

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ

А. Ф. Сорокин⁽¹⁾, М. Я. Захарова⁽¹⁾, А. А. Сорокин⁽¹⁾, А.М. Цюх⁽²⁾, В.П. Власенко⁽²⁾

⁽¹⁾ Научно-производственное предприятие СТ "ТИАМАС" (Россия-Украина), 97403
Крым, Евпатория, ул. Чапаева 89 кв. 29, п/я 25, тел. (8-06569) 2-04-22,

sorokin@ecc. crimea.ua

⁽²⁾ Центр приема научной информации Национального центра управления и
испытаний космических средств, ПК А Украины, 97419 Крым, Евпатория-19,

tsyukh@pochtanit.rii

Показано, что сжатие первичного протооблака в присутствии крупномасштабного магнитного поля с необходимостью вызывает цепочку явлений, при протекании которой проявляются все морфологические особенности галактических подсистем в наблюдаемой части Вселенной.

UNIVERSAL SCRIPT OF FORMATION OF GALACTIC SUBSYSTEMS

A.F. Sorokin, M. Zakharova, A.A. Sorokin, A. Tsyukh, V. Vlasenko

It is shown that compression of a primary protocloud at the presence of a large-scale magnetic field with necessity arouses succession of effects during which all morphological features of galactic subsystems become apparent in the observed part of the Universe.

Введение

По мере накопления и уточнения наблюдательных данных о галактических подсистемах все более очевидной становится необходимость создания самосогласованной единой модели их онтогенеза (зарождения, развития и разрушения) [1].

В такой модели должны найти свое объяснение: многофазность межзвездной среды, источники мощных потоков атомов из галактических центров, природа областей аномального энерговыделения (джеты, радиогалактики, квазары и т.д.), механизм образования и устойчивость спирально дисковой структуры галактик при наличии дифференциального вращения, способ накопления газа в галактической плоскости и наблюдаемый дефицит вещества в приядерных областях, образование частиц сверхвысоких энергий, существенное различие возраста звезд сферических и дисковых подсистем и т.д.

Существующие для объяснения этих фактов модели, как правило, имеют полуэмпирический характер, зачастую слабо связаны между собой и, скорее, относятся к описанию развития уже существующих структур без объяснения природы их возникновения [2]. Так, общепринятая гипотеза разделения первичного газового облака на две фазы как результата развития тепловой неустойчивости [3], явно недостаточна для объяснения всего многообразия наблюдаемых параметров межзвездной среды и не всегда

находит подтверждение в детальных расчетах течения газа с учетом теплового баланса [4].

В достаточно хорошо проработанной теории волновой природы спиральной структуры галактик, упругость, необходимая для распространения волн плотности, обусловлена силами Кориолиса, приводящими к эпициклическому движению звезд, т.е. в конечном счете, вращением всей системы [5,6]. Изначальное вращение всего газового протооблака предполагается и для объяснения дисковой структуры галактик. Однако, даже при незначительных скоростях, вращение частиц вокруг выделенной оси в сверхгалактических масштабах требует колоссальных запасов энергии, должно затруднять процесс фрагментации протооблака и противоречит данным об изотропности Вселенной.

Широкое применение представлений об ударных галактических волнах сыграло важную роль в понимании процессов, происходящих в галактиках, однако, ограничение скачка плотности и других параметров на фронте ударной волны величиной $\chi + 1/\chi - 1$ (χ - постоянная адиабаты) показывает, что они, скорее всего, могут играть роль «триггерного» механизма в тех или иных процессах [7].

Обнаружение [8-10] и детальное исследование [11-15] устойчивых спирально - дисковых структур, образующихся во вращающейся в скрещенных ($E \perp B$) полях плазме, позволило предложить модель онтогенеза галактик, получившую название "модель Сорокиных-Захаровой" [16] (на западе S-Z model [1]), в которой указанные факты находят свое естественное объяснение или вытекают из нее, как следствие.

Возникновение плазменной подсистемы, как основного формообразующего фактора

Феноменологически, в описываемой модели формирование галактических подсистем разделено на два существенно разнесенных во времени этапа и предполагается, что каскадная иерархическая фрагментация протооблака происходит в крупномасштабном магнитном поле B_0

По окончании фрагментации атомы водорода и гелия ускоряются в режиме свободного падения на гравитационные центры фрагментов. В элементарных столкновениях происходит возбуждение атомов и в процессах зарядового обмена, рождаются электроны. По достижении критических температуры и плотности газа электроны за короткое время нагреваются в электрон-ионных столкновениях до температуры достаточной для массовой ионизации атомов (в отсутствие пыли и тяжелых элементов потери энергии на излучение пренебрежимо малы) [17]. Резко возрастает степень ионизации и образуется тонкий шаровой плазменный слой. Свободное падение атомов заменяется медленной диффузией рекомбинирующих ионов поперек магнитного поля. Резкое увеличение плотности фотонов лаймановского континуума приводит к тому, что граница плазменного слоя движется к центру фрагмента за счет фотоионизации. Возникающие поверхностные диамагнитные токи ослабляют магнитное поле внутри слоя, усиливая

его снаружи. Поле внутри протозвезды многократно усиливается, формируя геометрию топологически эквивалентную тору. Внешнее магнитное поле перестраивается из однородного в поле пробочной конфигурации, образуя зеркальную ловушку. В результате изменения поля, в пространстве возникает ЭДС электромагнитной индукции и вихревое, азимутальное электрическое поле E_φ . Частицы плазмы дрейфуют радиально со скоростью $V_D = E_\varphi / B$ по циклоидам в скрещенных $E_\varphi \perp B$ полях, ускоряются до энергий $W = eE_\varphi a \sim mc^2$ (a - характерный размерный параметр: ларморовский радиус, длина свободного пробега частиц по процессам зарядового обмена и т.д.). Этот механизм обеспечивает высокоэффективное преобразование энергии гравитационного сжатия в кинетическую энергию всего ансамбля частиц плазменного слоя. В процессе многократных столкновений частиц в плазме, находящейся в магнитной ловушке, они рассеиваются на угол порядка единицы, попадают в конус ухода в пространстве скоростей и, двигаясь вдоль силовых линий B , покидают ловушку. Так как время электрон-электронного рассеяния в $(m_H / m_e)^{1/2}$ раз меньше протон-протонного, первыми уходят электроны, образуя частично скомпенсированные пучки джетов. В центральной части ловушки формируется объемно-заряженный шар с положительным амбиполярным потенциалом:

$$e\varphi \approx \eta kT_e, \quad (1)$$

где, $\eta \gg 1$ - определяется из условия равенства электронных и ионных потоков [18], что является типичной ситуацией для зеркальных ловушек [12].

Так как продолжительность процесса свободного падения атомов $\tau \sim (p)^{-1/2}$ определяется начальной (джинсовской) плотностью p_0 , то первые ассоциации протозвезд образуются вблизи центра масс протооблака, формируя ядро галактики. Удаленные протозвезды совершают более медленное падение на галактический центр и образуют неподвижную сферически-симметричную подсистему-старое население. Действительно, масса протооблака (без учета остаточного межзвездного газа)

$$M_0 \approx N \cdot m_\phi = N \cdot \left(\frac{k_B}{G \cdot m_H} \right)^{3/2} T_0^{3/2} \cdot \rho_\phi^{-1/2}$$

где, N - число протозвезд, m_ϕ - масса фрагмента, k_B - постоянная Больцмана, G - гравитационная постоянная, m_H - масса протона, T_0 - температура, ρ_ϕ - плотность фрагмента). Отношение времени свободного падения на гравитационный центр протооблака τ_0 к времени сжатия фрагмента τ_ϕ :

$$\frac{\tau_0}{\tau_\phi} \approx \left(\frac{\rho_\phi}{\rho_0} \right)^{1/2} = N \left(\frac{T_\phi}{T_0} \right)^{3/2}.$$

Для реально наблюдаемого соотношения масс и числа звезд $N \sim 10^8 - 10^{13}$, $\rho_f \sim 10^{-14} - 10^{-17}$ кг/м³ и характерное время свободного сжатия фрагментов $\tau_\phi - 10^5 - 10^8$ лет, соответственно $10^{13} < \tau_0 < 10^{21}$ лет ($T \approx \text{const}$), что указывает на фактическую неподвижность старого звездного населения.

Перемещение ближних звезд к галактическому центру с плазмой приводит к пересоединению магнитных силовых линий и формированию единой центральной магнитной ловушки, заполненной плазмой. Такая конфигурация общегалактического магнитного поля была выявлена уже в первых поляризационных измерениях радифона нашей Галактики [19]. Джеты, двигаясь по магнитным силовым линиям центральной ловушки концентрируются в ее пробках, образуя волнообразные и дискретные структуры и диффузные облака на выходе из них. Удаленные звезды проходят весь звездный цикл и угасают, образуя «скрытую массу».

Таким образом, по окончании этого этапа оказываются сформированными: сферическая подсистема неподвижных звезд, часть которых сгруппирована, в силу локальных неоднородностей ρ_0 в звездные скопления, сферическая газовая подсистема с нарастающей к галактическому центру плотностью атомов остаточного газа, галактический центр, объемно-заряженная положительно плазменная подсистема, удерживаемая магнитным полем пробочной конфигурации. Плазма центра, также как и джеты в пробках, образуют область аномального энерговыделения.

Формирование галактических дисков. Дифференциальность вращения галактик. Накопление газа

На последующем этапе эволюции галактик происходит длительное накопление газа, формирование диска и спиралей. После излучения джетов в плазменной подсистеме, представляющей из себя объемно - заряженный шар устанавливается радиальное распределение электрического поля E_r , поддерживаемое токами поперечной проводимости $j_\perp : E_r = j_\perp / \sigma_\perp$, где σ_\perp - поперечная проводимость, определяемая перезарядкой ионов на остаточном газе и их рекомбинацией с электронами. В скрещенных $E_r \perp B$ полях частицы плазмы движутся по циклоидам, создавая азимутальный дрейф всей плазменной подсистемы вращение вокруг галактического центра. В этой ситуации любой вновь родившийся заряд за ларморовский период приобретает поперечную скорость, среднее значение которой $V_\perp = E_r / B \gg V_H$, что приводит к существенному изменению поведения плазмы. Во-первых, в соответствии с сохранением первого адиабатического инварианта условия продольного удержания улучшаются в $\exp(B_{\text{пр}} / B_0 - 1)$ раз ($B_{\text{пр}}/B_0$ - пробочное отношение) [11]. Во-вторых, ион, родившийся на расстоянии z_1 от центральной плоскости, в бочкообразном поле ловушки колеблется в пределах $-Z_1 < Z < Z_1$, и перезарядается на атомах остаточного газа в точке $|Z_2| < |Z_1|$, образовавшийся при перезарядке ион колеблется уже в более узких пределах $-Z_2 < Z < Z_2$. Соответственно сдвигаются к центральной плоскости и точки рождения ионов при ионизации.

В этих процессах формируется плазменный диск с двумерной функцией распределения, как заряженных частиц, так и нейтральных атомов перезарядки. Толщина диска h определяется ионным рассеянием за время перезарядки. Радиальное распределение скорости дрейфа частиц устанавливается в соответствии с распределением плотности заряда $\rho_e(r)$ и магнитного поля $B(r)$. В частности, наблюдаемые кривые дифференциального вращения галактик хорошо объясняются, если принять, что $B(r) \approx \text{const}$, ($r < r_0$), а напряженность электрического поля соответствует полю объемно заряженного диска в его центральной плоскости $E_r = r_0 \rho_e / \epsilon_0$, ($r < r_0$).

Флуктуации магнитного поля и плотности избыточных ионов приводят к вариациям в кривых дифференциального вращения. При глубоких долговременных флуктуациях возможно образование контрвращающихся звезд [20].

В формирующейся дисковой плазменной подсистеме развиваются неустойчивости, приводящие к радиальному расширению диска вместе с замороженным магнитным полем (бомовская диффузия). В результате увеличивается пробочное отношение и уменьшается радиус кривизны магнитных силовых линий R , что с одной стороны улучшает условия продольного удержания, а с другой, ускоряет развитие наиболее опасной для зеркальных конфигураций желобковой неустойчивости, инкремент нарастания которой пропорционален $V_i / (Rb)^{1/2}$ (b - характерный радиальный размер плазмы, V_i - тепловая скорость ионов). Развитие этой неустойчивости приводит к образованию возмущений плотности и быстрому стеканию плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. Образуются спицы, из которых во вращающемся диске формируются спирали. В дифференциально вращающейся плазме осуществляется эффективный механизм подавления высших мод желобковой неустойчивости [15] за счет «проскальзывания» слоев плазмы и вытекания возмущенных зарядов через пробки (галактические полюса). Соответственно, в галактической вращающейся плазме возбуждаются моды с азимутальным волновым числом $k < 2\pi r / b$. При малых $r < (b / 2\pi)$ желобковая неустойчивость вообще не возбуждается, при $r > b / 2\pi$ возникает один рукав, дробящийся на несколько при увеличении r , что соответствует наблюдательным фактам. Сформировавшаяся спирально - дисковая плазменная подсистема галактики является эффективным накопителем газа на эффектах перезарядки. Действительно, в галактический диск со всех сторон поступают атомы остаточного газа с тепловой скоростью V_0 . В результате перезарядки из ионов плазмы получают быстрые нейтральные атомы. "Холодные" ионы захватываются в ловушку и включаются в дрейфовое движение плазмы. Зависимость $\sigma_{10} V_i$ (σ_{10} - эффективное поперечное сечение перезарядки) от энергии таково, что, в основном, перезаряжаются ионы, имеющие максимальную энергию, т.е. движущиеся по касательной к окружности дрейфа. Образовавшиеся атомы перемещаются по хорде до следующего акта перезарядки на длину свободного пробега λ_{10} , незначительно смещаясь по радиусу на $\Delta r \ll \lambda_{10}$. Соответственно скорость радиального движения

$$\frac{d(\Delta r)}{dt} = V_r = V_D \cdot \left\{ \left[(r \cdot n_i \sigma_{10})^2 + 1 \right]^{1/2} - r \cdot n_i \sigma_{10} \right\},$$

с которой атомы выходят из галактики через боковую поверхность ее диска, оказывается существенно меньше V_0 . Этот механизм с одной стороны обеспечивает накопление газа, с другой создает мощные потоки быстрых атомов из центра вдоль рукавов галактик. Непрерывный характер перезарядки ($\lambda_0 \ll b$) обеспечивает вращение газовой подсистемы синхронно с плазменным остовом на периферии галактик. Вблизи центра $\lambda_0 \ll b$ и, соответственно $V_r \approx V_D$, что приводит к выносу частиц из этой области и наблюдаемому дефициту вещества в приядерной области.

Из-за различия в величине сечений резонансной ($H^+ + H^0$, $H_2^+ + H_2^0$) и нерезонансной ($H^+ + H_2^0$, $H_2^+ + H^0$) перезарядки плотности H и H_2 и их радиальные распределения в диске галактики существенно различаются, что довольно четко проявляется в наблюдениях.

Через характерное для каждого радиуса время $\tau = r / 2V_r$ достигается стационарное значение плотности, величина которой нарастает с увеличением $r : n_{\max} = rn_0 V_0 / hV_r$. Поэтому, по мере увеличения радиуса плазменного остова, плотности вновь образующихся в нем облаков возрастают. По достижении джинсовского предела начинается второй этап звездообразования, что увеличивает скорость радиального расширения плазмы за счет процессов фотоионизации. Вновь образующаяся звездная подсистема вращается со скоростями равными скорости материнских облаков. Картина образования отдельных звезд аналогична описанной выше (с излучением джетов и формированием локальных пробочных конфигураций магнитного поля), хотя и затруднена из-за вращения системы. На этом этапе звездообразования рождение больших звездных скоплений маловероятно в силу относительного небольших размеров материнских облаков. Кроме того, сами звезды, также как и облака сосредотачиваются внутри области пересечения шарового слоя, соответствующего n_{\max} , с плазменным рукавом, сформированным желобковой неустойчивостью. Оценки времени накопления газа до стационарного значения плотности показывают, что в настоящее время, этот этап находится на начальной стадии, так как его длительность для периферии галактик существенно превышает время существования Вселенной. Вновь родившиеся звезды, двигаясь сначала синхронно с рукавами, постепенно покидают ее по кепплеровским орбитам, что объясняет наблюдаемое различие в толщинах, газового и звездного дисков.

Возникновение новых звезд приводит к перестройке магнитного поля и изменению положения оси и центральной плоскости общей магнитной ловушки в пространстве. Поэтому, в общем случае, современное расположение центральной плоскости плазменной и привязанной к ней газовой подсистем не совпадает с ориентацией звездного диска, который в свою очередь может состоять из нескольких дисков одновозрастных звезд, что наблюдается для большинства галактик и необъяснимо в других моделях [20]. Вблизи центральной плоскости рождение звезд может привести к пересоединению

магнитных силовых линий, находящихся под существенно различающимися потенциалами. В этом случае происходит линейное ускорение частиц вдоль магнитного поля за времена выравнивания потенциала, а сама звезда становится мишенью, а, следовательно, и источником мощных тормозных γ и рентгеновского излучений.

Рассмотренный механизм накопления материи действует и в локальных пробочных конфигурациях магнитных полей окружающих звезды, (недавние поляризационные измерения излучения солнечной короны [21] указывают на существование такой конфигурации у нашей системы). К такому же выводу приводит анализ глобальных динамических параметров Солнечной системы [22]. Так как плотность плазмы и остаточного газа вблизи звезд существенно выше межгалактической, и они обогащены тяжелыми элементами, имеющими большие сечения процессов зарядового обмена, из-за более быстрого накопления газа начинается конденсация материи образование кластеров и пыли. Уход электронов через пробки обеспечивает возникновение радиального электрического поля и азимутального дрейфа плазмы, скорость которого не связана с вращением самой звезды. Кластеры материи и пыль вследствие фотоэмиссии или прилипания электронов оказываются заряженными и, как и ионы, движутся по циклоидам, участвуя в процессах зарядового обмена при столкновениях. В силу сохранения адиабатического инварианта удерживаемый на перезарядном механизме газ и кластеры накапливаются в плоскости эклиптики, там же происходит и интенсивная конденсация, пылеобразование и формирование более крупных фрагментов. Сечение захвата (геометрическая площадь пылинок и конденсатов) существенно превышает сечение атомной перезарядки. Вследствие этого стационарное значение плотности достигается на меньших расстояниях от центра и за меньшие времена. Наличие многоэлектронных атомов, эмитированных звездами, уже вступившими в период ядерного синтеза приводит к перераспределению атомов в газовом диске. Вблизи центральной звезды сосредотачиваются тяжелые атомы, как имеющие меньшие потенциалы ионизации, большее сечение перезарядки с возбужденных уровней и больший ларморовский радиус. На периферии интенсивнее идет концентрация атомов легких элементов с низкими температурами конденсации и большими потенциалами ионизации, что приводит к образованию газо-жидкостных объектов.

Заключение

Описанная общая картина онтогенеза весьма вариабельна. Так, если длительность этапа достижения критической джинсовской плотности оказывается меньше времени развития желобковой неустойчивости в плазменной подсистеме, первоначально образуется звездное кольцо. По мере формирования спиралей, в дальнейшем образуется и спиральная звездная подсистема пересеченные спирали, галактики с баром. При аномально больших начальных размерах протооблака желобковая неустойчивость не успевает развиваться и образуются медленно вращающиеся эллиптические галактики.

В соответствии с описанной моделью авторами проведены расчеты для случаев, допускающих аналитическое решение, результаты которых будут приведены в последующих публикациях.

1. Zakharova M., Sorokin A.F., Sorokin A.A., Tsyukh A. Ontogenesis of protogalactic subsystems. Formation of a spiral-disk subsystem. The Evolution of Galaxies I. From Simple Approaches to Self-Consistent Models. July 16-20, 2002, Kiel, Germany
2. Firmani C, Tutukov A.V. Astronom. and Astrophys. v.264, 1992, p. 37.
3. Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Физика межзвездной среды, М. 1979г.
4. Biermann P., Kippenhahn R., et. al. Astron. Astrophys., 19, 113, 1972, Tubbs A.D., Astrophys. J., 243, 778, 1981.
5. Поляниченко В.Л., Фридман А.М. Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М. 1976.
6. Марочник Л.С. Спиральная структура галактик. Физика космоса. (Э) М. 1986. стр.653.
7. Берман В.Г., Марочник Л.С., др. Крупномасштабное движение межзвездного газа в галактических спиральных волнах. Препринт РЖИ АН СССР, 1982, №ПР-717.
8. Сорокин А.Ф., Цельник Ф.А. и др. Разряд с осциллирующими электронами в ловушке с магнитными пробками. Препринт 109-70 ИЯФ СОАН СССР, Новосибирск 1970.
9. Сорокин А.Ф., Цельник Ф.А. и др. Вращающаяся плазма в ловушке с магнитными пробками. Препринт 110-70 ИЯФ СОАН СССР, Новосибирск, 1970.
10. 10. Sorokin A.F., Tsel'nik F.A. at. all. Low - density rotating plasma in a mirror. Soviet physics - Technical Physics, v 16, №12, 1972, p. 2006-2010.
11. 11. Сорокин А.Ф., Цельник Ф.А. и др. О равновесном состоянии вращающейся плазмы в зеркальной ловушке. Физика плазмы т.4, в.3, 1978, стр. 488-49.
12. 12. Sorokin A.F., at. all. Measuring profiles of residual gas density and electric potential in the plasma. XIII International conference phenomena in ionized gases, part II, p.215.DDR. Berlin 1977.
13. Кудрявцев А.М., Сорокин А.Ф. Способ измерения локальных параметров плазмы с помощью пучка атома. Письма в ЖЭТФ, т.18, в.8, 1973, стр.486-490.
14. Lehnert V. Phys Scripta, v.9, 1974, p. 189.
15. Бехтенов А.А., Волосов В.И., ЖТФ, т.47, 1977, стр.1450.
16. Сорокин А.Ф., Сорокин А.А., Захарова М.Я. Магнито-плазменная модель образования протогалактических подсистем. Тезисы Всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г, стр. 100.
17. 17. Холтыгин А.Ф. Функции высвечивания горячей плазмы с флуктуациями плотности. Тезисы Всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001г, стр. 186.
18. Будкер Г.И. Физика плазмы и проблема управляемого термоядерного синтеза, т.1, МЛ958, стр.243.
19. Берже Г.Л., Сейлстад Д.А. Магнитное поле Галактики. Астрофизика, в.6, М., 1967, стр.79-93.
20. 20. О.К. Сильченко. Наблюдательные признаки секулярной эволюции. Тезисы Всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г, стр. 161.
21. 21. Сорокин А.Ф., Сорокин А.А., Захарова М.Я., Цюх А.М. Радионаблюдения корональных дыр. «Солнечная активность и внутреннее строение Солнца» 4-8 июня 2001г. Крым, Научный.
22. 22. Васильева Г.Я., Румянцев Л.И. Черных Ю.В. Солнечная активность, как проявление самоорганизации Солнечной системы в галактике. Тезисы Всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г, стр. 29.