

УДК 524.52

## НАКОПЛЕНИЕ ГАЗА В ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

<sup>1</sup>Сорокин А.А., <sup>2</sup>Сорокин А.Ф., <sup>3</sup>Захарова М.Я., <sup>2</sup>Соколова О.В., <sup>4</sup>Горобец Н.Н.

<sup>1</sup>Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,  
пр-т Вернадского, 4, г. Симферополь, 95007, Украина

<sup>2</sup>Евпаторийское отделение Крымского факультета Восточноукраинского национального университета  
им. В. Даля, ул. Кирова 54, г. Евпатория, 97404, Украина

www.vni.crimea.edu

<sup>3</sup>СТ НПП «ТИАМАС»,

<sup>4</sup>Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина,  
e-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

Рассмотрен механизм накопления газа в галактических объектах, погруженных в крупномасштабное магнитное поле. Вследствие диамагнетизма плазменной подсистемы объекта с необходимостью формируется пробочная геометрия магнитного поля с радиальным электрическим полем. В такой конфигурации полей происходит эффективное удержание и накопление плазмы, вращающейся в скрещенных полях. Атомы тесно связаны на эффектах перезарядки с ионами, вследствие чего происходит и их накопление. Приведены расчёты распределений молекулярного и атомарного водорода в нашей Галактике, пробочная геометрия магнитного поля которой давно известна. Показано, что данный механизм хорошо описывает основные особенности газовых подсистем

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** астрофизика, галактические объекты, накопление газа

Розглянуто механізм накопичення газу в галактичних об'єктах, занурених у великомасштабне магнітне поле. Внаслідок діаманетизму плазмової підсистеми об'єкта з необхідністю формується коркова геометрія магнітного поля з радіальним електричним полем. У такій конфігурації полів відбувається ефективне утримання й накопичення плазми, що обертається в схрещених полях. Атоми тісно зв'язані на ефектах перезарядження з іонами, внаслідок чого відбувається і їхнє накопичення. Наведено розрахунки розподілів молекулярного й атомарного водню в нашій Галактиці, коркова геометрія магнітного поля якої давно відома. Показано, що даний механізм добре описує основні особливості газових підсистем

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** астрофізика, галактичні об'єкти, накопичення газу

The mechanism of the accumulation of gas in the galactic objects submerged in the large-scale magnetic field is examined. As a consequence of the diamagnetism of the plasma subsystem of object, the stopper geometry of magnetic field with the radial electric field is formed. In this configuration, effective retention and the accumulation of the plasma, which revolves in the lattice-type fields, occurs. Atoms are tightly connected on the effects of recharge with the ions, which provides their accumulation. The calculated distributions of molecular and atomic hydrogen in our Galaxy, whose the stopper geometry of its magnetic field is well-known, are given. It is shown that this mechanism describes well the basic special features of gas subsystems

**KEY WORDS:** astrophysics, galactic objects, the accumulation of gas

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее исследованными и в то же время наиболее загадочными являются газовые подсистемы галактических объектов (ГО). Нерешенными остаются проблемы дефицита вещества в приядерных областях ГО, устойчивости и самого существования газо-пылевых несамогравитирующих комплексов и дисковых подсистем (за время существования  $\sim 10^{17}$  с при наблюдаемой дисперсии скоростей атомов  $\sim 10^4$  м/с они должны были рассеяться в пространстве), многофазности межзвездной среды, мощных потоков атомов вдоль рукавов спиральных галактик и т.д. Согласно критерия Джинса (см. ниже(1)), начальные размеры протооблаков  $\tau_j$ , из которых в результате гравитационного сжатия образовались довольно распространенные галактики с  $M > 10^{11} M_\odot$ , должны были превышать современное расстояние до горизонта видимости. Это означает, что должны существовать специфические механизмы накопления и удержания газа в ГО.

Ранее была предложена S – Z модель образования ГО, в рамках которой находят своё объяснение их основные морфологические признаки без привлечения экзотических представлений и гипотетических объектов [1, 2, 3]. Целью настоящей статьи является анализ физических процессов в галактических объектах, которые в итоге приводят к накоплению газа в них.

## АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

В результате лабораторных исследований вращающейся плазмы [4, 5, 6] было показано, что сжатие протооблака, погруженного в крупномасштабное магнитное поле с необходимостью вызывает протекание следующей цепочки явлений:

I. По достижении джинсовской концентрации:

$$n_j \geq 3k_B T_0 / 8 \gamma \pi r_j^2 m_H^2, \quad (1)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T_0$  – начальная температура газа в протооблаке,  $\gamma$  – гравитационная постоянная,  $m_H$  – масса атома водорода, атомы ускоряются в режиме свободного падения на гравитационный центр протооблака до энергий, достаточных для ионизации в атомных столкновениях.

II. Образующийся диамагнитный плазменный слой перестраивает магнитное поле  $B$  и формируется тороидальная структура в виде фигуры вращения зеркальной (пробочной) магнитной ловушки вокруг направления начального магнитного поля [7]. Сохранение первого адиабатического инварианта обеспечивает удержание и накопление большинства частиц, благодаря их отражению от магнитных пробок.

III. В актах рассеяния частицы плазмы попадают в конус ухода в пространстве скоростей. Так как ионная частота столкновений меньше электронной через пробки уходят быстрые электроны, формируя джет, а сама плазма заряжается положительно, что типично для зеркальных ловушек [5].

IV. В сформированном радиальном электрическом поле  $E_r$  плазма сжимается в диск, т. к. точки отражения приближаются к экваториальной плоскости, а дополнительный центробежный потенциал увеличивает время удержания плазмы [8]. Впервые такой эффект был экспериментально обнаружен в лабораторных исследованиях вращающейся плазмы [4]. Этот же факт проявился в теоретических расчётах движения заряженных частиц в магнитосфере Земли [9, 10].

V. На всех этапах плазменная подсистема оказывается в скрещенных полях и за ларморовский период приходит во вращение с дрейфовой скоростью  $V_D = \Omega_D r = \left[ \left[ F_{\perp} \cdot B \right] \right] / B^2$ . До формирования джета и радиального электрического поля магнитогравитационные дрейфы электронов и ионов разнонаправлены, что усиливает диамагнитный эффект. По достижении  $F_E = eE + m_e \Omega_D^2 r \sin(Br) > F_G$  электроны меняют направление вращения (для нарастающего к периферии амбиполярного потенциала) и вся плазма вращается как целое (обычно наличие вращения постулируется). В случае спадающего электрического поля, как показано на рис. 1, на первом этапе образуются противовращающиеся звёзды. Радиальное распределение скоростей (в этой модели представляется как кривая дифференциального вращения), целиком определяется распределениями  $B(r), E(r)$  и, таким образом, снимается вопрос об устойчивости спиральной картины галактик.

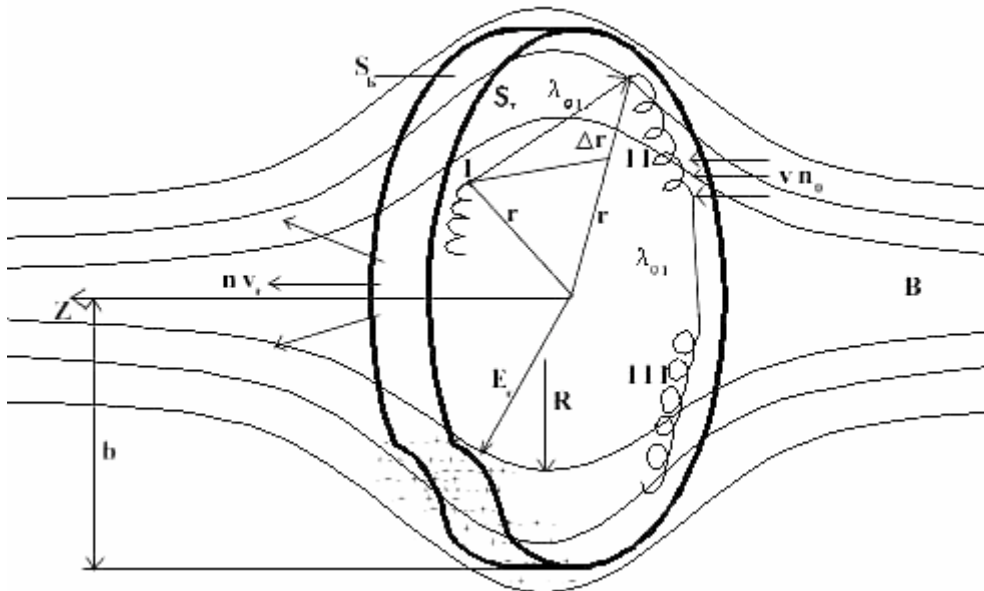


Рис. 1. Схема накопления газа.

VI. Известно, что плазма в пробочной геометрии магнитного поля абсолютно неустойчива по отношению к желобковым колебаниям. В лабораторных условиях это приводит к уходу плазмы от стенки, и образованию радиальных «спиц». В открытом пространстве плазма смещается в области, где время развития неустойчивости

$\tau_f = \sqrt{Rb}/V_i$  велико ( $R$  – радиус кривизны магнитных силовых линий,  $b$  – размер плазменного образования,  $V_i$  – тепловая скорость ионов). Из-за отличия вращения от твердотельного «спицы» закручиваются в спирали. При  $\Omega_{D0} > dV_D/dr$  формируются отстающие спирали, при  $dV_D/dr > \Omega_{D0}$  – лидирующие, существование которых необъяснимо в рамках теории звездной волны плотности.

Покажем, что плазма в такой конфигурации полей способствует накоплению и удержанию газа во внутренней области ГО.

Параметр адиабатичности, отделяющий упорядоченное движение от запутанного, стохастического движения частиц [10], в рассматриваемых ГО  $\chi = \sqrt{b/\rho} \gg 1$ , и адиабатические инварианты сохраняются с экспоненциальной точностью по  $\chi$  ( $\rho$  – максимальный ларморовский радиус ионов). В силу сохранения первого адиабатического инварианта частицы колеблются между точками отражения, в которых, по определению, составляющая скорости вдоль поля  $V_{||} = 0$ . Для типичных скоростей вращения  $V_D \sim 10^5$  м/с и концентраций атомов  $n_a \sim 3 \cdot 10^5$  м<sup>-3</sup>, сечение перезарядки  $\sigma_{10} \sim 3 \cdot 10^{-19}$  м<sup>2</sup> и длина свободного пробега частиц по этому процессу  $\lambda_{10} \sim 10^{13}$  м, что много меньше характерных размеров рассматриваемых здесь ГО ( $\geq 1$  пк). Следовательно, атомный компонент (также как и образующиеся из него объекты) привязан к ионному и полностью повторяет параметры, в частности  $V_{||a} = 0$  в точках отражения (для «внутренних» атомов).

Для грубой оценки параметров накопления (без учёта образования пылевой, звездной материи и распределения частиц по скоростям) представим плазменную подсистему в виде цилиндра радиусом  $b$  и высотой  $L$  (на торцах которого и лежат точки отражения, рис.1), погруженного в остаточный газ с концентрацией  $n_0$  и температурой  $T_0 = 0,5m_H < V_0 >^2$ . Обычно  $L/b \ll 1$  (для спиральных галактик  $\sim 0,01$ ) и из условия сохранения магнитного потока  $B_{\min}/B_{\max}$  также много меньше единицы, что позволяет использовать модель прямоугольной магнитной ямы ( $B_{\min}$  – поле в плоскости симметрии диска,  $B_{\max}$  – поле в пробках).

Изменение числа атомов  $N$  в кольцевом слое толщиной  $\delta$  равно разности потоков атомов остаточного газа приходящих со всех сторон извне -  $Q_1$ , и уходящих со скоростью  $V_r$  через боковые поверхности «внутренних» атомов -  $Q_2$ :  $dN/dt = Q_1 - Q_2$ , где

$$N = 2\pi r L n \delta, \quad Q_1 = 4\pi r n_0 V_0 \delta, \quad Q_2 = \delta d(nV_r S_L)/dr, \quad S_L = 2\pi r L.$$

Соответственно, изменение концентрации «внутренних» атомов:

$dn/dt = n_0 V_0/L - 0,5n(V_r/r + dV_r/dr)$ , а распределение концентрации «внутренних» атомов по радиусу:

$$n(r) = \{2n_0 V_0/L - [2n_0 V_0/L - n_0(V_r/r + dV_r/dr)] \exp(-(V_r/r + dV_r/dr)t)\} / (V_r/r + dV_r/dr)^{-1}. \quad (2).$$

Определим среднюю радиальную скорость для «внутренних» атомов. При установившихся полях  $E$  и  $V$  ионы движутся по трохоидам и их переход на другой радиус возможен либо в результате рассеяния ионов, либо рекомбинации или перезарядки в виде атомов. Сечения рекомбинации, рассеяния и ионизации в интересующей нас области скоростей ( $V \sim 10^5$  м/с) существенно меньше перезарядных  $\sigma_{10}$ , кроме того,  $\sigma_{10}V$  (и, соответственно, частота столкновений) быстро растёт с увеличением скорости. Следовательно, ионы перезаряжаются на вершинах трохоид (рис.1) и родившиеся атомы движутся по касательным, имея энергию  $W_D = 2m_H V_D^2 + k_B T_i$ . Так как время между актами перезарядки  $\tau_{10}$  много меньше времени пролёта всей системы  $\tau$ , в процессе последовательных превращений частицы могут набрать дополнительную энергию  $\sim 2m(E_r/B)^2 \tau/\tau_{10}$ , создавая азимутальные потоки атомов. Такое «перезарядное» ускорение наблюдалось в лабораторных условиях в виде уширения энергетического спектра атомов в сторону больших энергий [6]. Распределение по энергиям при циклоидальном движении имеет два максимума: при  $W_c \sim k_B T_i$  и  $W_h \sim W_D$ . Первая группа атомов имеет в

$$v = \sqrt{k_B T_i / W_D} \quad (3)$$

раз меньшую длину свободного пробега, чем вторая, движется навстречу ей и остается вблизи точки перезарядки. Вторая группа может выйти за пределы плазменного образования, образуя горячую фазу.

Этот факт, по нашему мнению, более адекватно объясняет существование холодной и горячей фаз, чем гипотеза тепловой неустойчивости, которой противоречит пространственное разделение фаз и которая не всегда подтверждается в детальных расчетах с учётом теплового баланса [11].

Вторичные ионы, образующиеся в этих процессах, включаются во вращение и для них всегда выполняется условие удержания:

$$V_{\parallel} \ll V_{\perp} \sqrt{(B_{\max} - B_{\min})/B_{\min}}, \text{ т.е. происходит накопление плазмы.}$$

Образовавшиеся атомы перемещаются по касательным до следующего акта перезарядки или ионизации (рис. 1) на длину свободного пробега  $\lambda = (n_i \sigma_{10})^{-1}$ , незначительно смещаясь по радиусу на  $\Delta r = (\sqrt{\lambda^2 + r^2} - r)$ . Соответственно, радиальная скорость смещения (т.е. ухода из слоя):  $V_r = \Delta r / \tau_{10} = \Delta r n_i \sigma_{10} V_D$ , может быть существенно меньше скорости поступления «внешних» атомов  $V_0$ , что и обеспечивает накопление атомов внутри магнитоплазменной структуры.

Из (2) видно, что абсолютное значение концентрации определяется величиной потока «внешних» атомов остаточного газа и временем накопления, в то время как радиальное их распределение - произведением  $n_i \sigma_{10}$  и профилем  $V_D = E/B$ , т.е. пространственными распределениями магнитного и электрического полей.

Рассмотрим процесс накопления газа на примере нашей Галактики. Своеобразная пробочная конфигурация магнитного поля была выявлено уже в первых наблюдениях вращения плоскости поляризации излучений оптического и радиодиапазонов [12].

Если за критерий правильности принять совпадение наблюдательных данных о значениях концентраций газа у различных авторов, то вопрос остается открытым [13]. Однако, можно считать твердо установленным, что наблюдается дефицит газа в приядерной области, распределения  $H_2$  и  $H$  имеют характерные максимумы в районе 5 кпк и 10 кпк, соответственно (кривые 5 и 6 на рис. 2), наблюдаются потоки атомов вдоль рукавов, устойчивые газопылевые комплексы и высокоширотные облака газа.

Согласно измерениям кривой дифференциального вращения Галактики на расстояниях  $r > 0,6$  кпк  $dV_r/dr \sim 0$  (что свидетельствует о постоянстве или синхронном изменении  $E$  и  $B$  полей) и расчет по формуле (2) существенно упрощается. При расчёте использовались усредненные данные из обзора [13] и последовательно учитывались изменения параметров.

Кривые 1 ( $t = 3 \cdot 10^{16}$  с), 2 ( $t = 4,5 \cdot 10^{17}$  с – современный период) на рис.2 показывают ход накопления газа при постоянных:  $n_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$ ;  $V_0 = 10^3 \text{ м/с}$ ;  $n_i = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$ ;  $L = 400 \text{ пк}$ ;  $V_D = 2,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ ;  $\sigma_{10} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2$  (нерезонансное сечение). Видно, что концентрация атомов возрастает в  $\sim 10^4$  раз, и атомы действительно выносятся из приядерных областей на периферию, причем этот механизм ничем не ограничен (в том числе и уменьшением  $n_i$  или с учетом расширения диска Галактики к периферии). По-видимому, за указанные времена в сферической подсистеме остаточного газа устанавливается бальмановское распределение по высоте от гравитационного центра Галактики:  $n(r) = n_{0m} \exp[-(r-b)/h]$ . Косвенным свидетельством этому служит факт возрастания металличности к центру Галактики и то, что максимум концентрации для молекулярного водорода

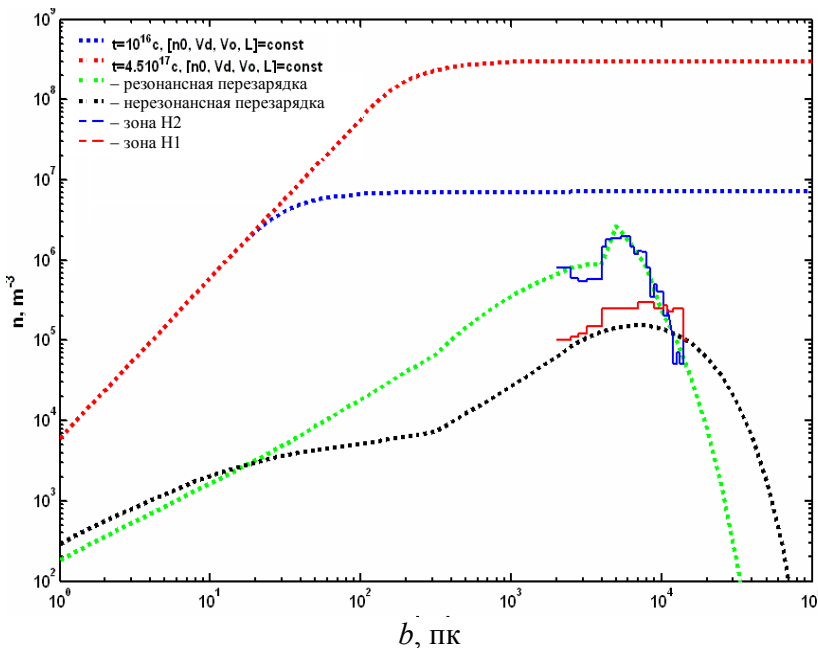


Рис. 2. Радиальные распределения молекулярного и атомарного водорода для различных исходных данных

расположен в два раза ближе к центру, чем для атомарного (приведенная высота «однородной атмосферы»  $h$  обратно пропорциональна молекулярному весу). За ещё меньшие времена происходит ассоциация атомарного водорода в молекулярный. Расчеты показали, что наилучшее согласие с наблюдательными данными получается при  $h = 10^{21}$  м (для известного начального значения  $n_{0m} = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$  при  $b = 10^{20}$  м). Учет дифференциального вращения Галактики и изменения толщины диска

$$L(r) = 400 \text{ пк} \sqrt{1 + (r/4 \text{ кпк})^2}$$

[14] несущественно сказывается на результатах. В то же время, если учесть повышение концентрации ионов  $H_2^+$  (и молекул  $H_2$ ) в рукаве Ориона то получается лучшее согласие с наблюдательными данными о положении пиков. На рис. 2 кривая 3 представляет результаты

расчета распределения  $H_2$  (согласно [13] в этом случае бралось резонансное сечение перезарядки  $H_2^+$  в  $H_2$ ), кривая 5- наблюдательные данные по зонам H2. Соответственно, ионы водорода нерезонансно перезаряжаются на  $H_2$  - кривая 4, что удовлетворяет наблюдательным данным по зонам H1. С учетом замечания (3) это даёт объяснение наблюдаемым «коридорам» горячего газа между облаками в рукавах. Очевидно, что в более ранние периоды образование «твёрдой материи» происходило ближе к центру, газ (и ионная составляющая) были исчерпаны и в районе 10 пк – 10 кпк концентрации газа и плазмы оказались, по крайней мере в  $10^2$  раз меньше (таково современное соотношение масс газовой и звездной подсистем) предполагаемых в расчетах кривых 1, 2.

Флуктуации полей и неоднородность сжатия, очевидно, приводят к образованию локальных магнитных ловушек, в которых происходит накопление плазмы и образование, например, высокоширотных облаков (в них действительно наблюдаются усиленные магнитные поля).

При наличии возбуждённых атомов (что характерно для эпохи рекомбинации) сечения перезарядки на которых на несколько порядков больше обычных, максимум распределений газа пропорционально сдвигается к центру (наблюдались рекомбинационные линии H 300<sub>α</sub> и C 640<sub>α</sub> - размер атома последнего ~ 0,1 мм). Тот же эффект характерен и для пылевой плазмы. С учетом того, что параметр удержания плазмы в рассматриваемой геометрии полей  $n_i \tau_i \sim 10^{19} \text{ с м}^{-3}$  ( $\tau_i$  – время удержания плазмы) [15] данный механизм накопления газа может быть ответственен за возникновение начальных флуктуаций плотности обычно туманно именуемых «адиабатическими».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов лабораторных исследований физических процессов во вращающейся плазме, находящейся в магнитном поле, рассмотрены явления накопления газа в галактических объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А.А., Сорокин А.Ф., Захарова М.Я. Магнитоплазменная модель образования протогалактических подсистем.//Всероссийская астрономическая конференция. Сб. тезисов - Санкт – Петербург, 2001, С. 190.
2. Zakharova M., Sorokin A.A. Ontogenesis of protogalactic subsystem, Formation of a spiral-disk subsystem.// The Evolution of Galaxies – Kiel, Germany, 2002, С. 111.
3. Сорокин А.А., Сорокин А.Ф., Захарова М.Я. Универсальный сценарий образования галактических подсистем// Космічна наука і технологія, 2003, т. 9, № 2, С. 296-303.
4. Цельник Ф.А., Сорокин А.Ф., Мыскин О.К. и др. О равновесном состоянии вращающейся плазмы в зеркальной ловушке.// Физика плазмы, 1978, т. 4, № 3, С. 488-491.
5. Цельник Ф.А., Кудрявцев А.М., Мыскин О.К. и др. МГД устойчивое удержание вращающейся плазмы // Письма в ЖТФ, 1985 т.41, в.12,С.494-497.
6. Сорокин А.Ф., Кудрявцев А.М. Метод измерения локальных параметров плазмы с помощью пучка быстрых атомов // Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 18, в. 8, С. 486-490.
7. Сорокин А.А., Власенко В.П., О формировании магнито- плазменных подсистем.// VI Украинская конференция по космическим исследованиям. Сб. тезисов – Евпатория, 2006, С.24.
8. Волосов В.И., Пальчиков В.Е., Цельник Ф.А. О некоторых особенностях поведения вращающейся плазмы в ловушке с магнитными пробками. // ДАН СССР, 1968, Т. 181, № 3, С. 575-576.
9. Воронов Е.В., Кринберг И.А. О возможности ускорения заряженных частиц в хвосте магнитосферы. // Космические исследования, 1990, т. 28, № 2, С. 271-276.
10. Зелёный Л.М., Зогин Д.В., Бюхнер Й. Квазиадиабатическая динамика заряженных частиц в магнитосферном хвосте.// Космические исследования, 1990, т. 28, в.3, С. 430-444.
11. Biermann P., Kippenhahn R. et. al. Phase Transition in the Interstellar Medium // Astron. Astroph, 1972, Vol 19, P.113-122.
12. Арп Х.С. Эволюция галактик // Астрофизика. 1967, в. 6, С. 94 –111.
13. Шапировская Н.Я., Бочаров А.А. Распределение электронной концентрации рассеивающих неоднородностей по Галактике. ИКИ. М. Пр.- 1984, 936 с.
14. Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D., Shukurov A.M. Magnetic field distribution in spiral galaxies // Astron. Astroph, 1985, v. 148, no. 2, P. 335-343.
15. Пеккер М.С., Волосов В.И. О точности численных расчетов потерь плазмы из открытых магнитных ловушек. //Численные методы механики сплошной среды: Сб. науч. тр./АН СССР. Сиб. отд-ние. ВЦ; ИТПМ. 1979, Т. 10, вып. 1. С. 45-56.