

Наблюдательная ротационная устойчивость пульсаров

А.Е.Авраменко, Б.Я.Лосовский

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

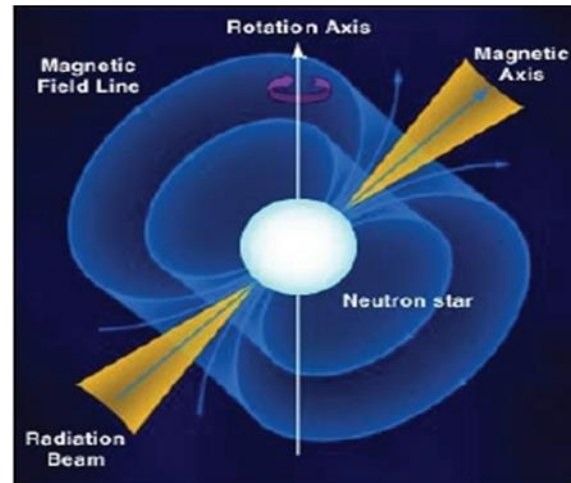
Астрометрия-2015

21-25 сентября, Пулково

Содержание

- *Нейтронные звезды-пульсары: физические свойства*
- *Периодическое излучение и параметры вращения нейтронных звезд*
- *Согласованность наблюдаемых параметров вращения на вековом масштабе*
- *Метрическая инвариантность показателя торможения секундных и миллисекундных пульсаров*
- *Ротационная устойчивость пульсара B0531+21 в Крабовидной туманности*

Введение. Нейтронные звезды - пульсары: физические свойства

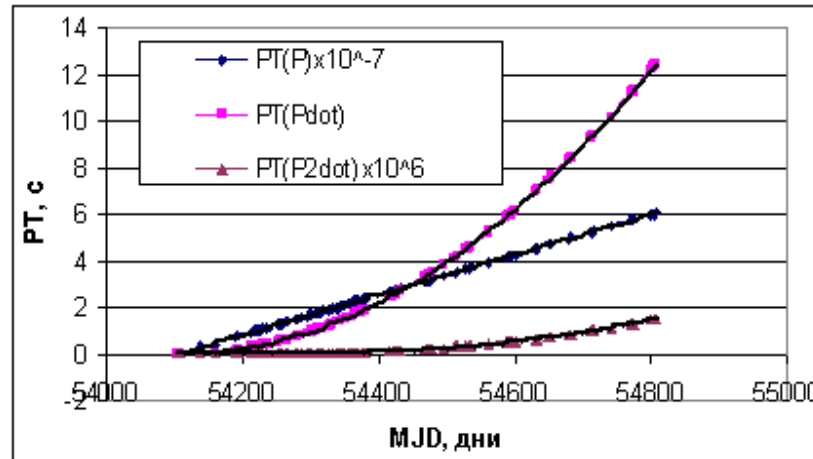


- ◆ Плотность вещества звезды 10^{14} - 10^{15} г/см³, или (100-1000) мегатонн/см³;
- ◆ Масса M_{PSR} порядка массы Солнца;
- ◆ Диапазон значений периода вращения $P = 1,5$ мс÷8,5 с;
- ◆ Радиус R около 10 км;
- ◆ Линейная скорость в экваториальной области $2\pi R / P \Rightarrow c$;
- ◆ Мощность излучения 10^{23} - 10^{26} Вт, верхний предел сопоставим с мощностью, излучаемой Солнцем за счет ядерных реакций;
- ◆ Замедление вращения \dot{P} за счет потерь энергии на излучение:
 - около 10^{-19} - 10^{-21} с·с⁻¹ для миллисекундных пульсаров
 - около 10^{-15} - 10^{-16} с·с⁻¹ для секундных пульсаров.

Нейтронная звезда – это прежде всего жёсткая механическая система с устойчивыми закономерностями вращения, обнаруживаемыми по наблюдениям периодического излучения пульсаров.

Ротационная модель интервалов излучения пульсаров

$$PT(P_0, \dot{P}, \ddot{P}) = P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3, \quad N=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$



Три параметрических компонента интервалов PT :

$$PT(P_0) = P_0 N \Rightarrow 10^8 \text{ с}; \quad P_0 \approx 1 \text{ с}$$

$$PT(\dot{P}) = 0,5 P_0 \dot{P} N^2 \Rightarrow 10 \text{ с}; \quad \dot{P} \approx 10^{-15} - 10^{-16} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$PT(\ddot{P}) = \frac{1}{6} (P_0^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3 \Rightarrow 10^{-6} \text{ с}; \quad \ddot{P} \approx 10^{-28} - 10^{-29} \text{ с}^{-1}$$

Числовые значения периода вращения и производных P_0, \dot{P}, \ddot{P} удовлетворяют условию сходимости полиномиального ряда (1).

Вклад производных 3-го и более высоких порядков не превышает 1 нс за несколько лет и не может быть различим по наблюдениям пульсара.

Параметрическая модель наблюдаемых интервалов РТ

Уравнение наблюдаемых интервалов PT :

$$PT_i = (1 + \alpha_i)(P_0^* N + \frac{1}{2} P_0^* \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^{*2} \ddot{P} - 2P_0^* \dot{P}^2) N^3)_i. \quad (2)$$

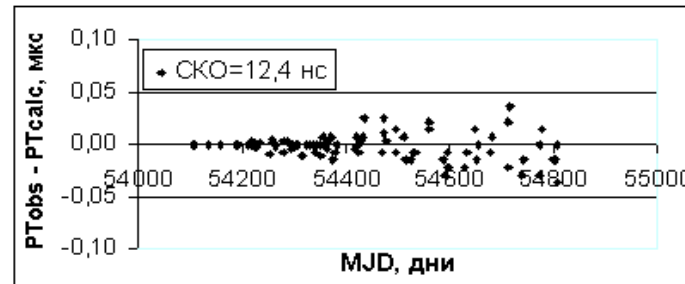
PT_i – численные величины наблюдаемых интервалов;

P_0^* , \dot{P} , \ddot{P} – наблюдаемые параметры вращения пульсара на начальную эпоху;

α_i – мера сходимости (расхождение) интервалов.

$\alpha_i = 10^{-14} - 10^{-16}$, сопоставивимо с нестабильностью атомных шкал времени.

Разность наблюдаемых и рассчитанных по наблюдаемым параметрам вращения интервалов PSR J1509+5531:



$$PT_{obs} = PT_i;$$

$$PT_{calc} = (P_0^* N + \frac{1}{2} P_0^* \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^{*2} \ddot{P} - 2P_0^* \dot{P}^2) N^3)_i;$$

$$P_0^* = 0,739683736756101 \text{ c } (54104.24); \quad \dot{P} = 4,99821 \cdot 10^{-15} \text{ c} \cdot \text{c}^{-1}; \quad \ddot{P} = 9,821177 \cdot 10^{-29} \text{ c}^{-1}.$$

Аналитические интервалы PT_{calc} определяются фиксированными на начальную эпоху наблюдаемыми параметрами вращения пульсара и не зависят от случайных вариаций PT_{obs} .

Единственным решением уравнения (2) является такое сочетание наблюдаемых параметров вращения, которое соответствует условию сходимости полиномиального ряда (1) при любой продолжительности наблюдений с погрешностью $10^{-18} - 10^{-19}$.

Согласованность наблюдаемых параметров вращения

а) *по критерию когерентности:*

$$P_0^*(t) = P_0 + \dot{P}_0 \cdot t + \ddot{P} \cdot t^2; \quad (3)$$

где: $P_0^*(t) = P_0 + \dot{P} \cdot t; \quad \dot{P} = \dot{P}_0 + \ddot{P} \cdot t;$

$$t = P_0^* N, \quad 1 < N < \infty.$$

б) *по показателю торможения* $n = 2 - \frac{P\ddot{P}}{\dot{P}^2}:$

Параметры вращения и показатель торможения *секундных* пульсаров:

$(P > 0,1 \text{ с})$

PSR	$P, \text{ с}$	$\dot{P} \text{ с}\cdot\text{с}^{-1}$	$\ddot{P}, \text{ с}^{-1}$ (БСА)	n
1. B0809+74	1,29224132384	$1,676 \cdot 10^{-16}$	$< 10^{-30}$	не определен
2. B1919+21	1,337301192269	$1,34809 \cdot 10^{-15}$	$3,99573 \cdot 10^{-30}$	-0,94
3. B0834+06	1,27376417152	$6,79918 \cdot 10^{-15}$	$1,07448 \cdot 10^{-28}$	-0,96
4. J1509+5531	0,739681922904	$4,99821 \cdot 10^{-15}$	$9,82117 \cdot 10^{-29}$	-0,91
5. B2217+47	0,538467394548	$2,76421 \cdot 10^{-15}$	$4,30247 \cdot 10^{-29}$	-1,03
6. B0329+54	0,71451866398	$2,04959 \cdot 10^{-15}$	$1,67089 \cdot 10^{-29}$	-0,84
7. B0531+21	0,0334033474094	$4,2096 \cdot 10^{-13}$	$1,57877 \cdot 10^{-23}$	-0,94

$$n = -(0,9 \pm 0,2); \quad n_{\text{средн}} = -0,94$$

Наблюдаемые параметры свидетельствуют о монотонном замедлении вращения, присущем когерентному периодическому излучению пульсара.

Для наблюдаемых пульсаров показатель торможения представляет собой численный инвариант $n = -(0,9 \pm 0,2)$.

Пороговое значение наблюдаемой второй производной $> 10^{-30} \text{ с}^{-1}$.

Согласованные параметры вращения миллисекундных пульсаров

$$P_0^*(t) = P_0 + \dot{P} \cdot t; \quad t = P_0^* N, \quad 1 < N < \infty.$$

$$(P < 0,1 \text{ с})$$

PSR	$P, \text{ с}$	$\dot{P}, \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$	$\ddot{P}, \text{ с}^{-1}$ (верхний предел)
B1937+21	0,001557806468819794	$1,051193 \cdot 10^{-19}$	$2,08469 \cdot 10^{-35}$
B1855+09	0,00536210045404154	$1,78363 \cdot 10^{-20}$	$1,74506 \cdot 10^{-37}$
J1640+2224	0,00316331581791380	$2,8276 \cdot 10^{-21}$	$7,42848 \cdot 10^{-39}$
J2145-0750	0,01605242391433660	$2,97848 \cdot 10^{-20}$	$1,6248 \cdot 10^{-37}$
J0613-0200	0,00306184408653189	$9,5913 \cdot 10^{-21}$	$8,8357 \cdot 10^{-38}$
J1713+0747	0,004570136525082782	$8,5289 \cdot 10^{-21}$	$4,6796 \cdot 10^{-38}$
J1643-1224	0,00462164151699818	$1,84628 \cdot 10^{-20}$	$2,1685 \cdot 10^{-37}$

$$\ddot{P} = (2 - n_{\text{средн}}) \frac{\dot{P}^2}{P}; \quad (n_{\text{средн}} = -0,94)$$

По численному инварианту показателя торможения определяется верхний предел второй производной периода вращения миллисекундных пульсаров, величина которого согласована с наблюдаемыми значениями периода и первой производной.

По аналитической модели интервалов (2) определяются согласованные значения наблюдаемых параметров вращения и показателя торможения секундных и миллисекундных пульсаров, которые соответствуют их монотонному замедлению вследствие потерь энергии вращения.

«The observed \dot{V} values for the majority of pulsars are not caused by magnetic dipole radiation or by any other systematic loss of rotational energy, but are dominated by the amount of timing noise present in the residuals and the data span.

...Показатель торможения n для анализируемых 366 пульсаров находится в диапазоне от -287986 до $+36246$ при среднем значении -1713 и медианном значении 22 . При этом 193 пульсара имеют положительную вторую производную частоты вращения, а остальные 173 – отрицательную».
G. Hobbs, A. G. Lyne and M. Kramer (2010). An analysis of the timing irregularities for 366 pulsars, MNRAS, 402, 1027-1048.

О происхождении двух непересекающихся групп – секундных и миллисекундных пульсаров

$P > 0,1$ с

PSR	P , с	\dot{P} , с·с ⁻¹	\ddot{P} , с ⁻¹ (БСА)	n
1. B0809+74	1,29224132384	$1,676 \cdot 10^{-16}$	$< 10^{-30}$	не определён
2. B1919+21	1,337301192269	$1,34809 \cdot 10^{-15}$	$3,99573 \cdot 10^{-30}$	-0,94
3. B0834+06	1,27376417152	$6,79918 \cdot 10^{-15}$	$1,07448 \cdot 10^{-28}$	-0,96
4. J1509+5531	0,739681922904	$4,99821 \cdot 10^{-15}$	$9,82117 \cdot 10^{-29}$	-0,91
5. B2217+47	0,538467394548	$2,76421 \cdot 10^{-15}$	$4,30247 \cdot 10^{-29}$	-1,03
6. B0329+54	0,71451866398	$2,04959 \cdot 10^{-15}$	$1,67089 \cdot 10^{-29}$	-0,84
7. B0531+21	0,0334033474094	$4,2096 \cdot 10^{-13}$	$1,57877 \cdot 10^{-23}$	-0,94

$P < 0,1$ с

PSR	P , с	\dot{P} , с·с ⁻¹	\ddot{P} , с ⁻¹ (верхний предел)
B1937+21	0,001557806468819794	$1,051193 \cdot 10^{-19}$	$2,08469 \cdot 10^{-35}$
B1855+09	0,00536210045404154	$1,78363 \cdot 10^{-20}$	$1,74506 \cdot 10^{-37}$
J1640+2224	0,00316331581791380	$2,8276 \cdot 10^{-21}$	$7,42848 \cdot 10^{-39}$
J2145-0750	0,01605242391433660	$2,97848 \cdot 10^{-20}$	$1,6248 \cdot 10^{-37}$
J0613-0200	0,00306184408653189	$9,5913 \cdot 10^{-21}$	$8,8357 \cdot 10^{-38}$
J1713+0747	0,004570136525082782	$8,5289 \cdot 10^{-21}$	$4,6796 \cdot 10^{-38}$
J1643-1224	0,00462164151699818	$1,84628 \cdot 10^{-20}$	$2,1685 \cdot 10^{-37}$

Когерентность периодического излучения пульсаров на вековом масштабе и численная инвариантность показателя торможения при сильно, на несколько порядков различающихся производных периода вращения у секундных и миллисекундных пульсаров позволяет предположить, что разделение пульсаров на две группы обусловлено состоянием околосредней плазмы при взрыве сверхновой одновременно с коллапсом ядра.

Коллапс ядра в среде плотной ионизированной плазмы, где особенно выражены магнитоиндукционные взаимодействия вращающихся силовых полей со средой, способствует появлению секундных пульсаров. Возникновение же короткопериодных, миллисекундных пульсаров следует ожидать, напротив, в разреженной околосредней среде, более приближённой к вакуумной модели.



Авторы и права: Дж. Хестер и П. Скоуэн ([Аризонский университет](#))

PSR B0531+21

$$P = 0,033 \text{ с} = \sqrt{1 \cdot 10^{-3}}$$

$$\dot{P} = 4,2096 \cdot 10^{-13} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1} \quad (\text{на 2-3 порядка больше})$$

$$\ddot{P} = 1,57877 \cdot 10^{-23} \text{ с}^{-1} \quad (\text{на 5-6 порядков больше})$$

$$dE_{rot} / dt = -4\pi^2 I \dot{P} / P^3 = 10^{38} \text{ эрг/с}$$

(на 4-5 порядков больше)

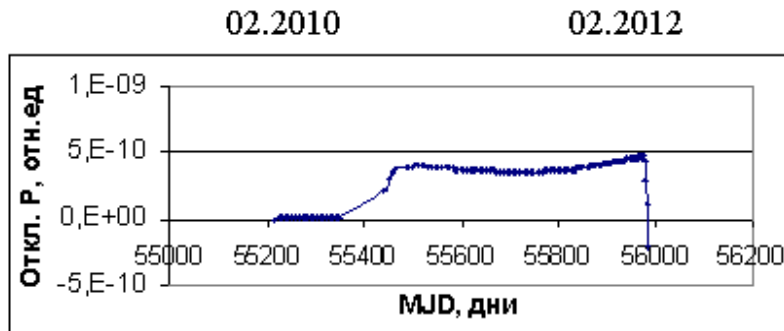
$$n = -0,94 = \text{Исреди!}$$

В записях китайских астрономов есть описание следующего явления: "Летом 1054 нашей эры в созвездии Тельца вдруг одна звезда стала яркой как полная Луна". Это была **мощная вспышка сверхновой звезды** - взрыв массивной звезды, от которой осталась **наблюдаемая в настоящее время Крабовидная туманность**. При таком взрыве **ядро звезды коллапсирует**, превращаясь во вращающуюся **нейтронную звезду**, или **пульсар**.

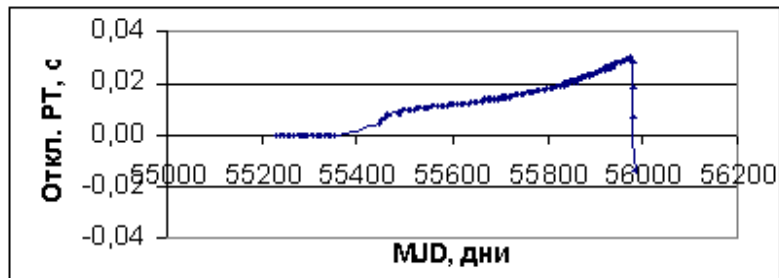
Используя снимки космического телескопа им. Хаббла в видимом свете, астрономы недавно открыли интересные движения в Крабовидной туманности, вызываемые выделенной пульсаром энергией.

Основное в этих движениях, есть концентрические кольца вещества, летящие от пульсара со скоростью, равной половине скорости света, светящееся гало, а также "пляшущее" пятно интенсивного излучения и висящий туманный сгусток над полюсом пульсара. Пульсар своей энергией управляет динамикой и излучением всей туманности с поперечником более чем 10 световых лет.

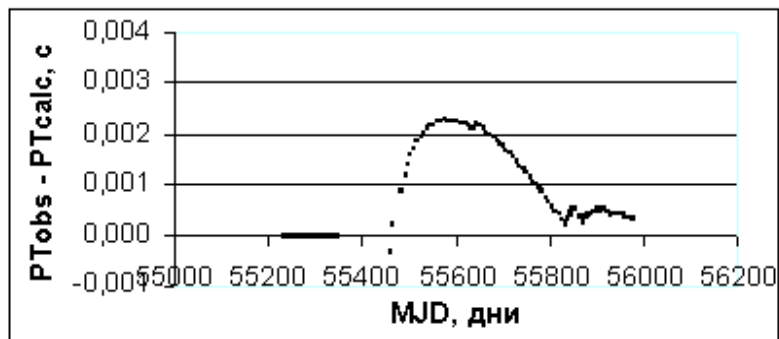
Аномальные отклонения периода и интервалов пульсара B0531+21 (наблюдения на БСА ФИАН 02.2010 – 02.2012)



а) отклонения наблюдаемого периода P



б) отклонения наблюдаемых интервалов PТ



в) разность наблюдаемых и расчетных интервалов

Расхождение наблюдаемых и аппроксимируемых величин у PSR B0531+21 на несколько порядков больше, чем у других пульсаров.

Вывод: Аномальные отклонения периода и интервалов не связаны с вращением пульсара PSR B0531+21.

Причина аномальных отклонений наблюдаемого периода излучения PSR B0531+21 – доплеровское смещение при движении источника под действием неуравновешенных в лучевом направлении сил.

Доплеровское смещение длины волны (периода)

Параметр доплеровского смещения:

$$Z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}};$$

$\lambda_{obs}, \lambda_{emit}$ – значения длины волны в точке наблюдения
и испускания излучения, соответственно.

Доплеровское смещение длины волны источника, движущегося
с лучевой скоростью v_r и полной скоростью v , определяется:

$$Z = \frac{1 + v_r / c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \quad (4)$$

Приравнявая Z (4) и отклонение наблюдаемого периода $\alpha_i = \Delta P^* / P^*$,

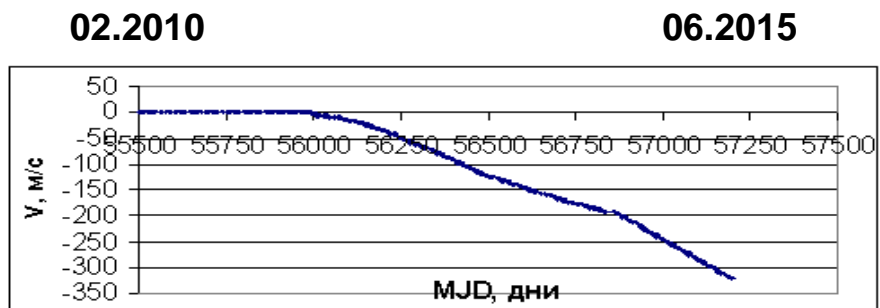
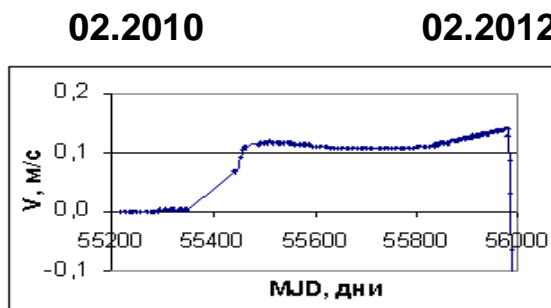
учитывая $v_r \approx v$ и $v/c \ll 1$, находим значение лучевой скорости v_r ,

которая соответствует относительному отклонению наблюдаемого периода:

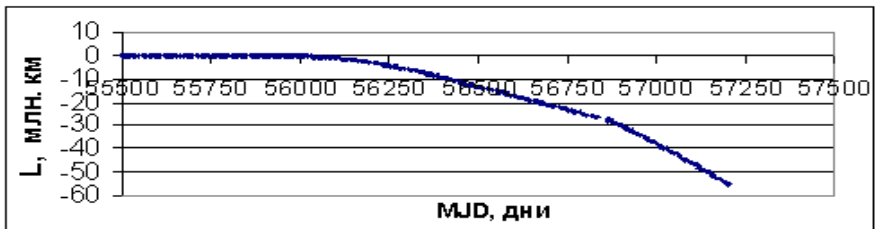
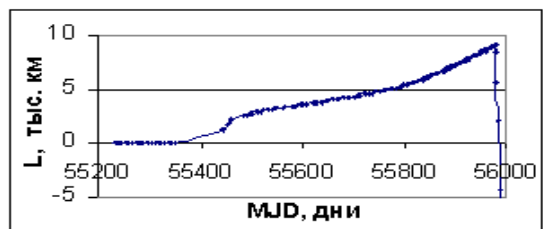
$$v_{r_i} = \alpha_i \cdot c$$

Доплеровское смещение находится по отклонениям наблюдаемого периода излучения, определяемым лучевой скоростью движения пульсара.

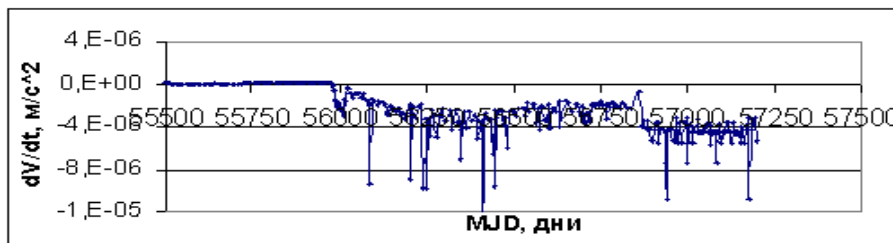
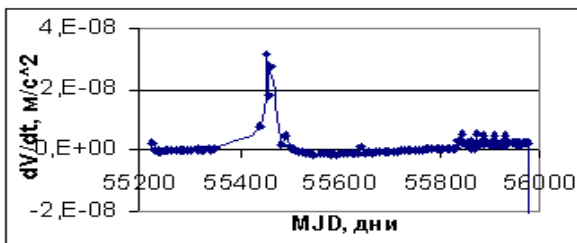
Скорость, перемещение и ускорение пульсара B0531+21 (наблюдения на БСА ФИАН 02.2010 – 06.2015)



а) скорость



б) радиальное перемещение



в) ускорение

Мониторингом на БСА обнаружено, что **21 февраля 2012г. (MJD 55978)** движение PSR B0531+21 изменило направление в сторону сближения пульсара с наблюдателем

Энергетические характеристики пульсара B0531+21

Энергия:

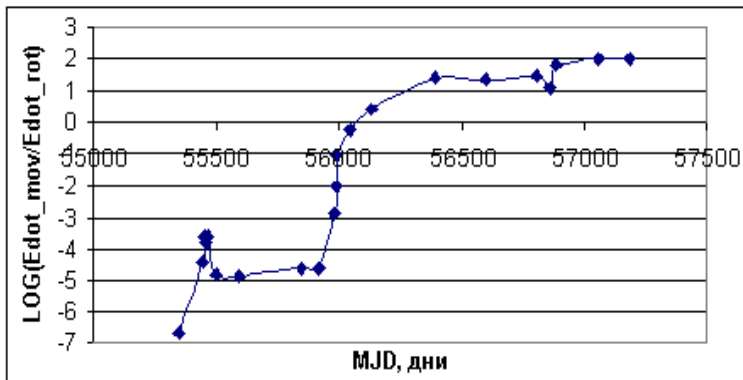
$$E = E_{rot} + E_{mov} = \frac{I\Omega^2}{2} + \frac{MV^2}{2}; \quad I = \frac{2}{5}MR^2 - \text{момент инерции шара}$$

Мощность:

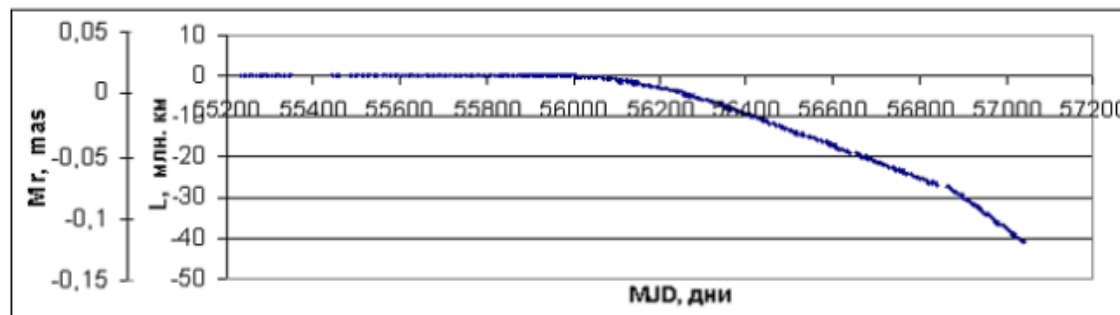
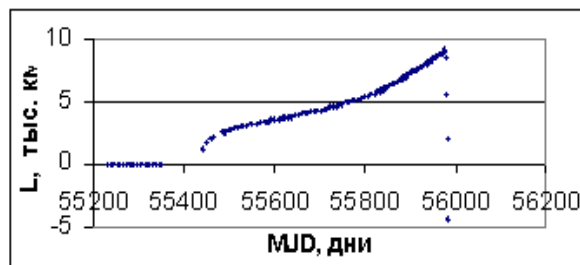
$$\dot{E} = I\Omega\dot{\Omega} + MV\dot{V} = \frac{2}{5}MR^2(2\pi)^2 \frac{\dot{P}}{P^3} + MV\dot{V};$$

$$\text{где: } \Omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{P}; \quad \dot{\Omega} = 2\pi\dot{\nu} = -2\pi \frac{\dot{P}}{P^2}; \quad \dot{\nu} = -\frac{\dot{P}}{P^2}$$

- Энергия вращения и энергия движения пульсара независимы, при этом энергия вращения на 8-10 порядков больше
- Мощность, развиваемая при ускоренном движении, может на несколько порядков превышать мощность потерь энергии вращения
- Можно предположить, что энергопотери торможения через вихревые индукционные токи в сверхплотной и неоднородной околзвездной плазме возбуждают неуравновешенные в радиальных направлениях силы, вызывающие движение пульсара.



Наблюдаемое движение PSR B0531+21 в лучевом направлении



- *Наблюдаемые параметры вращения PSR B0531+21 соответствуют монотонному замедлению пульсара и не зависят от доплеровского смещения наблюдаемого периода излучения.*
- *Указанные в источниках фиксированные значения PM (RA, Dec) в диапазоне порядка 10 mas/yr не нарушают ротационной устойчивости PSR B0531+21, как и наблюдаемое спонтанное перемещение пульсара в оцениваемом диапазоне порядка 0,1 mas в 7-летнем промежутке наблюдений.*

$$r = 2 \text{ Кпк} = 6,17 \cdot 10^{16} \text{ км}$$

$$1 \text{ угл. секунда} = 4,848 \cdot 10^{-6} \text{ рад.}$$

$$1 \text{ mas} = 4,848 \cdot 10^{-9} \cdot 6,17 \cdot 10^{16} = 2,99 \cdot 10^8 \text{ км}$$

$$1 \text{ mkas} = 2,99 \cdot 10^5 \text{ км.}$$

Proper Motion PSR B0531+21:

PM RA = -14,7 (8) mas/yr; PM Dec = 2,0 (8) mas/yr. (Cat. ATNF)

$$\mu_{\alpha} = -11.8 \pm 0.4 \pm 0.5 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$\mu_{\delta} = +4.4 \pm 0.4 \pm 0.5 \text{ mas yr}^{-1} \text{ (Kaplan et al., 2008)}$$

Измерение доплеровского смещения периода излучения пульсара может быть положено в основу определения координат местоположения и скорости на траектории движения космических объектов с погрешностями в пределах 10 м и $10^{-2} - 10^{-3}$ м/с, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Аппроксимация наблюдаемых интервалов периодического излучения пульсара по наблюдаемым параметрам вращения, фиксированным на начальную эпоху в любом промежутке наблюдений, свидетельствует о когерентности импульсного излучения и монотонном замедлении вращения нейтронной звезды.

Численная инвариантность показателя торможения $n = -(0,9 \pm 0,2)$ секундных и миллисекундных пульсаров позволяет предположить, что принадлежность пульсаров к одной из двух непересекающихся групп предопределена при взрыве сверхновой: коллапс ядра в среде плотной ионизированной плазмы порождает секундные пульсары, а короткопериодные миллисекундные пульсары образуются в разреженной околосвёздной среде, более приближённой к вакуумной модели.

Наблюдаемое спонтанное движение пульсара B0531+21, вызванное неуравновешенными в радиальных направлениях силами магнитоиндукционного происхождения в сверхплотной плазме, не приводит к нарушению ротационной устойчивости нейтронной звезды и когерентности периодического излучения.

М.: ЛЕНАНД, 2015. – 200 с.

Издательство «URSS»

