

УДК: 524.354.4

РАДИОСВЕТИМОСТИ ПУЛЬСАРОВ И МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Г.С.СААКЯН, Г.Ф.ХАЧАТРЯН

Поступила 9 апреля 1999

Используя формулы теории радиоизлучения пульсаров, по имеющимся наблюдательным данным вычислены радиосветимости пульсаров и магнитные моменты нейтронных звезд.

1. *Введение.* За прошедшие три десятка лет со времени открытия пульсаров накоплен богатый наблюдательный материал, который, как нам кажется, более чем достаточен для теоретического осмысления всего имеющегося комплекса явлений. Самым примечательным свойством пульсаров является их относительно мощное пучкообразное радиоизлучение. Оно содержит в себе необходимую информацию о месте и механизме его формирования. Важную информацию содержит в себе не только сама плотность потока энергии радиоизлучения, но и геометрическая структура, угловой раcтвор радиопучка, форма и микроструктура профилей радиопульсов, скорость удлинения периодов и т.д. В редких случаях в пульсарах наблюдаются также гамма, рентгеновское и оптическое излучения, которые, несомненно, вместе с радиоизлучением являются отдельными звеньями сложного комплекса явлений, обусловленного сильными магнитным и электрическим полями вращающейся нейтронной звезды. Здесь электрическое поле имеет вторичное происхождение: оно генерировано вращением намагниченной звезды.

Основные характеристики излучения (радио и другие) пульсаров очевидно определяются магнитным моментом μ и угловой скоростью вращения $2\pi/P$ (P – период пульсара) нейтронной звезды. Задачей теории является нахождение аналитических зависимостей для этих характеристик. Следовательно, в благоприятном случае теоретический анализ наблюдательных данных должен дать определенные сведения о параметрах (магнитный момент, момент инерции, масса и радиус) нейтронных звезд. Именно такую задачу ставим мы перед собой в этой и последующих двух работах.

2. *Магнитные моменты нейтронных звезд в пульсарах.* Первые важные шаги в деле создания теории пульсаров были сделаны в работах [1-5]. Позже систематические исследования по этой проблеме были проведены в серии работ [6-11]. В результате удалось распознать природу

механизма образования радиоизлучения, что позволило получить формулу для его радиосветимости в зависимости от параметров μ и P [6]:

$$L \approx 3.79 \cdot 10^{28} c_k^2 \mu_{30}^2 P^{-8/7} \text{ эрг/с.} \quad (1)$$

Здесь c_k - множитель порядка 0.1, дальнейшее уточнение значения которого можно проводить путем тщательного анализа данных наблюдений, с учетом значения известных параметров нейтронных звезд:

$$c_k = H/B \sin \varepsilon_m, \quad (2)$$

где $B \approx 2\mu/r^3$ - магнитная индукция в радиационном канале пульсара (канал открытых силовых линий), r - расстояние от центра звезды, $\varepsilon_m \approx c_k(\Omega r/c)^{1/2}$ - угол, составленный крайними открытыми силовыми линиями радиационного канала с осью магнитной симметрии, $\Omega = 2\pi/P$, наконец, H - напряженность магнитного поля, создаваемого протекающим через магнитную воронку электрическим током перед его захлопыванием [6]. Магнитной воронкой называется нижняя часть радиационного канала с высотой

$$h \approx 1.07 \cdot 10^7 c_h \mu_{30}^{1/3} P^{-4/21} \text{ см} \quad (3)$$

над магнитной шапкой, где происходит формирование радиоизлучения пульсара. Здесь c_h - коэффициент порядка единицы, учитывающий возможные неточности в определении высоты магнитной воронки. В (1) и (3) пропущен множитель c_α мало отличающийся от единицы [6], зависящий от угла наклона α вектора $\vec{\mu}$ относительно оси вращения звезды.

Формула (1) позволяет по измеренным потокам энергии радиоизлучения L_0 вычислить магнитные моменты нейтронных звезд в пульсарах. Полноценных сведений о спектральном распределении энергии радиоизлучения пульсаров не имеется. Но имеется богатый материал о потоках энергии на частоте $\nu = 400$ МГц (в полосе с шириной $\Delta\nu \approx \nu$). Выбор этой частоты обусловлен тем, что вблизи нее спектральное распределение энергии имеет максимум, по-видимому для большинства объектов. Имеются данные и о плотностях потоков энергии на частоте $\nu = 1400$ МГц, но они заметно меньше потоков на частоте $\nu = 400$ МГц. Полная радиосветимость пульсара равна

$$L_0 = S \Omega_{\text{рад}} d^2, \quad (4)$$

где S - плотность потока энергии, d - расстояние пульсара, $\Omega_{\text{рад}}$ - телесный угол пучка радиоизлучения [6]:

$$\Omega_{\text{рад}} \approx 1.59 \cdot 10^{-2} c_h \mu_{30}^{1/3} P^{-25/21}. \quad (5)$$

По порядку плотность потока энергии радиоизлучения пульсара равна

$$S \approx 4 \cdot 10^8 \cdot 10^{-26} c_0 S_{400} = 4 \cdot 10^{-18} c_0 S_{400}, \quad (6)$$

где S_{400} - рассчитанная на 1 Гц монохроматическая плотность потока энергии

на частоте 400 МГц, в единицах $\text{мЯн} = 10^{-26} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц}$, наконец c_0 - число порядка единицы, с учетом ошибки аппроксимации полного потока энергии радиоизлучения по монохроматическому потоку:

$$c_0 = \frac{\int S_\nu d\nu}{4 \cdot 10^{-18} S_{400}},$$

S_ν - монохроматическая плотность потока энергии. Подставляя (5) и (6) в (4), получаем следующую оценку для наблюдаемой радиосветимости пульсара

$$L_0 = 6.06 \cdot 10^{23} c_h c_0 S_{400} d_{\text{кпк}}^2 \mu_{30}^{1/3} P^{-25/21} \text{ эрг/с}, \quad (7)$$

где $d_{\text{кпк}}$ - расстояние пульсара в килопарсеках.

Приравнявая (1) к (7), получаем для магнитного момента нейтронной звезды пульсара:

$$\mu \approx 1.33 \cdot 10^{27} c_h^{3/20} c_0^{0.6} c_k^{-1.2} (S_{400} d_{\text{кпк}}^2)^{0.6} P^{-1/35} \text{ эрг/Гаусс}. \quad (8)$$

Здесь слабая зависимость магнитного момента от периода P пульсара кажущаяся, ибо плотность потока энергии S_{400} , по-видимому, также зависит от P . Теперь, исключая μ из (7), мы получаем удобную формулу для вычисления радиосветимостей пульсаров по измеряемым плотностям потоков и расстояниям:

$$L_0 = 6.66 \cdot 10^{22} c_h^{1.05} c_0^{1.2} c_k^{-0.4} (S_{400} d_{\text{кпк}}^2)^{1.2} P^{-1/2}. \quad (9)$$

Плотности потоков энергии S_{400} , периоды P и расстояния $d_{\text{кпк}}$ известных пульсаров приведены в обзоре [12]. Используя эти данные в табл.1 по формулам (5), (8) и (9) вычислены магнитные моменты, телесные углы пучков радиоизлучения и радиосветимости ряда пульсаров. В перспективе имеется реальная возможность оценить потоки энергии в диапазоне жесткого гамма излучения пульсаров, а также оценить моменты инерции и массы нейтронных звезд. Но для того чтобы судить о правдоподобности полученных результатов, необходимо иметь представление о тех ошибках, которые неизбежно сопровождают нас как при использовании формул теории, так и при получении необходимых экспериментальных данных. При определении радиосветимостей и магнитных моментов пульсаров существуют три основных канала ошибок. Так, ошибки на множитель порядка в 1.5 раза возможны в определении телесного угла радиоизлучения пульсара (5). Многие монохроматические плотности потока энергии S_{400} измерены один или несколько раз, поэтому они могут содержать ошибки на множитель в два и более раз. По понятным причинам ошибки на множитель примерно в 1.5 раза могут быть в измерениях расстояний пульсаров. В итоге, как можно усмотреть из (7) и (8), ошибки на множитель примерно в $2 + 3$ раза могут образоваться в определении μ и примерно в 5 раз в L_0 . Кроме указанных ошибок, некоторая неопределенность в значениях μ и L_0 существует по той

Таблица 1

РАДИОСВЕТИМОСТИ НЕКОТОРЫХ ПУЛЬСАРОВ И МАГНИТНЫЕ
МОМЕНТЫ ИХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

PSR B	P (с)	d (кпк)	S_{400} (мЯн)	μ_{50} (эрг/Гс)		$\Omega_{\text{рад}}$ $c_k = c_h = 1$	$\lg L_0$ (эрг/с)	
				$c_k = 0.1$	$c_k = 1$		$c_k = 0.1$	$c_k = 1$
				$c_h = 2$	$c_h = 1$		$c_h = 2$	$c_h = 1$
1937+21	0.00156	3.58	240	3.48	0.199	21.3	31.09	30.40
1821-24	0.00305	5.50	4.0	1.95	0.111	7.39	30.26	29.53
1257+12	0.00620	0.62	20	0.0920	0.00523	1.17	27.25	26.54
1620-26	0.01108	1.80	15	0.273	0.0155	0.841	27.91	27.19
0531+21	0.0334	2.00	950	3.63	0.206	0.536	29.61	28.89
0540-69	0.05038	49.4	0.7	2.21	0.126	0.280	28.98	28.26
1913+16	0.05903	7.14	4	0.616	0.035	0.151	27.78	27.07
0833-45	0.0893	0.50	5000	1.81	0.103	0.132	28.51	27.80
1930+22	0.1444	9.80	7	1.23	0.0699	0.0655	27.94	27.22
1556-57	0.1945	5.34	20	1.10	0.0628	0.0443	27.70	26.98
1635-45	0.2646	4.64	9	0.573	0.0326	0.0247	26.98	26.26
0609+37	0.2979	1.47	16	0.203	0.0115	0.0152	26.02	25.30
1503-66	0.3557	5.61	13	0.889	0.0506	0.0201	27.21	26.50
1154-62	0.4005	9.50	145	7.09	0.403	0.0348	28.96	28.24
2227+61	0.4431	5.56	18	1.06	0.0604	0.0165	27.26	26.55
1015-56	0.5035	11.8	15	2.33	0.133	0.0183	27.88	27.16
0904-74	0.5496	4.41	11	0.595	0.0338	0.0105	26.65	25.93
1911+11	0.6010	3.44	5	0.274	0.0156	0.00727	25.93	25.21
1714-34	0.6563	22.1	3.6	2.10	0.119	0.0129	27.65	26.94
2122+13	0.6941	2.08	4	0.131	0.00744	0.00478	25.22	24.50
0922-52	0.7463	5.61	12	0.830	0.0472	0.00813	26.78	26.07
1810+02	0.7939	5.80	4	0.446	0.0254	0.00614	26.21	25.50
1648-42	0.8441	7.21	100	3.98	0.227	0.0118	28.09	27.37
1309-55	0.8492	6.76	16	1.23	0.070	0.00794	27.06	26.35
1507-44	0.9439	4.22	14	0.642	0.0365	0.00564	26.45	25.73
1523-55	1.049	7.07	17	1.33	0.0760	0.00635	27.03	26.31
1905+39	1.236	1.71	25	0.305	0.0174	0.00319	25.67	24.95
1925+22	1.431	9.30	6	0.985	0.0560	0.00396	26.61	25.89
2303+30	1.576	3.93	30	0.918	0.0522	0.00345	26.50	25.79
1454-51	1.748	1.37	4	0.0771	0.00439	0.00134	24.30	23.58
2045-16	1.962	0.64	125	0.243	0.0138	0.00171	25.24	24.52
1738-08	2.043	3.54	10	0.416	0.0236	0.00195	25.68	24.97
1910+20	2.233	4.81	5	0.395	0.0225	0.00172	25.60	24.88
1753+52	2.391	3.56	4	0.241	0.0137	0.00134	25.13	24.41
1740-31	2.415	3.64	28.3	0.799	0.0454	0.00198	26.17	25.45
1612-29	2.478	1.66	5	0.110	0.00625	0.000993	24.43	23.72
1010-23	2.518	1.64	4	0.0948	0.00539	0.000927	24.30	23.58
0320+39	3.032	1.47	35	0.304	0.0173	0.00109	25.22	24.50
0525+21	3.746	2.27	60	0.703	0.0399	0.00113	25.84	25.12
1845-19	4.308	0.96	20	0.129	0.00733	0.000542	24.30	23.58
1951+11	5.094	5.56	13	0.816	0.0464	0.000821	25.82	25.10

Примечание к таблице: При вычислении μ , $\Omega_{\text{рад}}$ и L_0 принято $c_0 = 1$.

причине, что в их формулах имеются множители, содержащие постоянные c_0 и c_k , не имеющие характера ошибок в подлинном смысле этого понятия.

Ереванский государственный
университет, Армения

THE PULSARS RADIO RADIATION AND MAGNETIC MOMENTS OF NEUTRON STARS

G.S.SAHAKIAN, H.F.KHACHATRYAN

Using formulas of pulsars radio radiation theory and the observational data, radioluminities of pulsars and the magnetic moments some of neutron stars are calculated.

ЛИТЕРАТУРА

1. *P.Goldreich, W.H.Julian*, *Astrophys. J.*, **157**, 869, 1969.
2. *T.Gold*, *Nature*, **221**, 25, 1969.
3. *P.A.Starrock*, *Astrophys. J.*, **164**, 529, 1971.
4. *M.A.Ruderman, P.G.Sutherland*, *Astrophys. J.*, **196**, 51, 1975.
5. *В.С.Бескин, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин*, *Ж. эксперим и теор. физ.*, **58**, 401, 1983.
6. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **42**, 253, 1999.
7. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **36**, 87, 1993.
8. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **37**, 97, 1994.
9. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **38**, 143, 1995.
10. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **39**, 303, 1996.
11. *Г.С.Саакян*, *Астрофизика*, **39**, 489, 1996.
12. *J.H.Taylor, R.N.Manchester and A.G.Lune*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **88**, 529, 1993.