

## ОБ ЭВОЛЮЦИИ УГЛОВ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ И ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ В РАДИОПУЛЬСАРАХ

© 2023 г. И. Ф. Малов\*, О. И. Малов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича, Астрокосмический центр, Пушино, Россия

\*E-mail: malov@praо.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Тремя методами вычислены значения углов  $\beta$  между магнитным моментом и осью вращения центральных нейтронных звезд для 307 известных радиопульсаров. Нет явной статистической зависимости вычисленных углов  $\beta$  от кинематического возраста пульсаров. Из этого следует, что либо указанный угол не изменяется заметно с возрастом пульсара, либо пульсары рождаются с произвольным углом наклона.

*Ключевые слова:* нейтронные звезды, радиопульсары, углы наклона

DOI: 10.31857/S0004629923020068, EDN: CKGQIE

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение всех лет исследования пульсаров одним из фундаментальных оставался вопрос о том, как изменяется угол  $\beta$  между магнитным моментом и осью вращения этих объектов. От решения этого вопроса зависят суждения об изменении структуры магнитосферы, о протекающих в ней процессах и механизмах замедления вращения центральной нейтронной звезды. На первых этапах полагали, что угол  $\beta$  экспоненциально уменьшается со временем (см., напр., [1]). В модели Бескина и др. [2], напротив, этот угол стремился к  $90^\circ$ , т.е. все пульсары эволюционировали к ортогональным ротаторам. Однако магнитогидродинамические расчеты при определенных предположениях показали [3], что  $\beta$  уменьшается со временем обратно пропорционально квадратному корню из возраста объекта ( $\beta \propto t^{-1/2}$ ).

Обнаружить изменение  $\beta$  в конкретном пульсаре на основе кратковременных наблюдений очень проблематично. Поэтому необходимо проанализировать, как зависят значения этого угла от возраста для некоторой совокупности исследуемых источников. Этой задаче и посвящена настоящая работа.

### 2. УГЛЫ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ И ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

В распространенной модели магнитосферы пульсара (рис. 1) [4], используя сферическую тригонометрию, можно получить следующее уравнение:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \zeta + \sin \beta \sin \zeta \cos \frac{\Phi_p}{2}. \quad (1)$$

В выражении (1)  $\theta$  – угловой радиус конуса излучения, который в модели полярной шапки отождествляется с конусом открытых силовых линий дипольного магнитного поля,  $\beta$  и  $\zeta$  – углы между осью вращения нейтронной звезды  $\Omega$  и осью конуса излучения  $\mu$  и лучом зрения наблюдателя  $L$  соответственно,  $\Phi_p$  – угловая полуширина наблюдаемого импульса.

Для вычисления трех углов ( $\theta$ ,  $\beta$  и  $\zeta$ ) необходимо составить еще два описывающих их уравнения. Самую простую оценку угла  $\beta$  можно получить, предположив, что луч зрения проходит через центр конуса излучения, т.е.

$$\beta = \zeta. \quad (2)$$

В этом случае из (1) следует, что

$$\sin \beta = \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\Phi_p/2)}. \quad (3)$$

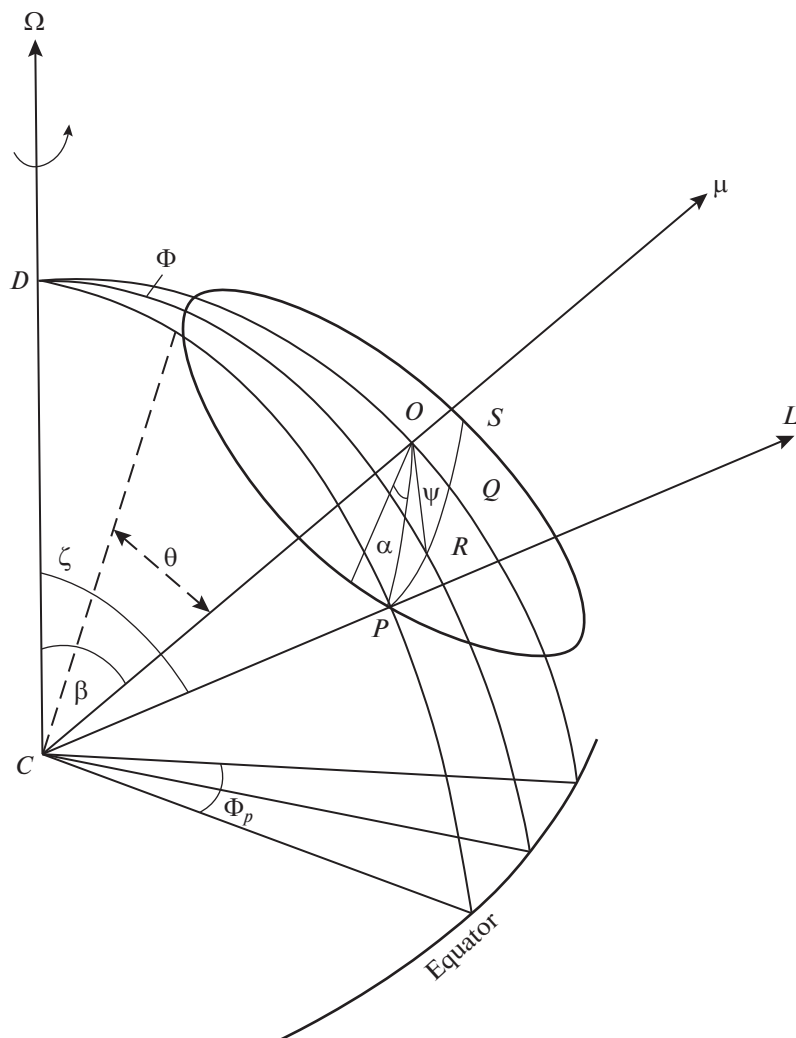


Рис. 1. Геометрия конуса излучения в модели полярной шапки.

В дальнейшем будем полагать, что

$$\Phi_p = W_{10}/2, \tag{4}$$

где  $W_{10}$  – угловая ширина наблюдаемого импульса по уровню 10%.

Будем также считать, что единственной причиной, вызывающей наблюдаемое уширение импульса по сравнению с реальным размером конуса излучения  $\theta$ , является приближение конуса к оси вращения пульсара, т.е. уменьшение угла  $\beta$ . Тогда реальный размер конуса соответствует  $\beta = 90^\circ$ . При этом видимая ширина для конкретного пульсара будет минимальной. Построив зависимость  $W_{10}(P)$  и проведя на ней нижнюю границу  $(W_{10})_{\min}(P)$ , положим

$$\theta = \frac{(W_{10})_{\min}}{2}. \tag{5}$$

Окончательно для оценки угла  $\beta$  получим выражение

$$\sin \beta = \frac{\sin \frac{(W_{10})_{\min}}{4}}{\sin \frac{(W_{10})}{4}}. \tag{6}$$

Используя значения  $W_{10}$  из работы [5] (см. табл. 1), построим зависимость, приведенную на рис. 2. При построении учитывалось соотношение

$$W^\circ = 360^\circ \frac{W}{P}, \tag{7}$$

чтобы представить ширину импульса в градусах.

В рамках той же модели можно записать еще одно уравнение, связывающее различные углы в пульсаре:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \sin \phi}{\sin \zeta \cos \beta - \cos \zeta \sin \beta \cos \phi}. \tag{8}$$

**Таблица 1.** Углы  $\beta$  между магнитным моментом и осью вращения в пульсарах, вычисленные согласно выражениям (6), (9) и (13)

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{\text{kin}}$ , год
J0034–0721	0.942950995	39.9		8.5			8.5	1.80E+07
J0108–1431	0.807564614	33.4	1	10.8	8.7	8	8	1.67E+06
J0134–2937	0.136961611	31.5		22.5			22.5	1.49E+07
J0151–0635	1.464664549	27.6		10.5			10.5	2.21E+07
J0152–1637	0.832741613	11.3		33.1			33.1	8.88E+06
J0206–4028	0.63055126	11.4		36.8			36.8	9.94E+06
J0211–8159	1.077332701	24.1		13.5			13.5	
J0255–5304	0.447708473	9.6		53.5			53.5	9.24E+06
J0304+1932	1.387584446	19	16.7	15.6		41.9	41.9	4.26E+06
J0401–7608	0.545254187	17.8		23.9			23.9	
J0448–2749	0.450448331	17.6	0.58	26.1	6.4	6.4	6.4	
J0450–1248	0.438014149	26.2		17.4			17.4	
J0452–1759	0.548939223	24.1		17.4			17.4	1.26E+07
J0459–0210	1.133076124	15.9		20.3			20.3	
J0520–2553	0.241642176	23.8		24.2			24.2	
J0525+1115	0.354437595	21.1		23.6			23.6	2.16E+06
J0533+0402	0.963017825	14.6	36.8	23.6			23.6	
J0536–7543	1.245856133	30.3	13.8	10.1		26.5	26.5	2.29E+06
J0540–7125	1.286014595	19.6		15.6			15.6	
J0543+2329	0.245983683	27.7	0.85	20.5	12.3	11.8	11.8	7.71E+05
J0601–0527	0.39596917	21.9		21.8			21.8	4.02E+06
J0614+2229	0.334959966	14.8	5.2	35.6		70.7	70.7	9.56E+06
J0624–0424	1.039076476	24.7		13.3			13.3	
J0630–2834	1.244418596	34.6	3.6	8.9	26.9	16.7	16.7	1.65E+06
J0636–4549	1.984597367	7.1		39.2			39.2	
J0656–2228	1.224754415	9.1		35.9			35.9	
J0656–5449	0.183156899	20		32.6			32.6	
J0659+1414	0.384928623	28.1	1.7	17	20.6	18.3	18.3	9.40E+05
J0709–5923	0.485268384	8.5		61.9			61.9	
J0719–2545	0.974724731	11.1		31.7			31.7	
J0729–1448	0.251658714	31.5	4.7	17.8		43.6	43.6	
J0729–1836	0.510160345	17.6		24.8			24.8	9.40E+04
J0738–4042	0.374920736	49.9		9.6			9.6	2.44E+06
J0742–2822	0.166762292	17.9	2.2	38.6	40.4	37.1	37.1	4.23E+05
J0745–5353	0.214838506	50.3	3.2	11.8	57.9	27.3	32.3	9.19E+05
J0749–4247	1.095452158	15.1		21.6			21.6	
J0809–4753	0.547202119	23		18.2			18.2	1.67E+06
J0820–1350	1.238129544	10.4	18.4	31			31	1.41E+06
J0820–3921	1.073566584	36.6		8.9			8.9	
J0821–4221	0.396728235	22.7		21			21	
J0837+0610	1.273768292	9.6		33.4			33.4	2.53E+06
J0837–4135	0.751625423	8.6		48			48	1.03E+05
J0838–2621	0.308580662	39.7		13			13	
J0843–5022	0.208955693	50		12			12	

Таблица 1. Продолжение

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{kin}$ , год
J0846–3533	1.116098409	24.5		13.1			13.1	2.55E+05
J0849–6322	0.367953256	166.3		3.1			3.1	
J0855–3331	1.267535703	10.6		29.8			29.8	
J0856–6137	0.962510611	18	6	19	57.2	36.6	36.6	
J0857–4424	0.326786221	18.7		27.8			27.8	
J0901–4624	0.441995131	29.3	5.5	15.5		36.8	36.8	
J0902–6325	0.660313372	20.7		18.9			18.9	
J0905–4536	0.988280597	83.1		4.1			4.1	
J0907–5157	0.253557725	34.1	2.2	16.4	32.3	25.6	25.6	
J0922+0638	0.430627099	20.4		22.7			22.7	1.96E+06
J0924–5302	0.746338052	12.1		32.2			32.2	
J0924–5814	0.73950547	38.9	1.83	9.6	16.7	13.2	13.2	
J0932–3217	1.931626743	7.6		36.2			36.2	
J0934–5249	1.444777141	10.5		28.7			28.7	
J0941–5244	0.658557614	18		21.9			21.9	
J0942–5552	0.664388681	26.6		14.6			14.6	
J0942–5657	0.808164371	7.1	18.6	61			61	8.89E+05
J0953+0755	0.253065165	29.3		19.1			19.1	6.81E+06
J0954–5430	0.472850559	15.2	10.6	30			30	
J0955–5304	0.862122011	13.8		26.2			26.2	
J1001–5507	1.436630854	7.8		40.4			40.4	
J1003–4747	0.307074219	24.6		21.3			21.3	
J1015–5719	0.139881678	146.7		5			5	
J1016–5345	0.769585867	8		52.9			52.9	
J1017–5621	0.50346262	34.3	29.2	12.5		37.6	37.6	
J1020–6026	0.14048129	66.6		10.4			10.4	
J1032–5911	0.464212627	13.2		35.5			35.5	
J1036–4926	0.510369403	15.5		28.4			28.4	
J1038–5831	0.661992094	12		34.1			34.1	
J1041–1942	1.386368075	18.9	14.6	15.7		41.2	41.2	1.15E+07
J1043–6116	0.288605287	17.5		31.5			31.5	
J1046–5813	0.369428088	15.6		32.3			32.3	
J1047–3032	0.330328052	30.5		16.6			16.6	
J1047–6709	0.198451451	38.1	1.8	16	29.5	23.6	23.6	
J1048–5832	0.123725343	28.2	5.849	26.3			26.3	
J1049–5833	2.202325077	9.6	7.2	26.5	45.1	36.7	36.7	
J1055–6022	0.947558409	17.6	4.8	19.5	42.6	33.1	33.1	
J1056–6258	0.422450532	33.2	2.1	13.8	24.7	19.8	19.8	
J1057–5226	0.19711469	31	1.4	19.8	22.6	20.3	20.9	8.19E+05
J1059–5742	1.18500262	10.3		31.6			31.6	
J1110–5637	0.558254373	18.1	7.9	23.3		59.7	59.7	
J1112–6613	0.33421384	32.3		15.6			15.6	
J1112–6926	0.820487642	17.6		20.7			20.7	
J1114–6100	0.88085825	24.5		14.3			14.3	
J1115–6052	0.259779371	13.9	2.7	43.2	40.7	38.8	38.6	

Таблица 1. Продолжение

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{kin}$ , ГОД
J1116–4122	0.943157883	9.2		40			40	1.28E+07
J1119–6127	0.407962984	42.4	71.6	11	18.9	15.1	15.1	
J1123–4844	0.244838478	25		22.9			22.9	
J1123–6259	0.271437312	19.9	2.58	28	38.2	33.6	33.6	
J1126–6942	0.579418752	15.5		27			27	
J1136+1551	1.187913066	12.7		25.3			25.3	7.30E+05
J1137–6700	0.556216056	88		4.8			4.8	
J1141–3107	0.538431789	21.4		19.8			19.8	
J1141–3322	0.291467801	8.6	8	19.1		56.9	56.9	
J1143–5158	0.675646047	12.8		31.4			31.4	
J1146–6030	0.273374509	19.8		28.1			28.1	
J1157–6224	0.400525717	42.2		11.1			11.1	
J1204–6843	0.308860862	15.2		36			36	
J1224–6407	0.216479798	15.1		42.1			42.1	3.59E+05
J1225–5556	1.018452868	11.3		30.4			30.4	
J1225–6408	0.419617792	18.9		24.9			24.9	
J1231–4609	0.877239078	22.8	15.9	15.4		43.5	43.5	
J1236–5033	0.294759771	20.8		25.9			25.9	
J1240–4124	0.512242093	14.1		31.7			31.7	
J1243–6423	0.388485127	10.2		53.3			53.3	
J1251–7407	0.327057738	15.4	10	34.4			34.4	
J1253–5820	0.255496327	18.3	6.2	31.4			31.4	8.40E+05
J1305–6455	0.57165179	31.5		13			13	
J1306–6617	0.4730278	44.9		9.8			9.8	
J1319–6056	0.284352672	19		28.9			28.9	
J1320–3512	0.458488407	70.7		6.3			6.3	
J1320–5359	0.279737683	21.9	6.1	25		69.3	69.3	8.82E+05
J1326–5859	0.477993613	17.3		25.9			25.9	
J1327–6222	0.529929187	12.9		34.4			34.4	
J1327–6301	0.196479945	55	1.3	11.1	20.9	16.2	16.2	
J1327–6400	0.280677974	153.9		3.7			3.7	
J1333–4449	0.345602949	10.1		57.6			57.6	
J1339–4712	0.137054658	12.9		69			69	
J1340–6456	0.378622066	24.7		19.5			19.5	
J1341–6220	0.193339746	76.3		8.1			8.1	
J1349–6130	0.259364764	19.4	2.65	29.3	40.4	35.4	35.4	
J1356–5521	0.507379567	22.7		19.1			19.1	
J1357–6429	0.166108328	67.2	1.1	9.7	18.9	14.3	14.3	
J1359–6038	0.127508466	20.9	3	36.2	80.8	59.2	59.2	
J1403–7646	1.306197812	21.5		14.1			14.1	
J1410–7404	0.278729444	4.5					0	
J1412–6145	0.315258433	20.6		25.5			25.5	
J1413–6141	0.28562462	71.8		7.4			7.4	
J1415–6621	0.392478973	15.6		31.5			31.5	
J1427–4158	0.586485556	14.7		28.6			28.6	

Таблица 1. Продолжение

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{\text{kin}}$ , год
J1428–5530	0.57029241	15.8		26.7			26.7	
J1430–6623	0.785443345	12.8		29.4			29.4	7.32E+05
J1435–5954	0.472996377	25.1	2.3	17.6	25.9	22.1	22.1	
J1443–5122	0.732061265	57.5	2.6	6.5	23.8	13	13	
J1453–6413	0.179486804	19.5		34			34	8.45E+05
J1456–6843	0.263376907	39.6		13.8			13.8	1.05E+06
J1507–4352	0.2867585	23.9	7.7	22.6		72.2	72.2	
J1507–6640	0.355656301	21.3		23.4			23.4	
J1512–5759	0.128698573	44.8		16			16	
J1513–5908	0.151581943	95	0.8	7.2	14.2	10.3	10.3	
J1514–4834	0.454840333	18.2		25.1			25.1	
J1517–4356	0.650836872	14.4		28			28	
J1522–5829	0.395354482	22.8		20.9			20.9	
J1524–5625	0.078218549	76	1.7	11.4	42.5	25.2	25.2	
J1524–5706	1.116174457	13.9	11.1	23.5		59.6	59.6	
J1528–4109	0.526556139	12.3	7.4	36.4			36.4	
J1531–5610	0.084206064	47	1.5	17.9	34.5	27.4	27.4	
J1534–5334	1.368882243	17.4		17.2			17.2	3.29E+05
J1534–5405	0.289688895	26.1		20.5			20.5	
J1535–4114	0.432866134	18.3	7	25.4		65.6	65.6	
J1536–3602	1.319759042	26.7		11.2			11.2	
J1539–5626	0.243395151	25.1		22.8			22.8	6.78E+04
J1542–5034	0.599248003	9		50.6			50.6	
J1543–5459	0.377137778	35.3		13.6			13.6	
J1548–5607	0.170937956	40		16.1			16.1	
J1557–4258	0.329186858	24.1		21.2			21.2	3.87E+06
J1559–4438	0.257056098	19.6		29.1			29.1	2.44E+06
J1600–5044	0.1926049	20.6		31.1			31.1	5.95E+05
J1600–5751	0.194455894	48.1		12.8			12.8	
J1602–5100	0.864286208	12.5		29.1			29.1	
J1603–5657	0.496077113	9.4	19.4	52.3			52.3	
J1604–4909	0.327418522	14.3		37.5			37.5	8.26E+05
J1605–5257	0.658013413	43.2		9			9	
J1607–0032	0.421816234	15.6		30.5			30.5	4.44E+06
J1609–1930	1.557917248	6.2		52.1			52.1	
J1612–2408	0.923833711	12.4		28.6			28.6	
J1614–3937	0.407292274	26.5		17.7			17.7	
J1614–5048	0.231693836	57.5		10			10	
J1615–5537	0.791525716	10.5		36.9			36.9	
J1617–5055	0.069356847		0.1		2.1	2	2	
J1633–5015	0.352145404	19.4		25.9			25.9	
J1636–4440	0.206648509	46.7	3	12.9	52.8	38.4	38.4	
J1641–2347	1.09100843		0.19		1.4	1.4	1.4	
J1643–4505	0.237390393	28.8		19.9			19.9	
J1644–4559	0.455078202	10.5		47			47	

Таблица 1. Продолжение

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{\text{kin}}$ , год
J1645–0317	0.387689698	7.4						6.24E+06
J1646–4346	0.231603329	108.8	71.7	5.4	25.9	11.6	11.6	
J1646–6831	1.785613305	22.6		11.9			11.9	
J1650–1654	1.749551746	14.8		18.4			18.4	5.27E+06
J1650–4502	0.380869799	18	0.75	27.3	9	8.8	8.8	
J1651–4246	0.844080632	70.4	3.8	5.1	34.3	11.8	11.8	
J1651–7642	1.75531108	21.5	6.2	12.6	42.2	24.9	24.9	
J1652–1400	0.305447058	27.2		19.2			19.2	
J1653–3838	0.305037319	17.7		30.3			30.3	
J1654–2713	0.791822442	14.5		25.6			25.6	
J1655–3048	0.542935874	72.9		5.8			5.8	
J1700–3312	1.358307011	13.3	17	22.8		67.9	67.9	
J1701–3726	2.454618043	15.4		15.6			15.6	
J1701–4533	0.322908567	39	6.7	13		35.3	35.3	
J1702–4128	0.182135803	85	2.3	7.5	40.7	17.3	17.3	
J1702–4310	0.240523865	34.4	1.2	16.5	17.2	15.4	15.4	
J1703–3241	1.211785095	14.9	25.5	21.2		69.2	69.2	
J1703–4851	1.396404984	14.4		20.7			20.7	
J1705–1906	0.298987427	17.7		30.6			30.6	7.06E+05
J1705–3950	0.318941483	38.4		13.3			13.3	
J1707–4053	0.581017696	48.9		8.3			8.3	
J1709–1640	0.653053971	12.4		32.9			32.9	1.47E+06
J1709–4429	0.102459246	45.7	2.3	17.1	55.9	35.4	35.4	
J1714–1054	0.696278743	39.9		9.5			9.5	
J1719–4006	0.189094493	24.7		25.6			25.6	
J1720–2933	0.620448365	19.1	5.1	21.1	59.2	39.6	39.6	
J1721–3532	0.280423859	88.6	0.7	6.1	9.5	7.4	7.4	
J1722–3207	0.477157948	15.1		30.1			30.1	3.21E+05
J1722–3632	0.399183352	33.4		14.1			14.1	
J1723–3659	0.202724899	62.2	3.1	9.7	57.2	23.4	23.4	
J1727–2739	1.293099946	30.4	3.6	9.9	26	17.3	17.3	
J1730–3350	0.139460211	56.8	5.1	12.3		34.8	34.8	
J1731–4744	0.829828785	13.9		26.4			26.4	2.57E+05
J1733–2228	0.871682833	34.8		10.1			10.1	
J1733–3716	0.337594902	58.7		8.5			8.5	1.85E+05
J1738–2955	0.443425288	50.3	6.3	9		23.4	23.4	
J1739+0612	0.234169036	25.4		22.9			22.9	
J1739–1313	1.215697614	5.3	15					
J1739–3023	0.114371728	34.6	2.8	21.9	74.5	45.5	45.5	
J1740+1000	0.154087174	45.9	1.3	14.6	23.9	19.1	19.1	
J1740–3015	0.606886624	7.1	8.7	76.8			76.8	
J1741–3927	0.512212355	16.9		26			26	1.16E+06
J1742–4616	0.412401047	33.2	1.4	14	16.3	14.5	14.5	
J1743–3150	2.414652315	10.1	12.5	24.2		51.6	51.6	
J1743–4212	0.306166988	18.8		28.3			28.3	

Таблица 1. Продолжение

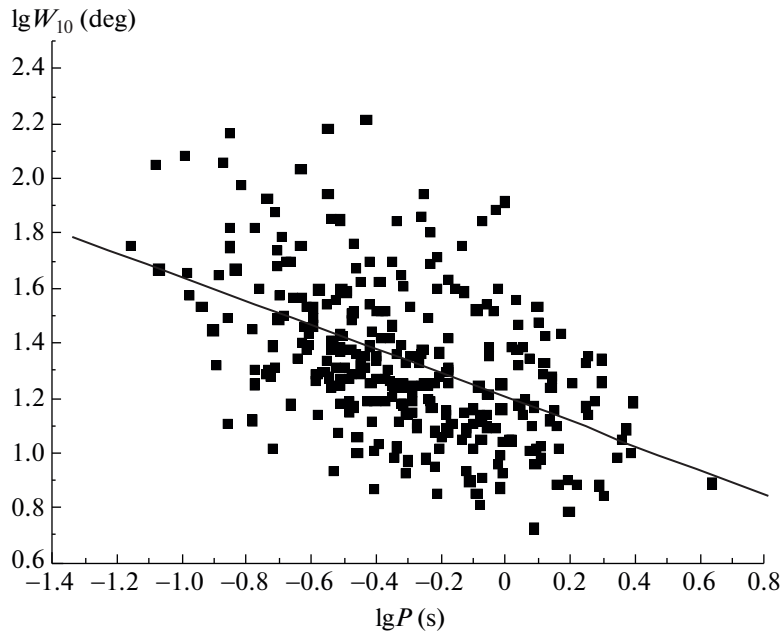
PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{\text{kin}}$ , год
J1745–3040	0.367433725	22.5		21.8			21.8	8.87E+04
J1749–3002	0.609873649	51.9		7.7			7.7	
J1750–3157	0.910362984	33.2		10.4			10.4	
J1751–4657	0.742353603	14.1		27.2			27.2	8.56E+05
J1752–2806	0.562557636	9.6		47.9			47.9	6.83E+05
J1757–2421	0.234105791	36.9		15.6			15.6	
J1801–2920	1.081910498	21		15.5			15.5	
J1803–2137	0.13366692	115.8	2.3	6.3	47.9	15.4	15.4	3.88E+04
J1805–0619	0.454650713	23		19.7			19.7	
J1806–2125	0.481824602	41.1		10.6			10.6	
J1807–0847	0.163727372	28.6		23.2			23.2	5.57E+06
J1808–0813	0.876044287	16.4		21.6			21.6	
J1808–3249	0.364912242	20.7		23.8			23.8	
J1809–1917	0.08275527	113.1	1.7	7.7	41.9	17.7	17.7	8.34E+03
J1811–0154	0.924944823	77.8		4.5			4.5	
J1812–1733	0.538340543		0.2		2.1	2	2	
J1816–5643	0.217922882	37.3		15.8			15.8	
J1817–3837	0.384486784	13.1		38.8			38.8	
J1820–0427	0.598081935	12		35.4			35.4	1.38E+06
J1820–1818	0.309904593	27		19.3			19.3	
J1822–2256	1.874268518	15.6	4	17.1	24.9	21.2	21.2	
J1824–1945	0.189337441	10.5						1.00E+06
J1825–1446	0.279198309		0.2		2.7	2.7	2.7	1.72E+05
J1826–1334	0.101486794	123.1	1.9	6.6	43.4	15.7	15.7	1.49E+05
J1829–1751	0.307132976	23.4		22.4			22.4	1.15E+05
J1830–1059	0.405073135	5.6	3.7		47.9	46.6	46.6	
J1832–0827	0.647325599	13.9		29.1			29.1	7.43E+04
J1832–1021	0.330354089	19.6	4	26.3	61.3	45.3	45.3	
J1835–0643	0.305830098	71.2		7.3			7.3	
J1835–0944	0.14534738	47.1	2.3	14.6	45.8	29.3	29.3	
J1835–1020	0.302449584	11.9	11.2	48.9			48.9	2.61E+05
J1835–1106	0.165917635	20.4	4.3	33.3			33.3	1.23E+05
J1837–0045	0.617036696	23.3		17.2			17.2	
J1837–1837	0.618357697	10.5	5.3	41.1	63.8	53.2	53.2	
J1841–0345	0.204068115	31.8	3.2	19.1	60	38.5	38.5	
J1841–0425	0.186148858	19.1	2.8	34.1	51.9	44.6	44.6	1.19E+05
J1841–7845	0.353602533	42.1		11.6			11.6	
J1842–0905	0.344646012	23		21.9			21.9	
J1843–0000	0.880334322	16.4	7.8	21.7		47.9	47.9	
J1845–0434	0.486750799	21.4		20.5			20.5	
J1845–0743	0.104694652	37.8		20.6			20.6	
J1847–0402	0.597808754	18.1		22.7			22.7	5.93E+05
J1848–0123	0.659432051	20.2		19.5			19.5	7.51E+03
J1848–1414	0.297769547	36.3		14.5			14.5	
J1848–1952	4.308189599	7.8		25.5			25.5	



Таблица 1. Окончание

PSRJ	$P$ , с	$W_{10}$ , °	$C$	$\beta_1$ , °	$\beta_2$ , °	$\beta_3$ , °	$\beta$ , °	$t_{\text{kin}}$ , год
J1850+1335	0.345581898	11.5	4.6	48.2	80.4	63.3	63.3	1.99E+06
J1852–2610	0.336337132	33.2		15.1			15.1	
J1853+0011	0.397889459	18.7	2.8	25.7	34.9	30.5	30.5	
J1900–2600	0.612209204	39.8		10.1			10.1	1.32E+06
J1901+0331	0.655450239	19.8		19.9			19.9	7.14E+04
J1901+0413	2.663079683	16.7	10.5	13.9	71.8	30.8	30.8	
J1901–0906	1.781927762	13.9		19.5			19.5	1.66E+06
J1901–1740	1.95685759	22.1		11.8			11.8	
J1903+0135	0.729306961	11.4		34.8			34.8	7.49E+05
J1904+0004	0.139524667	56.8		12.3			12.3	1.35E+06
J1904–1224	0.750808122	12.5		30.9			30.9	
J1905+0709	0.648040054	33.1	5	11.8	56	27.6	27.6	
J1909+0912	0.222949273	25.3	3.2	23.4	57.1	41.7	41.7	
J1913–0440	0.825935803	6.5		72.2			72.2	4.20E+06
J1913+0904	0.163245786		0.4		7.5	7.5	7.5	
J1919+0134	1.603983555	18.2		15.4			15.4	
J1932+1059	0.226518747	22.2	1.6	26.7	24.5	22.8	22.8	1.91E+05
J1932–3655	0.571420529	17.6		23.7			23.7	
J1941–2602	0.402857909	10.8		48.2			48.2	6.94E+06
J1943+0609	0.446226282	17.7		26			26	
J1943–1237	0.972428851	8.5		43.4			43.4	
J1944–1750	0.841157774	13.1		28.1			28.1	
J1946–1312	0.491865489	13.8		32.8			32.8	
J1946–2913	0.959447932	9.9		36			36	3.13E+06
J1949–2524	0.95761663	7.5		51.1			51.1	
J2005–0020	2.279661059	11.2	12.3	22.3		48.7	48.7	
J2006–0807	0.580871337	63.9		6.4			6.4	8.25E+06
J2046–0421	1.546938117	8		37.8			37.8	1.16E+07
J2048–1616	1.961572304	18.2	24.5	14.3		38.4	38.4	1.40E+06
J2053–7200	0.341336406	47.5	15.4	10.5		30.8	30.8	
J2108–3429	1.423101838	12.6		23.6			23.6	
J2116+1414	0.440153067	16.1		29			29	8.52E+06
J2155–3118	1.030002112	11.1	8.3	30.7		60.6	60.6	
J2248–0101	0.477233119	18.1		24.8			24.8	1.11E+07
J2324–6054	2.347488363	12.3	18.6	20		52.2	52.2	
J2330–2005	1.643622185	7.7		38.7			38.7	3.67E+06
J2346–0609	1.181463383	22.2	11.3	14.1		35.9	35.9	6.17E+06

Примечание.  $P$  – период пульсара,  $W_{10}$  – угловая ширина наблюдаемого импульса по уровню 10%.  $C = \frac{d\psi}{d\phi}_{\text{max}}$ ;  $\beta_1$  – минимальное значение угла между магнитным моментом и осью вращения согласно (6),  $\beta_2$  – максимальное значение угла  $\beta$  согласно (9),  $\beta_3$  – значение угла согласно (13),  $\beta$  – среднее значение угла, использованное для построения зависимостей на рис. 3;  $t_{\text{kin}}$  – кинематический возраст пульсара.



**Рис. 2.** Зависимость ширины импульса от периода пульсара. Линия, описывающая угловой размер конуса излучения для среднестатистического пульсара (17), получена методом наименьших квадратов согласно выражению (16).

В уравнении (8)  $\psi$  — позиционный угол линейной поляризации, отсчитываемый от центрального меридиана, а  $\phi$  — долгота относительно того же центра. Поскольку излучение, а следовательно, и значения позиционного угла, как правило, ограничены долготами точек в наблюдаемом импульсе, для дальнейших оценок достаточно использовать величину максимальной производной

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

приходящейся на долготу  $\phi = 0^\circ$ .

Следует отметить, что всегда  $(\zeta - \beta) < \theta$ , и, построив на рис. 2 статистическую зависимость  $\theta(P)$  по известным  $P$ , мы получим из (9) максимальное значение угла  $\beta_{\max}$ . С другой стороны, оценка этого угла из соотношения (6) — минимальное значение указанного угла  $\beta_{\min}$ , поскольку мы в этом случае связываем видимое увеличение ширины конуса излучения исключительно с приближением его к оси вращения пульсара. Из двух полученных значений мы можем найти разумную величину для дальнейшего анализа:

$$\langle \beta \rangle = \frac{\beta_{\max} + \beta_{\min}}{2}. \quad (10)$$

Если принять

$$C = \left. \frac{d\psi}{d\phi} \right|_{\max}, \quad B = \cos \theta(P), \quad D = \cos(W_{10}/2) \quad (11)$$

и использовать выражения (1) и (9), после преобразований получим уравнение для  $y = \cos \zeta$ :

$$C^2(1 - D)^2 y^4 + 2C(1 - D)y^3 + [1 + 2DC^2(1 - D)]y^2 + 2C(D - B^2)y + D^2C^2 - B^2(1 + C^2) = 0. \quad (12)$$

Определив из этого уравнения  $y$ , вычислим  $\beta$ , переписав выражение (9) в виде:

$$\beta = \frac{C(1 - y^2)^{1/2}}{1 + Cy}. \quad (13)$$

Эти значения, обозначенные как  $\beta_3$ , приведены для некоторых пульсаров в табл. 1.

Для нашей выборки нижняя граница на рис. 2 может быть описана уравнением

$$\lg W_{10}^\circ = (-0.37 \pm 0.03) \lg P [\text{sec}] + 0.76 \pm 0.02, \quad (14)$$

или

$$W_{10}^\circ = 5.75 P^{-0.37}, \quad (15)$$

что дает возможность использовать соотношение (6) и вычислить значения  $\beta$ , которые в табл. 1 обозначены как  $\beta_1$ .

Рисунок 2 позволяет провести методом наименьших квадратов прямую

$$\lg W_{10}^{\circ} = (-0.44 \pm 0.04) \lg P [\text{sec}] + 1.20 \pm 0.02, \quad (16)$$

описывающую угловой размер конуса излучения для среднестатистического пульсара:

$$\theta = \frac{W_{10}}{2} = 7.92^{\circ} P^{-0.44}. \quad (17)$$

В отличие от соотношения (15) здесь учитываются как приближение конуса излучения к оси вращения пульсара, так и возможность прохождения луча зрения на произвольном расстоянии от центра конуса. Уравнение (17) позволяет дать верхнюю оценку угла  $\beta_2$ , используя соотношение (9), или найти решение уравнения (12) и получить величину  $\beta_3$ . Значения углов  $\beta$ , вычисленных разными методами, вместе с их средними величинами приведены в табл. 1.

### 3. ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ПУЛЬСАРА

Возраст пульсара можно оценить несколькими способами. Наиболее часто используемая оценка — характеристический возраст

$$\tau = \frac{P}{2dP/dt}. \quad (18)$$

Он вычисляется в предположениях, что (1) единственным механизмом замедления вращения нейтронных звезд является магнитодипольное излучение, (2) начальный период вращения  $P_0$  образовавшейся нейтронной звезды значительно меньше ее современного периода  $P$  и (3) скорость его увеличения  $dP/dt$  остается неизменной в течение жизни звезды. В настоящее время существуют аргументы в пользу рождения пульсаров с произвольными периодами. Так, в работе [6] получены оценки начальных периодов пульсаров, находящихся в настоящий момент в остатках сверхновых. Оказалось, что нет преобладания миллисекундных периодов, а наблюдается широкое распределение от 13 до 1300 мс с медианным значением 80 мс. Поэтому характеристический возраст пульсара, как правило, значительно больше его реального возраста. Однако это — единственная оценка, которая может быть получена для всех известных пульсаров.

Существенно ближе к реальному возрасту может быть кинематический возраст

$$t_{\text{kin}} = \frac{z}{V}, \quad (19)$$

вычисляемый по времени удаления пульсара от диска Галактики в предположении о том, что пульсары образуются в галактической плоскости и что при удалении от нее скорость пульсара не

изменяется. Это предположение можно считать вполне разумным, поскольку из 3319 объектов из каталога ATNF (версия 1.67) только 189 (меньше 6%) находятся в шаровых скоплениях в сферической составляющей Галактики. Высота  $z$  над плоскостью определяется из наблюдений. Для более 200 пульсаров измерены их скорости в картинной плоскости  $V_{\text{trans}}$ . Реальное направление движения пульсаров в пространстве, к сожалению, измерить нельзя, так как отсутствие спектральных линий в их спектрах не позволяет определить радиальную составляющую скорости. Считая, что движение пульсара изотропно, т.е., что компоненты его скорости одинаковы по трем координатам, можно положить

$$V = \frac{V_{\text{trans}}}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

и получить оценку кинематического возраста.

Косвенные оценки могут быть выполнены по измеренным светимостям пульсаров. Во всех существующих моделях считается, что с возрастом пульсар затухает и приближается к линии смерти, а пересекая ее, перестает быть видимым. Поэтому естественно предположить, что излучаемая им в настоящее время мощность может служить мериллом его возраста: чем слабее излучение пульсара, тем он старше. Для вычисления полной излучаемой мощности  $L$  [эрг/с] необходимо хорошо знать спектр источника [7], который, однако, известен для ограниченного числа пульсаров. Поэтому в каталогах и в различных работах используются “монохроматические” светимости, вычисляемые умножением плотности потока на фиксированной частоте (как правило, на 400 или 1400 МГц) на квадрат расстояния,

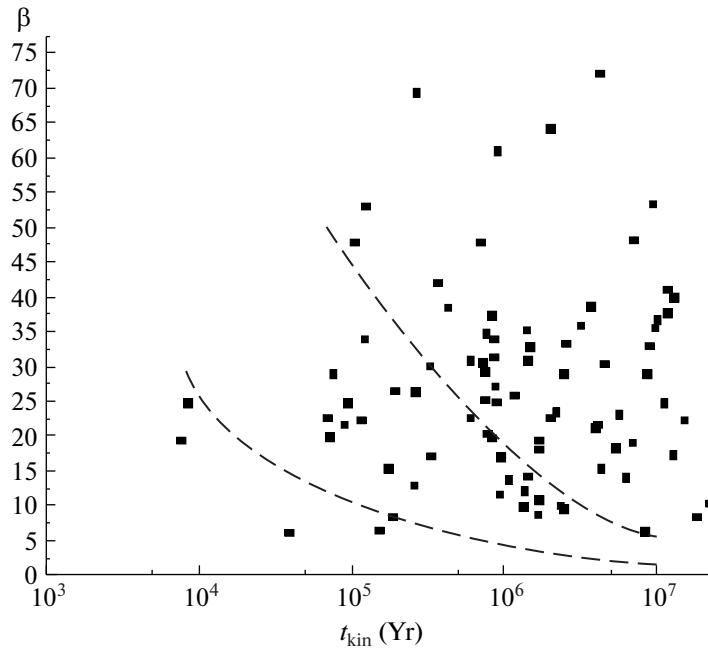
$$R_{\text{lum}} = S_{\nu} d^2, \quad (21)$$

и измеряемые в условных единицах мЯн кпк<sup>2</sup>. Полученная в [7] статистическая зависимость между  $L$  и  $R_{\text{lum}}$  показывает высокое значение корреляции между этими величинами и дает возможность вычислить по каталожным светимостям физическую излучаемую мощность, которую можно использовать для оценки возраста пульсара.

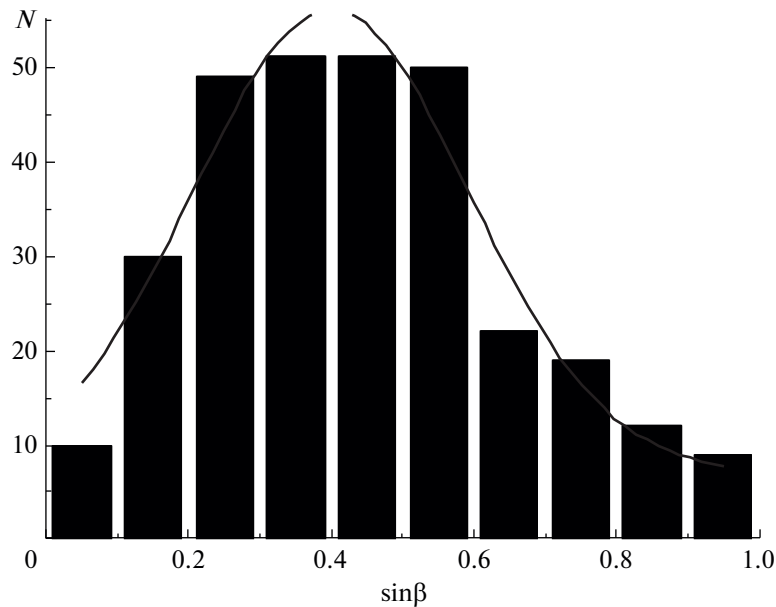
Существует и более надежный способ суждения о возрасте, но он пригоден только для пульсаров, находящихся в остатках сверхновых (SNR). Очевидно, что генетически связанный с остатком пульсар не может быть старше этого остатка, а возраст SNR может быть оценен с хорошей точностью.

Каждый из указанных методов вычисления возраста по отдельности оказывается не столь надежным, но использование их в совокупности позволяет надеяться на получение достаточно близких к достоверности выводов.

Мы используем здесь для анализа значения кинематических возрастов.



**Рис. 3.** Углы наклона пульсаров исследуемой выборки и их кинематические возрасты. Штриховыми линиями показаны степенные зависимости  $\beta = \beta_0(t_0/t)^{1/2}$  для  $\beta_0 = 30^\circ$ ,  $t_0 = 10^4$  лет (нижняя кривая) и  $\beta_0 = 50^\circ$ ,  $t_0 = 10^5$  лет (верхняя кривая).



**Рис. 4.** Распределение синусов угла наклона для исследуемой выборки.

#### 4. ЭВОЛЮЦИЯ УГЛА НАКЛОНА МАГНИТНОГО МОМЕНТА К ОСИ ВРАЩЕНИЯ ПУЛЬСАРА

На рис. 3 приведена диаграмма  $\beta(t_{\text{kin}})$ . На ней штриховыми линиями показана степенная зависимость

$$\beta = \beta_0(t_0/t)^{1/2}, \quad (22)$$

которая рассматривалась как возможная эволюция угла  $\beta$  со временем в работе [8]. При построении принято  $\beta_0 = 30^\circ$ ,  $t_0 = 10^4$  лет (нижняя кривая) и  $\beta_0 = 50^\circ$ ,  $t_0 = 10^5$  лет (верхняя кривая). Наблюдаемое распределение углов на этой диаграмме не согласуется с этой возможностью. Наши результаты свидетельствуют скорее о посто-

янности угла  $\beta$  в среднем пульсаре. Независимость угла  $\beta$  от возраста пульсара может быть реализована при расщепленном монополярном магнитном поле [8]. При анализе этой диаграммы следует иметь в виду, что эволюция угла для отдельного пульсара может следовать и уравнению (22), но статистически такая зависимость не видна. Если допустить, что она смазывается индивидуальными треками, то необходимо предполагать образование нейтронных звезд при рождении с произвольными углами наклона  $\beta$ . Такое предположение согласуется с полученным в [6] распределением  $\beta$  для пульсаров в остатках сверхновых, которое с вероятностью 80% можно считать равномерным.

Распределение вычисленных нами углов для исследуемой выборки (рис. 4) также свидетельствует о широком их разнообразии при среднем значении  $\sin \beta \approx 0.5$ . Это распределение может быть описано широкой гауссианой:

$$N(\sin \beta) = 49 \exp \left[ - \left( \frac{\sin \beta - 0.40}{0.39} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

## 5. ДИСКУССИЯ. ВЫВОДЫ

1. С помощью трех разработанных нами ранее методов проведены вычисления углов между магнитным моментом и осью вращения центральной

нейтронной звезды для 307 известных радиопульсаров.

2. Для оценки возраста пульсара используются кинематические возрасты.

3. Вычисленные значения углов между магнитным моментом и осью вращения нейтронной звезды не выявляют статистической зависимости от времени. Из этого следует, что либо эти углы остаются постоянными в течение жизни пульсара, либо нейтронные звезды рождаются с произвольными углами наклона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. Davis and M. Goldstein*, *Astrophys. J.* **159**, L81 (1970).
2. *В. С. Бескин, А. В. Гуревич, Я. Н. Истомин*, *ЖЭТФ* **85** (2), 401 (1983).
3. *A. Philippov, A. Tchekhovskoy, and J. G. Li*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **441**, 1879 (2014).
4. *Р. Манчестер, Дж. Тейлор*, *Пульсары* (М: Мир, 1980).
5. *R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs*, *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
6. *I. F. Malov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **502**, 809 (2021).
7. *И. Ф. Малов, О. И. Малов*, *Астрон. журн.* **83** (6), 542 (2006).
8. *S. V. Bogovalov*, *Astron. and Astrophys.* **349**, 1017 (1999).