

УДК: 524.354.4—337—327

## ОБ УГЛАХ МЕЖДУ ОСЬЮ МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ И ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ В ПУЛЬСАРАХ

И. Ф. МАЛОВ

Поступила 5 июля 1985

Принята к печати 18 февраля 1986

Дан критический обзор существующих методов определения угла  $\beta$  между магнитным полем и осью вращения пульсара. Получены уточненные оценки этого угла по наблюдаемым ширинам профилей для 282 ПСР и по наблюдаемому ходу позиционного угла для 63 ПСР. С использованием поляризационных данных и данных о виде профиля вычислены углы  $\beta$  для ПСР с интеримпульсами: у 5 ПСР  $\beta$  мало ( $< 10^\circ$ ) и у трех  $\beta \sim 90^\circ$ . Указан ряд ПСР с малыми  $\beta$  и с  $\beta \sim 90^\circ$ , у которых могут быть обнаружены интеримпульсы и межимпульсное излучение.

1. *Введение.* Одной из важнейших характеристик, которые могут быть использованы для проверки предлагаемых моделей пульсаров (ПСР), для выбора возможных путей их эволюции, для оценки их светимостей и населенности в Галактике, является угол  $\beta$  между направлениями оси магнитного диполя  $\vec{\mu}$  и оси вращения нейтронной звезды  $\vec{\Omega}$ . Однозначное определение этой величины для известных ПСР дало бы ответ на следующие первостепенные с точки зрения понимания природы ПСР вопросы: происходит ли сближение указанных осей в течение жизни ПСР или они с увеличением возраста удаляются друг от друга; является ли основной причиной потери вращательной энергии нейтронной звезды магнитодипольное излучение или «токовые потери»; наблюдаются ли интеримпульсы у ПСР при  $\vec{\mu} \perp \vec{\Omega}$  или, наоборот, при малых углах между  $\vec{\mu}$  и  $\vec{\Omega}$ ; отклоняется ли магнитное поле от дипольного в области генерации радиоизлучения. Поэтому за время исследования ПСР предпринимались неоднократные попытки оценить значение этого параметра по имеющимся наблюдательным данным.

Цель настоящей работы — дать критический анализ предложенных методов вычислений угла  $\beta$  и полученных с помощью этих методов результатов, а также оценить современное состояние проблемы. Будем исходить

из модели полярной шапки, предполагая, что магнитное поле нейтронной звезды дипольно, а наблюдаемое радиоизлучение генерируется на умеренных расстояниях от ее поверхности ( $r \ll R_{LC} = \frac{cP}{2\pi}$ ) в пределах конуса открытых силовых линий.

2. *Оценки по наблюдаемой ширине профиля.* В работе [1] предложено считать, что наблюдаемый разброс эквивалентных ширин  $W$  профилей является следствием различия углов между лучом зрения наблюдателя и осью вращения  $\zeta$  для различных ПСР. При этом, если предположить, что наблюдаемая ширина связана с реальной шириной  $\theta$  диаграммы излучения соотношением:

$$W = \frac{\theta}{\sin \zeta}, \quad (1)$$

что

$$\theta = AP^{-0.5} \quad (A = \text{const}) \quad (2)$$

и что

$$\beta = \zeta, \quad (3)$$

т. е. луч зрения во всех ПСР проходит через центр конуса излучения, то можно оценить по взятым из наблюдений значениям  $W$  величину угла  $\beta$ . Соответствующая геометрия представлена на рис. 1, заимствованном из [2]. В работе [1] по эквивалентным ширинам на частоте 400 МГц для 308 ПСР [3] вычислены углы  $\beta$ . Следует подчеркнуть, что эти оценки представляют собой нижние пределы для большей части ПСР, поскольку «реальная» ширина (константа  $A$  в (2)) определялась по нижней границе на диаграмме  $W(P)$ , и никак не учитывалась возможность прохождения луча зрения на значительном расстоянии от центра конуса излучения. Тем не менее, для многих ПСР эти оценки остаются пока единственно возможными. Необходимо только сделать следующие уточнения. 1) Вместо эквивалентных ширин профилей лучше использовать ширины импульсов по уровню 10%, так как они ближе к величине  $\Phi_p$ , изображенной на рис. 1. Вписанная в массив  $\lg W_{10}(\lg P)$  [3] по методу наименьших квадратов прямая имеет вид:

$$\lg W_{10} = (-0.36 \pm 0.05) \lg P + 1.27 \pm 0.02, \quad (4)$$

а для нижней границы получим:

$$\theta = \frac{(W_{10})_{\min}}{2} = 2^{\circ}3P^{-0.36} \quad (5)$$

Отличие наблюдаемого показателя при  $P$  от 0.5 может быть связано, например, с тем, что у разных ПСР излучение с частотой 400 МГц генерируется на разных уровнях в магнитосфере (вследствие влияния других параметров ПСР). В любом случае мы должны исходить из наблюдательных

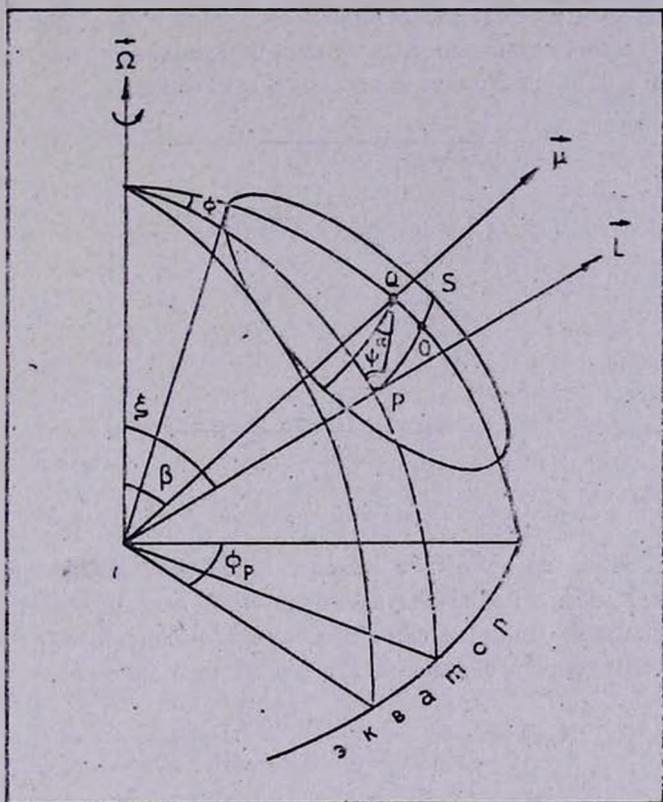


Рис. 1. Расположение различных осей пульсара в модели полярной шапки.

данных, и в дальнейшем с  $\Phi_P$  отождествлялось  $\frac{W_{10}}{2}$  из [3]. 2) Выражение (1) справедливо только при малых углах  $W$  и  $\theta$ . Однако существуют ПСР, у которых наблюдаемые профили занимают заметную часть периода. Поэтому вместо (2) лучше использовать выражение [2]:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \zeta + \sin \beta \sin \zeta \cos \Phi_P, \quad (6)$$

положив в нем, как это сделано в [1],  $\beta = \zeta$ . Тогда получим:

$$\beta = \arcsin \left( \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\Phi_p}{2}} \right) \quad (7)$$

Найденные таким способом оценки (углы  $\beta_1$ ) для 282 ПСР с известными  $W_{10}$  [3] приведены в табл. 1. Как уже отмечалось выше, для большей части ПСР эти значения следует рассматривать как нижние пределы величины  $\beta$ . Поэтому преобладание малых значений угла  $\beta$  (рис. 2), как и в [1], может быть связано со сделанными предположениями, и его нужно подтвердить с помощью более совершенных методов.

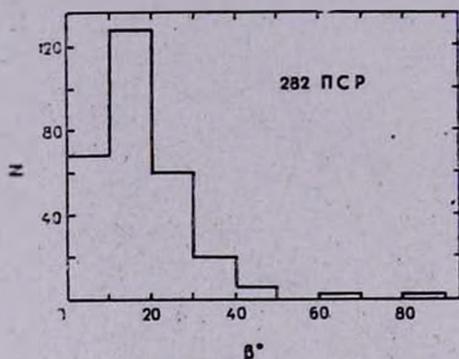


Рис. 2. Распределение вычисленных значений угла  $\beta_1$  для 282 ПСР.

3. *Использование данных о максимальной производной позиционного угла.* Для излучения кривизны электрический вектор лежит в плоскости магнитной силовой линии, а само излучение поляризовано параллельно проекции оси магнитного диполя. Из рис. 1 находим [2]:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \sin \Phi}{\sin \zeta \cos \beta - \cos \zeta \sin \beta \cos \Phi} \quad (8)$$

В работе [4] для вычисления угла  $\beta$  использовано получаемое из (8) соотношение:

$$\left( \frac{d\psi}{d\Phi} \right)_{\max} = \frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)} \quad (9)$$

Наличие второго уравнения, связывающего углы  $\beta$  и  $\zeta$ , позволяет отказаться от предположения о том, что  $\beta = \zeta$ , и вычислить значения  $\beta$  более точно. Ниже приведены оценки углов  $\beta$  и  $\zeta$ , полученные с использованием уравнений (6) и (9). При этом по сравнению с работой [4] сделано два уточнения. 1) В [4], как и в [1], использовано соотношение (1), а постояя-

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ УГЛОВ  $\beta_1$  ДЛЯ 282 ПСР

ПСР	$\beta_1^0$	ПСР	$\beta_1^0$	ПСР	$\beta_1^0$	ПСР	$\beta_1^0$	ПСР	$\beta_1^0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0031-07	7.5	0756-15	36.0	0959-54	26.6	1317-53	14.3	1558-50	17.8
0100+65	9.3	0808-47	4.6	1001-47	16.7	1322-66	5.3	1600-27	18.7
0136+57	25.2	0809+74	9.2	1010-23	7.8	1323-63	6.7	1600-49	15.9
0138+59	8.8	0818-13	21.0	1014-53	22.7	1323-62	19.9	1601-52	5.7
0148-06	5.2	0818-41	2.5	1015-56	9.9	1325-43	17.7	1604-00	21.5
0149-16	28.2	0820+02	16.4	1039-19	13.0	1325-49	11.9	1609-47	14.8
0203-40	23.4	0823+26	34.6	1039-55	15.2	1336-64	15.4	1612+07	32.3
0254-53	39.7	0826-34	1.2	1044-57	10.3	1352-51	25.9	1612-29	17.8
0301+19	12.3	0833-45	35.6	1054-62	6.5	1353-62	11.2	1620-09	20.9
0320+39	20.3	0834+06	27.7	1055-52	2.7	1358-63	29.8	1630-59	14.1
0329+54	18.7	0835-41	41.6	1056-78	16.7	1417-54	17.0	1641-68	8.9
0402+61	17.7	0839-53	7.0	1056-57	20.8	1424-55	17.3	1642-03	80.1
0403-76	14.0	0840-48	7.4	1105-59	12.1	1426-66	20.8	1647-528	10.5
0447-12	14.6	0844-35	9.9	1110-65	10.1	1436-63	18.1	1647-52	16.4
0450+55	13.3	0853-33	27.7	1110-69	16.4	1449-64	30.1	1648-17	20.4
0450-18	12.6	0855-61	15.0	1112+50	24.9	1451-68	10.8	1659-60	2.9
0458+46	16.9	0901-63	15.0	1114-41	24.2	1454-51	12.4	1700-32	13.0
0523+11	19.1	0903-42	15.8	1118-79	18.0	1503-51	19.1	1700-18	19.0
0525+21	8.2	0904-74	12.0	1119-54	14.7	1503-66	18.5	1701-75	18.5
0531+21	5.7	0905-51	5.2	1113+16	22.1	1504-43	17.8	1702-19	21.7
0538-75	7.7	0906-17	18.9	1133-55	11.0	1507-44	7.1	1706-16	26.2
0540+23	16.1	0909-71	9.4	1143-60	12.3	1510-48	19.5	1707-53	23.5
0559-05	17.2	0919+06	18.1	1154-62	13.7	1523-55	9.5	1717-29	11.3
0559-57	13.1	0922-52	18.2	1159-58	19.5	1524-39	20.2	1718-02	5.8
0611+22	26.7	0923-58	6.7	1221-63	26.2	1530+27	20.1	1718-32	22.4
0621-04	8.4	0932-52	17.1	1222-63	10.1	1530-53	16.5	1719-37	14.2
0626+24	19.5	0940-55	19.1	1232-55	7.9	1540-06	32.7	1727-47	20.8
0628-28	6.5	0940+16	6.1	1236-68	19.6	1541-52	12.4	1729-41	7.8
0647+80	20.6	0941-56	23.5	1237+25	15.7	1541+09	2.4	1730-22	8.4
0655+64	23.4	0942-13	48.0	1237-41	24.6	1550-54	6.0	1732-07	17.1
0656+14	13.3	0943+10	12.1	1240-64	19.5	1552-31	15.3	1737+13	15.3
0727-18	18.6	0950-38	12.0	1256-67	16.3	1552-23	17.7	1737-39	11.4
0736-40	7.5	0950+08	13.9	1302-64	5.4	1555-55	16.4	1738-08	10.6
0740-28	27.2	0953-52	19.4	1309-53	11.6	1556-44	22.7	1740-03	20.1
0751+32	10.0	0957-47	4.4	1309-55	13.3	1556-57	8.0	1742-30	10.9

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1745-12	18.6	1839+56	20.6	1911+13	20.5	1933+16	33.6	2048-72	8.2
1745-56	13.7	1839+09	27.3	1911-04	60.7	1937-26	36.3	2053+36	9.7
1747-46	21.3	1842+14	27.3	1913+167	20.4	1940-12	34.7	2111+46	4.8
1749-28	42.7	1844-04	8.2	1913+10	6.3	1941-17	16.6	2113+14	26.4
1754-24	4.0	1845-19	17.2	1913+16	12.3	1942-00	11.6	2123-67	9.1
1756-22	17.4	1845-01	10.3	1914+09	19.0	1943-29	31.2	2151-56	10.0
1804-27	13.1	1846-06	18.9	1915+13	32.2	1944+22	16.2	2152-31	21.8
1804-08	16.5	1851-79	10.2	1916+14	17.2	1944+17	9.7	2154+40	8.8
1806-53	10.4	1851-14	21.6	1917+00	23.1	1946-25	38.5	2217+47	32.6
1811+40	21.0	1857-26	7.6	1918+19	5.9	1946+35	12.5	2224+65	6.0
1813-26	5.6	1859+03	9.7	1919+14	13.6	1952+29	10.8	2303+30	30.2
1813-36	16.3	1900+05	11.2	1919+21	21.5	1953+50	36.9	2310+42	24.1
1818-04	30.8	1900+01	23.7	1920+21	19.6	2002+31	43.4	2315+21	26.6
1819-22	10.0	1900-06	10.8	1922+20	10.6	2003-08	5.2	2319+60	8.0
1820-31	25.8	1905+39	13.0	1923+04	24.6	2016+28	24.8	2321+61	14.2
1821+05	14.7	1907+00	67.6	1924+16	20.3	2020+28	22.2	2323+63	5.2
1822-09	12.5	1907+02	30.5	1924+14	4.4	2021+51	15.4	2324+60	9.6
1826-17	3.8	1907+10	31.0	1925+22	7.1	2025+21	10.3	2327-20	28.3
1828-60	13.9	1907+03	2.8	1926+18	16.5	2028+22	16.3	2351+61	13.7
1831-03	9.0	1907-03	24.2	1929+10	19.5	2043-04	26.4		
1831-04	3.3	1907+12	9.8	1929+20	14.6	2044+15	16.2		
1834-10	1.7	1910+20	30.6	1930+22	17.7	2045-16	12.2		

ная  $A$  определялась по нижней границе массива  $W_{10}(P)$  (вместо эквивалентных ширин в [4] использованы ширины по уровню 10%, взятые из [3]). Такой подход в данном случае не совсем корректен. Если в [1] отличие наблюдаемой ширины от реальной ширины конуса излучения всегда было связано с видимым уширением диаграммы из-за приближения конуса к полюсу вращения, то здесь наблюдаемая ширина может быть как больше реальной ширины конуса (вследствие того же эффекта), так и уже (из-за того, что луч зрения проходит достаточно далеко от центра конуса). Поскольку априори вклад обоих эффектов не известен, в качестве нулевого приближения можно считать их примерно равными. Тогда зависимость  $\theta(P)$  определяется прямой, вписанной в массив  $W_{10}(P)$  по методу наименьших квадратов. Для частоты 400 МГц это соответствует уравнению (4):

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{W}_{10}}{2} = 9^{\circ} 3 P^{-0.36}. \quad (10)$$

Вследствие указанных выше причин полученные в [4] оценки вновь следует рассматривать как нижние пределы углов  $\beta$  для большей части ПСР. 2) В [4] значения  $\left(\frac{d\psi}{d\Phi}\right)_{\max}$  вычислялись как средние по поляризационным данным, полученным для данного ПСР на разных частотах. Однако  $\left(\frac{d\psi}{d\Phi}\right)_{\max}$ , вообще говоря, зависит от частоты, и поскольку для различных ПСР диапазон частот был неодинаковым, то такой подход мог привести к погрешности в оценке  $\beta$ . Этот эффект в [4] не исследовался. По данным работы [5] можно сопоставить величину  $\left(\frac{d\psi}{d\Phi}\right)_{\max}$  для одних и тех же пульсаров на частотах 1600 и 2700 МГц. Оказалось (рис. 3), что

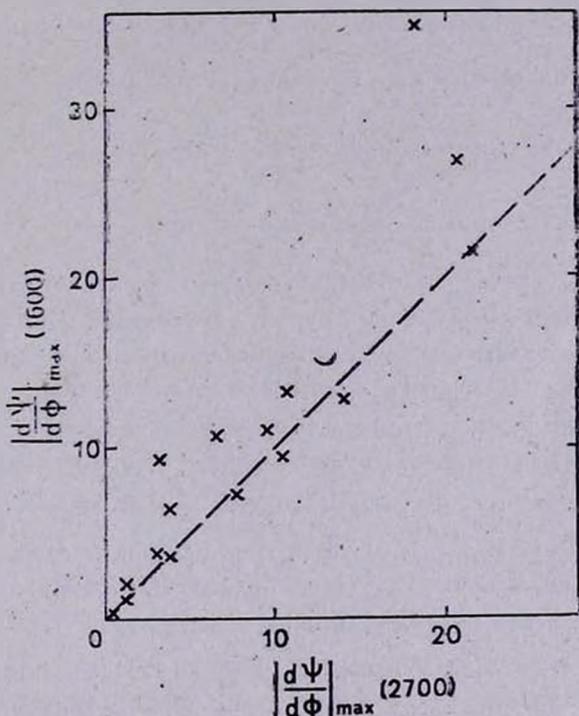


Рис. 3. Соотношение между градиентами позиционного угла на частотах 1600 и 2700 МГц [5].

соответствующие производные систематически выше на более низкой частоте. Поэтому мы проводили вычисления угла  $\beta$  по поляризационным данным на 4 частотах (400, 640, 1600 и 2700 МГц) отдельно, используя для имеющихся выборок ПСР на каждой частоте свое соотношение, аналогичное (10):

$$\bar{\theta} = 8^{\circ}1 P^{-0.28} \text{ на } 640 \text{ МГц}, \quad (11)$$

$$\bar{\theta} = 7^{\circ}8 P^{-0.11} \text{ на } 1600 \text{ МГц}, \quad (12)$$

$$\bar{\theta} = 3^{\circ}4 P^{-0.16} \text{ на } 2700 \text{ МГц}. \quad (13)$$

При этом были использованы данные для ПСР с монотонным изменением позиционного угла из работ [5—11]. Исходными для вычислений были уравнения (6) и (9), в которых  $\Phi_p$ ,  $\theta$  и  $\left(\frac{d\psi}{d\Phi}\right)_{\max}$  считались заданными.

Необходимо отметить, что знак  $\frac{d\psi}{d\Phi}$  зависит от направления вращения нейтронной звезды ( $d\Phi > 0$  или  $d\Phi < 0$ ) и от того, ближе к оси вращения или дальше от нее проходит луч зрения относительно центра конуса излучения (т. е. от знака величины  $\zeta - \beta$ ). Поскольку направление вращения ПСР не известно, мы проводили вычисления для  $\frac{d\psi}{d\Phi} = C$  и  $\frac{d\psi}{d\Phi} = -C$ . Соответствующие значения углов ( $\beta_2$  и  $\zeta_2$ ) приведены в

табл. 2 (в скобках указаны значения  $\beta$  и  $\zeta$  при  $\frac{d\psi}{d\Phi} = -C$ ). Проведенные вычисления показали, что оценки углов  $\beta$  для данного ПСР на частотах 400, 640 и 1600 МГц близки друг к другу, а на 2700 МГц  $\beta$  всегда меньше. Это может быть связано с отклонением магнитного поля от дипольного вблизи поверхности нейтронной звезды, где генерируется излучение на самых высоких радиочастотах. Для сравнения полученных значений  $\beta$  с результатами других авторов нужно брать величину, усредненную по оценкам на трех нижних частотах (400, 640 и 1600 МГц) ( $\bar{\beta}_2$  в табл. 2).

Соответствующие значения  $\bar{\beta}_2$  оказываются, как правило, выше оценок работы [4] (рис. 4). То, что некоторые значения данной работы оказались меньше, вызвано, во-первых, разными зависимостями  $\theta(P)$ , принятыми в [4] ( $\theta \propto P^{-0.5}$ ) и здесь (выражения (10)—(13)), а, во-вторых, тем обстоятельством, что эффект от прохождения луча зрения вне оси конуса излучения, по-видимому, меньше, чем эффект приближения всего конуса к оси вращения, и значения констант в выражениях (10)—(13), вероятно, должны быть несколько меньше принятых. Как показывает рис. 5, вывод о преобладании малых значений угла  $\beta$ , сделанный в работах [1] и [4], не подтверждается.

Если говорить строго, то полученные в разделах 2 и 3 значения углов  $\beta$  являются статистическими оценками, поскольку при их вычислениях

ЗНАЧЕНИЯ УГЛОВ  $\beta_2$  И  $\zeta$  ДЛЯ 65 ПСР

Таблица 2

ПСР	$\beta_2^0$				$\beta_2^0$				$\overline{\beta_2^0}$
	400 МГц	640 МГц	1600 МГц	2700 МГц	400 МГц	640 МГц	1600 МГц	2700 МГц	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0031-07	2.8		0.4		5.6		2.3		1.6
0301+19	54.7 (53.6)		51.8 (52.8)	11.8 (25.1)	57.4 (50.9)		55.8 (48.7)	13.0 (22.5)	53.2
0525+21	34.5 (34.0)		46.9 (46.7)	18.4 (24.3)	35.6 (33.0)		48.5 (45.2)	19.2 (23.2)	40.7
0540+23	21.1		14.2	0.1	34.2		20.6	0.5	17.6
0611+22	45.7 (29.9)		55.4 (52.1)	11.1 (20.7)	58.2 (21.2)		62.3 (45.5)	14.0 (15.2)	50.6
0628-28	10.7	8.2	10.8		13.8	10.4	13.7		9.9
0740-28		24.2 (28.0)	60.0 (52.2)	19.5 (29.1)		36.0 (14.4)	66.1 (46.6)	22.4 (25.0)	42.1
0809+74			9.8				13.6		9.8
0818-13		50.6 (51.2)				56.6 (45.3)			50.6
0823+26				57.6 (58.2)				59.8 (56.0)	
0833-45	12.7 (5.1)		62.5 (42.5)		34.3 (3.4)		69.9 (36.8)		37.6
0835-41	60.5 (31.4)				70.3 (30.2)				60.5
0940-55			8.4				12.8		8.4
0943+10	21.0				27.8				21.0
0950+08	21.1		6.4		33.3		11.7		13.8
1055-52		14.3				23.2			14.3
1112+50			29.7 (30.3)				36.7 (23.2)		29.7
1133+16	67.6 (75.2)	59.6 (55.3)	64.4 (51.2)		73.8 (68.7)	65.3 (49.8)	70.6 (45.9)		63.9
1154-62		19.0				26.5			19.0
1221-63		66.2 (70.0)	61.8 (57.4)			75.0 (61.0)	64.9 (54.4)		64.0
1237+25		73.8 (61.9)				76.1 (59.8)			73.8
1240-64		40.2 (43.2)				48.3 (34.7)			40.2
1323-62			78.3 (67.5)				80.0 (65.9)		78.3
1353-62			25.0 (33.2)				28.4 (28.7)		25.0
1426-66			66.8 (43.1)				72.9 (38.6)		66.8

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1449—64	11.6 (10.0)	37.2 (33.4)			28.2 (4.4)	48.8 (22.8)			24.4
1451—68	31.3 (39.7)	28.7 (35.8)			40.4 (28.6)	34.2 (29.1)			30.0
1508+55			70.7 (16.8)	23.7 (30.3)			76.5 (15.0)	26.9 (27.6)	70.7
1530—53		77.3 (63.1)				79.2 (61.3)			77.3
1556—44		51.8 (45.8)				60.8 (37.5)			51.8
1558—50		63.0 (55.2)				57.8 (50.8)			63.0
1557—50			44.8 (44.8)			52.8 (36.8)			44.8
1642—03	50.7 (11.0)	59.8 (32.0)	27.9 (31.0)		63.5 (7.9)	69.7 (25.9)	35.6 (22.6)		46.1
1700—32		52.2 (51.2)				54.0 (49.4)			52.2
1706—16	60.7 (27.1)				70.3 (22.1)				60.7
1727—47		67.4 (40.1)	72.6 (75.3)			73.4 (35.9)	77.6 (70.2)		70.0
1742—30		36.4 (33.4)				39.8 (30.3)			36.4
1747—46		49.9 (61.1)	49.4 (49.7)			54.7 (55.6)	55.9 (43.2)		49.6
1749—28	58.7 (15.3)	31.7 (29.4)	36.0 (47.9)		69.7 (11.9)	40.8 (20.9)	40.2 (42.6)		40.1
1822—09		7.4	12.4			13.6	17.7		9.9
1845—01		21.8 (37.1)	35.6 (41.4)			26.7 (29.0)	39.9 (36.6)		28.7
1852+03		17.0 (37.6)				21.8 (27.6)			17.0
1900+01	22.8 (24.3)	66.6 (31.7)	29.5 (30.8)		32.5 (14.0)	73.5 (27.6)	37.6 (23.0)		39.6
1907+02	35.7				27.3				35.7
1907+10	41.6 (19.4)				55.3 (12.6)				41.6
1911—04				23.8 (29.0)				26.4 (25.8)	
1915+13			30.2 (38.6)				34.9 (32.8)		30.2
1919+14	44.4 (40.3)				36.4 (47.7)				44.4
1919+21	26.1 (28.4)				33.8 (20.1)				26.1

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1920+21	65.7 (35.6)				72.8 (31.1)				65.7
1924+16	16.8				27.1				16.8
1929+10	22.9		13.1	2.4	37.0		21.2	4.2	18.0
1933+16	51.4 (19.3)				63.9 (14.0)				51.4
1944+17			0.4 (3.0)				2.1 (12.3)		0.4
1946+35			26.6 (30.1)	14.5 (26.2)			29.4 (27.0)	15.9 (23.7)	26.6
1952+29			16.2 (34.1)				22.0 (22.6)		16.2
2016+28	42.6 (57.4)				49.0 (49.3)				42.6
2021+51	46.9 (46.6)		29.8 (34.6)	8.9 (21.3)	55.1 (38.4)		36.8 (25.7)	11.2 (15.8)	38.4
2045-16	57.6 (56.1)	53.6 (53.3)	62.7 (60.4)	20.7 (26.7)	59.0 (54.7)	55.5 (51.4)	64.4 (58.8)	21.8 (25.3)	58.0
2148+63			46.1 (48.7)				51.1 (43.5)		46.1
2154+40			29.7 (36.6)				32.2 (32.3)		29.7
2217+47			69.8 (11.5)	24.2 (30.6)			76.1 (10.2)	25.9 (28.5)	69.8
2303+30	66.8 (35.9)		65.6 (48.2)		74.0 (31.3)		72.5 (42.6)		66.2
2319+60			30.1 (37.9)				33.9 (33.2)		30.1
2324+60			26.6 (37.3)				31.3 (31.0)		26.6

использовались статистические зависимости  $\theta(P)$ . Для какого-либо конкретного ПСР реальный угол между осью магнитного диполя и осью вращения может отличаться от приведенного в табл. 1—2 значения. Чтобы получить более точные оценки  $\beta$  для данного ПСР, необходимо привлекать дополнительную информацию, позволяющую избежать использования статистических соотношений.

4. *Использование данных о форме профиля.* В работах [12—15] для определения углов  $\beta$  и  $\zeta$  предложено использовать сравнение наблюдаемого профиля импульса с профилем, вычисленным в рамках модели полярной шапки с ускоряющим электрическим полем, постоянным по шапке [16] или спадающим к краю ее в соответствии с решением Фоли и др. [17]. В этом случае интенсивность зависит от угла по закону [13]:

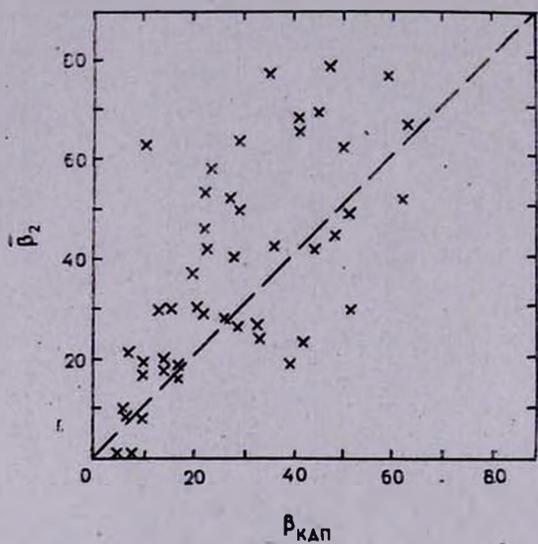


Рис. 4. Сравнение углов  $\bar{\beta}_2$  с оценками, полученными в работе [4] ( $\beta_{КАП}$ ).

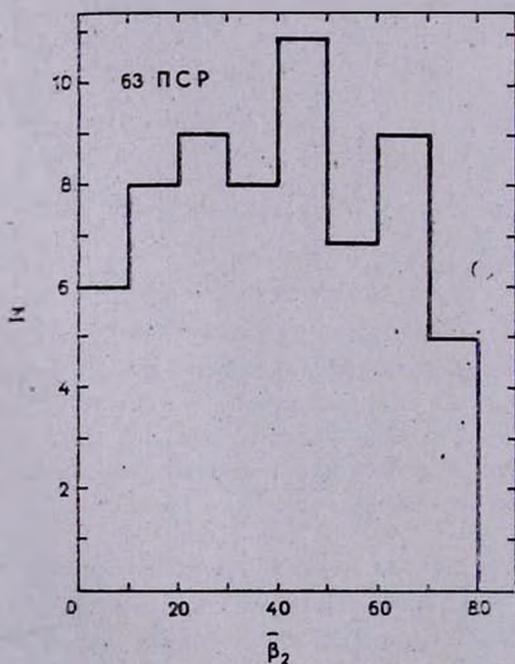


Рис. 5. Распределение вычисленных значений  $\bar{\beta}_2$  для 63 ПСР.

$$I(\nu, \vartheta) \propto \int_{-\vartheta_{\max}}^{\vartheta_{\max}} \gamma^2 \frac{\vartheta'}{r} \left[ \frac{\xi^2 K_{2,3}^2(\xi) + \frac{\gamma^2 (\vartheta - \vartheta')^2}{1 + \gamma^2 (\vartheta - \vartheta')^2} \xi^2 K_{1,3}^2(\xi)}{1 + \gamma^2 (\vartheta - \vartheta')^2} \right] d\vartheta', \quad (14)$$

где

$$\xi = \frac{2\pi\nu r}{3c\gamma^3} (1 + \gamma^2 \vartheta'^2)^{3/2}, \quad (15)$$

$r$  — радиус кривизны силовой линии,  $\vartheta_{\max} = \frac{3}{2} \vartheta_c$ ,  $\vartheta_c$  — угловой радиус полярной шапки,  $\gamma$  — лоренц-фактор излучающих электронов. Если считать, что наблюдаемая ширина профиля отличается от истинной ширины полярной шапки только вследствие нецентрального прохождения луча зрения (PS) по конусу излучения (рис. 1), то можно записать соотношения

$$QO = \zeta - \beta = \vartheta_c \sin \alpha, \quad (16)$$

$$\vartheta_c = \frac{W_{10}}{3 \cos \alpha}. \quad (17)$$

Сравнение наблюдаемого профиля с вычисленным по формуле (14) позволяет определить значения  $\alpha$  и  $\gamma$ , при которых сумма квадратичных уклонов этих профилей друг от друга минимальна. Знание угла  $\alpha$  дает возможность из (16) вычислить  $(\zeta - \beta)$ . Вторым уравнением между углами  $\beta$  и  $\zeta$  является уравнение (8). Необходимо подчеркнуть, что непосредственное использование уравнения (8) вместо соотношения (9) позволяет по наименьшей сумме квадратичных уклонов более точно определить углы  $\beta$  и  $\zeta$ , при которых вычисленный ход позиционного угла  $\psi(\Phi)$  наилучшим образом согласуется с наблюдаемым. Именно такой подход применялся в работах [12—15]. Как следует из [15], половина из 22 ПСР имеет углы  $\beta$ , превышающие  $30^\circ$  (опять нет преобладания малых значений  $\beta$ ). В [15] указывалось, что изменение модели электрического поля в зазоре приводит к заметному изменению определенного этим способом значения  $\beta$  для средних углов наклона (от  $25^\circ$  до  $34^\circ$  в ПСР 0525 + 21 и от  $48^\circ$  до  $22^\circ$  в ПСР 1133 + 16 [12—13]). Повтому для эффективного использования описанной в этом разделе методики необходимо уточнение наших знаний о структуре магнитосферы. Однако уже сейчас можно сделать достаточно уверенные выводы о величине угла  $\beta$  в целом ряде ПСР, среди которых наибольший интерес представляют ПСР, обладающие ин-теримпульсами.

5. Наклоны осей в пульсарах с интеримпульсами. В табл. 3 приведены некоторые данные для ПСР с интеримпульсами. Из этой таблицы следует, что у ПСР 0950 + 08, 1055—52, 1822—09 и 1929 + 10  $\left| \frac{d\psi}{d\Phi} \right|_{\max} \sim 1$ .

Таблица 3  
УГЛЫ НАКЛОНА ДЛЯ ПСР С ИНТЕРИМПУЛЬСАМИ

№	ПСР	$P$ (с)	$\left  \frac{d\psi}{d\Phi} \right _{\max}$	$\nu$ (МГц)	$\beta^\circ$
1	0531+21	0.033	3.9	1664	85
2	0823+26	0.531	21.7	1612	85
3	0950+08	0.253	1.2	1612	7
4	1055—52	0.197	1.6	640	9
5	1822—09	0.769	1.2	640	7
6	1929+10	0.226	1.6	1612	8
7	1937+21	0.002	3.1	2380	79
8	0826—34	1.849	1.9	610	<10

Обращаясь к формуле (9), находим, что такой градиент может быть только у ПСР с  $\sin \beta \sim \sin (\zeta - \beta)$ . Поскольку  $(\zeta - \beta)$  не должно превышать радиус полярной шапки  $\theta_c$ , а последний для большей части ПСР — величина малая ( $\sim 10^\circ$ ), то близость значений  $\beta$  и  $(\zeta - \beta)$  означает малость угла  $\beta$ . Таким образом, в рамках принятой модели из одних поляризационных данных можно сделать вывод о близости оси магнитного диполя к оси вращения нейтронной звезды у ряда ПСР. Использование данных о виде профиля дает возможность по методике раздела 4 оценить угол  $\beta$ . Соответствующие значения приведены в табл. 3. Поляризационные данные из работ [6—11] позволяют сделать вывод о малости угла  $\beta$  также в ПСР 0540+23, 0031—07, 1924+16 и 1944+17. Этим ПСР должно быть уделено максимальное внимание при поиске межимпульсного излучения.

Что касается ПСР 1937+21, то для него методика раздела 4 не дает однозначного решения при имеющихся наблюдательных данных. Для определения угла  $\beta$  в этом ПСР может быть использован метод, предложенный в работе [18] и связанный с тем обстоятельством, что при наличии сведений о ходе позиционного угла по всем долготам (кривая  $\psi(\Phi)$  известна для всех  $\Phi$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ) можно оценить углы  $\beta$  и  $\zeta$  по одним поляризационным данным. В случае ПСР 1937+21 известен ход позиционного угла вблизи главного импульса и интеримпульса [19]. Наилучшее согласие с наблюдательными данными получается при  $\beta = 79^\circ$  и  $(\zeta - \beta) = 22^\circ$  (рис. 6). Если учесть, что уже на поверхности этого ПСР раскрыв конуса

составляет  $\theta_c = 21^\circ.5$ , то такое расстояние луча зрения от центра конуса вполне возможно и согласуется с однокомпонентностью наблюдаемого импульса. Таким образом, для этого ПСР  $\mu$  почти перпендикулярен  $\Omega$ .

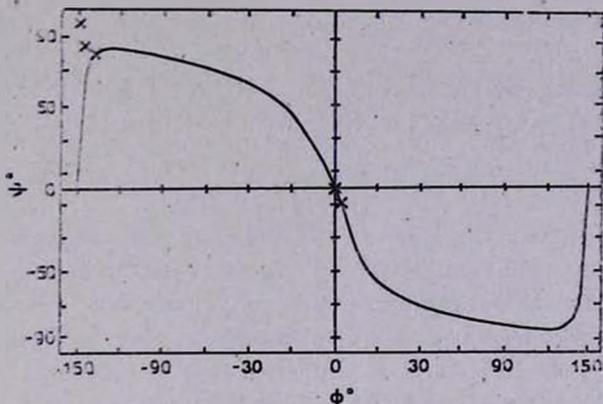


Рис. 6. Наблюдаемый (крестики) и вычисленный (при  $\beta = 79^\circ$  и  $\zeta - \beta = 22^\circ$ ) ход позиционного угла в ПСР 1937+21.

6. **Заключение.** 1. В работе получены оценки углов между осью магнитного диполя и осью вращения нейтронной звезды для 282 ПСР, представляющие собой нижние пределы этих углов. Как и следовало ожидать, для большей части ПСР эти оценки дают малое значение  $\beta$  (для 196 ПСР  $\beta < 20^\circ$ ).

2. Определены статистические значения угла  $\beta$  для 65 ПСР. Значения  $\beta$  у этих ПСР распределены равномерно в интервале от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ .

3. По всей совокупности наблюдательных данных найдены величины угла  $\beta$  для ПСР, имеющих интеримпульсы. Оказалось, что примерно у половины этих ПСР угол  $\beta$  близок к  $90^\circ$ , а у остальных он мал ( $< 10^\circ$ ).

4. У 4 ПСР поляризационные данные свидетельствуют о малости угла  $\beta$ . Это позволяет надеяться на обнаружение у них заметного межимпульсного излучения.

5. Вычисления с использованием поляризационных данных проводились только для тех ПСР, у которых ход позиционного угла вдоль среднего профиля монотонен. Однако во многих ПСР позиционный угол испытывает скачки (ПСР 0329+54, 0834+06, 1237+25 и др.). Это, по-видимому, означает, что структура магнитного поля в этих ПСР значительно сложнее дипольной. Такие случаи в настоящей работе не исследовались. Здесь также не рассматривались возможности, связанные с генерацией радиоизлучения другими механизмами и в других областях магнитосферы

ПСР (вблизи светового цилиндра и в экваториальных поясах). Все эти вопросы выходят за рамки данной статьи и представляют предмет отдельных исследований.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР

## ON THE ANGLES BETWEEN THE AXIS OF MAGNETIC DIPOLE AND THE AXIS OF ROTATION OF PULSARS

I. F. MALOV

A critical survey of known methods for the determination of an angle ( $\beta$ ) between the magnetic field and rotation axis of pulsars is given. More accurate estimates of this angle are obtained on the basis of observed profile widths for 282 pulsars and observed position angles for 63 pulsars. Polarization data and structure of observed profiles gave us the possibility to estimate the angle  $\beta$  for pulsars with interpulses: 5 pulsars have small  $\beta$  ( $< 10^\circ$ ), for 3 pulsars  $\beta \sim 90^\circ$ . In addition 4 pulsars with small  $\beta$  and two pulsars with  $\beta \gtrsim 80^\circ$  may have interpulses or interpulse radiation.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Кузьмин, И. М. Дагкесаманская, Письма в Астрон. ж., 9, 149, 1983.
2. Р. Манчестер, Дж. Тейлор, Пульсары, Мир, М., 1980.
3. R. N. Manchester, J. H. Taylor, Astron. J., 86, 1953, 1981.
4. А. Д. Кузьмин, И. М. Дагкесаманская, В. Д. Пугачев, Письма в Астрон. ж., 10, 854, 1984.
5. D. Morris, D. A. Graham, W. Sieber, N. Bartel, P. Thomasson, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 46, 421, 1981.
6. R. N. Manchester, Astrophys. J. Suppl. Ser., 23, 283, 1971.
7. P. A. Hamilton, P. M. McCulloch, J. G. Ables, M. M. Komisaroff, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 180, 1, 1977.
8. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, R. N. Manchester, J. G. Ables, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 183, 645, 1978.
9. R. N. Manchester, P. A. Hamilton, P. M. McCulloch, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 192, 153, 1980.
10. D. C. Backer, J. M. Rankin, Astrophys. J. Suppl. Ser., 42, 143, 1980.
11. J. M. Rankin, J. M. Benson, Astron. J., 86, 418, 1981.
12. И. Ф. Малов, Астрон. циркуляр, № 1110, 1980.
13. И. Ф. Малов, Астрофизика, 19, 161, 1983.
14. И. Ф. Малов, Астрофизика, 19, 315, 1983.
15. И. Ф. Малов, Физ. вст. АН СССР, Препр., № 250, М., 1983.
16. M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, Astrophys. J., 196, 51, 1975.
17. W. M. Fawley, J. Arons, E. T. Scharlemann, Astrophys. J., 217, 227, 1977.
18. R. Narayan, M. Vivekanand, Astron. and Astrophys., 113, L 3, 1982.