_k \sim 5 \cdot 10^5 \text{ К}$ [9, с. 1217]; [18, с. 101]. Скорость звука в короне $a_k \approx 70 \text{ км/с}$.

В газе гало $T_g \sim 10^5 \text{ К}$ [7, с. 85]. Скорость звука в гало $a_g \approx 30 \text{ км/с}$.

В межоблачной среде Галактики $T_t \sim 10^4 \text{ К}$ [7, с. 86] скорость звука $a_t \approx 10 \text{ км/с}$.

Скорость оседания ВСО в короне Галактики $v \sim 90 - 100 \text{ км/с}$ [1]; $70 - 90 \text{ км/с}$ [4] сравнима со скоростью звука в корональном газе $a_k \sim 70 \text{ км/с}$ (4.1), чему соответствует число Маха $M = v/a_k \sim 1 - 1,4$. При $M \sim 1$ аэродинамическое сопротивление максимально (волновой кризис), что обусловлено переходом от ламинарного режима обтекания к турбулентному

[17, с. 165], т.е. ударные волны ВСО и ВМО в корональном газе могут порождать турбулентности, в которых возникает магнитное поле [2].

Оценим равновесную скорость ВСО, оседающего в Галактику из гало (короны) в условиях равновесия силы гравитации $F_g = GM_r m_v / R_r^2$ и силы динамического давления встречного потока коронального газа $F_d = k_a S \rho v^2$, где $S = \pi r_v^2$; $\rho = n m_p$. Скорость оседания ВСО:

$$v = (1/r_v R_r)(GM_r m_v / \pi m_p n k_a)^{1/2}, \quad (4.2)$$

где M_r , R_r – масса и радиус Галактики с учетом гало в пределах удаленности ВСО; m_v , r_v – масса и радиус ВСО; n – концентрация окружающего газа.

В дискообразном гало высотой 1,5 – 2 кпк плотность газа $n_r \sim 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ (10.4); выше данной области преобладает горячий корональный газ плотностью $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ (§ 5).

$M_r \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [17, с. 389]; $R_r \sim 15$ кпк [17, с. 387]. Для ВСО типа Смита $m_v \sim 10^6 M_\odot$; $r_v \sim 0,5$ кпк [5]. Равновесная скорость ВСО в короне $v \sim 100 \text{ км/с}$ [2], что сравнимо со скоростью звука в короне $\sim 70 \text{ км/с}$ (4.1), когда аэродинамическое сопротивление максимально [17, с. 165] при $k_a \sim 2$.

Равновесная скорость ВСО в гало $v_v \approx 100 \text{ км/с}$, что сравнимо с оценкой (4.2) для короны и выше скорости звука в гало $\sim 30 \text{ км/с}$ (4.1) при числе Маха $M \sim 3$, чему может соответствовать коэффициент аэродинамического сопротивления $k_a \sim 1$.

Равновесная скорость ВСО соответствует их полной скорости v ; ее составляющие относительно плоскости диска определяются углом падения:

$$v = v/\sin \theta, \quad (4.3)$$

где θ – угол наклона к плоскости диска; v – составляющая полной скорости.

Лучевая скорость облака Смита $v \sim 73 \text{ км/с}$, движущегося в гало под углом $\theta \sim 45^\circ$ к плоскости диска [5], может соответствовать полной скорости $v \approx 100 \text{ км/с}$, что сравнимо с оценкой (4.2) и наблюдаемой лучевой скоростью других ВСО 90 – 100 км/с [1]; 70 – 90 км/с [4].

У ВМО, чья масса сравнима с массой ГМО $\sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$, радиус оболочки $r \sim 150$ пк (§ 1). Согласно (4.2) равновесная скорость ВМО в короне $v_{mo} \approx 300 \text{ км/с}$, что выше скорости звука в короне $\sim 70 \text{ км/с}$ (4.1) при $M \sim 4$, т.е. $k_a \sim 1$.

Равновесная скорость ВМО в гало $v_{mo} \approx 200 \text{ км/с}$, что выше скорости звука в газе гало $\sim 30 \text{ км/с}$ (4.1) при $M \sim 7$, т.е. $k_a \sim 1$.

Первая космическая скорость для Галактики соответствует скорости ее вращения $235 \pm 15 \text{ км/с}$ [17, с. 387], т.е. ВМО могут двигаться в гало по эллиптическим орбитам с меньшей скоростью $< 235 \text{ км/с}$. Так, объекты гало движутся вокруг центра Галактики по вытянутым, хаотически ориентированным орбитам с большим эксцентриситетом с дисперсией остаточных скоростей 100 – 150 км/с [17, с. 387].

Из-за разницы равновесных скоростей в гало ВМО и ВСО в гало $v_{mo} - v_v \leq 135 \text{ км/с}$ при $v_v \sim 100 \text{ км/с}$ и $v_{mo} < 235 \text{ км/с}$ ВМО может выделиться из ВСО при пересечении Галактики (§ 5).

Оценим время торможения (ускорения) газовых облаков за счет динамического давления потока окружающего газа. Облако обладает импульсом $m_v v$, т.е. силе динамического давления газа $F_d = k_a S \rho v^2$ (где $S = \pi r^2$; $\rho = n m_p$) противостоит инерционная сила торможения $F_i = m_v v / \Delta t$. Время торможения (ускорения) газового облака в газовой среде:

$$\Delta t = m_v / \pi k_a m_p n v r^2, \quad (4.4)$$

где; m_v , r – масса и радиус облака; n – концентрация газа; k_a – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Оценим время торможения газом гало Галактики ВСО типа облака Смита массой $m_v \sim 10^6 M_\odot$ радиусом $r \sim 0,5$ кпк [5]. Плотность коронального газа $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [18, с. 101]; равновесная скорость ВСО $v_{vo} \sim 100 \text{ км/с}$ (4.2) при $M \sim 1$; $k_a \sim 2$ время торможения ВСО в гало $\Delta t \approx 6 \cdot 10^7$ лет. Для сравнения, облако Смита, ранее испытавшее столкновение с диском Галактики, повторно столкнется с ним через $3 \cdot 10^7$ лет [5], что вдвое меньше.

Оценим время торможения ВМО в гало Галактики с пересечением диска с учетом потери газа в галактических фонтанах (§ 5). Средняя масса ВМО:

$$m_M^* = (m_{MO} + m_r)/2, \quad (4.5)$$

где m_{MO} – начальная масса ВМО; m_r – масса ГМО.

При $m_{MO} \sim 4,5 \cdot 10^5 M_\odot$ (§ 5); $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ [7, с. 85] средняя масса ВМО $m_M^* \approx 4 \cdot 10^5 M_\odot$.

Средняя скорость ВМО в гало с учетом пересечения диска Галактики:

$$v_M^* \approx (v_M + v_{MO})/2, \quad (4.6)$$

где v_{MO} – равновесная скорость ВМО; v_M – скорость после пересечения диска.

Оценка (4.7) показывает, что за счет ускорения межзвездным газом скорость ВМО при пересечении диска возрастет с $v_M \sim 135$ км/с до $v_M' \sim v_M'' \sim 170$ км/с. Средняя скорость ВМО $v_M^* \approx 150$ км/с при $M \sim 2$, т.е. $k_a \sim 1$.

Радиус оболочки ВМО $r \sim 150$ пк (рис. 2); для коронального газа $n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см⁻³ [18, с. 101]. Согласно (4.4) время торможения ВМО в гало $\Delta t_r \approx 10^9$ лет, что в 4 раза превышает галактический год $2,5 \cdot 10^8$ лет [17, с. 387]. Период эллиптической орбиты ВМО $t_0 \sim 2,5 \cdot 10^8$ лет (5.9), допускает число пересечений диска (с противоположных сторон) $N = 2\Delta t_r/t_0 \approx 8$. С учетом взаимодействия ВМО с межзвездным газом вращающейся Галактики число пересечений ее диска ограничено $N \sim 5$ (§ 5).

Оценим время торможения ВМО, движущегося вдоль диска Галактики. Средняя плотность диска $n \sim 0,6 \pm 0,1$ см⁻³ [9, с. 1217]. Среднее время торможения ВМО в диске $\Delta t_d \approx 10^7$ лет согласно (4.4). Для сравнения, время пролета ВМО сквозь диск, перпендикулярно его траектории $t_1 = D/v \approx 3 \cdot 10^6$ лет (что в $\Delta t_d/t_1 \approx 3$ раза меньше) при ширине диска $D \sim 0,3$ кпк [9, с. 1217]; $v \sim 100$ км/с (4.2) для 1-го пролета (внутри ВСО).

Оценим время ускорения ВМО динамическим давлением газа в диске, вращающемся со скоростью $v_r \sim 235$ км/с [17, с. 387] при $k_a \sim 1$. Согласно (4.4) время ускорения ВМО в направлении вращения диска $\Delta t_r \approx 3 \cdot 10^6$ лет, что сравнимо с временем пролета ВМО сквозь диск $t_1 \sim 3 \cdot 10^6$ лет, т.е. вращающийся диск может эффективно ускорять ВМО.

Время ускорения ВМО в направлении вращения диска в 3 раза меньше времени торможения в направлении на центр Галактики, т.е. изменение скорости ВМО при торможении перпендикулярно плоскости диска втрое меньше, чем при ускорении вдоль направления вращения диска. Скорость ВМО при 1-ом пролете сквозь диск перпендикулярно плоскости диска может снижаться с $v_M \sim 100$ км/с в $q \sim 1,6$ раза до $v_M' \sim 60$ км/с (§ 5) при $v_M - v_M' \approx 40$ км/с, т.е. ВМО может ускориться в направлении вращения диска до скорости $v_M' = 3(v_M - v_M') \approx 120$ км/с при нулевой начальной составляющей скорости ВМО в плоскости диска. При этом относительно вращающегося диска скорость ВСО снизится до $\Delta v_M = v - v_M' \approx 115$ км/с.

Полная скорость ВМО относительно центра вращающейся Галактики после пересечения ее диска возрастет:

$$v_M = (v_M'^2 + v_M'^2)^{1/2}, \quad (4.7)$$

где v_M' – скорость в направлении вращения диска; v_M' – перпендикулярно плоскости диска.

При $v_M' \sim 60$ км/с (§ 5); $v_M' \sim 120$ км/с скорость ВМО относительно центра Галактики после 1-го пролета сквозь диск $v_M' \approx 135$ км/с, что выше исходной скорости ~100 км/с на 35% и не превышает равновесную скорость ВМО в гало ~300 км/с (4.2). Тем самым, пересечение диска может ускорять ВМО, увеличивая перигелий его эллиптической орбиты.

Скорости ВМО относительно центра Галактики после последующих пересечений ее диска представлены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость ВМО относительно центра Галактики после ее пересечения

Номер пролета	1	2	3	4	5
Скорость, км/с	$v_m' \sim 135$	$v_m'' \sim 170$	$v_m''' \sim 190$	$v_m'''' \sim 200$	$v_m''''' \sim 200$

Полная скорость ВМО (с учетом 2-х составляющих) относительно межзвездного газа после пересечения вращающегося диска:

$$V_m = (\Delta v_m^2 + v_m'^2)^{1/2}, \quad (4.8)$$

где Δv_m – скорость относительно газа в направлении вращения диска.

При $v_m' \sim 60$ км/с (§ 5); $\Delta v_m' \sim 115$ км/с *скорость ВМО относительно межзвездного газа* после 1-го пролета сквозь диск $V_m' \approx 130$ км/с, что выше исходной скорости ВМО (в составе ВСО) ~ 100 км/с на 30%.

Скорость ВМО относительно межзвездного газа после пересечений Галактики представлена в табл. 2.

Таблица 2

Скорость ВМО относительно межзвездного газа после пересечения Галактики

Номер пролета	1	2	3	4	5
Скорость, км/с	$V_m' \sim 130$	$V_m'' \sim 80$	$V_m''' \sim 50$	$V_m'''' \sim 35$	$V_m''''' \sim 20$

Согласно (4.8) скорость ВМО при 5-ом пролете сквозь Галактику ~ 20 км/с (табл. 2). Проведем альтернативную оценку на основе соотношения (4.4). Так, ВМО может пересекать диск $N \sim 5$ раз (§ 5) в условиях роста времени пересечения диска до $1,6^N \cdot t \approx 4 \cdot 10^7$ лет при падении скорости ВМО до $v/1,6^N$ согласно (5.2). Оценим суммарное время ускорения ВМО газом диска на основе известного соотношения для геометрической прогрессии:

$$\Sigma t = t_1(q^N - 1)/(q - 1). \quad (4.9)$$

При $q \sim 1,6$; $N \sim 5$ (§ 5); $t_1 \sim 3 \cdot 10^6$ лет согласно предыдущей оценке, суммарное время ускорения ВМО в газе диска $\Sigma t \approx 10^8$ лет.

За это время согласно зависимости $\Delta t \sim 1/v$ (4.4) скорость ВМО относительно газа вращающегося диска понизится до $v_t/\Sigma t \approx 10$ км/с, что сравнимо со скоростью звука в межоблачной среде ~ 10 км/с (4.1), т.е. сопряжено с ростом аэродинамического сопротивления среды. Данная оценка сравнима пекулярной (остаточной) скоростью газовых облаков ~ 10 км/с в Галактике [9, с. 1217] и звезд $5 - 15$ км/с [17, с. 387]. Тем самым, *ВМО за 5 пролетов сквозь диск Галактики могут ускоряться под давлением межзвездного газа до скорости ~ 225 км/с, близкой к скорости вращения диска ~ 235 км/с, т.е. ВМО могут осесть в Галактике в виде ГМО*.

Оценка (4.4) применительно к торможению ВСО в Галактике не применима, поскольку толщина ее диска $\sim 0,3$ кпк [16, с. 648] на порядок меньше длины ВСО (типа облака Смита) ~ 3 кпк. Соответствующая оценка возможна на основе закона сохранения импульса (§ 5).

Оседание ВСО в Галактику, с одной стороны, сопряжено с нагребанием окружающего газа ударной волной. С другой стороны, встречный поток газа, уносит часть оболочки ВСО в «хвост» ударной волны [2], что иллюстрирует вытянутая форма облака Смита (рис. 1). Первый процесс увеличивает массу ВСО; второй – снижает.

Оценим критический радиус, при котором высокоскоростное газовое облако окажется устойчивым за счет сил гравитации. Силе динамического давления коронального газа на часть оболочки ВСО $F_d = pS_o$ в виде трубы с площадью сечения S_o противостоит сила гравитационного притяжения ВСО $F_g = Gm_v m / r^2$ данной части оболочки массой $m \approx \rho_v r S_o$, из чего (при $\rho_v/\rho = n_v/n$) следует критерий устойчивости радиуса ВСО:

$$r_k \leq G m_v n_v / \kappa_a n u^2, \quad (4.10)$$

где n_v – концентрация газа ВСО; n – концентрация окружающего газа.

В короне $n \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [18, с. 101]. Для ВСО типа облака Смита массой $m_v \sim 10^6 M_\odot$ при $u \sim 100 \text{ км/с}$ [5]; $n_v \sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ (1.1); $\kappa_a \sim 1$ критический радиус ВСО $r_k \leq 10 \text{ пк}$.

В гало $n \sim 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ (10.4) критический радиус ВСО $r_k \leq 2 \text{ пк}$.

Оценка (4.10) примерно на 2 порядка меньше радиуса облака Смита $r_v \sim 500 \text{ пк}$ [5], т.е. данное ВСО неустойчиво. Встречный поток газа может «обдирать» разреженную оболочку ВСО, что иллюстрирует вытянутая и рыхлая форма облака Смита (рис. 1).

Оценим критический радиус ВМО, движущегося в газе Галактики и ее гало. Типичные параметры ГМО $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$; $r_r \sim 20 \text{ пк}$; $n_r \sim 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ [7, с. 85]. При движении в гало *критический радиус ВМО* $r_k \leq 2 \text{ кпк}$, что сравнимо с длиной газовых шлейфов ВМО $\leq 2 \text{ кпк}$ (Рис. 2), т.е. *ВМО и их оболочки устойчивы к динамическому давлению газа гало Галактики*.

При движении ВМО в диске Галактики плотностью $n \sim 0,6 \text{ см}^{-3}$ [9, с. 1217]; *критический радиус* $r_k \leq 20 \text{ пк}$, что сравнимо с радиусом ГМО $r_m \sim 20 \text{ пк}$, т.е. *динамическое давление газа в диске Галактики может «форматировать» пролетающее ВМО под характеристики ГМО*.

5. Образование высокоскоростными облаками галактических фонтанов

Наблюдаются так называемые галактические фонтаны, в которых межзвездный газ поднимается над диском Галактики на сотни пк, обогащая корональный газ тяжелыми элементами [7, с. 86].

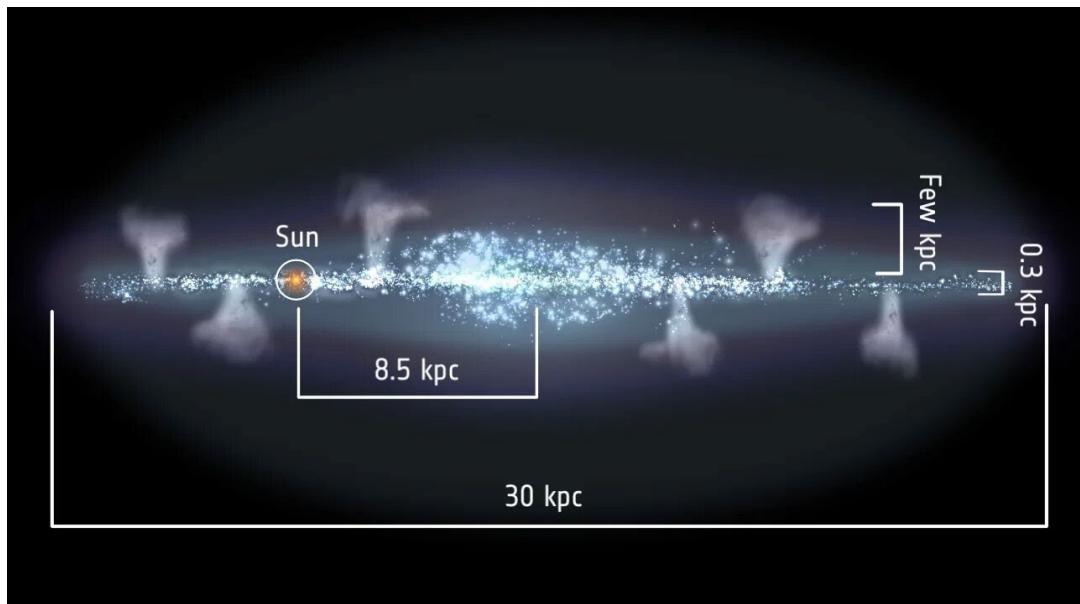


Рис. 4. Галактические фонтаны в Галактике (зонд XMM-Newton)

На рис. 4 представлено рентгеновское излучение горячего газа с температурой $\geq 2 \cdot 10^6 \text{ К}$ в галактических фонтанах масштаба $\sim 1 \text{ кпк}$, выбрасываемых из диска Галактики в ее гало. Ширина «ножки» фонтана $\sim 0,3 \text{ кпк}$ сравнима с шириной диска Галактики и диаметром оболочки ВМО $\sim 0,3 \text{ кпк}$; размер «шляпы» фонтана $\sim 1 \text{ кпк}$ сравним с размером ВСО $\sim 1 \text{ кпк}$ (§ 1).

Галактические фонтаны связываются со взрывами сверхновых [7, с. 86]. Расчеты показывают, что их также могут формировать пролеты ВСО сквозь диск Галактики. С одной стороны, падение ВСО в Галактику активизирует звездообразование (§ 6), включая рождение цепочек молодых звезд (§ 7), часть которых может эволюционировать в сверхновые, с которыми связываются галактические фонтаны. Так, звездообразование в Галактике носит очаговый характер и локализуется в областях размером $\sim 0,5 \text{ кпк}$ [16, с. 648], сравнимым с размером ВСО и ВМО $0,3 - 1 \text{ кпк}$ (§ 6). Галактические фонтаны образуют периодические

структурой с чередующимся направлением газовых выбросов (рис. 4), что объяснимо последовательным пересечением ВСО диска Галактики с противоположных сторон (§ 4).

Кроме того, падение ВСО может вызвать ударную волну, разогревающую межзвездный газ до температуры коронального газа. Пролет ВСО сквозь Галактику может разогревать газ до температуры $(4 - 10) \cdot 10^5$ К (§ 10), что сравнимо с температурой короны Галактики $\sim 5 \cdot 10^5$ К [9, с. 1217]; [18, с. 101], излучающей в мягком рентгеновском диапазоне. Выброшенный галактическими фонтанами газ насыщает внешнее дискообразное гало, проявляющееся на рис. 4. Так, у Галактики два дискообразных гало: сплюснутое внутреннее гало высотой $\sim 1,5$ кпк и внешнее высотой ~ 2 кпк [21] внутри сферического гало радиусом ~ 15 кпк [17, с. 387].

В Галактике наблюдаются крупномасштабные структуры межзвездного газа сравнимого размера ~ 1 кпк, связываемые с неустойчивостью Рэлея – Тэйлора газового диска Галактики с вмороженным магнитным полем [7, с. 87]. Крупномасштабные структуры газа могут формировать ударные волны ВСО сравнимого масштаба ~ 1 кпк. Так, магнитные поля Галактики связываются с динамикой межзвездного газа [12, с. 682]. Размер ВСО в короне Галактики 2 – 15 кпк [4] по мере оседания в Галактику уменьшается, до ~ 1 кпк что иллюстрирует размер облака Смита ~ 1 кпк [5] (Рис. 1) и других ВСО сравнимого масштаба в ее гало (рис. 2).

Рассмотрим динамику движения ВСО в гало с учетом пересечения диска Галактики. ВСО могут оседать в Галактику из короны по спиральной траектории пролетая через диск Галактики на удалении от центра ~ 10 кпк [2], что сравнимо с удаленностью галактических фонтанов на периферии диска (рис. 4). Скорость вращения Галактики ~ 235 км/с более чем вдвое превышает скорость ВСО ~ 100 км/с (§ 4), т.е. межзвездный газ может укорять ВСО в направлении вращения диска; при этом может тормозиться составляющая скорости ВСО, перпендикулярная плоскости диска.

Анализ динамики ВСО в гало (§ 4) показывает, что они могут повторно пересекать диск с обратной стороны, но ближе к центру Галактики, формируя обратный выброс газа. Третье пересечение диска может сформировать фонтан газа еще ближе к центру; при этом направление выброса окажется аналогичным первичному, что иллюстрирует рис. 4.

Угол пересечения ВСО диска Галактики зависит от траектории галактики – спутника, образующей их. При хаотическом распределении галактик – спутников средний угол падения ВСО в Галактику $\theta' \sim 45^\circ$. Например, ВСО облако Смита, ранее испытавшее столкновение с Галактикой, движется в гало под углом наклона к ее диску $\theta' \sim 45^\circ$ [5].

Оценим остаточную скорость ВСО и ВМО и выталкиваемого ими газа после пролета перпендикулярно плоскости диска Галактики. Из закона сохранения импульса следует оценка скорости тормозимого ВСО (ВМО):

$$v' = vnd/D(n_g + nd/D), \quad (5.1)$$

где v – скорость ВСО (ВМО); d – его размер; n – концентрация его газа; D – ширина газового диска; n_g – концентрация газа в диске.

В диске Галактики в среднем $n_g \sim 0,6 \text{ см}^{-3}$; $D \sim 0,3$ кпк [9, с. 1217]. ВСО типа облака Смита вытянуто на $d_v \sim 3$ кпк при $v_v \sim 100$ км/с [5]; $n_v \sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ (1.1). Остаточная скорость ВСО при первом пролете сквозь Галактику (без учета разрушения) $v_v' \approx 60$ км/с; втором $v_v'' \approx 40$ км/с; третьем $v_v''' \approx 25$ км/с; четвертом $v_v'''' \approx 15$ км/с; пятом $v_v''''' \approx 10$ км/с.

Для оболочек ВМО $d_o \sim 0,3$ кпк; $n_o \sim 1 \text{ см}^{-3}$; $v_m \sim 100$ км/с (§ 4). Остаточная скорость ВМО $v_m' \approx 60$ км/с. Скорости ВМО при 5-ти пролетах сквозь Галактику представлены в табл. 3.

Таблица 3

Скорость ВМО после пролета перпендикулярно плоскости Галактики

Номер пролета	1	2	3	4	5
Скорость, км/с	$v_M' \sim 60$	$v_M'' \sim 40$	$v_M''' \sim 25$	$v_M'''' \sim 15$	$v_M''''' \sim 10$

Остаточные скорости ВМО и ВСО при пятом пролете сквозь Галактику ~ 10 км/с сравнимы со скоростью звука в межоблачной среде ~ 10 км/с (4.1), что сопряжено с ростом аэродинамического сопротивления среды, тормозящего данные облака. Подобная скорость сравнима с пекулярной скоростью газовых облаков ~ 10 км/с в Галактике [9, с. 1217] и звезд $5 - 15$ км/с [17, с. 387]. Тем самым, *ВСО и ВМО, падающие перпендикулярно плоскости диска, могут осесть в Галактике при 5-ом пролете сквозь диск.*

Согласно оценке (5.1) составляющая скорости ВСО, перпендикулярная плоскости диска v_p , с каждым последующим его пересечением снижается в $\sim 1,6$ раза. Соотношение скоростей ВСО $v_v : v_v' : v_v'' \dots$ близко к пропорции «золотого сечения» $100 : 61,8 : 38,2 \dots$. С учетом $v_p \leq v_v$ данные пропорции ограничивают число пересечений Галактики оседающих ВСО (ВМО):

$$1,6^N \leq v_o/a_t, \quad (5.2)$$

где a_t – скорость звука в межзвездном газе; v_o – скорость ВСО в гало.

При $a_t \sim 10$ км/с (4.1) $v_{vo} \sim 100$ км/с (§ 4) число пересечений диска Галактики ВСО $N = 5$, что соответствует числу ее спиральных ветвей (§ 7).

Давление межзвездного газа ускорит ВМО вдоль направления вращения Галактики. При этом динамика изменения скорости ВМО при торможении (перпендикулярно плоскости диска) и ускорении вращающимся диском (вдоль плоскости диска) может быть сравнима (§ 4). Тем самым, при пролете сквозь Галактику ВМО могут приобретать дополнительную скорость в направлении вращения диска, компенсирующую потерю скорости, перпендикулярно направлению вращению диска. Средняя скорость ВМО в процессе пересечения Галактики может достигать ~ 150 км/с (§ 4), что ниже скорости вращения диска ~ 235 км/с [17, с. 387], т.е. ВМО могут вращаться в гало по эллиптическим орбитам.

Поскольку скорость оседания ВСО в условиях торможения газом гало $v_v \sim (1/r_v R_f)(M_f m_v)^{1/2}$ (4.2) на дистанции в несколько кпк меняется менее заметно, радиальная составляющая скорости ВСО v_r по мере приближения к центру Галактики в условиях ее гравитации может возрастать:

$$v_r \approx (v_v^2 - v_t^2)^{1/2}, \quad (5.3)$$

где v_v – скорость ВСО в гало; v_r – радиальная скорость в направлении центра Галактики; v_t – скорость перпендикулярно плоскости диска.

Как следствие, может расти дистанция между фонтанами при приближении к центру Галактики, что иллюстрирует левая часть рис. 4. Также неоднородность толщины диска может влиять на дистанцию между фонтанами, что иллюстрирует правая часть рис. 4.

Так, ВСО и ВМО могут последовательно пересекать Галактику с противоположных сторон, все ближе к центру. Если ВСО повторно пролетает сквозь внутреннюю область диска шириной $D \sim 0,5$ кпк (Рис. 4), его остаточная скорость (перпендикулярно плоскости диска) $v_v'' \approx 30$ км/с, а не $v_v'' \sim 40$ км/с при $D \sim 0,3$ кпк согласно (5.1).

Пролет сквозь спиральную ветвь деформирует ВСО с потерей существенной части массы [3]. По нашим оценкам ВСО средней массой $\sim 10^6 M_\odot$ могут пролетать через диск трижды до полного торможения за время $t_v \sim 10^8$ лет с пролетом радиального расстояния $(v_v + v_v' + v_v'')t/3\pi \approx 10$ кпк, образуя галактические фонтаны (рис. 4). При этом галактические фонтаны сформируют долгоживущую периодическую структуру, если их времена жизни $\tau_f > t_v$.

При пролете ВСО сквозь диск его разреженная оболочка плотностью $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ (1.1) может задержаться более плотным межзвездным газом $\sim 1 \text{ см}^{-3}$, пополнив Галактику атомарным водородом. Газ ВСО может выбросить газ из диска в гало, если плотность газа

в наиболее плотной области ВСО сравнима, либо выше, чем в диске $n \geq n_g$. При этом масса разогретого межзвездного газа может быть сравнима с массой испаряющейся оболочки ВСО $m_g \sim \Delta m_v$. На этой основе оценим массу газа в галактическом фонтане ВСО:

$$M_f \approx \pi m_p n_g D_f R_f^2, \quad (5.4)$$

где D_f – толщина Галактики; R_f – радиус «ножки» галактического фонтана.

В диске Галактики в среднем $n_g \sim 0,6 \text{ см}^{-3}$; $D_f \sim 0,3 \text{ кпк}$ [9, с. 1217]. Ширина «ножки» галактических фонтанов сравнима с шириной диска (рис. 4), т.е. $R_f \sim 0,15 \text{ кпк}$ *масса галактического фонтана* $M_f \approx 3 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$ при сравнимой массе выброшенного разогретого межзвездного газа $m_g \sim M_f/2 \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$ и испаряющейся оболочки ВСО $\Delta m_v \sim 1,5 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$.

$$D_f = D_f (n_g/n_r)^{1/3}, \quad (5.5)$$

где n_g – концентрация газа в диске Галактики; n_r – концентрация газа гало.

При $n_g \sim 0,6 \text{ см}^{-3}$; $D_f \sim 0,3 \text{ кпк}$ [9, с. 1217]; $n_r \sim 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ (10.4) *диаметр галактического фонтана* $D_f \approx 1 \text{ кпк}$, что соответствует наблюдаемому размеру его «шляпы» (Рис. 4).

Согласно соотношению (1.1) у газового облака массой $M_f \sim 3 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$ (5.4), чей радиус $R_f \sim 0,15 \text{ кпк}$ сравним с радиусом ВМО $\sim 0,15 \text{ кпк}$ (§ 1), средняя плотность $n \approx 1 \text{ см}^{-3}$, что удовлетворяет условию $n \geq n_g \sim 0,6 \text{ см}^{-3}$. Тем самым, *галактические фонтаны может формировать плотная внутренняя область ВСО $\sim 1 \text{ см}^{-3}$ размером $\sim 0,3 \text{ кпк}$, образующая ВМО*. При этом газ в диске может «калибровать» пролетающие сквозь них ВСО, задерживая их разреженную оболочку и пропуская плотную часть газа в виде ВМО.

Проведем альтернативную оценку массы галактических фонтанов. Ударная волна, образуемая при пересечении ВСО и ВМО диска Галактики, может разогревать газ. Газ в галактическом фонтане будет наблюдаем, если его температура выше, чем газа гало $T_f > T_g$, и сравнима с температурой короны $T_f \geq T_k$, излучающей в рентгеновской области (§ 10). При этом плотность газа в фонтане должна превышать плотность короны в $n_f/n_k \sim R_k/D_f$ раз (когда масса газа на луче зрения в фонтане и короне сравнимы), т.е. масса газа в фонтане:

$$M_f = \pi m_p n_k D_f^2 R_k / 3, \quad (5.6)$$

где D_f – диаметр галактического фонтана; R_k – радиус излучающей короны Галактики, n_k – концентрация газа в короне.

При $D_f \sim 1 \text{ кпк}$ (5.5); $n_k \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ [18, с. 101]; $R_k \sim 0,1 \text{ Мпк}$ [7, с. 81] масса фонтана $M_f \approx 3 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$, что соответствует оценке (5.4).

С учетом сжатия части газа ВСО (в процессе оседания в Галактику из ее короны) в ВМО (§ 3), оценим число фонтанов, формируемых одним ВСО:

$$N_{fv} = (m_{vo} - m_{mo})/M_f, \quad (5.7)$$

где m_{vo} – средняя начальная масса ВСО; m_{mo} – средняя начальная масса ВМО; M_f – масса галактического фонтана.

$M_f \sim 3 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$ (5.6); $m_{vo} \sim 1,3 \cdot 10^6 \text{ М}_\odot$ (1.6); по последующим оценкам $m_{mo} \sim 4,5 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$; *число фонтанов, образуемых одним ВСО* $N_{fv} \approx 3$, что соответствует наблюдениям (Рис. 4).

Доля газа ВСО (атомарного водорода), испаряемого фонтанами в гало:

$$\delta_n = N_{fv} M_f / m_{vo}, \quad (5.8)$$

где N_{fv} – число фонтанов, образуемых одним ВСО.

При $N_{fv} \sim 3$ (5.7) *доля газа ВСО, испаряемого галактическими фонтанами в гало* $\delta_n \approx 0,7$, что корреспондируется со средней долей ВМО в массе ВСО $\delta_m \sim 0,3$ (1.5) в условиях соотношения $\delta_n + \delta_m = 1$. Для сравнения, исходя из массы ГМО $m_r \sim 3 \cdot 10^5 \text{ М}_\odot$ максимальная потеря газа ВСО может достигать $\delta_n = 1 - m_r/m_{vo} \approx 0,8$ средней начальной массы ВСО $m_{vo} \sim 1,3 \cdot 10^6 \text{ М}_\odot$, что выше оценки $\delta_n \sim 0,7$ (5.8). Вместе с тем, часть газа ВМО может формировать в Галактике цепочки молодых звезд и газовых облаков (§ 7).

Оценим время жизни галактических фонтанов. В короне Галактики плотностью $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ время остывания горячего коронального газа $10^9 - 10^{10}$ лет [18, с. 402], т.е. время остывания горячего газа сравнимой температурой в галактических фонтанах может быть сопоставимо. Размер «ножки» и «шляпы» фонтанов на периферии диска меньше, чем внутри диска (Рис. 4), что объяснимо частичным растворением (испарением) в гало выброса газа.

Увлекаемый фонтаном ВСО газ с температурой $\sim 10^6$ К (Табл. 4) может подниматься на высоту, сравнимую с высотой внешнего гало ≤ 2 кпк (рис. 4). Газ с температурой $\sim 10^5$ К (табл. 4), увлекаемый ВМО, вероятно, поднимается на высоту внутреннего гало $\leq 1,5$ кпк.

Время жизни галактического фонтана в гало может превышать время динамических процессов, за которое восстанавливается тепловое равновесие в межзвездном газе $\tau_g \sim d/v_{3B} \leq 10^8$ лет масштаба $d \leq 0,5$ кпк, где v_{3B} – скорость звука [7, с. 86]. Высота галактического фонтана ВСО может быть сравнима с высотой внешнего гало $d_f \sim 2$ кпк (Рис. 4); в гало скорость звука $v_{3B} \sim 30$ км/с (4.1). Время оседания газа $\tau \approx 7 \cdot 10^7$ лет может быть сравнимо с временем его выброса, т.е. время жизни галактического фонтана $\tau_f \approx 1,5 \cdot 10^8$ лет, что превышает оценку $\tau_f > \tau_g \leq 10^8$ лет и сравнимо с галактическим годом $t_o \sim 2,5 \cdot 10^8$ лет – периодом вращения Галактики [17, с. 387]. Время жизни галактических фонтанов ВМО высотой $\sim 1,5$ кпк может достигать $\sim 10^8$ лет, что сравнимо по величине.

ВСО, двигаясь по эллиптической орбите, при пересечениях Галактики может формировать 3 галактических фонтана (рис. 4) за 1,5 галактических года, равных $t_o \sim 2,5 \cdot 10^8$ лет. Время жизни галактических фонтанов ВСО $\tau_f \sim 1,5 t_o \approx 4 \cdot 10^8$ лет. В случае ВМО $\tau_f \approx 3 \cdot 10^8$ лет.

Так, вращение ВСО и ВМО в гало по эллиптическим орбитам подобно движению маятника Фуко, чей период не зависит от амплитуды колебаний и сравним с галактическим годом:

$$t_o \approx 2\pi(R_g/g_r)^{1/2}, \quad (5.9)$$

где R_g – радиус Галактики; g_r – ее ускорение свободного падения.

С учетом $g_r = GM_g/R_g^2$; $v_i = (GM_g/R_g)^{1/2}$ соотношение (5.9) сводится к виду, определяемому радиусом Галактики и ее орбитальной скоростью:

$$t_o \approx 2\pi R_g/v_i, \quad (5.10)$$

где v_i – первая космическая скорость для Галактики.

При пересечении Галактики ВСО теряет часть массы газа, нагретого ударной волной и испаряющегося в гало, а также часть оболочки, удерживаемой в Галактике в виде облаков атомарного водорода. Суммарные потери газа $\Sigma m_g \approx 10^6 M_\odot$ сравнимы с массой ВСО $m_v \sim 10^6 M_\odot$ типа облака Смита. Часть газа (атомарного водорода) может увлекаться в оболочку ВМО, продолжающего движение в гало (§ 4). Масса оболочки ВМО $m_o = m_m - \Sigma m_g \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ сравнима с массой ГМО $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ [7, с. 85].

Падение ВСО и ВМО в Галактику, с одной стороны, может пополнять массу межзвездного газа. С другой стороны, часть межзвездного газа может выбрасываться галактическими фонтанами. Молекулярный газ ГМО может коллапсировать в звезды за $\sim 5 \cdot 10^8$ лет (6.5). Поскольку галактика содержит сравнимые доли атомарного и молекулярного водорода [16, с. 216], выбрасываться в гало может преимущественно атомарный газ, чья плотность $\sim 0,6 \text{ см}^{-3}$ на 3 порядка ниже, чем у молекулярных облаков $\sim 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$ [7, с. 85].

Приведенные выше оценки позволяют оценить энерговыделение в галактических фонтанах, образуемых ВСО:

$$W_f = 3kT_f M_f / m_p, \quad (5.11)$$

где M_f – масса газа в галактическом фонтане.

$M_f \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ (5.4), (5.6); $T \sim (0,4 - 1) \cdot 10^6$ К (Табл. 4). Энерговыделение галактического фонтана $W_f \approx 10^{53}$ эрг.

Оценим мощность ударных волн в галактическом фонтане:

$$L_f = W_f / \tau_f, \quad (5.12)$$

где W_f – энерговыделение в галактическом фонтане; τ_f – время его жизни.

Время формирования 3-х фонтанов $\sim 1,5$ галактических года, т.е. $\tau_f \sim 4 \cdot 10^8$ лет. При $W_f \sim 10^{53}$ эрг (5.11) мощность ударных волн $L_f \approx 10^{37}$ эрг/с.

После пересечения ВСО Галактики из него может выделиться ВМО, продолжающее движение в гало (§ 4). Оценим массу разреженной оболочки ВМО, испаряющейся при пролете сквозь Галактику. При пролете ВМО сквозь Галактику может испариться часть газа, чья плотность сравнима с плотностью газа диска. В центре ВМО в виде ГМО радиусом ~ 25

пк плотность газа $\sim 3 \cdot 10^2$ см⁻³ [7, с. 85] более чем на 2 порядка выше, чем в диске, т.е. данная область может сохраняться, как и плотная часть оболочки ВМО. Масса оболочки ВМО, испаряющейся при пролете сквозь Галактику:

$$\Delta m_o \approx 2\pi m_p n_g D_{r_0} \Delta r_o, \quad (5.13)$$

где r_0 – радиус оболочки ВМО, Δr_o – ширина ее разреженного слоя.

Исходя из зависимости $r_v \sim 1/\sqrt{n}$ (3.1) с ростом радиуса газового облака в 2 раза его плотность падает в 4 раза, т.е. $\Delta r_o \sim r_o/2 \approx 75$ пк при $r_o \sim 150$ пк ВМО (§ 1); $n_g \sim 0,6$ см⁻³; $D \sim 0,3$ кпк [9, с. 1217]. *Масса испаряющейся оболочки ВМО* в диске $\Delta m_o \approx 3 \cdot 10^4 M_\odot$.

ВМО может 5 раз пересекать Галактику (§ 4); суммарные потери газа ВМО $\Sigma \Delta m_m \sim 5 M_s \approx 1,5 \cdot 10^5 M_\odot$, что составляет ок. 1/2 массы ГМО $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ [7, с. 85]. Тем самым, *средняя начальная масса ВМО* $m_{mo} = m_r + \Sigma \Delta m_m \approx 4,5 \cdot 10^5 M_\odot$, в $m_{mo}/\Sigma \Delta m_m \approx 3$ раза выше массы теряемого газа и достигает $m_{mo}/m_{vo} \sim 0,3$ средней начальной массы ВСО $m_{vo} \sim 1,3 \cdot 10^6 M_\odot$ (1.6).

Оценим число галактических фонтанов, формируемых ВМО. ВМО может формировать за 1,5 галактических года $N_{fv} \sim 3$ галактических фонтана (5.7) с температурой $(0,3 - 1,7) \cdot 10^5$ К (Табл. 4), сравнимой с температурой газа в дискообразном гало $\sim 10^5$ К, из чего следует:

$$N_{fm} = N_m t_f / 1,5 t_o, \quad (5.14)$$

где N_m – число ВМО в гало; t_f – время жизни галактических фонтанов.

По предыдущей оценке время жизни галактических фонтанов $t_f \sim 3 \cdot 10^8$ лет. При $N_m \sim 2,5 \cdot 10^3$ (§ 1) $t_o \sim 2,5 \cdot 10^8$ лет [17, с. 387] *число галактических фонтанов ВМО в гало* $N_{fm} \approx 2 \cdot 10^3$.

Степень перекрытия гало галактическими фонтанами над плоскостью диска с каждой стороны (при их парной направленности) на луче зрения:

$$\delta_f = N_{fm} D_f / 4 R_r, \quad (5.15)$$

где D_f – диаметр галактического фонтана.

$D_f \sim 1$ кпк (5.5); $R_r \sim 15$ кпк [17, с. 387]; $N_{fm} \sim 2 \cdot 10^3$ (5.14) параметр $\delta_f \approx 30$. В данных условиях галактические фонтаны ВМО могут формировать над плоскостью диска сплошной слой потоков газа на луче зрения, т.е. *отдельные галактические фонтаны ВМО неразличимы*.

Степень покрытия галактическими фонтанами ВМО площади гало (дискообразного) над плоскостью диска (с каждой стороны):

$$\delta'_f = (N_{fm}/8) \cdot (D_f/R_r)^2. \quad (5.16)$$

Параметр $\delta'_f \approx 1$, т.е. *галактические фонтаны ВМО могут формировать в дискообразном гало сплошной слой горячего газа*.

6. Вклад высокоскоростных облаков в звездообразование

Галактика формировалась под воздействием ряда факторов, включая слияние карликовых галактик [17, с. 390], оседание остатков галактик – спутников, разрушенных приливными силами [22]; [23]. Кроме того, звездообразованию способствует столкновение с диском Галактики ВСО (образованных галактиками – спутниками) [14]; [5].

Эксцентриситеты орбит звезд и скоплений коррелируют с их возрастом и содержанием тяжелых элементов (ТЭ); у старых звезд орбиты сильно вытянуты, а содержание ТЭ понижено [17, с. 388]. Так, у Галактики два дискообразных гало, звезды в которых отличаются обилием ТЭ в 3 раза. Внутреннее гало высотой $\sim 1,5$ кпк вращается со скоростью 20 км/с; внешнее высотой ~ 2 кпк (бедное ТЭ) вращается в противоположном направлении со скоростью 70 км/с [21], т.е. разница скоростей звезд в гало $\Delta v_s \sim 90$ км/с.

Скорость запаздывания ВМО относительно врачающейся Галактики при ее пересечении постепенно снижается с $V_m' \sim 130$ км/с до $V_m'' \sim 80$; $V_m''' \sim 50 \dots$ (табл. 2), что сравнимо с $\Delta v_s \sim 90$ км/с. При этом ВМО обогащены ТЭ, поскольку ТЭ, содержащиеся в ВСО, оседают в их центре (§ 1). Кроме того, ВМО могут обогащаться ТЭ в процессе пересечения Галактики.

Можно предположить, что ВМО сталкиваясь с молекулярными облаками в Галактике, могут увлекать их в гало, где они коллапсируют в звезды, т.е. *звезды во внутреннем*

дискообразном гало радиусом $\sim 1,5$ кпк (чья скорость запаздывает относительно вращения диска) могут формировать ВМО. Так, ВМО (внутри ВСО), движущиеся в диске Галактики, могут формировать цепочки молодых звезд, звездных скоплений и газовых облаков (§ 7). Звездообразование в Галактике носит очаговый характер и локализуется в областях, чей размер $\sim 0,5$ кпк [16, с. 648] сравним с размером ВСО и ВМО $0,3 - 1$ кпк (§ 1).

Скорость ВМО, сталкивающихся с молекулярными облаками, может передаваться не только образуемым звездам, но и звездным скоплениям. Так, рассеянные звездные скопления (сравнительно молодые) возрастом $10^6 - 10^9$ лет массой $10^2 - 3 \cdot 10^3 M_{\odot}$ движутся по слабо вытянутым орбитам в дисковой подсистеме Галактики толщиной ~ 1 кпк [12, с. 65].

ВСО, оседающие в Галактике, могут содержать как атомарный, так и молекулярный водород (§ 1). Также межзвездный газ содержит сравнимую долю атомарного и молекулярного водорода [7, с. 85]; [16, с. 216]. При этом звездообразование происходит в молекулярных облаках [7, с. 87]; [16, с. 163]. В диффузных облаках атомарного водорода плотностью $< 10^2 \text{ см}^{-3}$ звезды образовываться не могут [16, с. 163]. Тем самым, звездообразованию могут способствовать не ВСО, а ВМО, образующиеся в их центрах.

Соотношение долей атомарного и молекулярного газа в ВСО позволяет оценить скорость звездообразования:

$$Y_s = \delta_m Y_v, \quad (6.1)$$

где Y_v – скорость оседания ВСО в гало Галактики из короны; δ_m – вклад ВМО в массу ВСО.

Оценим скорость оседания ВСО в гало Галактики из ее короны:

$$Y_v = \Sigma m_v / t_v, \quad (6.2)$$

где m_v – суммарная масса ВСО t_v – время оседания ВСО в гало Галактики из ее короны.

При $\Sigma m_v \sim 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ [1]; $t_v \sim (7 \pm 2) \cdot 10^8$ лет [2] *скорость оседания газа из короны* $Y_v \approx 10 \pm 3 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, что в несколько раз выше скорости звездообразования в Галактике – несколько звезд массой $\sim M_{\odot}$ в год [12, с. 68] и может указывать на испарение части газа ВСО в гало (короне) Галактики [2], преимущественно в галактических фонтанах (§ 5). При $\delta_m \sim 0,3$ (1.5) согласно (6.1) *скорость звездообразования* $Y_s \approx 3 \pm 1 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$.

Облака межгалактического газа пополняют межзвездный газ; при этом часть межзвездного газа уходит в межгалактическое пространство [7, с. 87]. Соотношения (6.1) и (6.2) позволяют оценить долю газа ВСО, испаряющегося в гало Галактики (в галактических фонтанах):

$$\delta_h = 1 - Y_s / Y_v, \quad (6.3)$$

где Y_s – скорость звездообразования в Галактике.

При $Y_s \sim 3 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (6.1); $Y_v \sim 10 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (6.2) *доля газа ВСО, испаряющегося в гало* $\delta_h \approx 0,7$, что соответствует оценке $\delta_h \sim 0,7$ (5.8).

Суммарная масса ВСО включает облака, движущиеся в короне, а также врачающиеся в гало. Вместе с тем, масса ВСО определяется на основе радиолинии водорода, не учитывающей массу молекулярного водорода ВМО внутри ВСО. Данные факторы в целом компенсируют друг друга, так что оценки (5.8) и (6.3) корректны в первом приближении.

Оценим скорость звездообразования в Галактике исходя из динамики оседания ВМО в Галактику из ее гало (половина ВМО завершает вращение):

$$Y_s = 2 \Sigma m_m / \Delta t_m, \quad (6.4)$$

где Σm_m – суммарная масса ВМО в гало; Δt_m – время их оседания в Галактику.

При $\Sigma m_m \sim 10^9 M_{\odot}$ (1.4); $\Delta t_m \sim 6 \cdot 10^8$ лет (1.3) *в Галактике скорость звездообразования* $Y_s \approx 3 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, что соответствует оценке (6.1).

Оценим время коллапса ГМО в Галактике в звезды:

$$\Delta t_k = \Sigma m_r / Y_s, \quad (6.5)$$

где Σm_r – суммарная масса ГМО в Галактике.

Галактика содержит $N_r \sim 5 \cdot 10^3$ ГМО средней массой $m_r \sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$ [7, с. 85]; суммарная масса ГМО $\Sigma m_r = N_r m_r \sim 1,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$. При $Y_s \sim 3 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (6.4) время коллапса ГМО в звезды $\Delta t_k \approx 5 \cdot 10^8$ лет, что в 5 раз превышает длительность динамических процессов в газе

Галактики $\leq 10^8$ лет [7, с. 86]. Для сравнения, согласно оценке (3.2), холодный газ ГМО плотностью $\sim 3 \cdot 10^2$ см⁻³ коллапсирует в звезду за $\sim 10^7$ лет, что на 2 порядка меньше оценки (6.5).

Разница в приведенных оценках может быть обусловлена временем торможения ВМО межзвездным газом. Так, время торможения ВМО в диске Галактики $\Delta t_{\text{д}} = \Delta t_{\text{k}} \sim 7 \cdot 10^8$ лет (4.4) (до остаточной скорости ~ 10 км/с, сравнимой с пекулярной скоростью газовых облаков ~ 10 км/с и звезд $5 - 15$ км/с в диске Галактики) сравнимо с оценкой $\Delta t_{\text{k}} \sim 5 \cdot 10^8$ лет (6.5).

При движении ВМО в газовой среде в них возникает магнитное поле, препятствующее сжатию газа. Движущиеся молекулярные облака обладают магнитным полем $\sim 10^{-5}$ Гс [10], в условиях градиента скоростей молекулярного водорода и пылинок [24]. В протозвездных молекулярных облаках магнитное поле $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ Гс (согласно зеемановскому расщеплению), удерживает их от гравитационного коллапса в звезду [16, с. 163].

7. Воспроизведение высокоскоростными облаками спиральных ветвей и цепочек молодых звезд

Выделяют 5 спиральных рукавов Галактики [25]. Спиральные ветви шириной $\sim 0,5$ кпк описывают логарифмическую спираль с разворотом на $\sim 12^\circ$; расстояние между соседними витками $\sim 1,5$ кпк (рис. 5), что сравнимо с толщиной внутреннего гало $\sim 1,5$ кпк [21] и в 5 раз больше толщины звездного диска $\sim 0,3$ кпк [9, с. 1217].

Звезды сосредоточены в основном в спиральных ветвях, т.е. оседание ВСО и ВМО из гало может в основном происходить в них, чему способствует гравитация спиральных ветвей и торможение межзвездным газом. Поскольку ВСО способствует звездообразованию в Галактике [5]; [14], спиральные ветви могут воспроизводиться. Так, в дифференциально вращающемся диске галактики спиральная структура может быть долгоживущей, когда она непрерывно воспроизводится (что предполагает непрерывное возникновение очагов звездообразования) и когда весь спиральный узор вращается с одинаковой угловой скоростью [16, с. 649].

Поскольку Галактика вращается со скоростью ~ 235 км/с [17, с. 387], вдвое превышающей скорость оседания ВСО ~ 100 км/с (§ 4), межзвездный газ может укорять падающие газ ВСО в направлении вращения диска при одновременном торможении вращения части межзвездного газа в диске. Последующий процесс последовательных пересечений ВМО диска (§ 4), сопровождающийся активизацией звездообразования, может способствовать воспроизведству периодической структуры спиральных ветвей.

Так, расчеты показывают, что ВМО могут быть захвачены Галактикой при 5-ом пролете сквозь ее диск (§ 4), что сравнимо с числом спиральных ветвей Галактики. Неоднородности плотности, возникающие за счет возмущений в диске [16, с. 649] в условиях регулярных пролетов ВМО могут усиливаться, формируя спиралеобразную структуру.

Межзвездная пыль часто образует длинные прожилки, идущие вдоль внутренней кромки спиральных ветвей, что связывается с ударными волнами [16, с. 648-649]. Подобные ударные волны могут образовать как остатки взрывов сверхновых масштаба $\sim 0,1$ кпк, так и ВСО масштаба ~ 1 кпк и ВМО размером $\sim 0,3$ кпк, пролетающие сквозь диск Галактики, образуя неоднородности МП сравнимого масштаба (§ 5).

Торможение части газа в диске при пролете ВМО может способствовать более активному звездообразованию в запаздывающей части спиральных ветвей и их наблюдаемому развороту в направлении на центр Галактики. Данное предположение аргументирует наличие у Галактики двух гало, звезды в которых вращаются с разными скоростями (§ 6).

Рассмотрим влияние оседания ВСО на скорость вращения Галактики. Оседая по хаотически ориентированным орбитам в Галактику, ВСО могут тормозить часть газа во вращающемся диске, передающего ВСО кинетическую энергию:

$$\Delta E_k = [M_r v^2 - (M_r + m_v)(v - \Delta v)^2] \kappa_d / R_r, \quad (7.1)$$

где m_v – масса ВСО; M_r – масса Галактики; v – линейная скорость вращения Галактики, Δv – ее изменение; k_d – коэффициент момента инерции Галактики.

При этом рост массы Галактики увеличит ее гравитационную энергию:

$$\Delta E_{\text{гр}} = Gm_v^2/R_r, \quad (7.2)$$

что, в свою очередь, увеличивает скорость вращения Галактики:

$$\Delta v = (G/R_r)^{1/2} \cdot [(M_r + m_v)^{1/2} - M_r^{1/2}]. \quad (7.3)$$

Данные факторы компенсируют друг друга, так что скорость вращения Галактики при оседании ВСО может поддерживаться; при этом меняется ее момент инерции, что отражается на кривой вращения Галактики (§ 8).

Часть ВСО, движущихся по хаотически ориентированным орбитам, может оседать вдоль плоскости диска Галактики. Ширина диска к периферии и в направлении балджа возрастает [16, с. 648], что объяснимо траекторией оседания ВСО и ВМО. Доля ВСО, оседающих вдоль плоскости диска, может определять отношение полутолщины диска и радиуса Галактики:

$$\Delta_v = D/2R_r. \quad (7.4)$$

При $D \sim 0,3$ кпк; $R_r \sim 15$ кпк доля ВСО, оседающих вдоль плоскости диска $\Delta_v \approx 1\%$.

В Галактике наблюдаются нитеобразные структуры масштаба ≤ 2 кпк в виде цепочек молодых звезд, звездных скоплений и газовых облаков (рис. 5) [25]. Они могут формироваться вдоль траекторий ВСО, оседающих вдоль плоскости диска. Доля звезд в звездных цепочках может достигать величины, сравнимой с Δ_v , т.е. $\sim 1\%$ молодых звезд в Галактике.

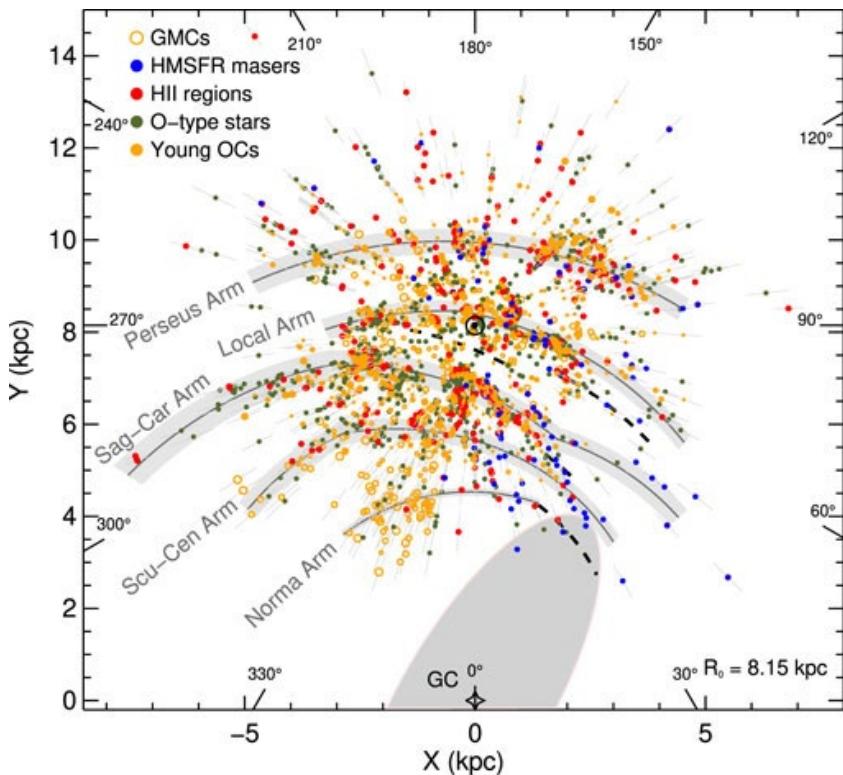


Рис. 5. Распределение молодых космических объектов в диске Галактики

На рис. 5 представлен набор данных по ГМО (желтые кружки), мазерам в области интенсивного звездообразования (синие точки), облакам ионизованного водорода (красные точки), звездам О-класса (зеленые точки), молодым рассеянным звездным скоплениям (желтые точки). Изогнутые сплошные линии обозначают спиральные рукава; серые области вокруг них – их ширину. Погрешность определения расстояния до объектов $\leq 0,5$ кпк [25].

Длину цепочек молодых звезд и газовых облаков может определять длина торможения ВМО (образуемых в центрах ВСО) в межзвездной среде до пекулярной скорости газовых

облаков, составляющей в Галактике ~ 10 км/с [9, с. 1217]. При начальной скорости ВСО $v \sim 100$ км/с время торможения ВМО в газе диска Галактики средней плотностью $\sim 0,6$ см⁻³ может составлять $\Delta t_d \sim 10^7$ лет при *длине торможения* $d = v\Delta t_d \approx 1$ кпк (§ 4).

Плотность газа на периферии диска существенно снижается [16, с. 648], что может увеличивать длину торможения ВМО и формированию звездных цепочек большей длины > 1 кпк.

8. Проявление гигантских молекулярных облаков в кривой вращения Галактики

Распределение массы в галактиках рассчитывают с учетом массы звезд и газа. Массу звезд оценивают исходя из их средней светимости на основе соотношения M/L (8.1) в зависимости от типа галактик, содержащих определенную долю газа [17, с. 389]. Между тем при определении массы различных областей галактик также следует учитывать динамику звездообразования. Существенный вклад в светимость галактик вносят молодые массивные звезды [17, с. 389], быстро выгорающие в условиях зависимости времени жизни звезд от массы $t_s \sim 1/M^3$ [12, с. 68], т.е. светимость старых звезд заметно ниже, чем молодых.

Звезды образуются в молекулярных облаках (§ 6). Скорость звездообразования во внутренних областях галактик на порядок выше, чем на их периферии [12, с. 68], где молекулярный газ практически отсутствует [18, с. 396]. Как следствие, на эффект вириальной (скрытой) массы, проявляющейся в кривой вращения галактик [17, с. 342], может влиять различное соотношение массы старых звезд низкой светимости на периферии и в центре галактик, а также молодых ярких звезд в их внутренних областях.

Большая часть ГМО и связанных с ними молодых звезд находится в кольце, удаленном на 4 – 8 кпк от ее центра, где интенсивность звездообразования максимальна [17, с. 388]. Масса данной области Галактики может быть завышена, а скорость вращения – занижена.

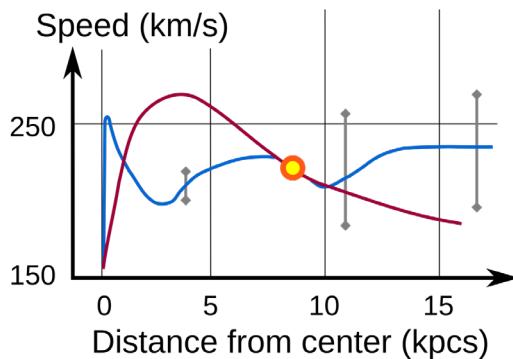


Рис. 6. Кривая вращения галактики Млечный Путь

На рис. 6 представлена кривая вращения Млечного Пути. По вертикальной оси отложена скорость вращения вокруг центра Галактики; по горизонтальной оси – расстояние от центра Галактики. Солнце отмечено желтым шаром. Наблюданная кривая скорости вращения – синяя; прогнозируемая кривая, основанная на звездной массе и газе в Галактике – красная; разброс в наблюдениях характеризуют серые полосы.

В зависимости от преобладания старых или молодых звезд отношение масса – светимость галактик различного типа находится в диапазоне:

$$5 M_\odot/L_\odot \leq M/L \leq 15 M_\odot/L_\odot, \quad (8.1)$$

где M_\odot – масса Солнца; L_\odot – светимость Солнца [17, с. 389].

Например, масса Млечного Пути $M_r \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [17, с. 389]; светимость $L_r \sim 1,3 \cdot 10^{10} L_\odot$ [9, с. 1214]; отношение $M_r/L_r \approx 15 M_\odot/L_\odot$, т.е. в Галактике преобладают старые звезды.

Отношение масса – светимость для Галактики адекватно оценено в окрестности Солнца на удалении ~ 8 кпк от ее центра (рис. 6). Напомним, что во внутренних областях галактик скорость звездообразования на порядок выше, чем на периферии [12, с. 68]. Как следствие, оценка массы внутренней области галактик (на основе средней светимости звезд) может

быть завышена, т.е. скорость ее вращения – занижена. Соответственно, оценка массы звезд на периферии галактик может быть занижена, а скорость вращения – завышена.

Резкий рост скорости вращения в ядре Галактики радиусом до <1 кпк (рис. 6) может быть обусловлен высокой плотностью старых звезд (красных карликов) и продуктов эволюции звезд (в основном старых белых карликов) низкой светимости. Так, эволюционно ядра галактик рассматриваются как центры конденсации галактик (малых) и первоначального звездообразования; там должны быть сконцентрированы самые старые звезды [17, с. 391].

Оценим добавочную светимость, привносимую молодыми звездами во внутренних областях Галактики, где скорость звездообразования высока. В Галактике преимущественно рождаются звезды массой $M \leq 0,8 M_{\odot}$ светимостью $L \leq 0,4 L_{\odot}$ [12, с. 489], что отражает известное начальное распределение звезд по массам Солнечной системы. Отношение масса – светимость таких звезд $M/L \geq 2 M_{\odot}/L_{\odot}$ в существенной мере определяет отношение масса – светимость галактик, богатых газом ($M/L)_g \sim 5 M_{\odot}/L_{\odot}$ (8.1).

Прирост массы молодых звезд в Галактике $\Delta M/\Delta t$ за время их жизни:

$$\Delta_m = \Delta M t_s / M_r \Delta t, \quad (8.2)$$

где t_s – время жизни молодых звезд.

В Галактике массой $M_r \sim 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ежегодно образуется несколько звезд массой $\sim M_{\odot}$ [12, с. 68]; прирост массы $\Delta M/\Delta t \sim 3 \pm 1 M_{\odot}$ в год (§ 6). Время жизни звезд массой $\sim 0,85 M_{\odot}$ сравнимо с возрастом галактик $t_s \sim t_r \sim 10$ млрд. лет [17, с. 387]; прирост $\Delta_m \approx 0,15 \pm 0,5$.

Введем параметр, характеризующий отношение светимости галактик, в которых преобладают старые, или молодые звезды:

$$\Delta_L = (M/L)/(M/L)_g, \quad (8.3)$$

где $(M/L)_g$, (M/L) – отношение масса – светимость галактик, богатых и бедных газом соответственно.

При $(M/L)_g \sim 5 M_{\odot}/L_{\odot}$, $(M/L) \sim 15 M_{\odot}/L_{\odot}$ [17, с. 389] параметр $\Delta_L \approx 3$.

Галактикам присущ профиль интенсивности звездообразования. Отклонение светимости молодых звезд по отношению к старым относительно средней светимости звезд в Галактике:

$$\Delta_{\pm} = \Delta_m \Delta_L / 2. \quad (8.4)$$

При $\Delta_m \sim 0,15$ (8.2); $\Delta_L \sim 3$ (8.3) отклонение светимости молодых и старых звезд в Галактике относительно средней величины $|\Delta_{\pm}| = 0,23 \pm 0,08$.

Солнце удалено от центра Галактики на 8 кпк, где пролегает граница наибольшей интенсивности звездообразования, удаленная на 4 – 8 кпк от ее центра [17, с. 388]. Поскольку соотношение долей старых и молодых звезд в окрестности Солнца, основанное на данных наблюдений, оценено наиболее адекватно (рис. 6), данная область может служить реперной (средней) величиной для параметра Δ_{\pm} , применимого к кривой вращения Галактики.

Во внутренней области Галактики с высокой скоростью звездообразования параметр $\Delta_+ = 23 \pm 8 \%$ (8.4), что может привести к пропорциональному завышению оценки массы звезд (среди которых много молодых) исходя из средней светимости звезд. Так, на удалении ~ 4 кпк от центра Галактики ее виртуальная масса меньше средней оценки на $30 \pm 5 \%$ (Рис. 6), что связывается с присутствием т.н. «темной энергии».

На периферии Галактики параметр $\Delta_- = -23 \pm 8 \%$ (8.4), что может привести к пропорциональному занижению оценки массы звезд (в основном старых). Действительно, на удалении ≥ 15 кпк от центра Галактики ее виртуальная масса выше средней оценки массы звезд и газа на $30 \pm 20 \%$ (рис. 6), что связывается с присутствием скрытой массы [17, с. 342].

9. Ударные волны высокоскоростных облаков, ускоряющие космические лучи

Кинетическая энергия ВСО и энергия их гравитационного притяжения Галактикой в процессе торможения средой трансформируется в энергию ударных волн в диске и гало

Галактики. Данные ударные волны могут ускорять космические, а также субкосмические лучи.

Оценим мощность ударных волн $L_f = E_v/t$, в которые трансформируется кинетическая энергия ВСО $E_v = \Sigma m_v V_v^2/2$ (где $\Sigma m_v/t = Y_v$) в диске Галактики и галактических фонтанах:

$$L_f = Y_v V_v^2/2, \quad (9.1)$$

где V_v – средняя скорость ВСО относительно межгалактического газа; Y_v – скорость оседания ВСО в гало Галактики из ее короны.

Оценим среднюю скорость ВСО относительно газа во вращающемся диске Галактики:

$$V_v = (v_r^2 + v_v^2)^{1/2}, \quad (9.2)$$

где v_r – линейная скорость вращения диска Галактики; v_v – скорость ВСО перпендикулярно плоскости диска.

При среднем угле наклона к плоскости диска $\theta \sim 45^\circ$ у ВСО, движущегося с равновесной скоростью $v_v \sim 100$ км/с перпендикулярная составляющая скорости согласно (4.3) $v_v = v \sin \theta \approx 70$ км/с (§ 4). При $v_r \sim 235 \pm 15$ км/с [17, с. 387] средняя скорость ВСО относительно межгалактического газа $V_v \approx 245$ км/с.

При $Y_v \sim 10 M_\odot$ год⁻¹ (6.2) согласно (9.1) мощность ударных волн в галактических фонтанах $L_f \approx 2 \cdot 10^{41}$ эрг/с.

Оценим мощность гравитационной энергии, которая может выделяться ударными волнами в процессе оседания ВСО и ВМО в Галактику из ее гало:

$$L_v = \mu KGM_g Y_v / R_g, \quad (9.3)$$

где K – параметр, учитывающий изменение гравитации Галактики по мере приближения к ее центру; μ – параметр, учитывающий испарение части газа ВСО.

Оценим параметр K , учитывающий изменение гравитации Галактики по мере приближения к области оседания ВСО. Энергия гравитации $U = F\Delta r = \int GM(R)m \cdot dR/R^2$. Виртуальная масса галактик $M(R)$ пропорциональна радиусу при постоянном отношении $M(R)/R$ [17, с. 342, 389], т.е. $U \sim \int dR/R = \ln |R|$ в границах от области оседания ВСО R_o до радиуса Галактики (ее гало) R_g при $K = \ln (R_g/R_o)$. Оценки показывают, что $R_g \sim 1,5 R_o$ при $K \approx 0,4$.

Так, ВСО оседают в Галактику из короны по спиральной траектории, пролетая через диск Галактики на удалении от центра $R_o \sim 10$ кпк [2], что сравнимо со средней удаленностью диска Галактики $(R_g + R_o)/2 \approx 10$ кпк при ее радиусе $R_g \sim 15$ кпк за пределами балда $R_b \sim 4$ кпк [17, с. 387]. Для сравнения, ВМО могут оседать в виде ГМО на удалении $R_o' \sim 6 \pm 2$ кпк от центра Галактики. Так, наибольшая интенсивность звездообразования происходит в области 4 – 8 кпк от центра [17, с. 388] (§ 8).

В галактических фонтанах может испаряться ~70% газа ВСО (§ 6), так что их средняя исходная масса $m_{vo} \sim 1,3 \cdot 10^6 M_\odot$ (1.6) снижается до массы ГМО $m_g \sim 3 \cdot 10^5 M_\odot$ [7, с. 85], что соответствует параметру $\mu = (m_{vo} + m_g)/2m_{vo} \approx 0,6$.

При $M_g \sim 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ [17, с. 389]; $Y_v \sim 10 M_\odot$ год⁻¹ [2] согласно (9.3) мощность ударных волн в гало $L_v \approx 2 \cdot 10^{41}$ эрг/с. Суммарная мощность ударных волн ВСО и МВО в диске и гало Галактики $\Sigma L = L_f + L_v \approx 4 \cdot 10^{41}$ эрг/с.

Для сравнения, энерговыделение сверхновых в Галактике $\sim 3 \cdot 10^{40}$ эрг/с [26]; по другим оценкам $10^{40} - 10^{41}$ эрг/с [19, с. 245] на порядок меньше. Суммарная мощность ударных волн ВСО в короне Галактики на порядок больше $\sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с, что может обеспечить плотность энергии излучения, усредненного по всему пространству Вселенной $\sim 10^{-4}$ эВ/см³ [2].

Ударные волны ускоряют космические лучи (КЛ) [19, с. 245]. Согласно механизму Ферми [19, с. 245] последовательные пересечения ударных волн намагниченных облаков газа КЛ увеличивает энергию частиц пропорционально уже достигнутой энергии. Согласно модели Крымского КЛ ускоряют сверхновые [26]; КЛ также могут ускорять пузыри Ферми [27].

Максимальная энергия КЛ зависит от магнитного поля (МП) во фронте ударной волны, а также скорости и времени ее распространения:

$$E_{max} \sim Btv^2, \quad (9.4)$$

где B – индукция магнитного поля; v – скорость ударной волны; t – время ее распространения [27].

При росте размера ударной волны $d = tv$ зависимость (9.4) представима в виде $E_{\max} \sim Bdv$. При этом по принятым представлениям максимальную энергию КЛ ограничит гирорадиус (ларморовский радиус) частиц, который не может превышать размер рассеивающей (ускоряющей) ударной волны:

$$E_{\max} \leq eBd/2, \quad (9.5)$$

где d – размер ударной волны; e – заряд электрона.

МП диска Галактики $B \sim 2 \cdot 10^{-6}$ Гс [16, с. 181] шириной $d_r \sim 0,3$ кпк [9, с. 1217] рассеет (удержит) КЛ с энергией $E_{\max} \leq 3 \cdot 10^{17}$ эВ. Так, у КЛ с энергией $< 10^{17}$ эВ анизотропия $< 1\%$ [12, с. 473]; при этом в спектре КЛ в области $\sim 10^{17}$ эВ наблюдается так называемое «колено» (рис. 7).

У ВМО $d_m \sim 0,3$ кпк (§ 1), $B_m \sim 10^{-5}$ Гс [10]; для ВСО $d_v \sim 1$ кпк (§ 1), $B_v \sim 3 \cdot 10^{-6}$ Гс [2]. Согласно (9.5) они рассеют КЛ с энергией $E_{\max} \leq 10^{18}$ эВ.

Галактика масштаба $d_r \sim 30$ кпк и ее гало, содержащее тысячи ВМО (§ 1), с учетом оценки (9.6) представима как целостная система, которая согласно критерию (9.5) способна рассеять (удержать) КЛ с $E_{\max} \leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ.

Оседающие в Галактику из короны цепочки ВСО, размером $d_n \leq 30$ кпк (§ 2) согласно (9.5) могут рассеять КЛ с энергией $E_{\max} \leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ.

Магелланов Поток длиной $d_{mp} \sim 100$ кпк [20] и, возможно, система цепочек ВСО в короне Галактики – ансамбль сравнимого масштаба рассеет (ускорит) КЛ с энергией $E_{\max} \leq 10^{20}$ эВ. Так, ВСО покрывают ок. 37% неба [14], т.е. могут покрывать $\sim 70\%$ короны Галактики в поперечнике. Подобный вывод аргументирует регистрация КЛ с энергией выше известного предела Грайзена – Зацепина – Кузьмина $\sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ, обусловленного взаимодействием частиц КЛ с фотонами микроволнового фонового излучения на дистанции ≥ 50 Мпк.

Присутствие источника КЛ $\leq 10^{20}$ эВ в пределах короны Галактики аргументирует их энергетический спектр. Так, по предыдущим оценкам суммарная мощность ударных волн ВСО и ВМО в Галактике, ее гало и короне $\sim 2,4 \cdot 10^{42}$ эрг/с обеспечит плотность энергии излучения, усредненного по всему пространству Вселенной $\sim 10^{-4}$ эВ/см³. Если межгалактические КЛ сверхвысокой энергии $\leq 10^{20}$ эВ ускоряют удаленные источники, плотность их энергии должна быть на 3 порядка выше: $\sim 0,1$ эВ/см³.

На это указывает аппроксимация энергетического спектра КЛ $3 \cdot 10^{18} – 3 \cdot 10^{19}$ эВ (Рис. 7) в область максимума $\sim 10^9$ эВ [12, с. 472], где плотность энергии галактических КЛ достигает ~ 1 эВ/см³ [12, с. 471]. Их удаленные источники должны иметь мощность $\sim 10^{45}$ эрг/с (в расчете на галактику), подобно квазарам, чья пространственная концентрация $\sim 10^{-8}$ Мпк⁻³ [12, с. 250] на 6 порядков ниже, чем галактик $\sim 10^{-2}$ Мпк⁻³ [18, с. 457], а средняя удаленность ($z \sim 2$) намного выше ограничения < 50 Мпк. У радиогалактик (источников КЛ) при сопоставимой с квазарами концентрации мощность $10^{42} – 10^{44}$ эрг/с [16, с. 213] минимум на порядок ниже.

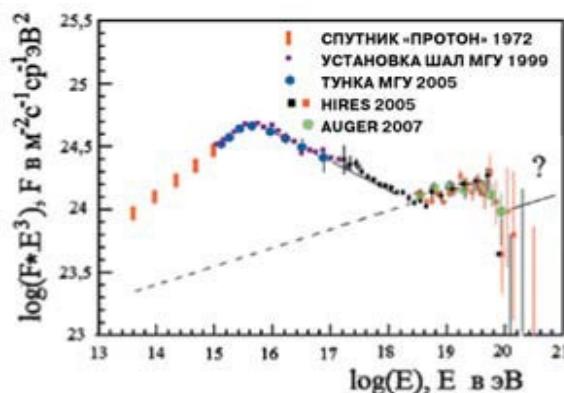


Рис. 7. Энергетический спектр космических лучей высоких энергий

Оценим энергию КЛ, ускоряемых ВСО и ВМО на основе зависимости (9.4). Ударные волны *остатков вспышек сверхновых* (OBC) могут ускорять КЛ до энергии $\leq 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ [26]; по принятым оценкам $E_{ovs} \leq (1 - 3) \cdot 10^{15}$ эВ [27] при МП в ударной волне OBC $(0,3 - 1) \cdot 10^{-4}$ Гс (например, в молодой SN 1006 возрастом $\sim 10^3$ лет). Оболочки старых OBC достигают $\leq 0,1$ кпк; температура $\sim 10^6$ К (влияющая на скорость расширения OBC) [7, с. 477].

МП в ударных волнах старых OBC может быть сравнимо с МП ВСО и ВМО, которые формируют ударные волны при пересечении Галактики (с образованием галактических фонтанов), а также при движении в ее гало. Так, скорость ВСО и ВМО относительно среды $100 - 250$ км/с (§ 4) сравнима со скоростью ударной волны OBC $r_{ovs}/t_{ovs} \approx 50 - 500$ км/с возрастом $t_{ovs} \sim 4 \cdot 10^4 - 10^6$ лет радиусом $r_{ovs} \sim 20 - 50$ пк [7, с. 477]. При скорости звука в газе гало ~ 30 км/с и диска ~ 10 км/с (§ 4) число Maxa $M \sim 3 - 30$. При высоких числах Maxa образуются ударные волны, ускоряющие КЛ [26].

Пролеты ВСО и ВМО сквозь Галактику за $d_r/v \approx 3 \cdot 10^6$ лет (§ 4) образуют галактические фонтаны с температурой $\sim 10^6$ К и $\sim 10^5$ К соответственно (§ 10), сравнимой с температурой газа старых OBC. Высота фонтанов $1,5 - 2$ кпк и время их распространения в гало $\sim 10^8$ лет (§ 5) более чем на порядок превышают масштаб $\sim 0,1$ кпк и время жизни OBC $\sim 10^6$ лет [7, с. 477]. Скорость относительно среды ВСО и ВМО сравнима со скоростью расширения старых OBC, т.е. образуемые ими ударные волны могут ускорять КЛ до сравнимой энергии.

Согласно зависимости (9.4) при пересечении Галактики ВСО и ВМО с образованием галактических фонтанов КЛ могут ускоряться до энергии $E_{max} \leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ, внося весомый вклад в их энергетический спектр (рис. 7). Напомним, суммарная мощность ударных волн ВСО и ВМО $\sim 4 \cdot 10^{41}$ эрг/с по предыдущей оценке, на порядок превышает энерговыделение сверхновых в Галактике $\sim 3 \cdot 10^{40}$ эрг/с [26]; $10^{40} - 10^{41}$ эрг/с [19, с. 245].

Обращение в гало Галактики ВМО со скоростью ≤ 230 км/с размером $\sim 0,3$ кпк (§ 4) может создавать ударные волны сравнимого масштаба. Кроме того, их оболочки могут сталкиваться в гало с оболочками других ВМО (§ 1), образуя встречные ударные волны. Согласно (9.4) отдельные ВМО могут ускорять КЛ до энергии $E_{max} \leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ.

КЛ могут ускорять ансамбли ударных волн [26]. Из короны Галактики оседают цепочки ВСО масштаба ≤ 30 кпк, образующие в гало комплексы масштаба ~ 10 кпк (§ 2). Время оседания ВСО из короны в гало $t_v \sim 7 \cdot 10^8$ лет; в Галактику из гало $t_v' \sim 4 \cdot 10^8$ лет (§ 5) превышает время жизни галактических КЛ $t_{KL} \leq 10^8$ лет [12, с. 472]. Согласно (9.4) КЛ могут ускориться до энергии $E_{max} = E_{ovstv}/t_{ovs} \leq 10^{18}$ эВ. По другой оценке пузыри Ферми масштаба ~ 10 кпк с МП $\leq 10^{-5}$ Гс [10] могут ускорять КЛ до сравнимой энергии $< 10^{18}$ эВ [27]. Напомним, пузыри Ферми окружены ВСО [8], чье сравнимое МП искажает МП пузырей.

Гало Галактики может содержать тысячи ВМО (§ 1). Оценим степень покрытия ударными волнами ВМО площади диска с каждой из сторон:

$$\delta_s^* = (N_m/2) \cdot (D_m/2R_f)^2, \quad (9.6)$$

где N_m – число ВМО; D_m – размер ударной волны ВМО.

$R_f \sim 15$ кпк [17, с. 387]; $N_m \sim 2,5 \cdot 10^3$ (§ 1); $D_m \sim 1$ кпк (с учетом газовых шлейфов ВМО) параметр $\delta_s^* \approx 1$. ВМО в гало могут формировать ансамбль ударных волн масштаба ~ 30 кпк.

Время жизни галактических КЛ $\leq 10^8$ лет в межзвездном газе (~ 1 см $^{-3}$) [12, с. 472] для галактических источников ограничивает $E_{max} < 10^{17}$ эВ [19, с. 245]. Система ВМО (для газовых шлейфов $B_v \sim 3 \cdot 10^{-6}$ Гс [2]) за время жизни КЛ $\leq 10^{10}$ лет до рассеяния ядрами частиц в гало плотностью $3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ (§ 10) согласно (9.4), а также (9.5) ускорит КЛ до $E_{max} \leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ.

Высокоэнергетичные КЛ $\leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ, ускоряемые ансамблем ВМО в гало, могут быть частично анизотропны. Так, анизотропия КЛ с энергией $10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$ эВ не ниже $\geq 10\%$ [12, с. 473]; что связывается с их ускорением внегалактическими источниками [12, с. 474].

В гало Галактики выделяются несколько комплексов ВСО, включая пузыри Ферми (Рис. 2), которые могут ускорять КЛ до $< 10^{18}$ эВ [27]. Из короны оседает ок. десятка цепочек ВСО (рис. 3), которые могут ускорять КЛ до сравнимой энергии. Суммарное число

подобных объектов на 2 – 3 порядка меньше числа ВМО в гало ($\sim 2,5 \cdot 10^3$) и старых ОВС в Галактике ($\sim 3 \cdot 10^4$), на МП которых происходит диффузия галактических КЛ с энергией $\leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ, сглаживающая их спектр. В данных условиях диффузия КЛ $< 10^{18}$ эВ на комплексах и цепочках ВСО может быть менее эффективна.

Как следствие, спектральный индекс КЛ, ускоряемых комплексами и цепочками ВМО ($\leq 10^{18}$ эВ), может быть выше среднего. Так, у КЛ с энергией $3 \cdot 10^{15} – 10^{18}$ эВ спектральный индекс $\gamma^* \sim 3,2$ выше, чем $\gamma \sim 2,7$ у КЛ с энергией $\leq 10^{15}$ эВ и КЛ $\geq 10^{18}$ эВ [12, с. 472] (Рис. 7).

Магелланов Поток длиной $d_{\text{ц}} \sim 100$ кпк и шириной $h_{\text{ц}} \sim 10$ кпк [20] как цепочка ВСО, движущихся со скоростями (на луче зрения) от +250 км/с в «голове» до -450 км/с в «хвосте», представим как линейный ускоритель КЛ, в котором доля ускоряемых КЛ по отношению к сферическим ударным волнам $h_{\text{ц}}/d_{\text{ц}} \approx 0,1$. У ускоряемых анизотропных КЛ с энергией $\leq 10^{20}$ эВ согласно (9.4) и (9.5), спектральный индекс может превышать $>\gamma + \lg(d_{\text{МП}}/h_{\text{МП}}) > 3,7$.

Цепочки ВСО длиной ≤ 30 кпк по мере оседания в Галактику могут сжиматься в сферические комплексы масштаба ~ 10 кпк (§ 2) при среднем отношении $h_k/d_k \approx 0,3$, чему может соответствовать $\gamma^* = \gamma + \lg(d_k/h_k) \approx 3,2$.

10. Разогрев газа в гало Галактики при оседании высокоскоростных облаков

Разогревать газ в гало Галактики могут ударные волны вокруг ВСО и ВМО, а также ускоряемые ими субкосмические лучи. Так, межзвездный газ разогревают, в т.ч. ударные волны и субкосмические лучи [7, с. 86]. Ударные волны нагревают газ во фронте ударной волны; за ее фронтом температура газа резко снижается; в сверхзвуковой ударной волне температуры данных областей отличается на порядок [19, с. 208].

Столкновение ВСО и ВМО с Галактикой может выбрасывать межзвездный газ в гало в виде галактических фонтанов горячего газа (§ 5). Скорость ВСО и ВМО относительно межзвездного газа равна тепловой скорости частиц одноатомного газа с температурой:

$$T = m_p v^2 / 3k, \quad (10.1)$$

где v – скорость частиц газа.

При формировании галактического фонтана может разогреваться часть газа ВСО (ВМО) и межзвездный газ сравнимой массы (§ 5) с достижением средней температуры газа $T_f \sim T/2$, т.е. температура газа в фонтане:

$$T_f = (V_v^2 - V_{v'}^2)m_p/6k, \quad (10.2)$$

где V_v – полная скорость ВСО (ВМО) относительно межзвездного газа при соударении с диском Галактики, $V_{v'}$ – после пролета сквозь диск.

Линейная скорость вращения Галактики $v_r \sim 235$ км/с [17, с. 387]; скорость ВСО в гало $v_v \sim 100$ км/с (§ 4); полная скорость $V_v \sim 255$ км/с (4.8). После 1-го пролета ВСО (ВМО) сквозь диск $V_{v'} \sim V_m \sim 130$ км/с (Табл. 2); температура газа в галактическом фонтане $T_f \approx 10^6$ К.

В силу торможения ВСО газом гало его скорость ограничена ~ 100 км/с (§ 4) при составляющей перпендикулярно плоскости диска ~ 60 км/с; вдоль диска $v_v \sim 85$ км/с. При 2-ом соударении с диском $V_v \sim 160$ км/с; $T_f \approx 5 \cdot 10^5$ К. При 3-ем пролете $V_v \sim 150$ км/с; $T_f \approx 4 \cdot 10^5$ К. Так, постепенное разрушение ВСО может ограничивать число фонтанов $N_f = 3$ (5.7).

Температура галактических фонтанов ВСО $(4 - 10) \cdot 10^5$ К сравнима с температурой короны Галактики $\sim 5 \cdot 10^5$ К [9, с. 1217]; [18, с. 101]. По закону Вина газ в галактических фонтанах излучает в рентгеновском диапазоне (в спектральных линиях), что иллюстрирует рис. 4.

Таблица 4

Температура газа в галактических фонтанах, образуемых при пролетах ВСО и ВМО сквозь Галактику

<i>Номер пролета</i>	<i>Скорость ВСО, км/с</i>	<i>Температура газа, К</i>	<i>Скорость ВМО, км/с</i>	<i>Температура газа, К</i>
1	130	10^6	130	10^6
2	160	$5 \cdot 10^5$	80	$2 \cdot 10^5$
3	150	$4 \cdot 10^5$	50	$8 \cdot 10^4$
4	-	-	35	$3 \cdot 10^4$
5	-	-	20	10^4

Оценим температуру газа в фонтане ВМО. Полная скорость ВМО (внутри ВСО) относительно межзвездного газа после 1-го пролета сквозь диск $V_m' \sim 130$ км/с (Табл. 2) меньше равновесной скорости в гало ~ 200 км/с (§ 4), т.е. скорость ВМО в гало может меняться несущественно и при 2-ом пересечении диска может составлять ок. 130 км/с.

Полная скорость ВМО (одиночного) относительно межзвездного газа после 2-го пролета ~ 80 км/с и далее последовательно снижается (табл. 2), что приведет к заметному падению температуры газа в фонтанах (табл. 4).

Как видно из табл. 4, при 2-ом пересечении диска ВМО $T_{fm} \approx 2 \cdot 10^5$ К; при 3-м пролете $T_{fm} \approx 8 \cdot 10^4$ К, что близко к температуре дискообразного гало $\sim 10^5$ К [7, с. 85]. При 4-м пролете ВМО сквозь Галактику $T_{fm} \approx 3 \cdot 10^4$ К.

Газ подобной температуры излучает в далеком УФ диапазоне, из-за чего он трудно наблюдаем. Так, горячий газ с температурой $(0,3 - 1,4) \cdot 10^5$ К согласно закону Вина излучает в области максимума спектра в диапазоне длин волн 20 – 91 нм; подобное УФ излучение практически полностью поглощает межзвездный атомарный водород (и гелий) [19, с. 221].

Оценим скорость ВМО относительно межзвездного газа во вращающемся диске, при которой газ разогреется до критической температуры, при которой он станет наблюдаем:

$$v_{min} = (6kT_c/m_p)^{1/2}, \quad (10.3)$$

где T_c – критическая температура для наблюдения газа.

При $T_c > 1,5 \cdot 10^5$ К *минимальная скорость ВМО относительно межзвездного газа в диске* $v_{min} > 80$ км/с, что сравнимо с полной скоростью ВМО после 2-го пролета сквозь диск ~ 80 км/с (табл. 4). Тем самым, 2-й, 3-й и 4-й пролеты ВМО сквозь диск могут формировать галактические фонтаны, насыщающие гало Галактики трудно наблюдаемым горячим газом.

При 5-ом пролете ВМО нагреет газ до $T_{fm} \approx 10^4$ К, близкой к температуре межоблачной среды Галактики $(0,7 - 1) \cdot 10^4$ К [7, с. 86].

Оценим плотность газа в дискообразном гало высотой 1,5 – 2 кпк (§ 5), способного уравновесить давление как теплой межоблачной среды Галактики, так и горячего газа в ее короне исходя из уравнения состояния ионизованного газа $p = nk(T_e + T_p)$ в равновесной системе:

$$n_2/n_1 = T_1/T_2, \quad (10.4)$$

где T_i – температура газа; n_i – концентрация газа.

В короне $n_k \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см⁻³; $T_k \sim 5 \cdot 10^5$ К [18, с. 101]; в гало $T_g \sim 10^5$ К [7, с. 85]. При $T_e \sim T_p$ *концентрация газа в дискообразном гало* $n_g \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ см⁻³.

У теплой, частично ионизованной межоблачной среды температура $T_t \sim (0,7 - 1) \cdot 10^4$ К; концентрация $n_h \sim 0,1$ см⁻³ [7, с. 86]; концентрация газа дискообразного гало $n_g \approx (1 - 1,4) \cdot 10^{-2}$ см⁻³. Данные оценки сравнимы с известной оценкой для S-галактик $n_g < 10^{-2}$ см⁻³ [7, с. 85].

На высоте ~ 5 кпк над галактической плоскостью плотность газа с температурой $\sim 10^5$ К падает до $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ см⁻³ [7, с. 85], т.е. в 30 раз. Это может указывать на преобладание в этой области коронального газа с температурой $\sim 5 \cdot 10^5$ К, излучение которого неразличимо на

фоне излучения протяженной короны. Так, радиус горячей газовой короны Галактики ~ 100 кпк [7, с. 81] более чем на порядок превышает высоту данной области гало 5 кпк.

Суммарной мощности ударных волн в короне Галактики $\sim 2 \cdot 10^{42}$ эрг/с, ускоряющих как космические, так и субкосмические лучи, достаточно для нагрева газа в короне Галактики массой $\sim 10^{12} M_{\odot}$ [2] при времени остывания горячего ($\sim 10^6$ К) газа плотностью $\sim 10^{-3}$ см $^{-3}$ в коронах галактик $10^9 - 10^{10}$ лет [18, с. 402]. Нагрев газа сферического гало Галактики массой $\sim 10^{10} M_{\odot}$ [9, с. 1215] сравнимой плотности и температуры требует меньшего энерговыделения $\sim 10^{40}$ эрг/с, на порядок меньше мощности ударных волн ВСО и ВМО в гало Галактики $\sim 2 \cdot 10^{41}$ эрг/с (§ 9). По-видимому, значительная часть энерговыделения ударных волн в гало может расходоваться на УФ излучение теплого газа (§ 1) и ускорение КЛ (§ 9).

Оценим плотность горячего газа, при которой ударные волны ВСО (ВМО) образуют атомарный водород. Интенсивность рекомбинационного, тормозного излучения плазмы и излучения в спектральных линиях $\sim n^2$ [12, с. 109]. Скачок плотности во фронте ударной волны в газе (плазме) ограничен коэффициентом предельного сжатия [19, с. 208]. Максимальное уплотнение газа может достигаться во встречных ударных волнах, например, в «хвосте» турбулентного газа объекта, движущегося в газе с концентрацией:

$$n_c = n_h/h_o^2, \quad (10.5)$$

где n_h – концентрация межоблачной среды; h_o – коэффициент предельного сжатия.

В теплой межоблачной среде $n_h \sim 0,1$ см $^{-3}$ [7, с. 86]; для одноатомного газа (протонов) $h_o = 4$ [19, с. 208]. Минимальная (критическая) концентрация горячего газа $n_c \geq 6 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$, чему удовлетворяет плотность газа в дискообразном гало $(1 - 1,5) \cdot 10^{-2}$ см $^{-3}$ (10.4).

Оценим температуру ионизации водорода:

$$T_i = 2E_i/3k, \quad (10.6)$$

где E_i – энергия ионизации водорода.

Для атома водорода $E_i = 13,6$ эВ [17, с. 297]; температура ионизации $T_i \approx 10^5$ К, что соответствует температуре дискообразного гало $\sim 10^5$ К [7, с. 85].

Для сравнения, плотность газа короны $n_k \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$ [18, с. 101] ниже в $n_c/n_k \approx 2$ раз; ее температура $T_k \sim 5 \cdot 10^5$ К [18, с. 101] выше в $T_k/T_i \approx 5$ раз.

По-видимому, критическая плотность и температура горячего газа достижима в области соприкосновения (слияния) корон галактик. Например, Магелланов Поток располагается между соседними галактиками – Большим и Малым Магеллановыми Облаками. Так, ВСО, содержащие атомарный водород с температурой $\leq 10^4$ К, могут формироваться галактиками – спутниками [1], вероятно, в «хвостах» ударных волн вокруг их гало [2].

В «хвосте» ударных волн ВМО в корональном газе могут образоваться области атомарного водорода, что объясняет наличие у движущихся в гало ВМО газовых шлейфов (§ 1), которые могут увлекаться гравитацией ВМО (§ 4), вне которых облака не образуются.

11. Выводы

1. Оценен радиус высокоскоростных облаков (ВСО) атомарного водорода ≤ 3 кпк и время $\leq 2 \cdot 10^8$ лет, за которое в них могут сформироваться гигантские молекулярные облака (ГМО).

2. При пролете ВСО сквозь Галактику динамическое давление межзвездного газа может «форматировать» его внутреннюю область под ГМО (радиус ~ 20 пк, масса $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$), которое может выделиться из ВСО в виде высокоскоростных молекулярных облаков (ВМО).

3. Гало может содержать $\sim 2,5 \cdot 10^3$ ВМО (радиус оболочки атомарного водорода ~ 150 пк) массой $\sim 4 \cdot 10^5 M_{\odot}$, движущихся по эллиптическим орбитам со скоростью 130 – 230 км/с и оседающих в Галактику через $\sim 6 \cdot 10^8$ лет.

4. В «хвосте» ударной волны в окрестности гало галактики – спутника могут формироваться цепочки ВСО масштаба ≤ 30 кпк, которые при оседании в Галактику могут группироваться в комплексы ВСО масштаба ~ 10 кпк.

5. В процессе торможения газом гало Галактики ВСО и ВМО могут двигаться вокруг ее центра по эллиптическим орбитам со скоростью ≤ 100 км/с и ≤ 230 км/с соответственно. Пересечение диска может ускорять ВМО до 230 км/с (относительно центра Галактики).

6. Оседание ВМО в диске Галактики в виде ГМО может обеспечить скорость звездообразования 3 ± 1 M_{\odot} год $^{-1}$.

7. ВМО может пересекать Галактику 5 раз, что соответствует числу ее спиральных ветвей, т.е. их формированию могут способствовать траектории оседания ВМО из гало.

8. Наблюдаемые цепочки молодых звезд длиной ≤ 2 кпк могут формироваться в «хвостах» ударных волн $\sim 1\%$ ВСО (содержащих ВМО), оседающих вдоль плоскости диска.

9. Пролет ВСО сквозь Галактику может формировать во внешнем дискообразном гало высотой ~ 2 кпк ок. 3 галактических фонтанов диаметром ~ 1 кпк, содержащих горячий газ с температурой $(4 - 10) \cdot 10^5$ К массой $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$.

10. ВМО со 2-го по 4-ый пролет сквозь Галактику могут формировать в ее внутреннем гало высотой $\sim 1,5$ кпк галактические фонтаны диаметром ~ 1 кпк, насыщающие его газом с температурой $\sim 10^5$ К и тяжелыми элементами.

11. Галактические фонтаны ВМО массой $\sim 3 \cdot 10^4 M_{\odot}$ могут формировать во внутреннем дискообразном гало сплошной слой горячего газа.

12. В галактических фонтанах ВСО может испаряться $\sim 70\%$ газа; в Галактике оседает $\sim 30\%$ газа в виде ГМО и теплого газа межоблачной среды.

13. Горячий газ внутреннего гало с температурой $\sim 10^5$ К, насыщаемый галактическими фонтанами ВМО, может иметь плотность $(1 - 1,5) \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}$.

14. Оценена критическая плотность коронального газа, в котором встречные ударные волны образуют облака атомарного водорода $\geq 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$, чему удовлетворяет газ в дискообразном гало, а также газ в области соприкосновения корон галактик – спутников.

15. ВМО при 5-ом пролете сквозь Галактику могут нагреть межзвездный газ до температуры $\sim 10^4$ К, сравнимой с температурой теплой межоблачной среды.

16. Скорость ВМО относительно межзвездного газа во врачающейся Галактике при 5-ом пролете сквозь ее диск может снизиться до пекулярной скорости газовых облаков ~ 10 км/с, т.е. они могут пополнять число ГМО.

17. Столкновение ВМО с молекулярными облаками в Галактике может способствовать звездообразованию во внутреннем дискообразном гало высотой $\sim 1,5$ кпк, где скорость вращения звезд замедлена.

18. ГМО удалены от центра Галактики на 4 – 8 кпк, как и образуемые ими молодые звезды, чья большая светимость может завышать оценку массы данной области, оцениваемую из среднего отношения масса – светимость Галактики (влияющей на кривую вращения) до 30%.

19. Кинетическая энергия ВСО и ВМО, при оседании в Галактику из ее гало может трансформироваться в энергию ударных волн, ускоряющих космические и субкосмические лучи.

20. В галактических фонтанах, образуемых ВСО и ВМО, энерговыделение может достигать $\sim 2 \cdot 10^{41}$ эрг/с, что на порядок выше мощности сверхновых в Галактике $\sim 3 \cdot 10^{40}$ эрг/с.

21. Пролет сквозь Галактику ВСО и ВМО диаметром 0,3 – 1 кпк может формировать в ее диске крупномасштабные структуры магнитного поля сравнимого размера.

22. ВМО в гало и галактические фонтаны высотой 1,5 – 2 кпк могут формировать ударные волны сравнимого масштаба, которые могут ускорять *космические лучи* (КЛ) до энергии $\leq 3 \cdot 10^{15}$ эВ (согласно механизму Ферми).

23. Цепочки ВСО в короне Галактики, сжимающиеся в комплексы ВСО в гало, включая ВСО в окрестности пузырей Ферми масштаба ~ 10 кпк, могут ускорять КЛ до $\leq 10^{18}$ эВ.

24. Ансамбль ВМО в гало Галактики масштаба ≤ 30 кпк может ускорять КЛ до $\leq 3 \cdot 10^{19}$ эВ. Магелланов Поток – цепочка ВСО длиной ~ 100 кпк, может ускорять КЛ до $\leq 10^{20}$ эВ.

Литература

1. 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.
2. С.Ю. Поройков. Проявления ударных волн вокруг гало галактик – спутников и высокоскоростных облаков в короне Галактики // Журнал естественнонаучных исследований. – 2025. – Т. 10. – № 2. – С. 2-26.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. P. Richter, B.P. Wakker, B.D. Savage, K.R. Sembach. A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer // The Astrophysical Journal. – 2003. – V. 586. – № 1 – P. 230-248.
7. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 3. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1992. – 672 с.
8. T. Ashley, A.J. Fox, F.H. Cashman, et al. Diverse metallicities of Fermi bubble clouds indicate dual origins in the disk and halo // Nature Astronomy. – 2002. – V. 6. – P. 968-975.
9. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
10. E. Carretti, R.M. Crocker, et al. Giant magnetized outflows from the centre of the Milky Way // Nature. – 2013. – V. 493. – P. 66-69.
11. P. Predehl, R.A. Sunyaev, et al. Detection of large-scale X-ray bubbles in the Milky Way halo // Nature. – 2020. – V. 588. – P. 227–231.
12. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 2. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 703 с.
13. Y. Stein, R.-J. Dettmar, R. Beck, et al. Transport processes and the X-shaped magnetic field of NGC 4217: off-center superbubble structure // Astronomy and Astrophysics. – 2020. – V. 639. – A111. – 25 pp.
14. M.E. Putman, J.E.G. Peek, M.R. Joung. Gaseous Galaxy Halos // Review Article. – 2012. – V. 50. – P. 491–529.
15. 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.
16. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 4. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1994. – 704 с.
17. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 1. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1988. – 704 с.
18. А.В. Засов, К.А. Постнов. Общая астрофизика. 2-е изд. испр. и дополн. Фрязино: Век 2. – 2011. – 576 с.
19. А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия, т. 5. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». – 1998. – 784 с.
20. 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.
21. D. Carollo, et al. Two stellar components in the halo of the Milky Way // Nature. – 2007. – V. 450. – P. 1020–1025.
22. 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.

23. R. Ibata, B. Gibson. The Ghosts of Galaxies Past // *Scientific American Magazine*. – 2007. – V. 296. – № 4. – P. 40-45.
24. Y. Hu, K.H. Yuen, V. Lazarian, et al. Magnetic field morphology in interstellar clouds with the velocity gradient technique // *Nature Astronomy*. – 2019. – V.3. – P. 776-782.
25. L.G. Hou. The spiral structure in the Solar neighborhood // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2021. – V. 8 – № 103. – 23 pp.
26. Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский. Ускорение космических лучей ударными волнами // *Успехи физических наук*. – 1988. – Т. 154. – № 1. – С. 49-91.
27. D. Chernyshov, K.-S. Cheng, V. Dogiel, C.-M. Ko. Fermi bubbles as sources of cosmic rays above 1 PeV // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – 145. – 04004. – 5 pp.