

УДК: 524.7—337

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ

Р. Р. АНДРЕАСЯН, А. Н. МАКАРОВ

Поступила 12 февраля 1988

Принята к печати 23 июня 1988

На основе количественного анализа мер фарадеевского вращения плоскости поляризации радиовлучения 185 пульсаров получены следующие значения направлений (l_0) и напряженностей (B_0) магнитных полей спиральных рукавов Галактики в окрестности Солнца до расстояний $\sim 5 \div 7$ кпк: рукав Персея — $l_0 \approx 90^\circ$, $B_0 \approx -2.5 \times 10^{-6}$ Гс; рукав Ориона — $l_0 \approx 80^\circ$, $B_0 = (-1.4 \div -2.0) \cdot 10^{-6}$ Гс; рукав Стрельца — Киля — $l_0 \approx 225^\circ$, $B_0 = (-2.0 \div -2.5) \cdot 10^{-6}$ Гс. Полагая, что магнитное поле в рассматриваемой части Галактики состоит из двух компонентов (плоского и области „гало“) можно считать, что приведенные данные относятся к плоскому компоненту. Что касается второго компонента („гало“), где $|z| > 0.4$ кпк, то для южного полушария получены $l_0 \approx 70^\circ$, $B_0 \approx -1.5 \cdot 10^{-6}$ Гс, а для северного — $l_0 \approx 245^\circ$, $B_0 \approx -1.1 \cdot 10^{-6}$ Гс.

1. *Введение.* Изучению магнитного поля нашей и других спиральных галактик в последнее время посвящено много работ как теоретического (например, [1, 2]), так и наблюдательного (например, [3—5]) характера. В основном рассматриваются модели кругового и бисимметричного спирального магнитного поля. Так, в работе [5] была предложена модель бисимметричного магнитного поля Галактики, в которой, в частности, направления магнитных полей спирального рукава Стрельца—Киля и местного рукава Ориона противоположны друг другу. Для изучения структуры магнитного поля в спиральных рукавах Галактики использовались меры фарадеевских вращений RM внегалактических радиосточников из списка [6]. С другой стороны, в [7] (также по RM внегалактических радиосточников) сделан вывод о совпадении направлений магнитных полей спиральных рукавов Персея и Ориона. Но отметим, что изучение магнитных полей спиральных рукавов, кроме рукава Ориона, с использованием данных RM внегалактических радиосточников затруднено тем, что эти рукава наблюдаются на очень низких галактических широтах. Вследствие этого излучение от внегалактических объектов проходит через несколько областей Галактики, в которых магнитные поля могут иметь различные

направления и напряженности. Кроме того, на низких галактических широтах из-за большого поглощения в оптическом диапазоне затруднено отождествление радиоисточников и, следовательно, число используемых в статистике объектов сильно уменьшается. Отметим также, что на галактических широтах $|b| < 10^\circ$ наблюдаются значения RM от нескольких сотен до нескольких единиц, а это вызывает сомнение в предположении, что величины RM обусловлены в основном вкладом магнитного поля Галактики. Поэтому выводы, сделанные в работах [5, 7], нуждаются в проверке с использованием другого рода данных.

Качественная проверка этих выводов с использованием данных о мерах вращений для пульсаров была сделана в [8, 9] авторами настоящей работы. Применение параметров пульсаров для изучения магнитных полей спиральных рукавов Галактики выгоднее использования внегалактических радиоисточников, поскольку пульсары — галактические объекты, расстояния для которых определены по их мерам дисперсий DM довольно уверенно. Следовательно, можно более уверенно определить местонахождение пульсаров в Галактике.

В настоящей работе с целью определения количественных характеристик магнитного поля в разных областях Галактики используются данные о мерах вращений (RM) 185 пульсаров, взятых из [10, 11]. Пульсары были разделены на несколько групп в зависимости от их положения в Галактике. Была использована модель Галактики и карта расположения спиральных рукавов из работы [12]. Предполагается, что спиральные рукава имеют полутолщину $z_0 \leq 400$ пк, поэтому для изучения магнитных полей спиральных рукавов используются только пульсары, находящиеся в слое $|z| \leq 400$ пк (z — расстояние от плоскости Галактики). На рис. 1 приведена карта распределения пульсаров ($|z| \leq 400$ пк) в Галактике из работы [9]. На этой карте нанесены линии расположения спиральных рукавов Галактики по модели Жорженов [12], а также условные пунктирные линии (нанесенные нами), ограничивающие области отдельных спиральных рукавов.

Поскольку в упомянутой выше работе [9] была предложена модель двухкомпонентного магнитного поля Галактики, в которой помимо плоского компонента (магнитные поля спиральных рукавов) существует и магнитное поле на достаточном удалении от плоскости Галактики (компонент «гало»), то данные RM пульсаров, находящихся вне слоя ± 400 пк, используются для изучения магнитного поля «гало». Напомним, что поле «гало» предполагается общим для всех спиральных рукавов, а его направление в северном и южном полушариях Галактики противоположны друг другу [9]. Причем, в южном полушарии это направление близко направлению поля рукава Ориона ($l_0 \approx 90^\circ$, $b_0 \approx 0^\circ$, l , b — галактические координаты).

2. *Магнитное поле рукава Ориона.* Для изучения магнитного поля местного Орионова рукава используются параметры пульсаров, которые находятся в области I (рис. 1). Отметим, что на рис. 1 не нанесены пульсары, у которых расстояния от Солнца $r < 1$ кпк. В настоящем разделе используются и эти данные. Всего в области Орионова рукава находится 71 пульсар.

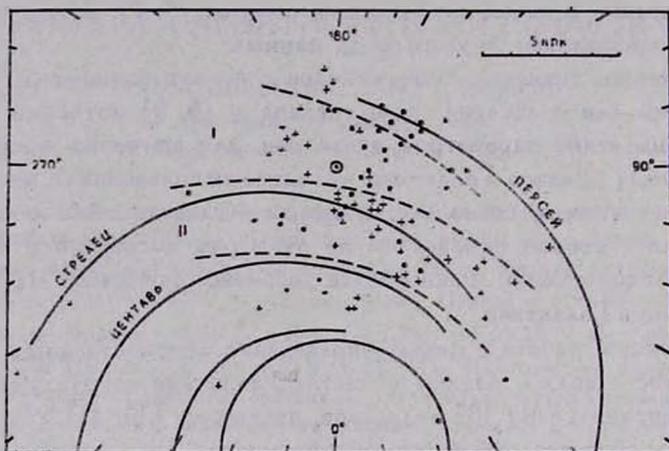


Рис. 1. Распределение пульсаров в плоскости Галактики. Знаками (+) и (•) обозначены пульсары соответственно с положительными и отрицательными значениями мер вращения.

На рис. 2 приведено распределение этих пульсаров по галактической долготе l и по расстоянию от плоскости Галактики z . При построении рисунка оказалось, что знаки мер вращений пульсаров изменяются около галактической долготы $l = 10^\circ$, поэтому для наглядности на рисунке координата l меняется от 10° до 370° . Пульсары на рисунке обозначены точками и крестиками в зависимости от знака RM (для положительных RM — крестиками). Отметим, что на рис. 2 нанесены также пульсары, находящиеся вне слоя $|z| \leq 400$ пк, который выделен пунктирными линиями.

Из рис. 2 в слое $|z| \leq 400$ пк видно, что в области $10^\circ < l < 190^\circ$ значения RM отрицательны, а в области $190^\circ < l < 370^\circ$ — в основном, положительны. Это означает, что магнитное поле в рукаве Ориона направлено приблизительно к $l_0 = 100^\circ$.

Надо отметить, что поскольку Солнце находится вблизи внутреннего края рукава Ориона [12], то часть пульсаров, имеющая галактические координаты $l > 300^\circ$ и $l < 60^\circ$ и находящаяся от Солнца на расстоянии $r < 1$ кпк, расположена в межкулавной области Ориона и Стрельца. Можно предположить, что магнитное поле в этой области является продолже-

нием магнитного поля «гало», упомянутого во введении, а также в работе [9]. Тогда в рамках модели двухкомпонентного магнитного поля легко объяснить то, что в северном полушарии в области с указанными координатами знаки RM пульсаров отличаются от знаков RM пульсаров северного полушария в целом. Данные RM пульсаров, находящихся в между-

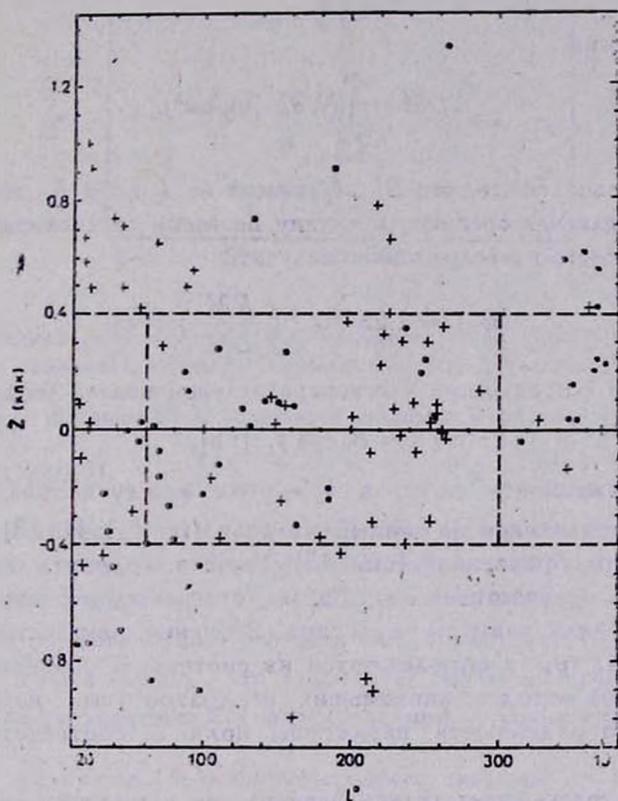


Рис. 2. Приведено распределение пульсаров области Орионова рукава ($60^\circ < l < 300^\circ$), междурукавного пространства Орион—Стрелец ($l > 300^\circ$, $l < 60^\circ$) и области «гало» ($|z| > 400$ пк).

кавной области, соответствуют направлению поля к $l_0 \approx 280^\circ$, что почти противоположно направлению поля Орионова рукава. В южном полушарии такой области с отличающимися знаками RM не наблюдается, что можно объяснить совпадением направлений магнитных полей «гало» южного полушария и рукава Ориона (см. [9], а также раздел 5 настоящей работы).

Для более точного определения параметров магнитного поля (направление l_0 , b_0 и напряженность B_0) Орионова рукава были проведены численные расчеты. Как известно (см., например, [11]), мера фарадеевско-

го вращения RM зависит от напряженности B_L (B_L — составляющая напряженности магнитного поля в направлении данного объекта), электронной концентрации N_e и пройденного излучением пути L в среде, то есть

$$RM = 8.1 \cdot 10^6 \int_L N_e B_L dL \text{ [рад/м}^2\text{]}, \quad (1)$$

а мера дисперсии

$$DM = \int_L N_e dL \text{ [пк/см}^3\text{]}. \quad (2)$$

Если предположить, что B_L не зависит от L (или B_L вывести из-под знака интеграла как среднюю величину по всему расстоянию), то из (1) и (2) для каждого пульсара можно получить

$$(B_L)_i = 1.23 \cdot 10^{-6} \left(\frac{RM}{DM} \right)_i \text{ [Гс]}. \quad (3)$$

С другой стороны, при плоскопараллельной модели магнитного поля

$$(B_L)_i = B_0 \cos \psi_i \text{ [Гс]}, \quad (4)$$

где B_0 напряженность поля, а ψ_i — угол между направлением поля (l_0, b_0) и направлением на данный пульсар (l_i, b_i). Из (3) и (4), после некоторых преобразований (см. [13]), можно получить линейное уравнение с 3-мя неизвестными x, y, z (в которые входят параметры поля (l_0, b_0) и B_0) для каждого пульсара. Значения неизвестных x, y, z и дисперсий $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ определяются из системы n уравнений (n — число пульсаров) методом наименьших квадратов (см., например, [14]), после чего определяются параметры поля и соответствующие дисперсии.

Этим методом определялись направление магнитного поля (l_0, b_0) и напряженность B_0 для рукава Ориона. В процессе вычислений, с целью улучшения статистики, были сделаны различные ограничения на параметры пульсаров, вследствие чего для величины B_0 были получены значения в интервале от -1.4 до $-2.0 \cdot 10^{-6}$ Гаусс (знак «минус» указывает на направление поля от наблюдателя), а для величин l_0 и b_0 , соответственно, $65^\circ \div 95^\circ$ и $-15^\circ \div 30^\circ$. Найденные значения находятся в хорошем согласии с ранее полученными [15—18], с использованием меньшего числа пульсаров.

Из (3) и (4) для отдельных пульсаров можно получить

$$(B_0)_i = 1.23 \cdot 10^{-6} \left(\frac{RM}{DM} \right)_i \frac{1}{\cos \psi_i} \text{ [Гс]}. \quad (5)$$

Величину $(B_0)_i$ назовем «приведенным» к направлению (l_0, b_0) значением напряженности магнитного поля. На рис. 3 приведена зависимость значений $(B_0)_i$ от расстояний пульсаров до плоскости Галактики.

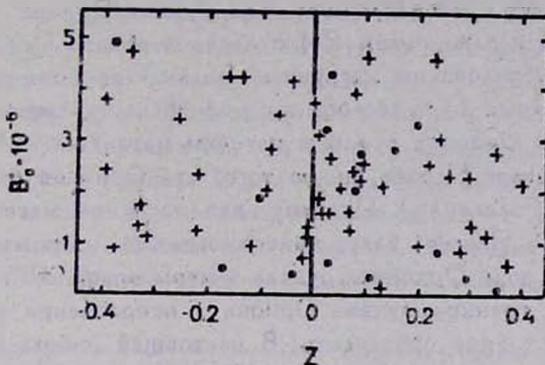


Рис. 3. Распределение значений $(B_0)_i$ пульсаров рукава Орiona в зависимости от расстояний до плоскости Галактики. Исключены пульсары, у которых при малых значениях $\left(\frac{RM}{DM}\right)_i$ величины $(B_0)_i$ получаются большими из-за того, что $\cos \psi_i$ близки к нулю (см. формулу 5).

Некоторые чрезмерно большие значения $(B_0)_i$ можно исключить из рассмотрения в силу того, что принятое направление магнитного поля почти перпендикулярно направлению данного пульсара, тогда как его $RM \neq 0$. Из рисунка видно, что заметной корреляции $(B_0)_i - z$ не наблюдается. Также видно, что существует большой разброс значений $(B_0)_i$ от среднего значения для фиксированных z . Оказалось, что разброс $\frac{\sqrt{\sum (\Delta B_0)_i^2}}{B_0}$ величины $(B_0)_i$ вокруг среднего значения ~ 1 . Такой большой разброс частично может быть обусловлен собственными магнитными полями пульсаров (хотя в работе [15] показано, что в меры вращений пульсаров вкладом собственного магнитного поля можно пренебречь), но, несомненно, основная часть этого разброса вызвана флуктуациями направления и величины магнитного поля, а также электронной концентрации в межзвездной среде. Отметим, что эти мелкомасштабные флуктуации не имеют ничего общего с изменением поля в разных спиральных рукавах.

3. *Магнитное поле спирального рукава Персея.* На рис. 1 в условно разделенной области спирального рукава Персея находятся всего 13 пульсаров (пульсар 2002+31 исключен из рассмотрения из-за его большого расстояния — 8 кдк от Солнца). Из рисунка видно, что распределение

знаков мер вращений RM у этих пульсаров (знак «+» означает, что RM положительна) по галактической долготе похоже на такое же распределение для Орионова рукава. Однако, основываясь только на этом факте, нельзя утверждать, что направление магнитного поля в спиральном рукаве Персея совпадает с направлением поля рукава Ориона. Это связано с тем, что величины и даже знаки RM пульсаров рукава Персея могут быть большей частью обусловлены магнитным полем Орионова рукава, так как излучение упомянутых 13 пульсаров в основной части своего пути к Солнцу проходит через Орионов рукав, в котором магнитное поле может быть сильнее, чем в рукаве Персея (из-за того, что Орионов рукав находится ближе к центру Галактики). Поэтому, для изучения магнитного поля в спиральном рукаве Персея, надо, по возможности, аккуратнее учитывать вклад магнитного поля Орионова рукава в меры вращений пульсаров. Для этого надо знать границу рукава Ориона в направлении рукава Персея, которую, однако, трудно определить. В настоящей работе использовалась условно нанесенная на рис. 1 граница. Последующие численные расчеты показали, что выбор границы не очень сильно влияет на результаты. Были определены расстояния до этой границы в направлении 13 пульсаров, находящихся в спиральном рукаве Персея. Эти расстояния, из-за малости галактической широты пульсаров ($|b| \leq 6^\circ$), практически совпадают с длиной пути, пройденного излучением пульсаров в области рукава Ориона. Для определения вклада магнитного поля Орионова рукава в величины RM пульсаров была использована формула (1), в которой интегрирование проводилось до границы рукава Персея. Как и в разделе 2 предполагалось, что в области рукава Ориона B_L не зависит от длины пути, по которому ведется интегрирование, это также означает, что напряженность не зависит от z (см. раздел 2), тогда как электронная концентрация определяется формулой

$$N_e(z) = N_0 e^{-z/h_e} \quad (6)$$

где $N_0 = 0.03 \text{ см}^{-3}$, а эквивалентная полутолщина слоя электронов $h_e = 1000 \text{ пк}$ (см. [11]). Из (1) с учетом (4) и (6), а также зная о постоянстве B_L , можно получить

$$(RM)_i = 8.1 \cdot 10^6 B_0 \cos \psi_i (DM)_i \quad (7)$$

где

$$(DM)_i = - \frac{N_0 h_e}{\sin |b_i|} \left[e^{-\frac{d_i \sin |b_i|}{h_e}} - 1 \right] \quad (8)$$

и

$$\cos \psi_i = \cos b_0 \cos b_i \cos (l_0 - l_i) + \sin b_0 \sin b_i, \quad (9)$$

d_i — расстояние до границы рукава Персея в направлении пульсара данного.

Если известны параметры магнитного поля (l_0, b_0) и B_0 , то из (7), (8) и (9) можно определить вклад магнитного поля рукава Ориона в RM пульсаров (в некоторых случаях при определении расстояний в работе [11] были учтены поправки в DM пульсаров, связанные с тем, что на луч зрения попадают Н II-области, в (8) мы также учли эти поправки).

Как отмечалось в разделе 2, для рукава Ориона были получены параметры магнитного поля при разных ограничениях на исходные данные. Эти параметры использовались при оценке вклада магнитного поля Орионова рукава в RM 13 пульсаров, находящихся в области спирального ру-

Таблица 1

PSR	l	b	DM	RM	r	$r_{\text{Орион}}$	$RM_{\text{ост.}}$	$RM_{\text{ост.}}$	$RM_{\text{ост.}}$	$DM_{\text{ост.}}$
1	2	3	4 пк/см ³	5 рад/м ²	6 кпк	7 кпк	8 рад/м ²	9 рад/м ²	10 рад/м ²	11 пк/см ³
0136+57	129.2	-4.0	73.7	-90	2.3	2.1	-46.	-56.2	-7.7	5.3
0138+59	129.1	-2.1	34.8	-48	3.0	2.1	-8.	-16.8	24.6	24.8
0329+54	145.0	-1.2	26.8	-54	2.6	1.9	-31.6	-42.4	-4.5	20.0
0540+23	184.4	-3.3	77.6	3	2.9	1.9	-17.5	-30.3	-3.1	23.5
0611+22	188.9	2.4	96.7	62	3.5	2.0	38.7	25.2	47.5	39.2
0626+24	188.8	6.2	70.	82	2.7	2.0	62.4	49.9	68.	16.2
2106+44	86.9	-2.0	129.	-146	4.6	4.0	-24.	-22.3	27.4	17.
2111+46	89.0	-1.3	141.5	-230	4.0	3.8	-111.1	-110.4	-60.9	32.3
2255+58	108.8	-0.6	148.	-322	4.5	2.8	-229.1	-236.4	-178.7	50.
2319+60	112.1	-0.6	96.	-230	2.8	2.6	-159.8	-166.6	-120.	19.1
2323+63	113.3	2.1	120.	-102	4.2	2.6	-33.1	-39.8	3.1	45.4
2324+60	112.9	0.0	120.	-221	3.4	2.6	-133.8	-142.4	-84.6	24.
2351+61	116.2	-0.2	95.0	-77	3.2	2.4	-14.7	-22.1	-22.2	24.3

Для учета вклада магнитного поля Орионова рукава в меру вращений RM пульсаров рукава Персея, использованы параметры (l_0, B_0) магнитного поля, найденные по данным: в столбце 8 — всех 71 пульсаров области I (рис. 1; в столбце 9 — 54 пульсаров (исключены пульсары межрукавной области): в столбце 10 — 43 пульсара (исключены пульсары межрукавной области и пульсары со знаками RM , отличными от тех, которые должны были наблюдаться при принятом направлении магнитного поля).

кава Персея. В табл. 1 приводятся первичные значения RM и DM этих пульсаров и остаточные значения $RM_{\text{ост.}}$ и $DM_{\text{ост.}}$ полученные после учета вклада магнитного поля Орионова рукава, с использованием пара-
12—21

метров этого поля при разных ограничениях. В конце таблицы даются разъяснения по поводу ограничений.

Из таблицы видно, что, в основном, во всех вариантах вычислений знаки RM пульсаров сохраняются. Пульсар 0540+23 можно было бы с самого начала исключить из рассмотрения, поскольку у него $RM = 3 \pm 6$ рад/м² (RM определено с большими относительными ошибками). Знаки RM изменяются только в последнем варианте вычислений и то всего у 3 пульсаров из 12. Это может быть из-за того, что при последнем варианте для величины B_0 получена сильно завышенная оценка, поскольку при получении его из рассмотрения были исключены все пульсары, знаки RM которых отличались от тех, которые должны были бы наблюдаться при принятом направлении магнитного поля. Полученные значения остаточных $RM_{ост.}$ показывают, что направление магнитного поля в спиральном рукаве Персея примерно совпадает с направлением поля Орионова рукава. Это связано с тем, что знаки $RM_{ост.}$ почти совпадают со знаками первичных RM и, следовательно, картина на рис. 1 в области рукава Персея не меняется.

Были проведены также численные расчеты для определения направления l_0 , b_0 и напряженности B_0 магнитного поля в рукаве Персея. При расчетах использовался тот же метод, что и в разделе 2, принимая, однако, значения $RM_{ост.}$ и $DM_{ост.}$. Но из-за того, что все пульсары Персея рукава расположены на очень низких галактических широтах $|b_i| \leq 6^\circ$, для значения b_0 получены очень неустойчивые результаты (см. [17]). По этой причине при расчетах принимается $b_0 = 0^\circ$, это, в свою очередь, приводит к тому, что вместо уравнений с 3-мя неизвестными методом наименьших квадратов решается система уравнений с 2-мя неизвестными (l_0 и B_0). Для направления поля в Персеевом рукаве, как и ожидалось, получены значения $l_0 \approx 90^\circ$, что близко к направлению поля рукава Ориона. Однако, для величины напряженности поля B_0 получены несколько неожиданные (см. [7]) значения $B_0 \approx -2.5 \cdot 10^{-6}$ Гс. Эти значения больше величины напряженности магнитного поля рукава Ориона, где $B_0 = (-1.4 \div -2.0) \cdot 10^{-6}$ Гс (см. раздел 2), хотя Орионов рукав расположен ближе к центру Галактики, чем рукав Персея. Данный результат можно было бы объяснить очень сильной зависимостью напряженности магнитного поля от расстояния до плоскости Галактики (z) в Орионовом рукаве, но, как это было сказано в разделе 2 и видно из рис. 3, такой зависимости не наблюдается для пульсаров с $|z| \leq 400$ пк. Вероятно, это можно объяснить чрезмерно большим значением (B_0), одного или двух пульсаров при малой статистике (см. формулу (5) раздела 2).

Резюмируя результаты этого параграфа, можно заключить, что направление магнитного поля рукава Персея близко направлению поля Орио-

нова рукава, а напряженность поля несколько больше, чем в рукаве Ориона. Отметим, однако, что этот результат получен на основе данных всего 13 пульсаров и, если немного переоценить значения напряженности поля рукава Ориона, то можно получить несколько иные выводы для Персея рукава.

4. *Магнитное поле спирального рукава Стрельца—Киля.* На рис. 1 в области спирального рукава Стрельца—Киля (область II) нанесены 38 пульсаров. По распределению знаков RM этих пульсаров в работе [9] был сделан вывод о противоположных направлениях магнитных полей спирального рукава Стрельца—Киля и рукава Ориона. В отличие от рукава Персея, вклад магнитного поля Орионова рукава не может сильно изменить значения RM пульсаров в рукаве Стрельца—Киля. Это связано с тем, что Солнце находится на краю Орионова рукава со стороны спирального рукава Стрельца—Киля. Кроме того, поскольку распределение знаков пульсаров на рис. 1 отличается в рукавах Ориона и Стрельца—Киля, то учет магнитного поля рукава Ориона может только увеличить абсолютные значения RM пульсаров, находящихся в рукаве Стрельца—Киля, не изменяя при этом их знака (кроме нескольких исключительных случаев, когда на рис. 1 пульсары с отрицательными значениями RM попадают в область положительных значений RM).

Данные этих 38 пульсаров спирального рукава Стрельца—Киля были проанализированы методом, предложенным в разделе 2. При различных ограничениях на данные пульсаров получены параметры магнитного поля спирального рукава Стрельца—Киля. Поскольку использованные объекты, в основном, имеют малые галактические широты (только у 3 пульсаров $|b| \geq 10^\circ$), то для b_0 нельзя получить устойчивые результаты (см. раздел 3). Поэтому принимается $b_0 = 0^\circ$. Для напряженности поля получены значения $B_0 = (-2 \div -2.5) \cdot 10^{-6}$ Гс, а для направления от $l_0 = 40^\circ \div 50^\circ$ к $l_0 = 220^\circ \div 230^\circ$, совпадающее с направлением рукава Стрельца—Киля или противоположное направлению поля Орионова рукава. Это направление совпадает с направлением магнитного поля, полученным по данным межзвездной поляризации излучения звезд (см., например, [19]), или, можно сказать, что, вероятно, по данным межзвездной поляризации было найдено направление магнитного поля рукава Стрельца.

Были рассчитаны также «приведенные» значения $(B_0)_i$ (см. раздел 2) для пульсаров рукава Стрельца—Киля. На рис. 4 приведена зависимость значений $(B_0)_i$ от расстояния до плоскости Галактики (z). Из рисунка видно, что в северном полушарии рукава Стрельца—Киля нет заметной корреляции $(\bar{B}_0) - z$. В южном же полушарии наблюдается сильная зависимость (\bar{B}_0) от z , которую, вероятно, можно объяснить тем, что

излучение пульсаров проходит через две области (рукав Стрельца и межрукавное пространство) с противоположными направлениями магнитных полей (см. раздел 5).

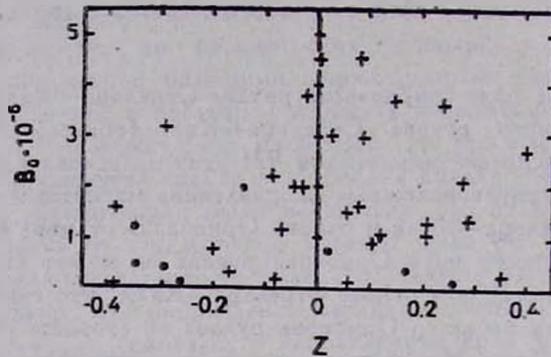


Рис. 4. Распределение значений $(B_0)_i$ пульсаров рукава Стрельца—Киля в зависимости от расстояний до плоскости Галактики. Исключены пульсары с большими значениями $(B_0)_i$ (см. подпись к рис. 3).

5. *Магнитное поле области «гало».* Как было изложено во введении, к области «гало» отнесены все пульсары с $|z| > 400$ пк. Таких пульсаров в нашем списке 48. Но некоторые из них находятся очень далеко от Солнца $r \sim 8 \div 15$ кпк по направлению центра Галактики и, следовательно, излучение от этих пульсаров проходит через несколько спиральных рукавов, учет магнитных полей которых в значения RM рассматриваемых пульсаров в настоящее время затруднителен. Поэтому мы ограничились только теми пульсарами области «гало», которые находятся над и под рукавами Ориона и Стрельца—Киля. Таких пульсаров 36. После учета вклада магнитного поля Орионова рукава в RM , пульсары были нанесены на рис. 2. Эти пульсары с $|z| > 400$ пк отделены от пульсаров Орионова рукава пунктирными линиями. Точно также отделены пульсары межрукавной области с $|z| \leq 400$ пк (между рукавами Ориона и Стрельца), поскольку эти пульсары тоже, скорее всего, можно отнести к области «гало» (в разделе 2 было предложено рассматривать поле «гало» простирающимся в межрукавную область до плоскости Галактики). Тогда в области «гало» будем иметь 54 пульсара.

Магнитные поля области «гало» северного и южного полушариев Галактики изучались отдельно. Из рис. 2 видно, что в области «гало» южного полушария Галактики распределение знаков RM пульсаров совпадает с распределением знаков RM пульсаров рукава Ориона, то есть в области «гало» южного полушария направление магнитного поля близко направлению магнитного поля Орионова рукава. Этот вывод проверялся и численными расчетами ($l_0 = 73^\circ$, $B_0 = -1.5 \cdot 10^{-6}$ Гс).

Распределение знаков RM пульсаров в области «гало» северного полушария противоположно распределению знаков RM пульсаров Орионова рукава и области «гало» южного полушария. Из численных расчетов получили: $l_0 = 245^\circ$, $B_0 = -1.1 \cdot 10^{-6}$ Гс.

Пульсары с известными RM северного полушария области «гало» расположены, в основном, на галактических долготах $0^\circ \leq l < 100^\circ$ и $300^\circ \leq l < 360^\circ$. Примерно на этих же галактических долготах ($0^\circ < l < 60^\circ$ и $270^\circ < l < 360^\circ$) находится Северный Полярный Выступ, наличием которого во многих работах (см., например, [4, 5, 20]) объясняется аномальное распределение знаков RM внегалактических радиоисточников. Меры вращения (RM) пульсаров, в отличие от RM внегалактических радиоисточников, дают возможность проверить такое предположение. Это связано с тем, что Полярный Выступ, вероятно, имеет размеры ≤ 100 пк и находится на расстоянии ~ 100 пк от Солнца (см., например, [21]), а пульсары, проектирующиеся на область Северного Полярного Выступа, расположены на разных, и во многих случаях больших, расстояниях от него. Следовательно, если бы значения RM пульсаров, находящихся за областью Полярного Выступа, определялись, в основном, магнитным полем Полярного Выступа, то они не зависели бы от расстояния до Солнца.

С целью проверки этого предположения были сделаны численные расчеты [22], которые показали наличие корреляции $RM_i - r_i$ (r — расстояние от Солнца) для пульсаров, находящихся в направлении Северного Полярного Выступа. Достоверность корреляции между этими величинами оказалась больше 95% (см., например, [23]). Это дает нам право утверждать, что магнитное поле Северного Полярного Выступа, если оно существует, не в состоянии полностью определить наблюдаемые меры вращений RM пульсаров в этом направлении. С другой стороны, вклад магнитного поля Полярного Выступа в RM оценивается ~ 5 рад/м² [24], тогда как наиболее частые значения наблюдаемых RM пульсаров $\sim 30 \div 50$ рад/м².

Имея в виду вышесказанное, кажется наиболее вероятным вместо магнитного поля Северного Полярного Выступа принимать модель магнитного поля «гало». Отметим, что использованные нами пульсары находятся на расстояниях до 1 кпк от плоскости Галактики, и, следовательно, наши выводы о «гало» касаются только области полутолщиной $z_0 \sim 1$ кпк. Иллюстрации можно найти в работе авторов [22].

6. **Заключение.** В заключение приведем общую картину магнитного поля Галактики, полученную из количественного анализа наблюдаемых параметров 185 пульсаров.

В Галактике можно выделять два основных компонента магнитного поля. Это магнитное поле в плоской подсистеме Галактики (магнитные по-

ля в спиральных рукавах) и магнитное поле так называемого «гало», охватывающее область спиральных рукавов. Направления магнитных полей в рукавах параллельны самим спиральным рукавам, причем, направления магнитных полей в спиральных рукавах Ориона и Стрельца—Киле почти противоположны (в Орионе поле направлено примерно от 260° к 80° , а в Стрельце — от 45° к 225°). В спиральном рукаве Персея направление поля (по данным 13 пульсаров) примерно совпадает с направлением поля Орионова рукава.

Получены также напряженности магнитных полей в спиральных рукавах: в Орионе — $B_0 \approx -1.5 \cdot 10^{-6}$ Гс, в Стрельце—Киле — $B_0 \approx -2.5 \cdot 10^{-6}$ Гс, в Персее — $B_0 \approx -2.5 \cdot 10^{-6}$ Гс.

Магнитное поле «гало» имеет противоположные направления в северном и южном полушариях Галактики, причем, в южном полушарии направление поля близко направлению магнитного поля Орионова рукава.

Величина напряженности поля «гало» $\sim 1.0 \cdot 10^{-6}$ Гс.

В конце отметим, что в настоящей работе для нахождения картины магнитного поля использовалась известная модель спиральных рукавов Галактики. Однако, если считать известной модель магнитного поля в плоскости Галактики, то распределение мер фарадеевских вращений пульсаров в Галактике (см. рис. 1) дает косвенный метод для уточнения модели спиральных рукавов Галактики.

Авторы искренне признательны академику В. А. Амбарцумяну и доктору физ-мат. наук М. А. Мнацаканяну, а также участникам теоретического семинара Бюраканской обсерватории за стимулирующие обсуждения и плодотворные замечания.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

THE STRUCTURE OF THE MAGNETIC FIELD OF THE GALAXY

R. R. ANDREASSIAN, A. N. MAKAROV

On the basis of the quantitative analysis of Faraday rotation measures of polarization planes of 185 pulsars the direction (l_0) and field strength (B_0) of the galactic spiral arms of the magnetic field in the neighbourhood of the Sun $\sim 5 + 7$ kpc are obtained (Perseus arm $l_0 \approx 90^\circ$, $B_0 \approx -2.5 \cdot 10^{-6}$ G; Orion arm $l_0 \approx 80^\circ$, $B_0 = (-1.4 + -2.0) \times 10^{-6}$ G, Sagittarius-Carina arm $l_0 \approx 225^\circ$, $B_0 = (-2.0 + -2.5) \cdot 10^{-6}$ G). Supposing that the magnetic field in the observed part of the Galaxy consists of two components (flat and region "halo"), we can consider

that the data refer to the flat component. As for the second component ("halo"), where $|z| > 0.4$ kpc., for the Southern hemisphere $l_0 \approx 70^\circ$, $B_0 \approx -1.5 \cdot 10^{-6}$ G, and for the Northern hemisphere the values $-l_0 \approx 245^\circ$, $B_0 \approx -1.1 \cdot 10^{-6}$ G are received.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Ruzmaikin, D. D. Sokoloff, A. H. Shukarov, *Astron. and Astrophys.*, 148, 335, 1985.
2. T. Sawa, M. Fujimoto, *Publ. Astron. Soc. Jap.*, 38, 133, 1986.
3. J. P. Vallee, *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, 78, 57, 1984.
4. J. P. Vallee, N. W. Broten, J. M. Macleod, *Astron. and Astrophys.*, 134, 199, 1984.
5. J. Sojuz, M. Fujimoto, *Astrophys. J.*, 265, 722, 1983.
6. H. Tabira, M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 39, 379, 1980.
7. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys.*, 124, 147, 1983.
8. P. P. Андреасян, А. Н. Макаров, *Астрон. циркуляр*, № 1500, 2, 1987.
9. P. P. Андреасян, А. Н. Макаров, *Астрофизика*, 28, 419, 1988.
10. P. A. Hamilton, A. G. Lyne, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 224, 1073, 1987.
11. P. H. Манчестер, Дж. Тейлор, *Пульсары*, Мир, М., 1980.
12. Y. M. Georgelin, Y. P. Georgelin, *Astron. and Astrophys.*, 49, 57, 1976.
13. P. P. Андреасян, *Астрофизика*, 24, 363, 1986.
14. А. С. Чеботарев, *Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей*, М., 1958.
15. R. N. Manchester, *Astrophys. J.*, 172, 43, 1972.
16. R. N. Manchester, *Astrophys. J.*, 188, 637, 1974.
17. A. A. Ruzmaikin, D. D. Sokoloff, *Astrophys. and Space Sci.*, 52, 375, 1977.
18. P. P. Андреасян, *Астрофизика*, 16, 707, 1980.
19. Т. А. Т. Спунстра, *Успехи физ. наук*, 121, 679, 1977.
20. M. Simard-Normand, P. P. Kronberg, *Astrophys. J.*, 242, 74, 1980.
21. R. Hanburg Brown, R. D. Davies, G. Hazard, *Observatory*, 80, 1960.
22. P. P. Андреасян, А. Н. Макаров, *Астрон. циркуляр*, № 1527, 1, 1988.
23. Е. И. Пустыльник, *Статистические методы анализа и обработки наблюдений*, Наука, М., 1968.
24. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys.*, 136, 373, 1984.