

УДК: 524.354.4—337

## ОТКЛОНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ДИПОЛЬНОГО В МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПУЛЬСАРОВ

И. Ф. МАЛОВ, С. А. СУЛЕЙМАНОВА

Поступила 9 августа 1988

Принята к печати 4 ноября 1988

Для ряда пульсаров в диапазоне 60—8700 МГц обнаружено заметное изменение с частотой максимальной производной позиционного угла плоскости поляризации в среднем профиле  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$ . В рамках модели «полого конуса» это означает нарушение дипольной структуры магнитного поля в меридиональной плоскости этих пульсаров.

1. *Введение.* В настоящее время при описании пульсаров считается общепринятой модель полого конуса, в которой наблюдаемое радиоизлучение связывают с излучением релятивистских электронов и позитронов, движущихся по искривленным силовым линиям дипольного магнитного поля, — излучением кривизны [1—3]. В этой модели электрический вектор волны расположен в плоскости магнитной силовой линии, и изменение позиционного угла  $\psi$  плоскости линейной поляризации вызывается прохождением различных силовых линий через луч зрения наблюдателя вследствие вращения пульсара [4] и описывается выражением:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \sin \varphi}{\sin \zeta \cos \beta - \cos \zeta \sin \beta \cos \varphi}, \quad (1)$$

где  $\beta$  и  $\zeta$  — углы, образованные осью вращения с осью магнитного диполя и с направлением на наблюдателя, соответственно;  $\varphi$  — долгота наблюдаемой точки импульса.

Скорость изменения позиционного угла оказывается максимальной при прохождении меридиана магнитного полюса ( $\varphi = 0$ ):

$$\left( \frac{d\psi}{d\varphi} \right)_M = \frac{\sin^2 \beta}{\sin(\zeta - \beta)}. \quad (2)$$

Таким образом, по характеру изменения угла  $\psi$  можно судить об особенностях геометрии магнитного поля в области генерации излучения.

Если магнитное поле дипольно, то ось конуса излучения — прямая линия, и, как следует из соотношений (1) и (2), скорость изменения позиционного угла вдоль импульса не зависит от того, на каком уровне в магнитосфере пульсара генерируется излучение. В рамках модели полого конуса в предположении о генерации более высоких частот ближе к поверхности нейтронной звезды [5] это означает, что  $\left(\frac{d\psi}{d\varphi}\right)_M$  не должно зависеть от частоты.

Сравнение данных о ходе позиционного угла вдоль среднего профиля на частотах 410 и 1665 МГц проведено в работе [6]. Был сделан вывод о том, что для выборки, состоящей из 7 пульсаров, заметных отличий этого параметра на двух частотах нет (если не считать PSR 0329+54). Однако позднее в работе [7] было показано, что на частоте 2700 МГц значения

$\left.\frac{d\psi}{d\varphi}\right|_M$  для выборки из 17 пульсаров, в среднем, меньше, чем на 1700 МГц.

В последние годы опубликован ряд работ, в которых обсуждаются наблюдательные эффекты, связанные с отличием структуры магнитного поля от дипольной. В работах [8—9] сообщается об обнаружении эффекта сверхдисперсионного запаздывания (СДЗ) прихода импульсов на низких частотах, что интерпретируется как отклонение магнитного поля от дипольного в экваториальной плоскости вследствие вращения пульсара. Предполагается, что наиболее заметным эффектом СДЗ будет на тех частотах, которые генерируются вблизи светового цилиндра.

Еще одно проявление отличия структуры магнитного поля от дипольной (в экваториальной плоскости), но уже вблизи поверхности нейтронной звезды, описано в работе [10]. Оно выражается в искажении формы и времени прихода импульсов на самых высоких частотах ( $\geq 10$  ГГц). На промежуточных частотах (100—1000 МГц) самым доступным инструментом проверки дипольности магнитного поля пульсаров остается анализ поведения позиционного угла в среднем импульсе в зависимости от частоты. В настоящее время опубликовано большое количество новых поляризационных данных. Ниже проводится анализ этих данных с целью оценки искажения дипольной структуры магнитного поля на умеренных расстояниях от поверхности нейтронной звезды.

2. *Наблюдательные данные о ходе позиционного угла в среднем профиле.* Из пульсаров, для которых известны данные поляризационных измерений [6, 11—20], мы выбрали объекты с монотонным изменением позиционного угла на трех и более частотах. Измеренные нами величины

$\left.\frac{d\psi}{d\varphi}\right|_M$  приведены в табл. 1 и 2. Поскольку направление вращения

нейтронной звезды мы не знаем (может быть  $d\varphi > 0$  и  $d\varphi < 0$ ), таблицы содержат только абсолютные значения производных  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$ . Из табл. 1 видно, что у ряда пульсаров значение  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  в пределах ошибок не зависит от частоты. Наиболее отчетливо эту независимость

Таблица 1

ПУЛЬСАРЫ, У КОТОРЫХ НЕТ ИЗМЕНЕНИЙ  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  С ЧАСТОТОЙ

№	PSR	60	103	150	240	400	610	1404	1612	2295	8700
			113	170	270	430	640	1420	1709	2700	
1	0031—07	0.7	0.7	0.7	{0.8  0.6	0.8			<1.6		
2	0355+54								1.2	2.2	1.9
3	0540+23					1.0			2.2	1.5	3.0
4	0611+22					2.9			3.4	3.7	
5	0628—28	3.8	4.1	{3.3  3.4	3.5	3.2	3.5		3.7	3.3	
6	0943+10	2.1	2.5			2.5					
7	0950+08	1.9	2.9	{1.6  2.1	2.1	1.6	2.2	1.7		2.0	
8	1451—68			0		3			0		
9	1541+09		0.4			0			0		
10	1929+10			1.5	1.0	{2.4  1.3			{1.4  1.5	1.5	1.2
11	2021+51					4.0			{3.4  3.3	4.2	4.7
12	2327—20			40	40		40				

демонстрируют пульсары PSR 0031 — 07, 0628 — 28 и 0950 + 08. В табл. 2 даны объекты, для которых обнаружены изменения производной позиционного угла с частотой. У пульсаров PSR 1133+16, 1747—46 и 2217 + 47 эти изменения ярко выражены. Для иллюстрации двух типов поведения параметра  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  в зависимости от частоты можно привести данные для PSR 0628—28 и PSR 1747—46 (рис. 1). Следует отметить, что такое же  $\Lambda$ -образное изменение, как у PSR 1747—46, наблюдается у PSR 1133 + 16 (и, возможно, еще у двух пульсаров—см. табл. 2). Для других пульсаров этой группы величина  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  может с частотой либо увеличиваться (+), либо уменьшаться (-).

ПУЛЬСАРЫ, У КОТОРЫХ

№	PSR	60	103	150	240	400,
			113	170	270	430
1	0301+19				12.6	16.7
2	0525+21					{33 30
3	0740-28				2.4	
4	0823+26	6.5			11.1	{ 7.5 10.0
5	0833-45					1.7
6	0835-41				6.6	13.7
7	0919+06		2.8			4.3
8	1133+16	5.6	9.0	{7.7 9.0	8.5 10.7	10.0
9	1449-64			0	2.3	2.3
10	1508+55					{18.6 18.1
11	1642-03		5.5	9.0	4.7	3.8
12	1727-47				8.3	
13	1747-46			6.9	14.6	30.0
14	2045-16			42	30	31
15	2217+47 j		0.5			

## ЗАВИСИТ ОТ ЧАСТОТЫ

610 640	1404 1420	1665 1720	2650 2700	8700	Примечания
		11.8 27	11.5 21		+,- -
3.0		{9.2 6.0	6.5	4.7	+,-
8.6	10.7	21.6	21.0		+
4.3		{7.5 6.3			+
		20.4			+
	4.9				+
9.2	9.2	{7.0 6.8 7.5	{5.5 6.4		+,-
3.3		4.0			+
		{12.8 12.7	11.0		-
4.3		3.5*			Изменение знака
19.5		22.0			+
21.0		8.0			+,-
21		{25 28 22	18		-
		10.3	17.5		+

И. Ф. МАЛОВ, С. А. СУЛЕЙМАНОВА

У ряда пульсаров происходит, по-видимому, изменение не только величины производной  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$ , но и ее знака. В качестве примера можно привести пульсары 1642—03 (1720 МГц [20]), 1749—28 (170 МГц [11, 15]), 1911—04 (170 МГц [15]) и 1919+21 (60 и 1612 МГц [12, 20]). Этот вывод следует считать предварительным, поскольку поляризация у этих пульсаров слабая, и измерения позиционного угла проведены с большими ошибками. Наиболее надежны данные для пульсара PSR 1642—03.

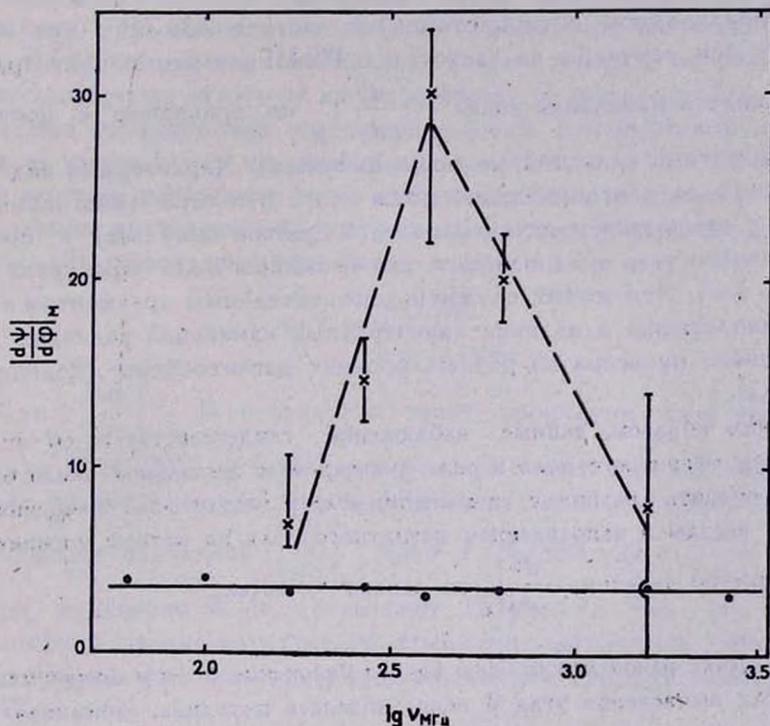


Рис. 1 Зависимость  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  от частоты для PSR 1747—46 (крестики, пунктир, указаны максимальные ошибки измерений) и PSR 0628—28 (точки, сплошная линия).

Измеренные значения  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  для этого пульсара приведены в табл. 2. Изменение знака производной происходит на частоте 1720 МГц (отмечено звездочкой).

Если этот эффект подтвердится, он будет свидетельствовать о том, что на одних уровнях луч зрения ближе к оси вращения, чем ось конуса

излучения ( $\zeta - \beta < 0$ ), на других—дальше от нее ( $\zeta - \beta > 0$ ). Следствием этого будет резкое увеличение абсолютного значения  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  на той частоте, которая генерируется в области, соответствующей  $\beta = \zeta$ . Для PSR 1642—03 такое увеличение должно наблюдаться на частотах  $640 \text{ МГц} < \nu < 1700 \text{ МГц}$ . Вероятно, именно этот эффект обнаруживается у PSR 1237+25 [21]: для аномальной моды его среднего импульса  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M = 39$  на частоте  $1700 \text{ МГц}$  и  $78$  на  $430 \text{ МГц}$ . В свете предлагаемой интерпретации на частоте  $430 \text{ МГц}$  луч зрения ближе к оси конуса, а на частотах  $< 430 \text{ МГц}$  у этого пульсара следует ожидать изменения знака у  $\left( \frac{d\psi}{d\varphi} \right)_M$  по сравнению с приведенными частотами (для той же моды импульса). Характерный вид среднего импульса для нормальной моды этого пульсара (многокомпонентность с уменьшением интенсивности в центре импульса) и профиль позиционного угла предполагают, что указанная мода образуется в области с  $\beta \approx \zeta$ . Это может служить дополнительным аргументом в пользу предположения о наличии значительных изменений величины ( $\zeta - \beta$ ) для данного пульсара на разных уровнях магнитосферы (недипольности поля).

Таким образом, данные наблюдений свидетельствуют об отличии структуры магнитного поля в ряде пульсаров от дипольной. Было бы интересно оценить величину изменений угла  $\beta$  между осью вращения нейтронной звезды и направлением магнитного поля на разных уровнях магнитосферы по величине  $\frac{d\psi}{d\varphi} \Big|_M$  на разных частотах.

3. *Оценки углов между осью конуса излучения и осью вращения пульсара.* Для вычисления угла  $\beta$  использовалась методика, описанная в работе [7], где вместе с уравнением (2) записывались соотношения:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \zeta + \cos W \sin \beta \sin \zeta, \quad (3)$$

$$\lg \theta = \lg a - b \lg P. \quad (4)$$

Здесь  $\theta$ —угловая ширина конуса излучения,  $W$ —наблюдаемая ширина профиля по уровню  $10\%$ ,  $a$  и  $b$ —постоянные, определяемые вписыванием в массив  $\lg W (\lg P)$  прямой по методу наименьших квадратов.

Решение уравнений (2)—(4) дает значения углов  $\beta$  и  $\zeta$  на разных частотах. Если угол  $\beta$  не зависит от частоты, то ось конуса излучения в областях генерации соответствующих частот является прямой линией и маг-

нитное поле можно считать дипольным. Если же поле уклоняется от дипольного,  $\beta$  будет зависеть от частоты.

Результаты вычислений с применением своего соотношения (4) для  $\Theta(P)$  на каждой частоте показывают, что угол  $\beta$  в объектах с сильными

изменениями  $\left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  также заметно отличается на разных частотах. Од-

нако при этом изменяется и вычисленный угол  $\zeta$ . Поскольку луч зрения фиксирован относительно оси вращения пульсара, реальный угол  $\zeta$  не должен зависеть от частоты. Описанный метод дает неверный результат, по-видимому, из-за того, что на разных частотах при получении зависимости  $\Theta(P)$  использованы выборки из разного числа пульсаров, причем значительная часть пульсаров в этих выборках не совпадает. Для устранения такого несоответствия можно использовать рассмотренный метод на одной из частот (здесь мы произвольно взяли частоту 1700 МГц, на которой известно наибольшее число поляризационных измерений), а затем, зафиксировав вычисленное на этой частоте значение  $\zeta$ , находить  $\beta$  из соотношения (2), которое можно переписать в виде:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{C \sin \zeta}{1 + C \cos \zeta}, \quad (5)$$

где  $C = \pm \left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$ . В результате такой процедуры получим, что у пульсара PSR 1747—46 изменения угла  $\beta$  с частотой составляют несколько градусов, и ход зависимости качественно совпадает с ходом наблюдаемых изменений  $\left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  ( $\nu$ ). У PSR 0628—28 с  $\left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  ( $\nu$ ) =  $\text{const}$  изменения  $\beta$  не превышают  $1^\circ$  (рис. 2). Как уже отмечалось выше, незнание направления вращения нейтронной звезды заставляет искать решение при положительных и отрицательных значениях  $C$ .

Наибольшее относительное изменение  $\left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  наблюдается у PSR 2217+47. Применение описанной методики к этому пульсару дает значение  $\beta = 74^\circ 8$  на частоте 1700 МГц и  $\beta = 24^\circ 4$  на 102 МГц. Такое большое отличие углов, необходимое для объяснения наблюдаемых изменений  $\frac{d\psi}{d\varphi}$  с частотой, означает неприменимость формул дипольного приближения.

Проведенные оценки углов  $\beta$  относятся к меридиональной плоскости. Интересно было бы сравнить эти результаты с данными об искажении

магнитного поля в плоскости экватора, полученными по эффекту СДЗ [8, 9] и по высокочастотным искажениям профилей [10].

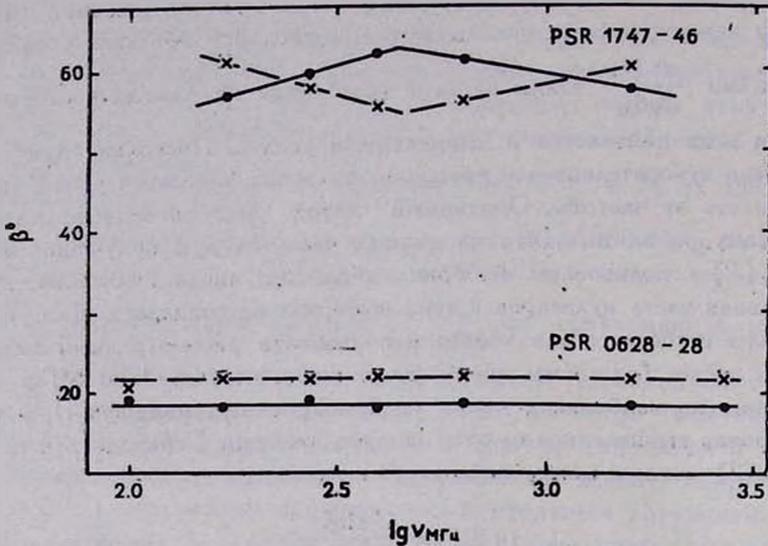


Рис. 2 Изменение угла  $\beta$  в зависимости от частоты для PSR 1747—46 и PSR 0628—28 (—  $C > 0$ , - - -  $C < 0$ ).

К сожалению, эффект СДЗ становится заметным на частотах ниже 100 МГц, а в нашей работе использованы данные, в основном, на более высоких частотах. Тем не менее, у пульсаров со слабыми изменениями  $\left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  ( $\nu$ ) (PSR 0031—07, 0628—28, 0950+08) наблюдаются также и самые слабые сверхдисперсионные запаздывания  $\Delta\varphi$ — не более  $3^\circ$  [9].

Наибольшее изменение  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  и  $\beta$  с частотой у PSR 2217+47 соответствует и наибольшему СДЗ ( $\Delta\varphi \sim 58^\circ$ ). Следующее по величине СДЗ ( $\Delta\varphi \sim 52^\circ$ ) наблюдается в PSR 1642—03. У этого пульсара, как уже отмечалось, по видимому, изменяется не только величина, но и знак производной  $\left( \frac{d\psi}{d\varphi} \right)_M$ , что соответствует значительным изменениям

угла  $\beta$ . Сильная зависимость  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  и  $\beta$  от частоты наблюдается также у пульсара PSR 1747—46, который до сих пор не исследовался на предмет поиска СДЗ. В свете сказанного выше следует ожидать, что этот эффект у него должен быть ярко выражен.

Полученные данные показывают, что существует корреляция искажений поля в меридиональной плоскости с искажениями в плоскости экватора, обнаруженными на низких частотах. Подобной корреляции с искажениями на высоких частотах не выявлено. Однако можно отметить, что сильное искажение формы и заметное смещение профиля обнаружено вновь у PSR 1642—03, в то время как у PSR 0950+08 этот эффект существенно меньше [10]. Эти два пульсара и в наших исследованиях попадают в разные группы.

4. *Зависимость ширины конуса излучения от частоты.* В предыдущем разделе для определения параметров  $\beta$  и  $\zeta$  на разных частотах использовались значения  $a$  и  $b$  на тех же частотах. Данные на 400, 640, 1700 и 2700 МГц были получены в работе [7]. Здесь мы дополнили их результатами наблюдений на 60, 102, 170 и 270 МГц [18—20]. В табл. 3 приведены соответствующие значения  $a$  и  $b$ .

Таблица 3

$\nu$ (МГц)	$a$	$b$	$\pm \Delta b$
60	15.4	0.55	0.31
102	14.8	0.24	0.20
170	8.5	0.34	0.13
270	8.4	0.23	0.20
400	9.3	0.36	0.05
640	8.1	0.28	0.14
1700	7.9	0.11	0.09
2700	3.4	0.16	0.17

Как следует из табл. 3 и рис. 3, средняя ширина конуса излучения (параметр  $a$ ) уменьшается с увеличением частоты, что уже неоднократно отмечалось в литературе и согласуется с предсказаниями большей части разрабатываемых моделей. Интересно, однако, отметить, что зависимость ширины от периода, определяемая параметром  $b$ , становится на высоких частотах более слабой. Такое поведение может быть связано с тем, что вблизи поверхности пульсара (в областях, где генерируется высокочастотное радиоизлучение) структура магнитного поля уже слабо зависит от скорости вращения нейтронной звезды, а, в основном, определяется другими факторами (структурой поля в момент образования пульсара, процессами внутри нейтронной звезды и т. п.). Следует, однако, отметить, что величина  $b$  из-за бедной статистики (и, может быть, из-за большой дисперсии индивидуальных значений параметров пульсаров) вычисляется с боль-

шой ошибкой (последняя строка в табл. 3). Поэтому в настоящее время можно говорить лишь о тенденции уменьшения параметра  $b$  с частотой.

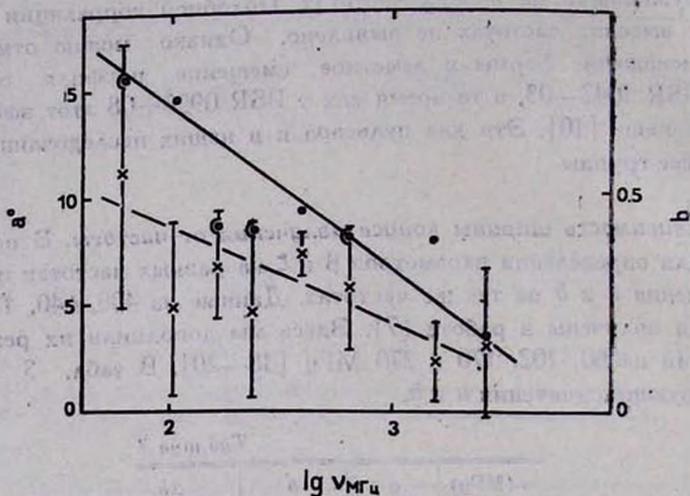


Рис. 3. Зависимость параметров  $a$  (точки, сплошная линия) и  $b$  (крестики, пунктир) от частоты.

5. **Заключение.** Проведено сравнение производных изменения позиционного угла плоскости поляризации в среднем профиле для ряда пульсаров. Обнаружено заметное изменение  $\left| \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_M$  по частоте для  $\sim 50\%$  пульсаров, у которых известны поляризационные измерения на трех и более частотах. Существование у этих пульсаров таких изменений свидетельствует об отличии магнитного поля от дипольного, а именно: об изменении углового расстояния между осью конуса излучения и лучом зрения. Оценить количественно это расстояние можно пока только по методике, разработанной для дипольного приближения. Проведенные по этой методике вычисления показывают, что для большей части пульсаров из табл. 2 изменения угла между осью вращения и осью конуса излучения на разных частотах не превышают  $2^\circ$ . В отдельных случаях (например, у PSR 2217+47) это различие может достигать  $50^\circ$ .

Таким образом, нами обнаружены искажения дипольной структуры магнитного поля в меридиональной плоскости целого ряда пульсаров. Важным моментом является то, что эти деформации обнаруживаются даже на средних частотах радиодиапазона ( $100-1000$  МГц).

Необходимо накопление новых наблюдательных данных для проверки наметившейся корреляции в отклонениях от чисто дипольного поля в меридиональной и экваториальной плоскостях.

Все сказанное означает, что простейшая модель пульсара с излучением в конусе открытых силовых линий дипольного магнитного поля должна быть изменена для объяснения наблюдаемых поляризационных данных в значительной части известных пульсаров.

В заключение выражаем благодарность Р. Манчестеру за предоставление профилей на низких частотах до их опубликования, а также сотрудникам группы исследования пульсаров ФИАН за полезные замечания.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР

## ON DISTORTIONS OF DIPOLAR MAGNETIC FIELD IN THE PULSARS MERIDIONAL PLANE

I. F. MALOV, S. A. SULEYMANOVA

Noticeable changes of maximum values of the position angle swing rate across integrated profiles were found comparing this rate at different frequencies (60—8700 MHz). Within the hollow cone model we interpret these changes as resulting from the distortion of the pulsar dipolar magnetic field structure.

### ЛИТЕРАТУРА

1. V. Radhakrishnan, D. J. Cooke, *Astrophys. Lett.*, 3, 225, 1969.
2. P. A. Starrock, *Astrophys. J.*, 164, 529, 1971.
3. M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, *Astrophys. J.*, 196, 51, 1975.
4. M. M. Komisaroff, *Nature*, 225, 612, 1970.
5. J. M. Cordes, *Astrophys. J.*, 222, 1006, 1978.
6. R. N. Manchester, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 23, 283, 1971.
7. И. Ф. Малов, *Астрофизика*, 24, 507, 1986.
8. Ю. П. Шитов, В. М. Малофеев, *Гизыма в Астрон. ж.*, 11, 94, 1985.
9. В. А. Извекова, А. Д. Кузьмин, В. М. Малофеев, Ю. П. Шитов. *Тр. Физ. ин-та АН СССР*, № 199, 13, 1989.
10. A. D. Kazmin, V. M. Malofeev, V. A. Izvekova, W. Steber, R. Wislitski, *Astron. and Astrophys.*, 181, 183, 1986.
11. С. А. Сулейманова, Ю. В. Володин, Ю. П. Шитов, *Астрон. ж.*, 65, 349, 1988.
12. С. А. Сулейманова, *Тр. Физ. ин-та АН СССР*, № 199, 42, 1989.
13. U. L. Schwarz, D. Morris, *Astrophys. Lett.*, 7, 185, 1971.
14. A. G. Lyne, F. G. Smith, D. A. Graham, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 153, 337, 1971.
15. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, R. N. Manchester. (unpublished data).
16. D. C. Backer, J. M. Rankin, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 42, 143, 1980.
17. P. A. Hamilton, P. M. McCulloch, J. G. Ables, M. M. Komisaroff, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 180, 1, 1977.