

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

НОЯБРЬ, 1980

ВЫПУСК 4

УДК 523.038

О СТРУКТУРЕ ГАЛАКТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Р. Р. АНДРЕАСЯН

Поступила 7 декабря 1979

Принята к печати 7 апреля 1980

На основании статистического анализа данных мер вращений для 176 внегалактических радиоисточников и 43 пульсаров изучена структура магнитного поля Галактики. Оказывается, что крупномасштабное магнитное поле Галактики параллельно спиральной ветви и имеет противоположные направления в южном и северном полушариях. При этом Солнце находится приблизительно на 70 пс южнее поверхности перемены знака магнитного поля. Такая картина соответствует дипольной модели магнитного поля Галактики. Для южного полушария найдена зависимость напряженности магнитного поля от расстояния до плоскости Галактики.

В результате анализа данных о конфигурации магнитных полей в галактике М 82 Грейбером [1] была впервые высказана гипотеза о возможном существовании дипольного магнитного поля галактического масштаба. Возникновение такого поля трудно понять на основе классической конденсационной теории образования галактик. С другой стороны, вопрос о происхождении галактических магнитных полей в рамках космогонической концепции Амбарцумяна был рассмотрен в работе [2]. Согласно этой работе наблюдаемое в настоящее время галактическое магнитное поле является остатком дипольного магнитного поля протогалактики-суперадрона, и естественно предположить существование дипольных магнитных полей во всех галактиках, что наиболее ясно проявляется при изучении магнитных полей активных «хвостатых» радиогалактик, движущихся в скоплениях галактик (см., например, [3]). При таких магнитных полях деформация силовых линий из-за дифференциального вращения галактик и уплотнения материи в спиральных рукавах приводит к тому, что магнитные поля почти параллельны спиральным рукавам и имеют противоположные направления выше и ниже плоскости галактик.

Настоящая работа посвящена изучению конфигурации магнитного поля нашей Галактики. Существуют несколько методов изучения магнитного поля Галактики. Один из них основан на эффекте фарадеевского вращения. При прохождении через магнитоионную среду плоскость поляризации линейно поляризованной волны поворачивается. Поворот в данном интервале длин волн определяется мерой вращения RM , которая дается выражением

$$RM = \frac{d\psi}{d(l^2)} = 8.1 \cdot 10^5 \int N_e B_L dl, \quad (1)$$

где λ — длина волны, ψ — угол поворота плоскости поляризации, N_e — электронная концентрация в среде, L — длина пути, пройденная излучением, в парсеках, B_L — продольная составляющая магнитного поля в гауссах. Знак меры вращения зависит от направления магнитного поля. Знак плюс указывает, что поле направлено к наблюдателю.

Ряд авторов, используя эффект фарадеевского вращения, оценили напряженность и форму магнитного поля Галактики. В первых работах [4—6], где использовалось распределение мер вращений внегалактических радиосточников по галактическим координатам, было показано, что магнитное поле имеет противоположные направления в северном и южном полушариях Галактики. Были предложены несколько моделей и оценена напряженность магнитного поля, величина которой оказалась порядка $2-3 \cdot 10^{-6}$ гс, а направление — почти параллельно спиральной ветви Галактики ($l=90^\circ$) и ($l=270^\circ$).

Однако в последнее время дополнительные данные о мерах вращений внегалактических радиосточников [7, 8] и пульсаров [9, 10] как будто свидетельствуют о том, что нет перемены знака магнитного поля при пересечении плоскости Галактики. Некоторые же несогласия данных в северном полушарии с моделью крупномасштабного магнитного поля, направленного к $l=90^\circ$, связываются с Северным Полярным Выступом.

В настоящей работе на основе данных о мерах фарадеевского вращения внегалактических радиосточников и пульсаров изучается зависимость эффективного направления l_0, b_0 магнитного поля Галактики в окрестностях Солнца в зависимости от галактической широты тех объектов, по которым оно определяется.

Здесь мы не пользуемся какой-либо предвзятой моделью крупномасштабного магнитного поля Галактики. Однако при обработке наблюдательных данных считаем, что в первую очередь следует учитывать зависимость поля от координаты z , а также, что при истолковании наблюдений высокоширотных объектов можно пренебречь изменениями поля B в

зависимости от координат x и y . Поскольку проекция напряженности магнитного поля на луч зрения дается формулой

$$B_L = B(z) \cos(l - l_0) \cos b, \quad (2)$$

где l и b — галактические координаты источника, и учитывая, что $dL = \frac{dz}{\sin b}$, из формулы (1) можно получить, что

$$RM = K \frac{\cos(l - l_0)}{\operatorname{tg} b}, \quad (3)$$

где обозначено

$$K = 8.1 \cdot 10^5 \int_0^{\infty} N_e(z) B(z) dz. \quad (4)$$

Если считать заданным распределение электронной плотности $N_e(z)$, то магнитное поле Галактики можно описать величинами K и l_0 . В частности, если функции $B(z)$ и $N_e(z)$ представить в виде

$$B(z) = B_0 e^{-cz}, \quad N_e(z) = N_0 e^{-dz}, \quad (5)$$

то для величины K получим выражение

$$K = 8.1 \cdot 10^5 \frac{B_0 N_0}{c + d}. \quad (6)$$

Для нахождения значений величин K и l_0 используется формула (3). Таковую формулу можно написать для каждого источника. При этом получается система n уравнений с двумя неизвестными (n — число источников), которую можно решить методом наименьших квадратов.

В работе используются данные о мерах вращения 301 внегалактического радиосточника. Из них 251 взяты из работы [7], а остальные 50 из [11]. С целью улучшения статистики некоторые из этих данных были исключены из рассмотрения. Известно (см. [7]), что мера вращения в Галактике, вообще говоря, не должна превышать 100 рад/м^2 , если, конечно, источник не находится на очень низкой галактической широте. Поскольку наблюдаемые меры вращений складываются из вращений, обусловленных прохождением излучения в самом источнике, в межгалактическом пространстве и, наконец, в Галактике, то очень большие меры вращений ($|RM| > 100 \text{ рад/м}^2$) могут быть внегалактического происхождения. Поэтому мы исключаем из статистики данные тех источников, у которых $|RM| > 100 \text{ рад/м}^2$ при $75^\circ > |b| > 15^\circ$.

Кроме того, очень малые меры вращений определяются с большими относительными ошибками, и мы исключаем из статистики также данные для тех источников, у которых $|RM| \leq 8$ рад/м². Такие меры вращений должны встречаться на очень больших галактических широтах ($|b| > 75^\circ$). После указанных исключений остаются данные для 176 радиоисточников. Эти данные были разделены на несколько групп по галактической широте. Затем вышеуказанным методом была проанализирована каждая из этих групп, а также комбинации, составленные из них. В табл. 1 приведены значения величин K и l_0 для некоторых групп. Оказывается, что во всех подобластях южнее 15° северного полушария значения K и l_0 в интервале вероятных ошибок совпадают, а в подобластях $b \geq 15^\circ$ направление поля l_0 изменяется почти на 180° .

Таким образом, о структуре крупномасштабного магнитного поля Галактики в окрестности Солнца можно сказать следующее. Прежде всего оно параллельно плоскости Галактики. В южном полушарии Галактики $K = -24.4 \pm 3.4$ рад/м², $l_0 = 98.8 \pm 21^\circ$, а в северном полушарии $K = -10.2 \pm 5.5$ рад/м² и $l_0 = 272.2 \pm 47^\circ$. То обстоятельство, что значения K и l_0 одинаковы в подобластях от 75° южной широты до 15° северной широты, по-видимому, можно объяснить тем, что Солнце находится южнее поверхности перемены знака магнитного поля, а слой, содержащий магнитное поле, ограничен в некоторых направлениях так, что луч зрения в направлениях $b < 15^\circ$ в основном проходит через слой, магнитное поле которого имеет то же направление, что и в южном полушарии.

Таблица 1

	n	K рад/м ²	l_0
$-75^\circ < b < -45^\circ$	21	-26.3 ± 9.1	80.2 ± 33
$-75^\circ < b < -30^\circ$	55	-26.0 ± 4.2	96.0 ± 25
$-75^\circ < b < -15^\circ$	73	-24.4 ± 3.4	98.8 ± 21
$-75^\circ < b < 0^\circ$	97	-21.1 ± 2.6	88.4 ± 26
$-75^\circ < b < 15^\circ$	116	-19.1 ± 2.3	87.6 ± 25
$-75^\circ < b < 45^\circ$	153	-12.1 ± 2.7	85.4 ± 31
$-75^\circ < b < 75^\circ$	176	-12.6 ± 2.8	83.9 ± 30
$-45^\circ < b < -15^\circ$	52	-25.7 ± 3.6	106.2 ± 17
$-45^\circ < b < 0^\circ$	76	-19.3 ± 2.7	86.8 ± 25
$-45^\circ < b < 15^\circ$	96	-17.4 ± 2.3	85.4 ± 24
$15^\circ < b < 45^\circ$	37	-15.5 ± 10	241.7 ± 30
$15^\circ < b < 60^\circ$	52	-11.2 ± 5.5	272.2 ± 47

Приступим теперь к обработке данных для пульсаров, взятых из [12]. Меры вращений известны всего для 43 пульсаров. В [12] приведены так-

же меры дисперсий $\left(DM = \int N_e dL \right)$ и расстояния от плоскости Галактики z , для вычисления которых было предположено, что электронная концентрация дается формулой (5) с параметрами $N_0 = 0.03 \text{ см}^{-3}$ и $d = 0.001 \text{ пс}^{-1}$. Поскольку пульсары являются галактическими объектами, то их меры вращения в основном обусловлены галактическими магнитными полями, и следовательно при изучении магнитного поля Галактики статистика данных мер вращения пульсаров должна давать лучшие результаты.

Если в формуле (1) вывести среднее значение напряженности магнитного поля из-под знака интеграла, то получим

$$\bar{B}_L = 1.23 \cdot 10^{-6} \left(\frac{RM}{DM} \right) \text{ Гс.} \quad (7)$$

\bar{B}_L дается также формулой (2), где вместо $B(z)$ надо взять усредненное по z значение B :

$$\bar{B}_L = B \cos(l - l_0) \cos b. \quad (8)$$

Построим диаграмму, по оси абсцисс которой отложены значения галактической долготы l , а по оси ординат — расстояния от плоскости Галактики z для соответствующего пульсара (рис. 1). Пульсары отмечаются стрелками, длины которых пропорциональны значению $B_l = B \cos(l - l_0)$,

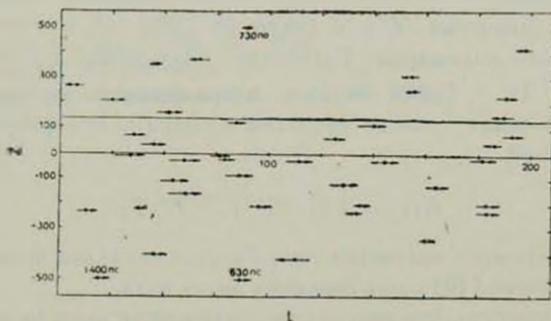


Рис. 1.

вычисленному по формулам (7) и (8). Для положительных значений B_l стрелки направлены налево. Так как наилучшее совпадение значений B_l с функцией $B \cos(l - l_0)$ получается, когда $l_0 \approx 110^\circ$, диаграмма построена для области $20^\circ \leq l \leq 200^\circ$. Из рисунка видно, что на расстоянии примерно 70 пс от плоскости Галактики существует поверхность перемены знака

магнитного поля. Действительно, на расстояниях $z > 140$ пс в северном полушарии усредненные по z значения B_i в основном (8 из 11) имеют положительный знак, тогда как значения B_i для объектов, находящихся на расстояниях $z < +140$ пс, в основном (28 из 32) отрицательны.

Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными выше при использовании данных о мерах вращения внегалактических радиосточников. При этом нужно допустить, что Солнце находится на расстоянии $z_0 = 70$ пс южнее поверхности перемены знака магнитного поля. Из статистического анализа данных пульсаров для южного полушария Галактики получается $B = 2.4 \cdot 10^{-6}$ Гс и $l_0 = 100^\circ$, а результаты северного полушария качественно совпадают с результатами, вытекающими из анализа рис. 1.

Отметим, что одновременное использование данных для пульсаров и внегалактических источников дает возможность найти параметры распределения магнитного поля B_0 и c (см. формулу (5)). Подставляя (5) в формулу (1) и интегрируя по z от нуля до z , получим

$$RM = K \frac{\cos(l - l_0)}{\operatorname{tg} b} [1 - e^{-z(c+d)}], \quad (9)$$

где K дается формулой (6). Если воспользоваться значениями K и l_0 , полученными из обработки данных внегалактических источников, то из последней формулы можно найти значения $(c + d)_i$ для отдельных пульсаров. За истинное же значение параметра $(c + d)$ можно принять среднее значение от всех $(c + d)_i$, после чего из (6) находится величина $N_0 B_0$, и далее c и B_0 (значения N_0 и d взяты из [12]).

Для южного полушария Галактики получается $c = 0.0016$ пс $^{-1}$ и $B_0 = 2.71 \cdot 10^{-6}$ Гс. Таким образом, напряженность магнитного поля в окрестностях Солнца, судя по объектам южного полушария, можно представить формулой

$$B(z) = 2.71 \cdot 10^{-6} e^{-0.0016z} \text{ Гс.} \quad (10)$$

В северном полушарии магнитное поле Галактики нельзя представить формулой, аналогичной (10) из-за перемены знака поля.

Следует отметить, что результаты, полученные нами на основе анализа данных о мерах вращения, хорошо согласуются с той картиной, которая наблюдалась бы, если бы магнитное поле нашей Галактики в начальной стадии его развития было бы дипольным.

В заключение приношу благодарность академику В. А. Амбарцумяну и М. А. Мнацаканяну за обсуждение результатов и ценные замечания.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

ON THE STRUCTURE OF THE GALACTIC MAGNETIC FIELD

R. R. ANDREASSIAN

Rotation measures of 176 extragalactic radio sources and 43 pulsars are used for the study of the structure of galactic magnetic field. It is shown that the large scale magnetic field of the Galaxy is directed approximately parallel to the local spiral arm and have opposite directions in the Northern and Southern hemispheres. The Sun lies approximately 70 pc to the south from the surface of the change of the magnetic field sign. Such a picture corresponds to the dipole model of the galactic magnetic field. Dependence of the magnetic field tension on the distance from the galactic plane is obtained for the Southern hemisphere.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Greyber Howard, A. J.*, 68, 8, 536, 1963.
2. *Р. М. Мурадян*, *Астрофизика*, 14, 439, 1978.
3. *W. J. Jaffe, G. C. Perola*, *Astron. Astrophys.*, 26, 423, 1973.
4. *G. L. Berge, G. A. Setelstad*, *Ap. J.*, 148, 367, 1967.
5. *R. D. Davies*, *Radio Astron. Galact. Syst.*, London—New York, Acad. Press. 1967, p. 391.
6. *R. D. Davies*, *Nature*, 218, No. 5140, 435, 1968.
7. *P. I. Vallec, P. P. Kronberg*, *Astron. Astrophys.*, 43, 233, 1975.
8. *А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А. В. Коваленко*, *Астрон. ж.*, 55, 692, 1978.
9. *R. N. Manchester*, *Ap. J.*, 172, 43, 1972.
10. *R. N. Manchester*, *Ap. J.*, 188, 637, 1974.
11. *P. Hayes*, *M. N.*, 173, 553, 1975.
12. *I. H. Taylor, R. N. Manchester*, *A. J.*, 80, 749, 1975.