

УДК 523.85

В. М. ЛИПУНОВ

МАГНИТОСФЕРА ГАЛАКТИКИ?

Рассматривается взаимодействие аккрецирующего межгалактического газа с магнитным полем Галактики. Показано, что при определенных параметрах магнитного поля Галактики и межгалактического газа вокруг Галактики может образоваться магнитосфера. Поскольку вне магнитосферы магнитное поле отсутствует, радиогало Галактики отождествляется с магнитосферой. На основании наблюдательных данных, свидетельствующих в пользу уплотненного радиогало ($Z < 10$ кпс), предлагается модель магнитосферы со следующими параметрами: размеры $\sim (5 \div 8)$ кпс, плотность аккрецирующего газа и напряженность магнитного поля на границе магнитосферы $\sim (1 \div 3) \cdot 10^{-29}$ г/см³ и $\sim (3 \div 5) \cdot 10^{-7}$ э соответственно. При этом средняя плотность межгалактического газа в местной группе оказывается равной $\sim (0.3 \div 1) \cdot 10^{-30}$ г/см³. Невозмущенное магнитное поле, генерируемое Галактикой, задается законом: $B = 2 \times 10^{-6} (Z/H)^{-x}$ э, где $2H$ — толщина газового диска, $1/2 \leq x \leq 3/4$. Полученная модель справедлива, если плотность и температура галактического газа внутри магнитосферы удовлетворяет следующим условиям: $\rho \leq (2-8) \cdot 10^{-28}$ г/см³ и $T \approx 10^6$ °К.

MAGNETOSPHERE OF THE GALAXY?, by V. M. Lipunov.— The interaction between accreting intergalactic gas and the magnetic field of the Galaxy is considered. It is shown that the magnetosphere can form around the Galaxy under certain suggestions concerning the parameters of the galactic magnetic field and the density of intergalactic gas. As there is no magnetic field outside the magnetosphere, the radio halo of the Galaxy is identified with the magnetosphere. On the basis of observational data that point out to the flattened radio halo ($Z < 10$ kpc), the model of the magnetosphere is proposed, having the dimensions of 5–8 kpc. For this model, the density of the accreting gas and the magnetic field strength on the boundary of the magnetosphere are $\sim (1 \div 3) \cdot 10^{-29}$ g/cm³ and $\sim (3 \div 5) \cdot 10^{-7}$ E respectively. The average density of the intergalactic gas in the Local Group turns out to be $\sim (0.3 \div 1) \cdot 10^{-30}$ g/cm³. The undisturbed magnetic field generated by the Galaxy is given by the law $B = 2 \cdot 10^{-6} (Z/H)^{-x}$ E, where $2H$ is the thickness of the gas disk and $1/2 \leq x \leq 3/4$. This model is valid when the density and temperature of the galactic gas satisfy the conditions $\rho \leq (2-8) \cdot 10^{-28}$ g/cm³ and $T \leq 10^6$ °K within the magnetosphere.

В настоящее время не вызывает сомнения факт существования в диске Галактики магнитного поля с напряженностью в несколько микрогаусс (см., например, [1]). Гораздо менее изучено магнитное поле вне диска, на которое указывает регистрация нетеплового радиоизлучения, исходящего из этих областей.

Идея о существовании магнитного поля вне диска была разработана Пикельнером и Шкловским [2]. Предполагалось, что у Галактики имеется обширная (с характерным размером в несколько десятков кпс) корона из горячего газа с магнитным полем, которая наблюдается как радиогало. Дальнейшие исследования показали, что радиогало Галактики имеет гораздо меньшие размеры и, вероятнее всего, его протяженность по Z -координате менее 10 кпс. Однако ввиду затруднений в интерпретации данных радионаблюдений вопрос о размерах радиогало Галактики до сих пор остается открытым [3].

В настоящей работе рассмотрено взаимодействие горячего межгалактического газа с магнитным полем Галактики. В частности, показано, что размеры радиогало определяются параметрами межгалактического газа и магнитного поля Галактики, проиллюстрирована возможность определения этих параметров, исходя из наблюдательных данных.

Мы исходим из того, что размеры радиогало Галактики менее 10 кпс. Но поскольку и в настоящее время существует мнение о более протяженном радиогало (см., например, [4]), отметим заранее, что это может означать следующее: либо плотность межгалактического газа существенно меньше 10^{-31} г/см³, либо мощность активных процессов в Галактике настолько велика, что галактический газ постоянно истекает из Галактики.

1. Исходные предположения

Будем предполагать, что вне диска Галактики ($|Z| \geq 100$ пс) существует крупномасштабное магнитное поле, генерируемое токами, текущими в диске, и, возможно, вне его. Для дальнейшего качественного рассмотрения напряженность магнитного поля, генерируемого Галактикой, представим в виде:

$$B = B_d(R) \left(\frac{|Z|}{H} \right)^{-x}. \quad (1)$$

Здесь $B_d(R)$ — напряженность магнитного поля в диске ($|Z| = H$), R и Z — обычные цилиндрические координаты, H — полутолщина диска, которую примем равной 100 пс. Напряженность магнитного поля в диске предполагаем постоянной и равной $2 \cdot 10^{-6}$ э (см., например, [5]), хотя есть указания на то, что $B_d(R)$ растет к центру Галактики. Будем считать также, что давление галактического газа меньше или порядка магнитного.

2. Модель магнитосферы

По современным представлениям межгалактический газ имеет среднюю плотность $\rho_\infty \sim 10^{-30}$ г/см³. Плотность достигает 10^{-28} г/см³ в центре богатых скоплений при температуре $T \sim 10^5 \div 10^6$ К. Длина свободного пробега l в таких условиях порядка 200 пс $T_s^2 \rho_{s0}^{-1}$. Здесь T_s — температура в единицах 10^5 К, ρ_{s0} — плотность в единицах 10^{-30} г/см³. Таким образом, при $\rho_{s0} \geq 0.1$ и $T \leq 10^6$ К справедливо газодинамическое приближение и, поскольку характерные времена диффузии магнитного поля в таком газе больше 10^{10} лет, межгалактический газ является диамагнитной плазмой. Так как в настоящее время нет фактов, свидетельствующих в пользу существования межгалактического магнитного поля с напряженностью $> 10^{-8}$ э, мы им пренебрегаем. Режим аккреции межгалактического газа существенно зависит от соотношения трех скоростей: скорости звука a_s , скорости Галактики относительно межгалактического газа v_0 и параболической скорости v_n . Полагая, что скорость v_0 порядка дисперсии скоростей галактик в местной группе ($50 \div 100$ км/сек), имеем вдали от Галактики (на расстоянии $80 \div 100$ кпс) $a_s \sim v_n$ и $v_0 \leq v_n$. Отсюда ясно, что режим аккреции на Галактику близок к сферически-симметричному с анизотропией в несколько десятков процентов.

Скорость звука в межгалактическом газе сравнивается с параболической на расстояниях порядка 50–70 кпс. Поэтому вблизи Галактики (на расстоянии $\leq 10 \div 15$ кпс) аккрецирующая плазма падает с параболической скоростью [6]. Вследствие диамагнетизма межгалактической плазмы набегающий поток будет сжимать магнитное поле Галактики до тех пор, пока давление аккрецирующего потока $P_A = \rho v_n^2$ не сравняется с давлением магнитного поля $P_M = B_M^2 / 8\pi$ (B_M — возмущенное магнитное поле Галактики):

$$\rho_M v_n^2 = k^2 \frac{B^2}{8\pi}. \quad (2)$$

В результате возникает замкнутая поверхность, вне которой нет магнитного поля, — магнитосфера. В формуле (2) ρ_M , v_n — плотность и скорость набегающего потока на границе магнитосферы, коэффициент k введен для учета возрастания на границе магнитосферы напряженности магнитного

поля по сравнению с невозмущенной величиной ($B_M = kB$). В области магнитосферы, где нет особенностей (нейтральных точек и точек ветвления), $k \approx 2$ для плоской магнитосферы и $k \approx 3$ для сферической границы.

На рис. 1 показана зависимость магнитного давления $P_M = 10^{-12} (Z/H)^{-2k}$ для разных k и давления аккрецирующего потока $P_A = \rho_m v_n^2$ от Z для различных плотностей газа на границе магнитосферы. Предполагается, что $k = 2.5$, а значения v_n соответствуют значениям на оси Галактики в модели Эйнаста [7]. Очевидно, что для возникновения магнитосферы необходимо, чтобы $k \geq 1/2$, поскольку в противном случае давление магнитного поля падает медленнее давления набегающего потока с увеличением Z . С другой стороны, чтобы возникла магнитосфера с размерами $Z_m \approx 3 \div 10$ кпс, необходимо, чтобы $k \leq 1$, так как уже при $k = 1$ плотность набегающего потока должна быть меньше 10^{-30} г/см^3 , а это означает, что на расстоянии $50 \div 100$ кпс от Галактики плотность межгалактического газа оказывается слишком малой: $\rho_\infty \approx \rho_m (R_m/R_\infty)^{3/2} \approx 3 \cdot 10^{-32} \text{ г/см}^3$. Отсюда получаем для $Z_m \approx 3 \div 8$ кпс:

$$\frac{1}{2} \leq k \leq \frac{3}{4}, \quad B_M \approx (3 \div 5) \cdot 10^{-7} \text{ э}, \quad \rho_m \approx (1 \div 3) \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Соответственно плотность межгалактического газа вдали от Галактики ($\sim 50 \div 100$ кпс) ρ_∞ порядка $(0.3 \div 1) \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$. Размеры магнитосферы в направлении вдоль диска, по видимому, не сильно отличаются от размеров газового слоя и составляют $R_m \approx 15 \div 20$ кпс.

3. Магнитосфера и радиогало

Поскольку вне магнитосферы Галактики магнитное поле отсутствует, то очевидно, что размеры радиогало нетеплового излучения определяются размерами магнитосферы.

Поэтому для уточнения размеров магнитосферы Галактики и определения параметров межгалактического газа и магнитного поля Галактики особую важность имеют наблюдения нетеплового радиоизлучения Галактики.

В рамках модели магнитосферы Галактики получает естественное объяснение асимметрия параметров радиогало по разные стороны от галактического экватора. (Известно, что наблюдения в северных широтах дают более уплоченное радиогало, чем в южных (см. [1])). Действительно, поскольку режим аккреции может отличаться от сферически-симметричного на несколько десятков процентов, мы можем ожидать, что существует асимметрия магнитосферы того же порядка. В направлении движения магнитосфера будет сильнее «поджата», чем в направлении на антиапекс, что приведет к соответствующей анизотропии радиоизлучения. В связи с этим представляется возможным определить величину и направление скорости движения Галактики относительно межгалактического газа.

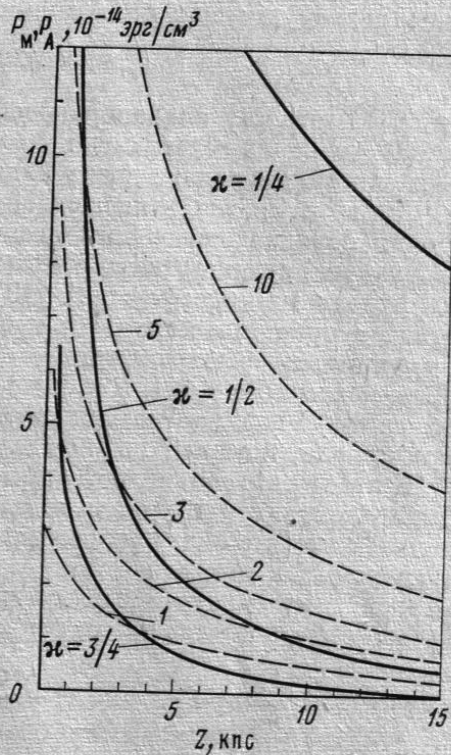


Рис. 1. График зависимости магнитного давления P_M (сплошные линии) и давления аккрецирующего потока P_A (пунктирные линии) от Z для различных значений k и плотности межгалактического газа на границе магнитосферы ρ_m . Справа от кривых указана плотность ρ_m в единицах 10^{-29} г/см^3 . Значение Z_m в точке пересечения кривых P_M и P_A соответствует стационарной границе магнитосферы.

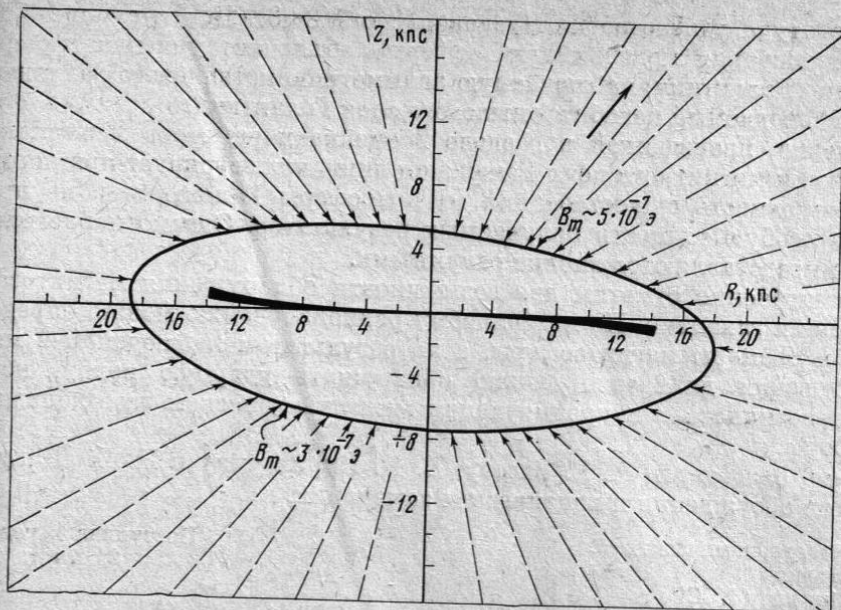


Рис. 2. Возможный вид магнитосферы Галактики. Стрелкой указано направление апекса. Вдоль оси R показан галактический газовый диск, прецессирующий под действием момента сил, приложенного к магнитосфере Галактики

находим характерное время роста возмущений с масштабом λ :

$$\tau_{\text{рТ}} \approx 10^7 \text{ лет } \lambda_1^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь λ_1 измеряется в пс. Очевидно, размеры λ сгустков, на которые разбивается аккрецирующая плазма, проходя в магнитосферу, должны быть такими, чтобы $\tau_{\text{рТ}} < \tau_{\text{ff}}$. τ_{ff} — характерное время свободного падения с магнитосферы. Отсюда полагая $\tau_{\text{ff}} \sim 10^8$ лет, находим максимальный размер сгустков (облаков) аккрецирующей плазмы: $\lambda < \lambda_{\text{max}} \approx 100$ пс. С другой стороны, на масштабах, меньших длины свободного пробега, неравномерно газодинамическое рассмотрение. Поскольку длина свободного пробега при температуре $T_s = 0.5 \div 1$ и плотность $\rho_m \approx 2 \cdot 10^{-29}$ г/см³ равна $l \approx (2 \div 10)$ пс, вследствие РТ-неустойчивости будут нарастать возмущения с длиной волны $\lambda \approx 100$ пс. Сгустки должны иметь «сигарообразную» форму. Длина таких «сигар» определяется, по-видимому, максимальными характерными масштабами регулярности магнитного поля вдоль границы магнитосферы (порядка нескольких кпс). При этом масса сгустков может достигать $50 M_{\odot}$.

Если температура газа на магнитосфере $T_s \geq 3$, нельзя проводить газодинамическое рассмотрение на масштабах $\lambda \approx 100$ пс. В этом случае газ на магнитосфере может накапливаться в течение $\sim (3 \div 5) \cdot 10^8$ лет, и за это время успеют нарасти возмущения с масштабом $\lambda \approx (1 \div 2)$ кпс. Масса сгустков в этом случае достигнет $10^3 M_{\odot}$. Такие облака ионизированного водорода, приобретая скорость вблизи газового диска $200 \div 300$ км/сек, могли бы инициировать образование высокоширотных облаков нейтрального водорода.

6. Заключение

На рис. 2 показан возможный вид магнитосферы Галактики, учитывающий изложенные выше особенности ее формирования. Отметим, что на границе магнитосферы мы не учитывали вклад давления галактического газа. В рамках предлагаемой модели это правомерно, если его плотность

и температура удовлетворяют условиям: $\rho \leq (2 \div 8) \cdot 10^{-28} \text{ г/см}^3$ и $T \leq 10^6 \text{ К}$.

Предложенная модель магнитосферы объясняет уплотненную форму радиогало Галактики, наблюдаемую асимметрию нетеплового радиоизлучения и наблюдаемый изгиб газопылевого слоя Галактики.

Конечно, проведенная в разделе 2 оценка параметров межгалактического газа и магнитного поля Галактики лишь иллюстрирует принципиальную возможность существования магнитосферы Галактики и не претендует на особую точность получаемых результатов. Однако найденные величины представляются вполне разумными.

В заключение отметим две возможности обнаружения магнитосфер у ближайших галактик. По нетепловому радиоизлучению можно определить форму и размеры магнитосферы, а по результатам наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне можно обнаружить ударную волну, которая должна возникать в аккрецирующем межгалактическом газе вблизи магнитосферы.

Автор благодарен А. В. Засову, В. Н. Курильчику и Н. И. Шакуре за полезные обсуждения и критические замечания.

Главная астрономическая
обсерватория
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 марта 1978 г.

Литература

1. Е. Н. Паркер, В сб. Космическая газодинамика, ред. Х. Дж. Хабинг, «Мир», М., 1972.
2. С. Б. Пикельнер, И. С. Шкловский, Астрон. ж., 34, 145, 1957.
3. В. Л. Гинзбург, Теоретическая физика и астрофизика, «Наука», М., 1975.
4. Н. М. Липовка, Канд. дисс., ГАИШ, М., 1977.
5. А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР, № 39, 1977.
6. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Теория тяготения и эволюция звезд, «Наука», М., 1971.
7. Я. Эйнасто, Л. Эйнасто, Tartu Teated, 36, 46, 1972.
8. V. Burke, F. Bernard, Astron. J., 62, 90, 1957.
9. Т. А. Лозинская, Н. С. Кардашев, Астрон. ж., 40, 209, 1963.
10. В. М. Липунов, Астрон. циркуляр № 1034, 1, 1979.
11. В. Н. Жигулев, Е. А. Ромишевский, Докл. АН СССР, 127, 1001, 1959.