

УДК 524.82; 524-1/-8

ОБ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В РАДИОПУЛЬСАРАХ

И. Ф. Малов, О. И. Малов

Предполагая, что замедление вращения пульсара происходит вследствие уноса углового момента магнитодипольным излучением, мы выполнили коррекцию индукции магнитных полей, представленных в ATNF каталоге. С этой целью использованы вычисленные нами ранее тремя методами значения углов β между магнитным моментом и осью вращения центральных нейтронных звёзд. Проанализирована зависимость полученных магнитных полей от возраста пульсара. Показано, что затухание магнитного поля происходит, в среднем, за время порядка миллиона лет.

Ключевые слова: нейтронные звёзды, радиопульсары, магнитные поля.

Введение. Одной из важнейших для физики пульсаров проблем остаётся исследование эволюции со временем их магнитных полей. Существует много работ, в которых делались попытки решить этот вопрос. В работе [1] проведено сравнение наблюдаемых параметров пульсаров с полученными при достаточно произвольных предположениях модельными значениями этих параметров. Авторы пришли к выводу о затухании магнитного поля со временем порядка 100 млн лет. С другой стороны, в [2] сделана также модельно-зависимая оценка времени затухания магнитного поля $4 \cdot 10^5$ лет. Однако большое число пульсаров в каталоге ATNF с оцененным возрастом до миллиардов лет означает, что магнитные поля в этих объектах, если и затухают, то очень медленно. Более того, предлагались механизмы генерации магнитного поля в пульсаре, которые могли бы усилить его со временем [3, 4].

Для большей части известных радиопульсаров магнитные поля на поверхности их нейтронных звёзд вычисляются в предположении, что замедление вращения ней-

тронной звезды происходит вследствие уноса углового момента её магнитодипольным излучением:

$$-I\Omega d\Omega/dt = \frac{B_p^2 R_*^6 \Omega^4 \sin^2 \beta}{6c^3}. \quad (1)$$

Здесь B_p – магнитная индукция на магнитном полюсе нейтронной звезды, Ω – угловая скорость её вращения, I и R_* – её момент инерции и радиус, β – угол между её магнитным моментом и осью вращения. В каталоге радиопульсаров ATNF [5] в рамках магнитодипольной модели даются значения магнитной индукции на экваторе нейтронной звезды

$$B_s = 3.2 \cdot 10^{19} (PdP/dt)^{1/2} \text{ Гс}, \quad (2)$$

которые в 2 раза меньше величин B_p на полюсе.

Формула (2) получена заменой угловой скорости на период вращения $P = 2\pi/\Omega$, подстановкой стандартных значений $I = 10^{45} \text{ г}\cdot\text{см}^2$, $R_* = 10^6 \text{ см}$ и в предположении о том, что $\sin \beta = 1$, т. е., что все радиопульсары представляют собой ортогональные ротаторы.

Следует подчеркнуть, что равенство (2) записано в предположении об отсутствии других механизмов замедления нейтронной звезды, кроме магнитодипольного излучения. Роль других механизмов торможения обсуждалась в работе [6]. Однако даже в рамках магнитодипольной модели использование условия $\sin \beta = 1$ является очень грубым приближением. В работе [7] проанализировано, насколько изменятся значения магнитной индукции, если в равенстве (2) брать реальные, вычисленные с помощью различных методов, углы β . Было показано, что эти углы сильно отличаются от 90° для большей части пульсаров, а, соответственно, реальные магнитные поля для них оказываются значительно сильнее.

Описанные проблемы заставляют снова вернуться к анализу зависимости магнитных полей от возраста пульсара. Не задаваясь целью вычисления индукций в рамках различных моделей замедления вращения, мы находим здесь их подкорректированные значения с учётом оцененных нами ранее углов β [8], принимая за основной механизм торможения магнитодипольное излучение

$$B^* = 2B_s / \sin \beta. \quad (3)$$

Следует подчеркнуть, что магнитогидродинамические расчёты [9] также показали зависимость скорости торможения от величины угла β в более общем случае. Мы проводим анализ наблюдаемого изменения величины магнитного поля из каталога ATNF при

увеличении возраста пульсара с учётом реальных значений $\sin \beta$. Выполнение подобного анализа в рамках механизмов торможения, отличных от магнитодипольного, будет возможным при появлении соответствующих каталогов, содержащих новые значения магнитной индукции.

В качестве возраста пульсара мы использовали его кинематический возраст

$$t_{\text{kin}} = \frac{z}{V}, \quad (4)$$

вычисляемый по времени удаления пульсара от диска Галактики. Высота z над плоскостью определяется из наблюдений. Для более 200 пульсаров измерены их скорости в картинной плоскости V_{trans} . Считая, что движение пульсара изотропно, т. е., что компоненты его скорости одинаковы по трём координатам, можно положить

$$V = \frac{V_{\text{trans}}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

и получить оценку кинематического возраста.

Новые значения индукций даны в табл. 1. Там же приведены кинематические возрасты пульсаров. Эти параметры позволяют перейти к анализу возможных изменений магнитного поля со временем. Результат показан на рис. 1.

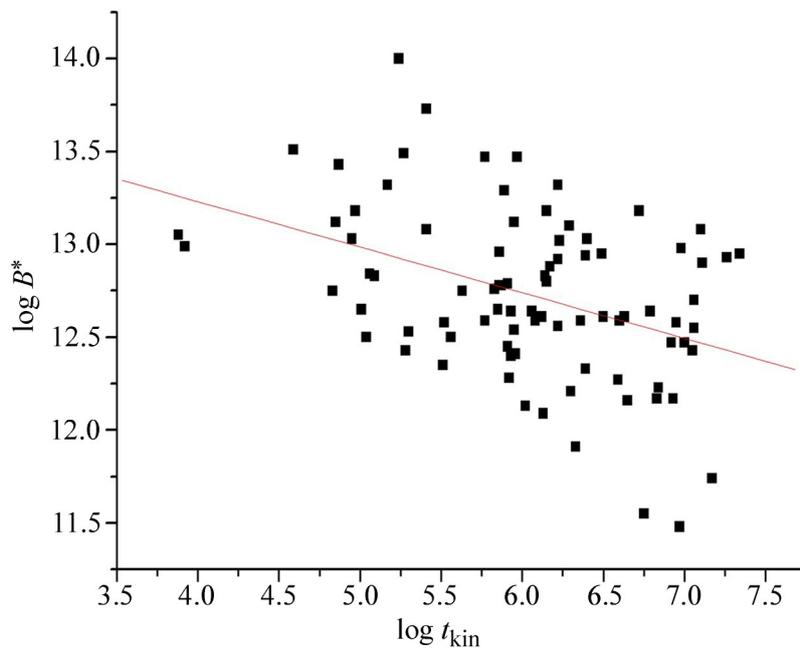


Рис. 1: Зависимость магнитной индукции от кинематического возраста пульсара.

Линейная зависимость на этом рисунке может быть описана уравнением:

$$\lg B_* = (-0.25 \pm 0.06) \lg t_{\text{kin}} + 14.22 \pm 0.37 \quad (6)$$

при коэффициенте корреляции $K = -0.41$ и вероятности случайного распределения $p \sim 10^{-4}$.

Эта зависимость означает, что если в момент $t_{\text{kin}} = 10^5$ лет $B_* = 10^{13}$ Гс, то его уменьшение в 2 раза произойдёт к моменту $t_{\text{kin}} = 1.2$ млн лет, т. е. заметное уменьшение поля происходит за время порядка миллиона лет.

Т а б л и ц а 1

Углы β , новые значения индукций и кинематический возраст пульсаров

PSR J	$\beta, ^\circ$	B^* , Гс	t_{kin} , ГОДЫ	PSR J	$\beta, ^\circ$	B^* , Гс	t_{kin} , ГОДЫ
J0034-0721	9	8.5E+12	1.80E+07	J0849-6322	3	2.0E+13	
J0108-1431	8	3.6E+12	1.67E+06	J0855-3331	30	1.2E+13	
J0134-2937	22	5.5E+11	1.49E+07	J0856-6137	37	4.3E+12	
J0151-0635	10	9.0E+12	2.21E+07	J0857-4424	28	1.1E+13	
J0152-1637	33	3.8E+12	8.88E+06	J0901-4624	37	2.1E+13	
J0206-4028	37	2.9E+12	9.94E+06	J0902-6325	19	1.7E+12	
J0211-8159	13	4.9E+12		J0905-4536	4	1.1E+13	
J0255-5304	53	3.0E+11	9.24E+06	J0907-5157	26	3.2E+12	
J0304+1932	42	4.1E+12	4.26E+06	J0922+0638	23	1.3E+13	1.96E+06
J0401-7608	24	4.6E+12		J0924-5302	32	2.0E+13	
J0448-2749	6	4.7E+12		J0924-5814	13	1.7E+13	
J0450-1248	17	1.4E+12		J0932-3217	36	2.4E+12	
J0452-1759	17	1.2E+13	1.26E+07	J0934-5249	29	1.1E+13	
J0459-0210	20	7.3E+12		J0941-5244	22	4.7E+12	
J0520-2553	24	4.2E+11		J0942-5552	15	3.1E+13	
J0525+1115	24	8.1E+11	2.16E+06	J0942-5657	61	1.3E+13	8.89E+05
J0533+0402	24	2.0E+12		J0953+0755	19	1.5E+12	6.81E+06
J0536-7543	27	3.8E+12	2.29E+06	J0954-5430	30	1.8E+13	
J0540-7125	16	7.7E+12		J0955-5304	26	8.0E+12	
J0543+2329	12	1.9E+13	7.71E+05	J1001-5507	40	2.7E+13	
J0601-0527	22	3.9E+12	4.02E+06	J1003-4747	21	4.4E+12	
J0614+2229	71	9.6E+12	9.56E+06	J1015-5719	5	6.6E+13	
J0624-0424	13	8.2E+12		J1016-5345	53	3.1E+12	

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

PSR J	$\beta,^\circ$	B^* , Гс	t_{kin} , годы	PSR J	$\beta,^\circ$	B^* , Гс	t_{kin} , годы
J0630-2834	17	2.1E+13	1.65E+06	J1017-5621	38	4.2E+12	
J0636-4549	39	8.0E+12		J1020-6026	10	1.1E+13	
J0656-2228	36	6.2E+11		J1032-5911	35	3.2E+12	
J0656-5449	33	2.9E+11		J1036-4926	28	3.9E+12	
J0659+1414	18	3.0E+13	9.40E+05	J1038-5831	34	3.3E+12	
J0709-5923	62	5.7E+11		J1041-1942	41	3.5E+12	1.15E+07
J0719-2545	32	1.0E+13		J1043-6116	32	6.7E+12	
J0729-1448	44	1.6E+13		J1046-5813	32	2.5E+12	
J0729-1836	25	1.5E+13	9.40E+04	J1047-3032	17	1.0E+12	
J0738-4042	10	8.7E+12	2.44E+06	J1047-6709	24	2.9E+12	
J0742-2822	37	5.6E+12	4.23E+05	J1048-5832	26	1.6E+13	
J0745-5353	32	2.6E+12	9.19E+05	J1049-5833	37	1.1E+13	
J0749-4247	22	5.7E+12		J1055-6022	33	3.5E+13	
J0809-4753	18	8.4E+12	1.67E+06	J1056-6258	20	7.3E+12	
J0820-1350	31	6.3E+12	1.41E+06	J1057-5226	21	6.1E+12	8.19E+05
J0820-3921	9	4.7E+13		J1059-5742	32	8.7E+12	
J0821-4221	21	6.6E+12		J1110-5637	60	2.5E+12	
J0837+0610	33	1.1E+13	2.53E+06	J1112-6613	16	4.0E+12	
J0837-4135	48	4.4E+12	1.03E+05	J1112-6926	21	8.7E+12	
J0838-2621	13	9.8E+11		J1114-6100	14	5.2E+13	
J0843-5022	12	1.9E+12		J1115-6052	39	4.5E+12	
J0846-3533	13	1.2E+13	2.55E+05	J1116-4122	40	8.6E+12	1.28E+07
J1119-6127	15	3.1E+14		J1428-5530	27	4.9E+12	
J1123-4844	23	6.6E+11		J1430-6623	29	6.1E+12	7.32E+05
J1123-6259	34	4.4E+12		J1435-5954	22	4.6E+12	
J1126-6942	27	6.2E+12		J1443-5122	13	4.5E+12	
J1136+1551	25	1.0E+13	7.30E+05	J1453-6413	34	2.5E+12	8.45E+05
J1137-6700	5	4.8E+12		J1456-6843	14	1.4E+12	1.05E+06
J1141-3107	20	6.1E+12		J1507-4352	72	1.4E+12	
J1141-3322	57	8.9E+11		J1507-6640	23	3.3E+12	

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{годы}$	PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{годы}$
J1143-5158	31	2.7E+12		J1512-5759	16	6.9E+12	
J1146-6030	28	3.0E+12		J1513-5908	10	1.7E+14	
J1157-6224	11	1.3E+13		J1514-4834	25	3.1E+12	
J1204-6843	36	8.9E+11		J1517-4356	28	1.6E+12	
J1224-6407	42	3.1E+12	3.59E+05	J1522-5829	21	5.1E+12	
J1225-5556	30	5.8E+12		J1524-5625	25	8.3E+12	
J1225-6408	25	3.0E+12		J1524-5706	60	4.7E+13	
J1231-4609	44	5.4E+11		J1528-4109	36	1.6E+12	
J1236-5033	26	9.9E+11		J1531-5610	27	4.7E+12	
J1240-4124	32	3.6E+12		J1534-5334	17	9.6E+12	3.29E+05
J1243-6423	53	3.3E+12		J1534-5405	20	3.9E+12	
J1251-7407	34	1.2E+12		J1535-4114	66	2.9E+12	
J1253-5820	31	2.8E+12	8.40E+05	J1536-3602	11	1.1E+13	
J1305-6455	13	1.4E+13		J1539-5626	23	5.7E+12	6.78E+04
J1306-6617	10	2.0E+13		J1542-5034	51	4.1E+12	
J1319-6056	29	2.8E+12		J1543-5459	14	3.8E+13	
J1320-3512	6	5.4E+11		J1548-5607	16	9.9E+12	
J1320-5359	69	3.5E+12	8.82E+05	J1557-4258	21	1.8E+12	3.87E+06
J1326-5859	26	5.8E+12		J1559-4438	29	2.1E+12	2.44E+06
J1327-6222	34	1.1E+13		J1600-5044	31	3.9E+12	5.95E+05
J1327-6301	16	4.0E+12		J1600-5751	13	5.9E+12	
J1327-6400	4	9.3E+13		J1602-5100	29	3.2E+13	
J1333-4449	58	3.3E+10		J1603-5657	52	3.0E+12	
J1339-4712	69	1.8E+10		J1604-4909	38	1.9E+12	8.26E+05
J1340-6456	20	8.4E+12		J1605-5257	9	5.3E+12	
J1341-6220	8	1.0E+14		J1607-0032	31	1.4E+12	4.44E+06
J1349-6130	35	4.0E+12		J1609-1930	52	2.3E+12	
J1356-5521	19	3.7E+12		J1612-2408	29	5.1E+12	
J1357-6429	14	6.3E+13		J1614-3937	18	1.7E+12	
J1359-6038	59	2.1E+12		J1614-5048	10	1.2E+14	

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{ГОДЫ}$	PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{ГОДЫ}$
J1401-6357	49	1.0E+13		J1615-5537	37	4.2E+12	
J1403-7646	14	1.0E+13		J1617-5055	2	1.8E+14	
J1410-7404	0			J1633-5015	26	5.4E+12	
J1412-6145	25	2.6E+13		J1636-4440	38	1.0E+13	
J1413-6141	7	1.5E+14		J1641-2347	1	1.8E+13	
J1415-6621	31	1.8E+12		J1643-4505	20	1.6E+13	
J1427-4158	29	2.6E+12		J1644-4559	47	8.4E+12	
J1645-0317	0		6.24E+06	J1745-3040	22	1.1E+13	8.87E+04
J1646-4346	12	5.1E+13		J1749-3002	8	3.3E+13	
J1646-6831	12	1.7E+13		J1750-3157	10	4.8E+12	
J1650-1654	18	1.5E+13	5.27E+06	J1751-4657	27	4.3E+12	8.56E+05
J1650-4502	9	3.3E+13		J1752-2806	48	5.8E+12	6.83E+05
J1651-4246	12	2.0E+13		J1757-2421	16	1.3E+13	
J1651-7642	25	7.5E+12		J1801-2920	15	1.4E+13	
J1652-1400	19	4.5E+11		J1803-2137	15	3.2E+13	3.88E+04
J1653-3838	30	3.7E+12		J1805-0619	20	4.0E+12	
J1654-2713	26	1.7E+12		J1806-2125	11	8.3E+13	
J1655-3048	6	2.8E+12		J1807-0847	23	3.5E+11	5.57E+06
J1700-3312	68	5.5E+12		J1808-0813	22	5.7E+12	
J1701-3726	16	3.9E+13		J1808-3249	24	8.0E+12	
J1701-4533	35	1.4E+12		J1809-1917	18	9.7E+12	8.34E+03
J1702-4128	17	2.1E+13		J1811-0154	4	3.2E+13	
J1702-4310	15	5.6E+13		J1812-1733	2	4.2E+13	
J1703-3241	69	1.9E+12		J1816-5643	16	1.5E+11	
J1703-4851	21	1.5E+13		J1817-3837	39	1.5E+12	
J1705-1906	31	4.4E+12	7.06E+05	J1820-0427	35	6.8E+12	1.38E+06
J1705-3950	13	3.9E+13		J1820-1818	19	1.0E+12	
J1707-4053	8	1.5E+13		J1822-2256	21	8.9E+12	
J1709-1640	33	7.5E+12	1.47E+06	J1824-1945	0		1.00E+06
J1709-4429	35	1.1E+13		J1825-1446	3	1.1E+14	1.72E+05

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{ГОДЫ}$	PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{ГОДЫ}$
J1714-1054	10	2.5E+12		J1826-1334	16	2.1E+13	1.49E+05
J1719-4006	26	2.6E+12		J1829-1751	22	6.9E+12	1.15E+05
J1720-2933	40	2.2E+12		J1830-1059	47	1.4E+13	
J1721-3532	7	4.2E+13		J1832-0827	29	2.7E+13	7.43E+04
J1722-3207	30	2.2E+12	3.21E+05	J1832-1021	45	3.3E+12	
J1722-3632	14	1.1E+13		J1835-0643	7	5.6E+13	
J1723-3659	23	6.5E+12		J1835-0944	29	3.3E+12	
J1727-2739	17	8.0E+12		J1835-1020	49	3.6E+12	2.61E+05
J1730-3350	35	1.2E+13		J1835-1106	33	6.8E+12	1.23E+05
J1731-4744	26	5.3E+13	2.57E+05	J1837-0045	17	7.0E+12	
J1733-2228	10	2.2E+12		J1837-1837	53	4.7E+12	
J1733-3716	9	3.1E+13	1.85E+05	J1841-0345	39	1.1E+13	
J1738-2955	23	3.1E+13		J1841-0425	45	3.1E+12	1.19E+05
J1739+0612	23	1.0E+12		J1841-7845	12	2.4E+12	
J1739-1313	0			J1842-0905	22	1.0E+13	
J1739-3023	46	3.3E+12		J1843-0000	48	7.1E+12	
J1740+1000	19	1.1E+13		J1845-0434	21	1.4E+13	
J1740-3015	77	3.5E+13		J1845-0743	21	1.1E+12	
J1741-3927	26	4.3E+12	1.16E+06	J1847-0402	23	2.9E+13	5.93E+05
J1742-4616	15	9.5E+11		J1848-0123	19	1.1E+13	7.51E+03
J1743-3150	52	4.4E+13		J1848-1414	14	5.2E+11	
J1743-4212	28	2.1E+12		J1848-1952	25	4.7E+13	
J1850+1335	63	1.6E+12	1.99E+06	J1943+0609	26	2.1E+12	
J1852-2610	15	1.3E+12		J1943-1237	43	3.7E+12	
J1853+0011	31	1.5E+13		J1944-1750	28	3.9E+12	
J1900-2600	10	4.1E+12	1.32E+06	J1946-1312	33	3.7E+12	
J1901+0331	20	1.3E+13	7.14E+04	J1946-2913	36	4.1E+12	3.13E+06
J1901+0413	31	7.4E+13		J1949-2524	51	4.6E+12	
J1901-0906	20	1.0E+13	1.66E+06	J2005-0020	49	2.1E+13	
J1901-1740	12	1.3E+13		J2006-0807	6	3.0E+12	8.25E+06

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{годы}$	PSR J	$\beta, ^\circ$	$B^*, \text{Гс}$	$t_{\text{kin}}, \text{годы}$
J1903+0135	35	6.1E+12	7.49E+05	J2046-0421	38	5.0E+12	1.16E+07
J1904+0004	12	1.2E+12	1.35E+06	J2048-1616	38	1.5E+13	1.40E+06
J1904-1224	31	2.9E+12		J2053-7200	31	1.0E+12	
J1905+0709	28	7.8E+12		J2108-3429	24	1.1E+13	
J1909+0912	42	8.6E+12		J2116+1414	29	1.5E+12	8.52E+06
J1913-0440	72	3.9E+12	4.20E+06	J2155-3118	61	2.6E+12	
J1913+0904	8	2.6E+13		J2248-0101	25	2.7E+12	1.11E+07
J1919+0134	15	7.4E+12		J2324-6054	52	6.3E+12	
J1932+1059	23	2.7E+12	1.91E+05	J2330-2005	39	8.9E+12	3.67E+06
J1932-3655	24	2.0E+12		J2346-0609	36	4.4E+12	6.17E+06
J1941-2602	48	1.7E+12	6.94E+06				

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об уменьшении индукции магнитного поля с возрастом пульсара. Ещё одним способом продемонстрировать этот вывод может быть построение гистограмм, показывающих распределение магнитных индукций для пульсаров с разным кинематическим возрастом, который для исследуемой выборки может считаться наиболее близким к реальному возрасту пульсара. На рис. 2 приведены эти гистограммы для двух подвыборок. Одна из них включает пульсары с $t_{\text{kin}} < 10^6$ лет, другая с $t_{\text{kin}} \geq 10^6$ лет. Средние значения магнитного поля для более молодых пульсаров ($\log B^* = 12.89$) оказываются в 2 раза выше, чем для более старых ($\log B^* = 12.59$). Такое же соотношение наблюдается и для медианных значений ($8 \cdot 10^{12}$ и $4 \cdot 10^{12}$ Гс, соответственно).

Дискуссия. Выводы.

1. В рамках предположения о том, что замедление вращения центральных звёзд в радиопулсарах вызвано их магнитодипольным излучением, проведена коррекция значений магнитной индукции, приведенных в каталоге ATNF. Для этой цели учтены углы между магнитным моментом и осью вращения нейтронной звезды.

2. Построена зависимость полученных величин магнитной индукции от кинематического возраста пульсара. Показано, что с возрастом магнитное поле пульсаров ослабевает с характерным временем порядка миллиона лет.

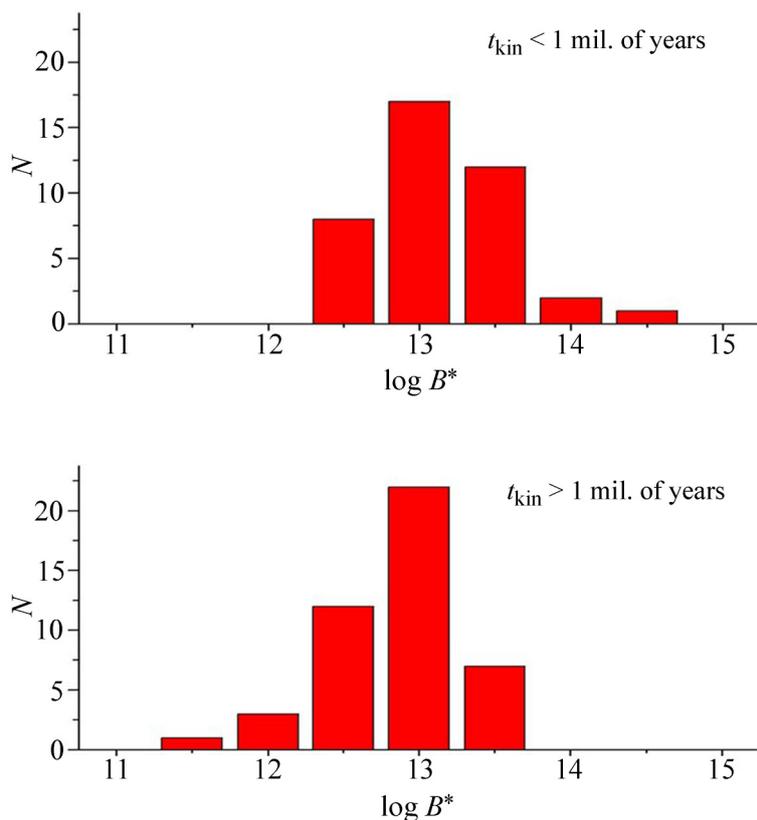


Рис. 2: Распределение магнитных полей в пульсарах с t_{kin} меньше и больше миллиона лет.

3. Использование модели магнитодипольного торможения оправдано тем, что оно базируется на двух ясных предположениях: о дипольном магнитном поле центральной нейтронной звезды и общепринятом значении момента инерции её $I = 10^{45} \text{ г}\cdot\text{см}^2$.

Из работы [9] известно, что магнитосфера пульсара заполнена плазмой. Однако пока, по нашему мнению, нет исследований, которые были бы выполнены на не подлежащих сомнениям теоретических основаниях и привели бы к “правильным” значениям магнитных индукций для основной массы пульсаров. Ниже мы упомянем усилия, предпринятые в этом направлении.

Рассматривались другие механизмы замедления вращения пульсаров: токовые потери на поверхности нейтронной звезды [10] и в её магнитосфере [11], влияние околопульсарных дисков [12, 13], процессы внутри нейтронных звёзд [14, 15], унос углового момента релятивистскими частицами (пульсарный ветер) [16].

Начиная с работ А. Спитковского с соавторами [17, 18], для построения моделей магнитосферы пульсаров и анализа замедления их вращения используются численные

расчёты на основе магнитогидродинамических (МГД) кодов. Принимаемые при этом предположения и упрощения, а также трудности МГД-вычислений подробно описаны в работе Петри [19].

Основным недостатком численных МГД-моделей, на наш взгляд, является их ограничение рассмотрением миллисекундных пульсаров с $P \leq 10$ мс. Такие пульсары в нашей работе не входят в исследованную выборку. Экстраполяция же результатов, полученных на основе упомянутых численных расчётов, на долгопериодические источники представляется необоснованной. Кроме того, в полученные выражения для потерь углового момента в последней известной нам версии МГД-расчётов [20] входят коэффициенты (k_0, k_1, k_2) , значения которых хотя и оказываются порядка 1, но точные значения их требуют более детального анализа. В работе [10] при определении токовых потерь используются безразмерный ток i и множитель f , определяющий структуру магнитосферы. Оба эти фактора зависят от угла наклона вектора магнитного момента к оси вращения (β). Необходимо учитывать эти зависимости, но они в явном виде пока не получены. Выражения для оценки магнитных полей в рамках этой теории представляют собой функции от P , dP/dt и β , но сильно отличаются от зависимостей, использованных в каталоге ATNF. Для лучшего понимания эволюции радиопульсаров было бы чрезвычайно важно составить каталог их магнитных полей на основе теории [10]. Другие модели торможения радиопульсаров разработаны ещё слабее и ждут своего детального анализа.

При появлении каталогов магнитных полей радиопульсаров, аналогичных каталогу ATNF, но полученных в рамках механизмов замедления вращения пульсаров, не связанных с магнитодипольным излучением, необходимо выполнить анализ эволюции этих полей с возрастом, такой же, как и проведенный в предлагаемой нами работе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Bhattacharya, R. A. M. J. Wijers, J. W. Hartman, F. Verbunt, *Astron. and Astrophys.* **254**, 198 (1992).
- [2] A. P. Igoshev, S. B. Popov, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444**(2), 1066 (2014). DOI: 10.1093/mnras/stu1496.
- [3] R. D. Blandford, J. H. Applegate, L. Hernquist, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **204**, 1025 (1983). DOI: 10.1093/mnras/204.4.1025.
- [4] D. M. Sedrakyan, A. G. Movsisyan, *Astrophysics* **24**(2), 163 (1986).

- [5] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs, *The Astronomical Journal* **129**(4), 1993 (2005). DOI: 10.1086/428488.
- [6] I. Malov, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **468**(3), 2713 (2017). DOI: 10.1093/mnras/stx619.
- [7] E. B. Nikitina, I. F. Malov, *Astronomy Reports* **61**(7), 591 (2017). DOI: 10.1134/S1063772917070058.
- [8] И. Ф. Малов, О. И. Малов, *Астрономический Журнал* **100**(2), 206 (2023). DOI: 10.31857/S0004629923020068.
- [9] P. Goldreich, W. H. Julian, *Astrophysical Journal* **157**, 869 (1969).
- [10] V. S. Beskin, A. V. Gurevich, Ya. N. Istomin, *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **58**(2), 235 (1983).
- [11] O. C. De Jager, H. I. Nel, *Astronomy and Astrophysics* **190**, 87 (1988).
- [12] F. C. Michel, A. J. Dessler, *Astrophysical Journal* **251**(1), 654 (1981).
- [13] G. V. Ustyugova, A. V. Koldoba, M. M. Romanova, R. Lovelace, *The Astrophysical Journal* **646**(1), 304 (2006). DOI: 10.1086/503379.
- [14] J.-H. Huang, R. E. Lingenfelter, Q.-H. Peng, K.-L. Huang, *Astronomy and Astrophysics* **113**, 9 (1982).
- [15] Z.-G. Deng, J.-H. Huang, X.-Y. Xia, *Astrophysics and Space Science* **129**(1), 53 (1987).
- [16] A. K. Harding, L. Contopoulos, D. Kazanas, *The Astrophysical Journal* **525**(2), L125 (1999). DOI: 10.1086/312339.
- [17] L. Contopoulos, A. Spitkovsky, *The Astrophysical Journal* **643**(2), 1139 (2006). DOI: 10.1086/501161.
- [18] A. Spitkovsky, *The Astrophysical Journal* **648**(1), L51 (2006). DOI: 10.1086/507518.
- [19] J. Petri, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **424**(1), 605 (2012). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21238.x.
- [20] A. Philippov, A. Tchekhovskoy, J. G. Li, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **441**(3), 1879 (2014). DOI: 10.1093/mnras/stu591.

Поступила в редакцию 2 ноября 2022 г.

После доработки 5 апреля 2023 г.

Принята к публикации 6 апреля 2023 г.