

# Аномальные пульсары

И.Ф.Малов  
ПРАО АКЦ ФИАН

- 1. Аномальные рентгеновские пульсары (AXP)
- 2. Гамма-репитеры (SGR)
- 3. Транзиенты
- 4. Компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых (CCO)
- 5. Слабо излучающие в рентгене одиночные нейтронные звёзды (XDINS)

# 1-2. АХР и SGR

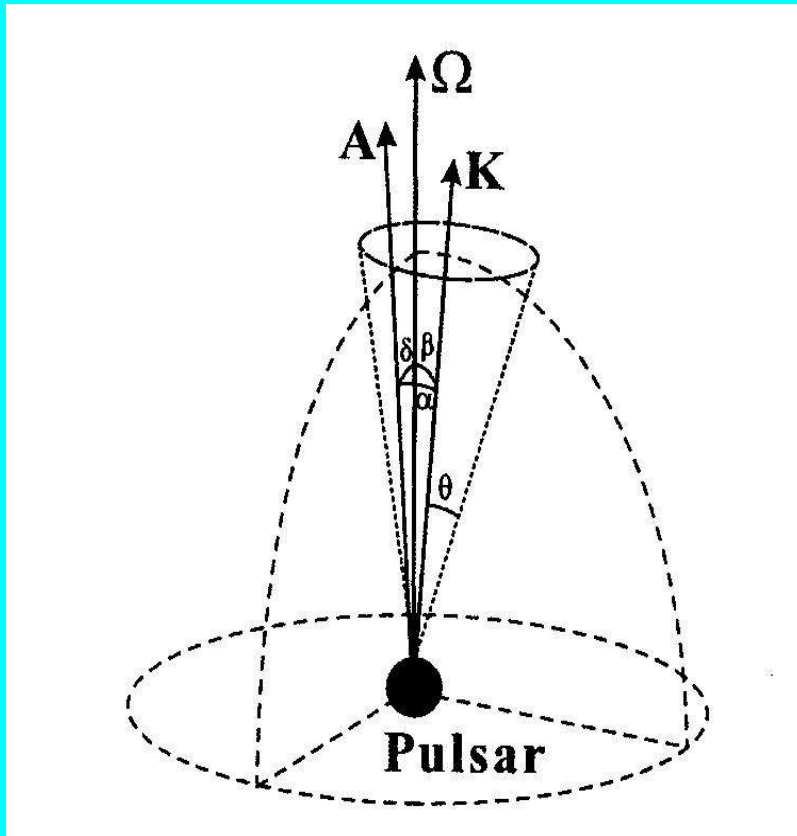
- 1 Магнетары
- $B = 6,4 \cdot 10^{19} (P \, dP/dt)^{1/2}$
- $B \sim 10^{14} - 10^{15}$  Гс
- 2. Аккреция
- 3. Прецессия
- 4. Белые карлики с большими магнитными полями  $B \sim 10^8 - 10^9$  Гс
- 5. Странные звёзды
- 6. Дрейфовые волны

# Магнетары

- $\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{B^2}{8\pi} \frac{4\pi R^3}{3} \right) = \frac{B R_*^3}{3} \frac{dB}{dt}$
- 1.  $\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{B^2}{8\pi} \frac{4\pi R^3}{3} \right) = \frac{B R_*^3}{3} \frac{dB}{dt}$
- При светимости  $L \sim 10^{35}$  эрг/сек и  $\nu \sim 10^{15}$  Гс магнитная энергия исчерпается за  $10^5$  лет. Подпитка остатка  $\sim 10^{37}$  эрг/сек – за 500 лет для SGR 1806-20.
- 2.  $\gamma + B \rightarrow e^+ + e^- + B$
- $\gamma + B \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2 + B$

- 3.  $d\Omega/dt = K \Omega^n$
- Для магнито-дипольного торможения
- $n = 3$ . По данным для SGR 1900+14
- $n = 0,19$ .
- **Магнито-дипольная модель неверна и определённые по формуле**
- **$B = 6,4 \cdot 10^{19} (P \, dP/dt)^{1/2}$**
- **магнитные поля ошибочны**

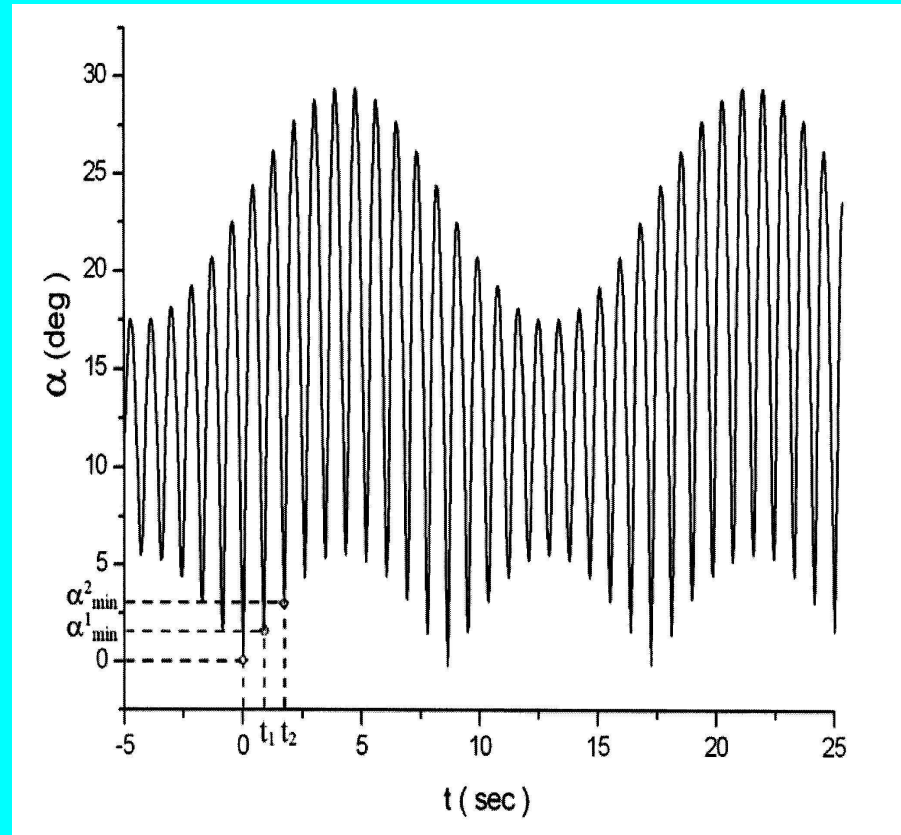
# Дрейфовые волны



Геометрия дрейфовой модели.  $K$  - конуса излучения,  $A$  - направление наблюдателя.

$\delta = \text{Constant}$ ,  $\theta = \text{Constant}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  - функции времени.

- Осциллирующее поведение  $\alpha$  со временем



# Вычисленные значения параметров АХР

IGR

№	п/п Источник	$P, \text{мс}$	$dP/dt, 10^{-15}$	$\lg B$	$\lg(dE/dt)$	
	$\lg B_s$		АХР	(Гц)	(эрг/с)	(Гц)
1	4U 0142+61 11.60	19.81	$2 \triangleright 23$	5.70	37.06	
2	1E 1048 -5937 12.10	87.22	$2 \triangleright 58$	4.28	37.18	
3	RXS 1709 -4009 11.46	11.84	10	6.25	38.38	
4	1E 1841-045 11.77	22.41	40	5.72	38.14	
5	1E 2259+586 11.22	10.75	$0 \triangleright 372$	6.13	37.07	
6	XTE J1810 -197 11.24	13.78	$14 \text{NS} - 2008$	5.82	38.33	



- Среди квазипериодических осцилляций в SGR 1806-20 с частотами 18, 26, 30, 92, 150, 625 Гц и в SGR1900+14 на 28, 53, 84 и 155 Гц есть частоты, соответствующие вычисленным периодам вращения. Возможно, что не все найденные частоты связаны с колебаниями нейтронной звезды, некоторые равны частотам вращения
- Линии в рентгеновских спектрах, если их интерпретировать как электронные циклотронные линии (что наиболее вероятно), соответствуют магнитным полям в области их образования порядка  $10^{11} - 10^{12}$  Гс.

# Пульсары с очень длинными периодами

Pulsar	$P_o$ (s)	$P$ (s)	$B_s$	$\beta \approx$	$\Theta$ (deg)	$W_{10}/P$	$\delta$ (deg)
			$(10^{12} G)$				
PSR J2144 -3933	8.5	0.85	0.2	7	1.5	0.1	
PSR J1847 -0130	6.7	1.12	16	5	3	0.3	
PSR J1814 -1744	4.0	0.5	6.9	5	2	0.2	

# Транзиенты

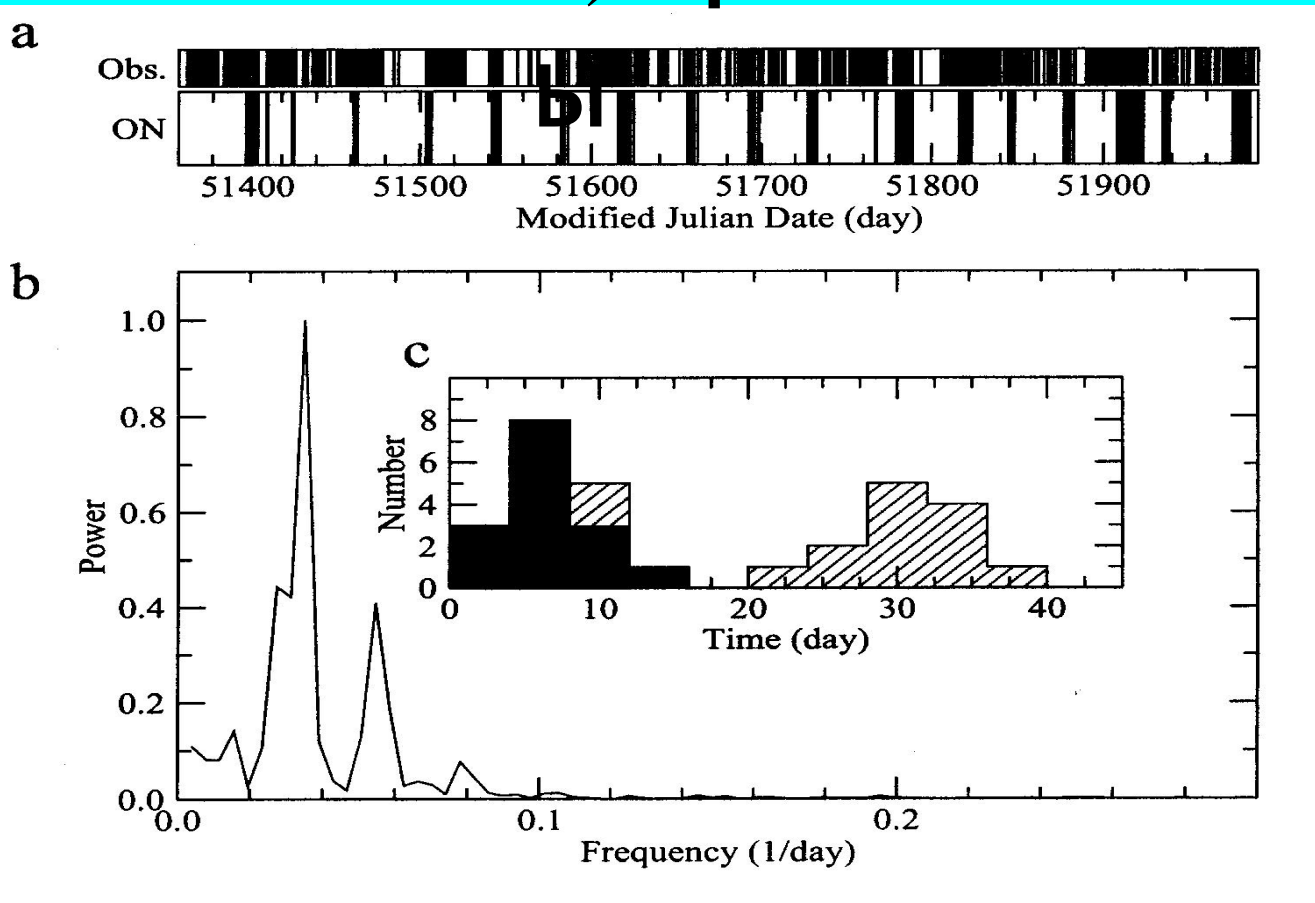
- 1) Квазирегулярные изменения интенсивности импульсов.
- 2) Редкие (индивидуальные) диспергирующие импульсы

# Модели

1. Прецессия пульсаров с длительными периодами нуллингов
2. Жанг и др. (2006) рассмотрели возможность нахождения пульсара вблизи «линии смерти» и его эпизодического появления выше этой линии.
3. Те же авторы (Дикс и др.2005, Жанг и др. 2006) использовали другую возможность для описания RRAT. Они выдвинули идею так называемого «обратного» (inward) излучения, т.е. излучения, направленного в обратном направлении по отношению к «прямому» излучению пульсара.
4. Ли (2006) выдвинул модель реликтового диска, сохранившегося после взрыва сверхновой или сформировавшегося из захваченной межзвёздной среды
5. Дрейфовая модель.

# 1) Транзиент

- Time variation of the radio emission of PSR B1931+24. a) A typical sequence of observations covering a 20-month interval is indicated by the black lines. b) The appearance of the pulsar is quasiperiodic nature. c) Histograms of the durations of the on (solid) and off (hatched) phases



# PSR 1832+0029

- 'on'state >300 days
- 'off'state ~700 days
- Quasi-periodicity  
Increase in slow-down rate during 'on'state similar to B1931+24



- $\sin \beta = C \sin (\zeta - \beta)$
- $\cos \theta = \cos \theta \cos \beta + D \sin \beta \sin \zeta$  (1)

- $(\zeta - \beta) = \theta / n$

- $$\sin \beta \sin \Phi$$

- $\operatorname{tg} \psi =$

(2)

---

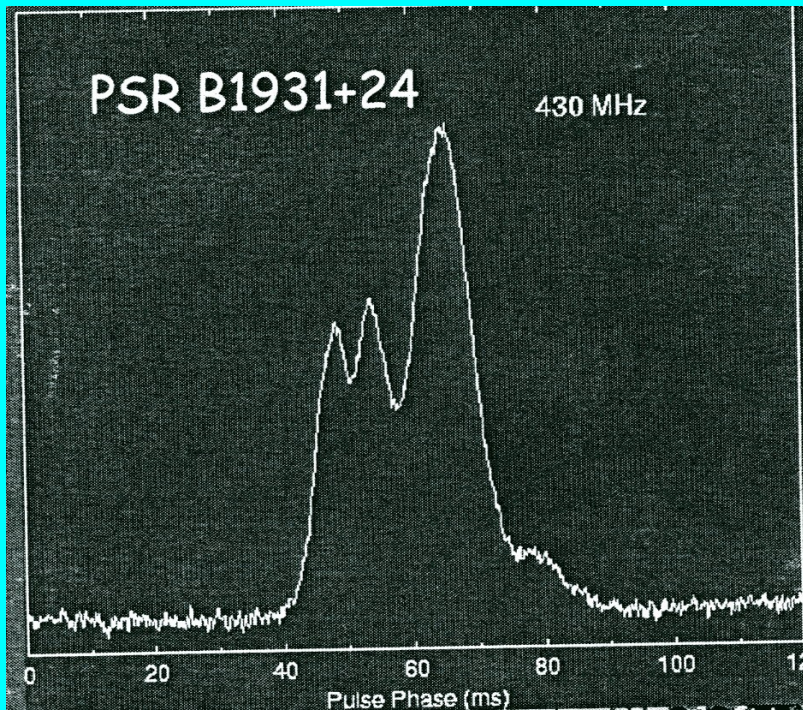
- $$\sin \zeta \cos \beta - \cos \zeta \sin \beta \cos \Phi$$

- $$\sin \beta$$

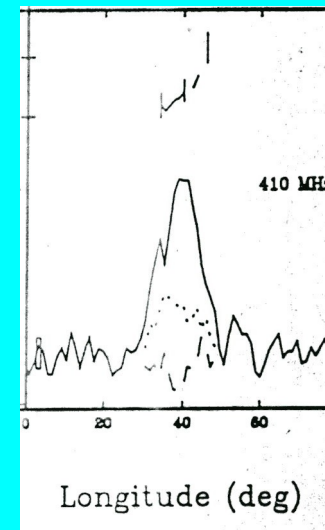
- $$\epsilon \left( \frac{d\psi}{d\Phi} \right)_{\max} = \frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)}$$
 (3)



# PSR B1931+24

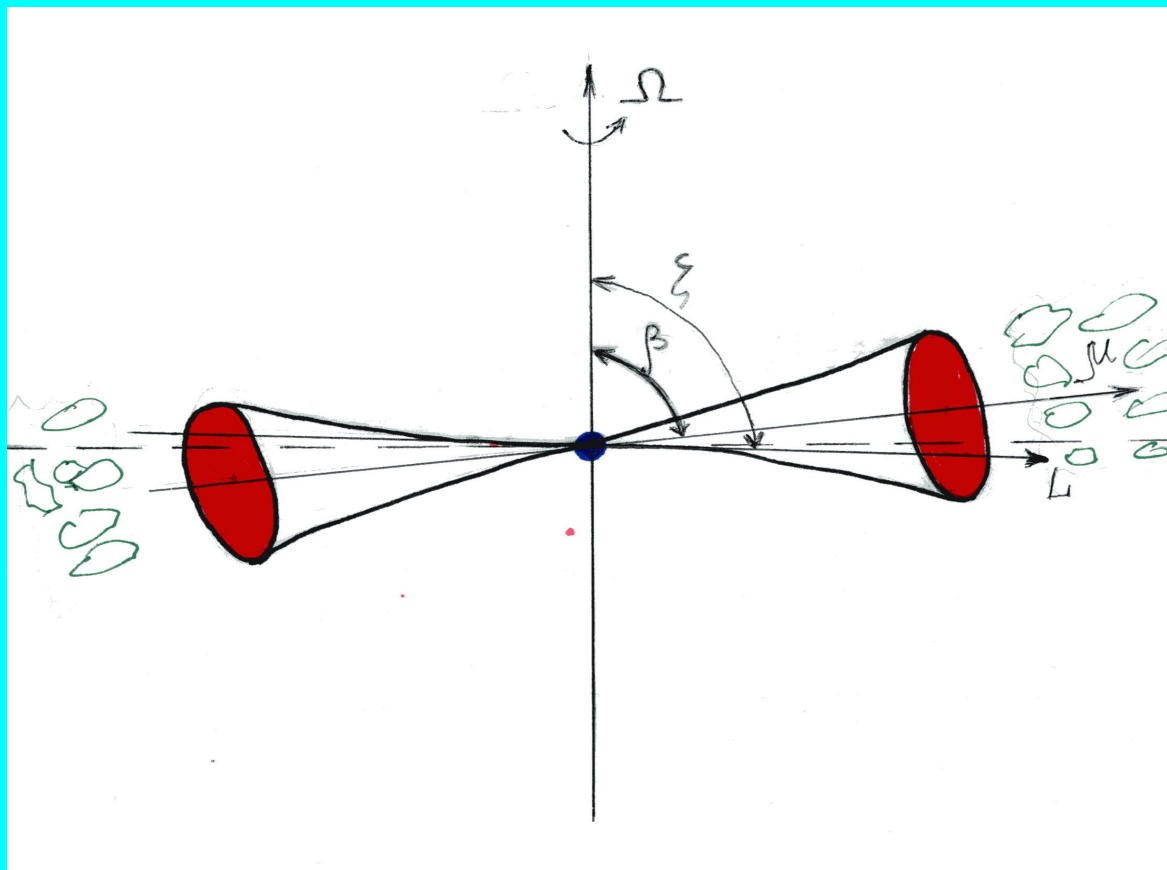


- 100
- 0

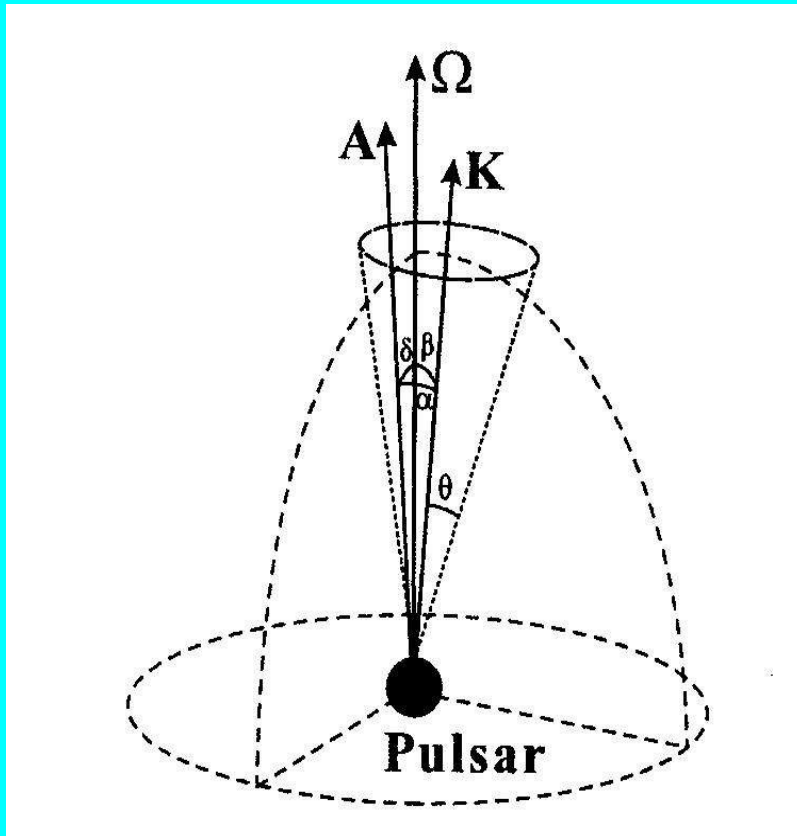


- $0,83 y^3 + 4,41 y^2 + 16,63y + 2,42 = 0$ , (8)
- которое имеет одно действительное решение  $y = -0,151$ , что соответствует углу  $\zeta = 98^{\circ}, 7$ . При этом из уравнения (6) получаем  $\beta = 88^{\circ}, 2$ , а из последнего уравнения системы (4) следует, что  $\theta = 21^{\circ}, 0$ . Анализ показывает, что ошибка  $\Delta D < 10^{-3}$  и основную погрешность вносит  $\Delta C$ . При  $C = 5,4$   $\zeta = 86^{\circ}, 5$  и
- $\beta = 76^{\circ}, 1$ , для  $C = 5,6$   $\zeta = 110^{\circ}, 0$
- $\beta = 93^{\circ}, 7$ , т.е., при  $C = 5,5 \pm 0,1$  получается решение для ортогонального ротатора.
-

# Пропеллер



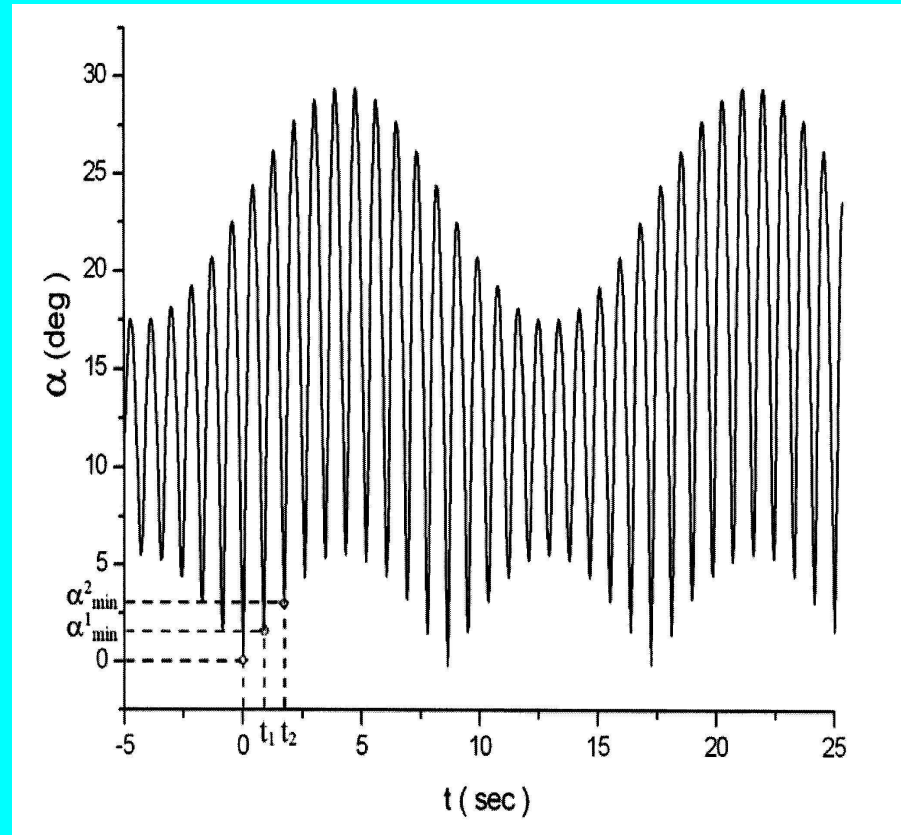
# Дрейфовые волны



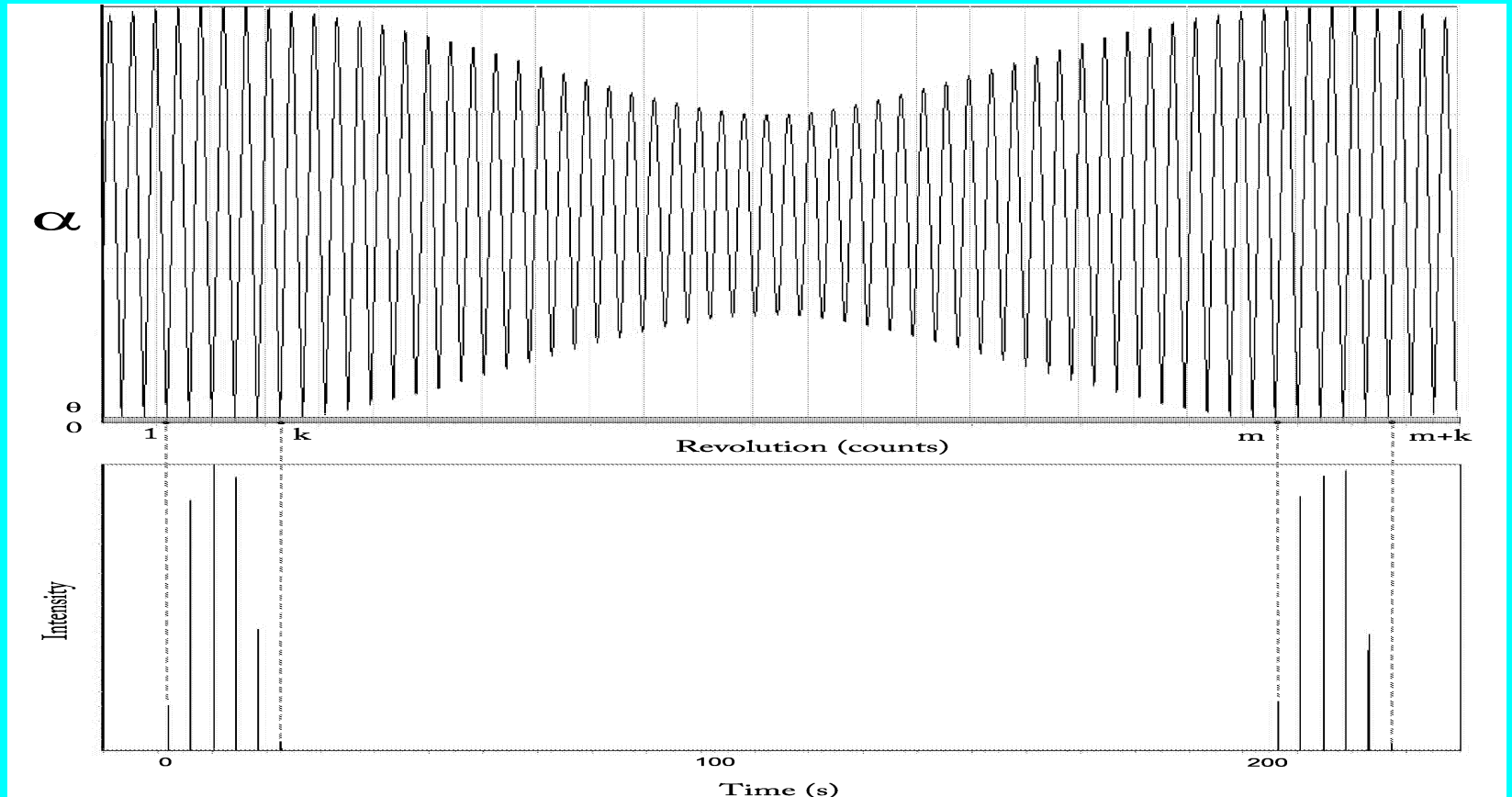
Геометрия дрейфовой модели.  $K$  - конуса излучения,  $A$  - направление наблюдателя.

$\delta = \text{Constant}$ ,  $\theta = \text{Constant}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  - функции времени.

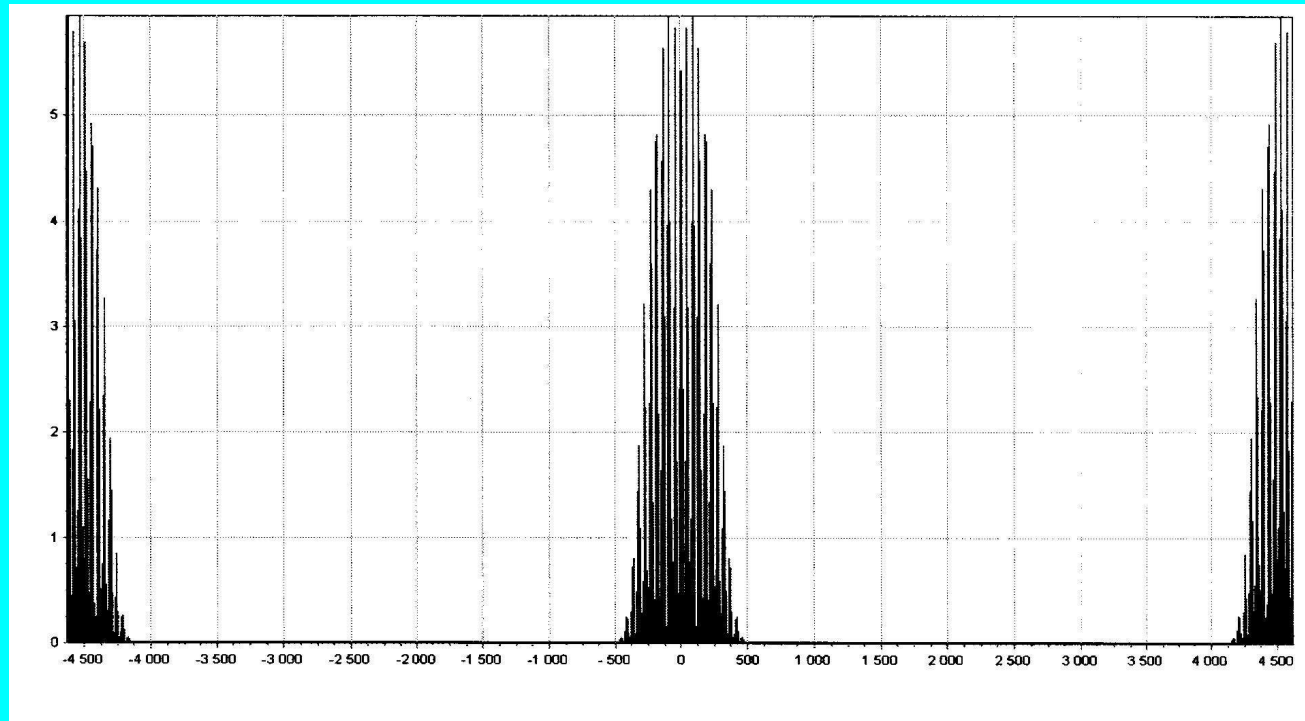
- Осциллирующее поведение  $\alpha$  со временем



# Simulated lightcurve of PSR J1819-1458

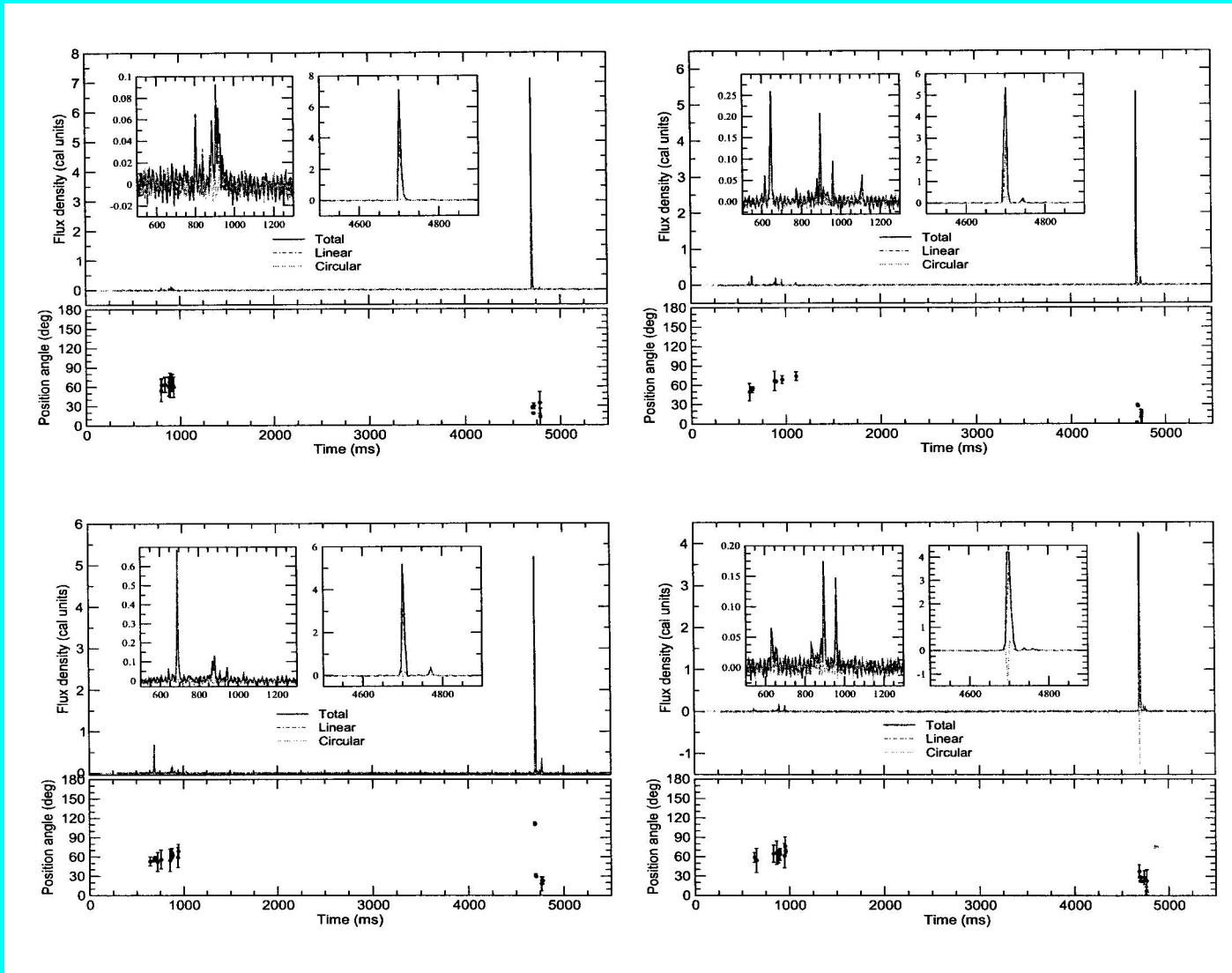


- Simulated lightcurve of PSR J1752+2359





# • АХР и PSR J 1810-197 на 8,4 ГГц





- Kramer et al. (2007) провели поляризационные измерения АХР J1810–197 и показали, что максимальная производная его позиционного угла

- $C \leq 1$ .
- $\epsilon \left( \frac{d\psi}{d\Phi} \right)_{\max} = \frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)}$

- Оценки дают  $\beta < 20^\circ$ . В дрейфовой модели должно быть  $C \ll 1$  и  $\beta < 10^\circ$ .
- Наличие интеримпульса – тоже может быть свидетельством малости угла  $\beta$ .
- Следовательно, основное предположение дрейфовой модели для этого объекта хорошо выполняется. Он представляет собой почти соосный ротатор и для него характерна приводившаяся ранее картина модуляции наблюдаемого излучения.

- 1) Транзиенты с квазипериодическим включением излучения – ортогональные ротаторы в стадии пропеллера (нужен поиск проявлений диска и измерение углов между осями).
- 2) Транзиенты с редкими импульсами – соосные ротаторы с попаданием излучения в конус наблюдателя вследствие катаклизмов на нейтронной звезде
- 3) AXP и SGR – соосные ротаторы с регулярной модуляцией излучения дрейфовыми волнами.

# Особенности ССО

- 1) близость источника к центру молодого остатка сверхновой, 2) отсутствие туманности, связанной с пульсарным ветром (PWN), 3) отсутствие оптического или инфракрасного компаньона, 4) постоянное неппульсирующее рентгеновское излучение
- ( $L_x \sim 10^{33}$  эрг/сек) с похожим на тепловой спектром, характеризующимся высокими температурами (0,2-0,4 кэВ) и генерируемым по-видимому в пределах очень малой излучающей площадки (порядка долей процента от полной поверхности нейтронной звезды).

# Пульсар J1852+0040 в Kes 79

- $P = 0,105$  сек
- $dP/dt < 2 \cdot 10^{-16}$  сек/сек
- $\downarrow$
- $B_s = 6,4 \cdot 10^{19} (P \cdot dP/dt)^{1/2} < 3 \cdot 10^{11}$  Гс
- $dE/dt = I \Omega \cdot d\Omega/dt < 7 \cdot 10^3$  эрг/сек
- $L_x = 3 \cdot 10^{33}$  эрг/сек
- $\downarrow$
- Энергия вращения + аккреция

- $r_{LC} = cP/2\pi = 5 \cdot 10^8 \text{ см}$
- $B_{LC} < 2,38 \cdot 10^3 \text{ Гс}$
- $\lg L_x \text{ (эрг/сек)} = (1,61 \pm 0,27) \lg B_{LC} \text{ (Гс)} + 24,94 \pm 1,25$
- $\lg L_x < 30,38 \rightarrow$  не синхротронное,
- а тепловое излучение за счёт остывания поверхности (и аккреции)

- $3^{1/2} \pi^{7/2} e \quad I \, dP/dt \, \gamma_b^{3/2}$
- $L = \frac{\quad}{\quad} \frac{\quad}{\quad}$

- $32 \, m^{1/2} \, c^{3/2} \quad P^{7/2} \, \gamma_p^2$

- 

- 



- $L < 2,13 \, 10^{30} \, \text{эрг/сек}$

# Радиосветимость

- 
- $\lg L_r = (1,08 \pm 0,17) \lg B_{LC} + 24,55 \pm 0,72$
- $\downarrow$
- $\lg L_r < 28,20$

- Принимая оценки радиопотока для PSR J1852+0040 на частоте 111 МГц  $S_{111} < 170$  мЯн и на 2000 МГц  $S_{2000} < 12$  мкЯн и представляя радиоспектр исследуемого пульсара степенной зависимостью:

- $S_\nu \propto \nu^\alpha$ ,

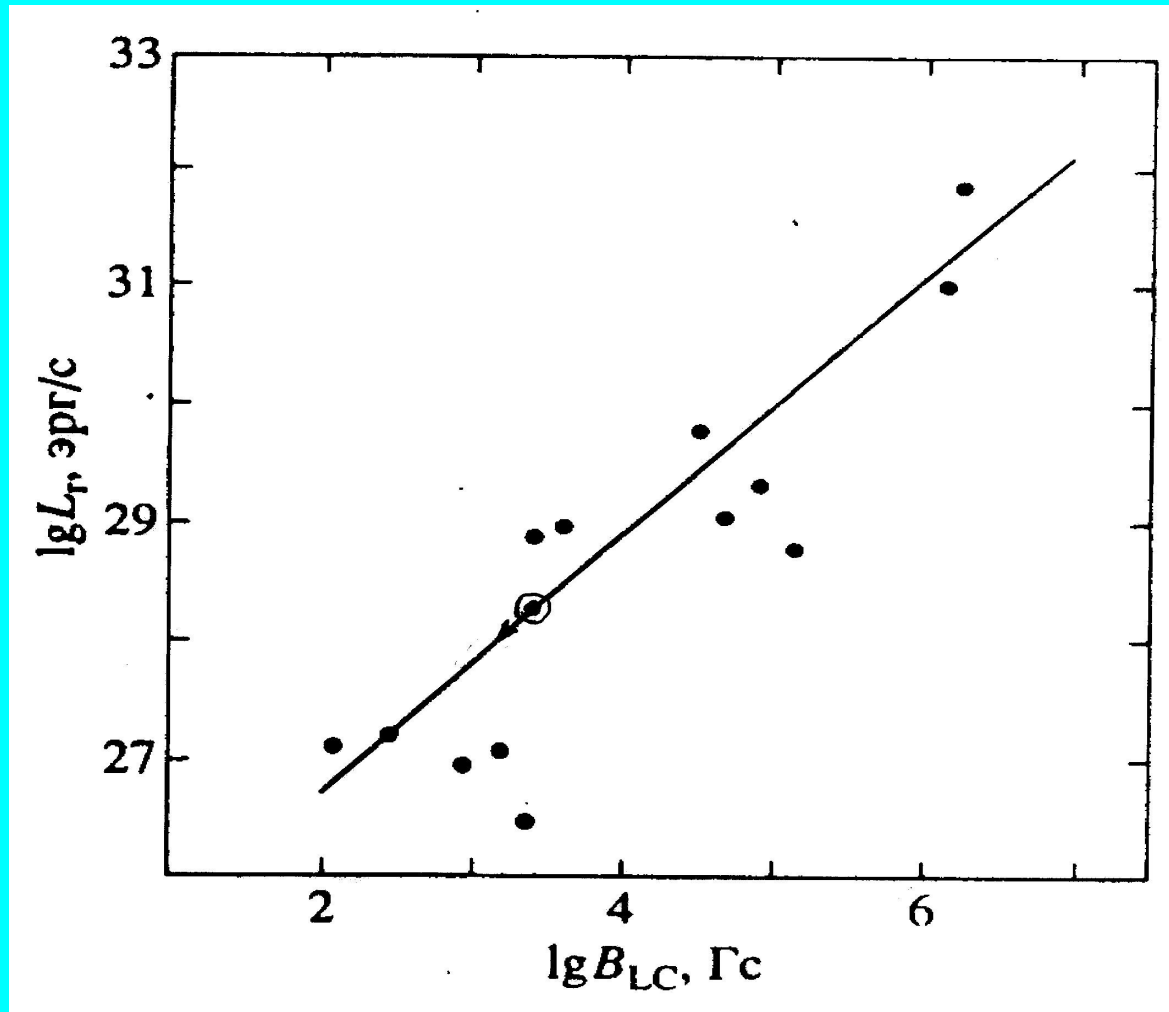
- получим для спектрального индекса  $\alpha$  значение

- У ряда радиопульсаров спектральный индекс близок к 3, в частности, у пульсара

- PSR B 0531+21 в Крабовидной туманности

- $\alpha \approx 2,8$ .





# Оптика

- Статистическое соотношение между оптической светимостью и  $V_{LC}$  даёт верхнюю оценку на оптическую светимость  $L_{opt} < 10^{28}$  эрг/сек.
- $\lg L_{opt} = (1.85 \pm 0.47) \lg V_{LC} + (21.00 \pm 2.32)$
- Вычисленные значения светимостей в радио и оптическом диапазоне не противоречат предположению о синхротронной или циклотронной природе излучения пульсара PSR J1852+0040.

# CSO E 1207.4+5209 (далее 1E 1207) в остатке сверхновой G296.5+10.0.

- $P = 424$  мсек
- $dP/dt = (6,6 \pm 9,0) 10^{-17}$  сек/сек
- $\downarrow$
- $V_s < 6,6 10^{11}$  Гс.
- Линии на 0,7 и 1,4 кэВ и возможно вблизи 2,1 и 2,8 кэВ  $\rightarrow V = 6 10^{10}$  Гс.
- $dE/dt < 1,3 10^{32}$  эрг/сек  $\rightarrow$  рентген связан с остыванием поверхности и аккрецией

# Модель ССО

- Часть поверхности нейтронной звезды, разогретая внутренними источниками (поскольку эти пульсары ещё достаточно молоды), бомбардировкой движущихся к поверхности позитронов (или электронов) и возможно частично аккрецирующим веществом из диска, испускает тепловое рентгеновское излучение. Затем в магнитосфере развиваются обычные для радиопульсаров процессы генерации электронно-позитронной плазмы и генерируются плазменные колебания, усиливающиеся за счёт тех или иных неустойчивостей. Относительно малый размер магнитосферы, характерный для короткопериодических пульсаров, приводит к генерации радиоизлучения лишь на её периферии (на расстояниях, сравнимых с радиусом светового цилиндра за счёт синхротронного (циклотронного) механизма

- Слабое магнитное поле на поверхности нейтронной звезды объясняет отсутствие туманности вокруг пульсара (PWN). Действительно, выброс частиц из пульсара

- 

- $$\frac{dN}{dt} = k \frac{\Omega^2 B_s R_*^3}{e c} \text{ эрг/сек,}$$

- 

- 

- где  $k$  – определённый коэффициент, пропорционален магнитному полю  $B_s$ .

- Динамика пульсарного ветра и его проявления в окружающей среде зависят от параметра, определяемого отношением плотности магнитной энергии к плотности энергии вытекающей плазмы

- $$\sigma = \frac{B^2}{4\pi m_e c^2 n \Gamma},$$

- $$4\pi m_e c^2 n \Gamma$$

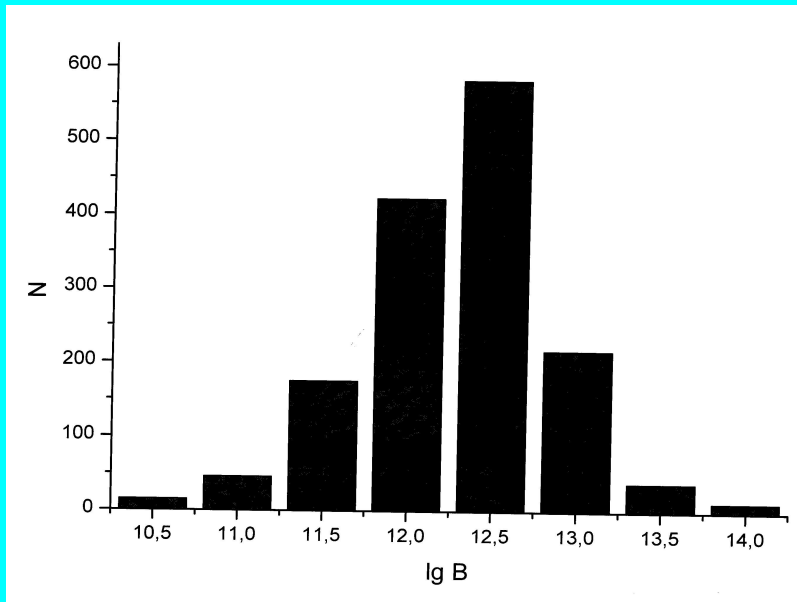
- где  $\Gamma$  – лоренц-фактор ветра, а  $n$  – концентрация частиц в ветре. Для объектов с величиной  $B$  на порядок меньше, чем у «нормальных» радиопульсаров, этот параметр будет на два порядка меньше, и существование заметной туманности вокруг пульсара становится проблематичным.

- Слабое магнитное поле даёт возможность плазме окружающего диска аккрецировать на нейтронную звезды и вызывать дополнительный нагрев поверхности нейтронной звезды.

- Для определения роли аккреции очень важны поляризационные измерения, которые бы позволили оценить угол между осью вращения и магнитным полем и выяснить возможное воздействие окружающего нейтронную звезду реликтового диска, как это сделано для некоторых аномальных объектов в наших работах по RRAT.



# Распределение магнитных полей на поверхности нейтронной звезды для 1511 нормальных пульсаров



- У 61 источника  $B_s < 10^{11}$  Гс. Если принять средний возраст радиопульсара  $6$  лет, а продолжительность наблюдаемой фазы остатка сверхновой порядка  $5$  лет, то число ССО должно быть порядка десятка

- ## XDINS
- После того, как остаток сверхновой станет ненаблюдаемым, нейтронная звезда может быть ещё регистрируемой за счёт потерь энергии вращения и излучения в радиодиапазоне, а также остывания поверхности и аккреции из оставшегося вокруг звезды диска и излучения в рентгене. Вполне возможно, что именно такие одиночные нейтронные звёзды со слабыми магнитными полями и представляют собой слабые рентгеновские источники XDINS.

- **СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**