

**Исследование структуры локальной межзвездной плазмы
наземно-космическим интерферометром
“РАДИОАСТРОН”
(по материалам кандидатской диссертации)**

Выступающий: Андрианов А.С.
Руководитель: д.ф.-м.н. Смирнова Т.В.

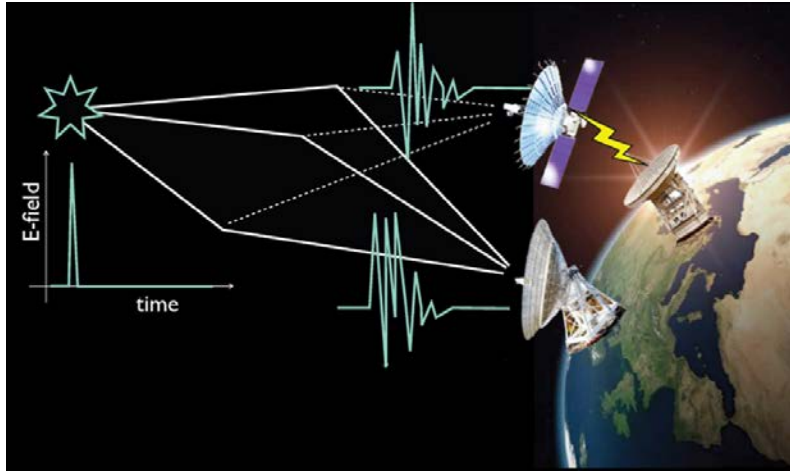
Астрокосмический центр Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н.
Лебедева РАН
(АКЦ ФИАН)

Москва, 2017

- **Цель** - данной работы исследование структуры локальной межзвездной плазмы на основе анализа межзвездных мерцаний близких пульсаров методами наземно-космической РСДБ.
- Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:
 1. Разработать модули программного обеспечения (ПО), реализующие алгоритмы первичной обработки данных РСДБ наблюдений пульсаров для программного коррелятора Астрокосмического центра ФИАН.
 2. Провести наблюдения, корреляционную обработку и анализ данных наземно-космического интерферометра Радиоастрон.
 3. Исследовать структуру и свойства межзвездной плазмы в направлении на пульсары PSR B0950+08, PSR B1919+21 и PSR B0525+21.

- **Введение**
- **Глава 1.** Межзвездные мерцания радиоисточников, интерферометрия
- **Глава 2.** Обработка данных проекта Радиоастрон
- **Глава 3.** Исследование межзвездной плазмы в направлении пульсаров V0950+08, V1919+21, V0525+21
- **Заключение**
- **Список литературы**
- **Список рисунков**
- **Список таблиц**
- **Приложение А. Основные используемые обозначения**

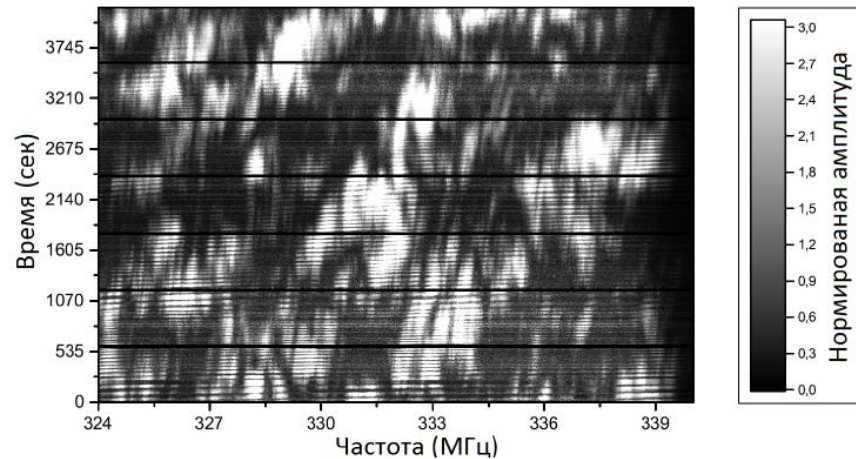
Межзвездные мерцания радиисточников



Эффекты рассеяния приводят к угловому уширению изображения пульсара, уширению импульса, модуляциям интенсивности (мерцаниям), и искажениям спектра источника. Влияние эффектов рассеяния на излучение пульсара можно представить в виде некой функции отклика на среду, которая отражает результат интерференционного усиления или ослабления излучения, пришедшего к наблюдателю различными путями, с различной оптической длиной.

$$E(\vec{\rho}, f, t) = u(\vec{\rho}, f, t)h(f, t)$$

PSR B1919+21



Т.к. относительная оптическая длина пути, проходимая излучением, распространяющимся различными путями через неоднородности среды, изменяется при изменении положения наблюдателя, то и функция отклика среды зависит от положения наблюдателя. Для большинства источников на метровых и дециметровых длинах волн, данный пространственный масштаб существенно превышает диаметр Земли, но, в то же время, во многих случаях он не превышает расстояние между радиотелескопом Радиоастрон и Землей.

$$t_{dif} = \frac{\rho_{dif}}{V_{\perp}}, \rho_{dif} = \frac{1}{k\theta_{scat}}; f_{dif} = \frac{c}{\pi Z\theta_{scat}^2}$$



- Радиоастрон – наземно-космический интерферометр с базой до 350 000 км
- Диапазоны длин волн:

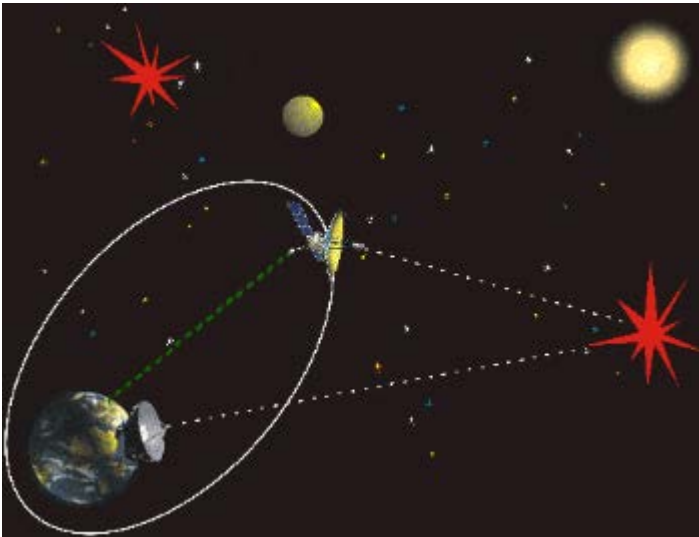
Р (327 МГц)

L (1668 МГц)

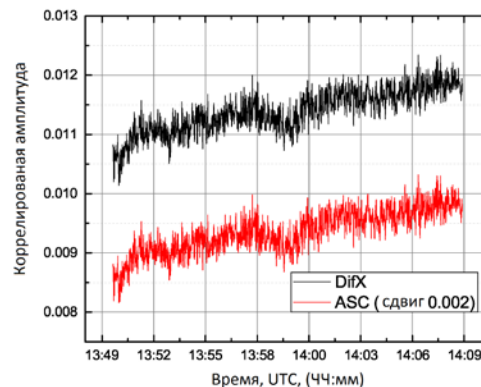
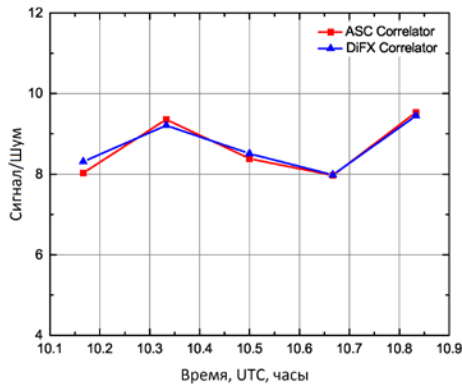
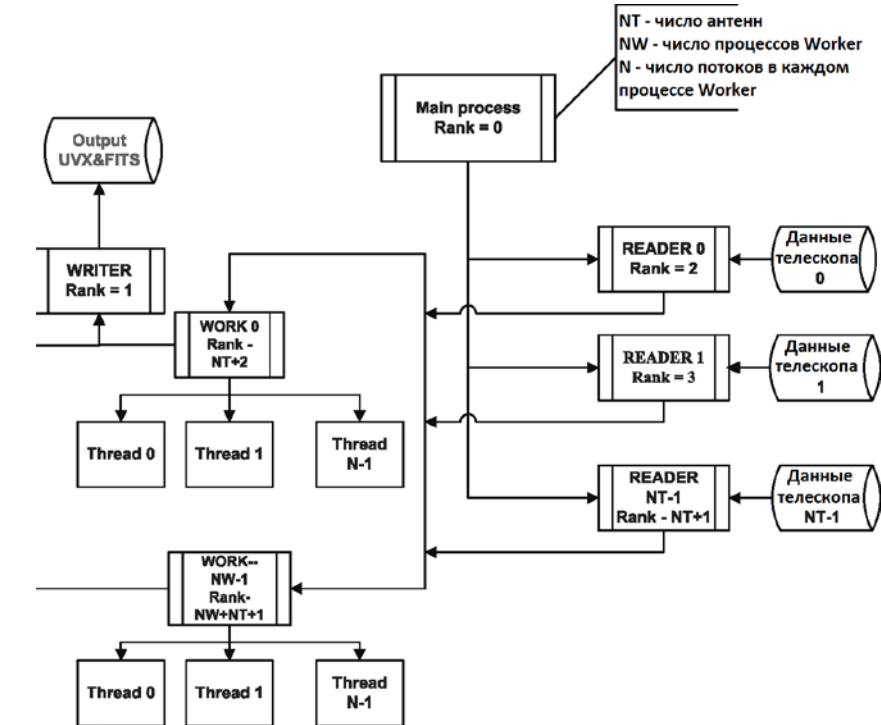
S (4828 МГц)

K (22 ГГц)

- На орбите с 18 июля 2011 г.



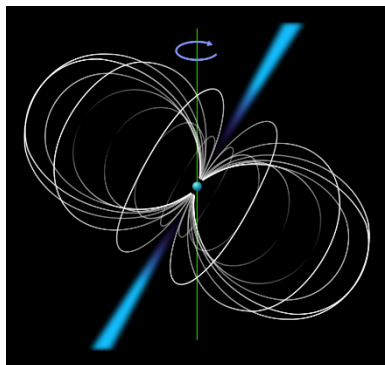
Глава 2. Обработка данных проекта Радиоастрон.



Основные характеристики коррелятора АКЦ:

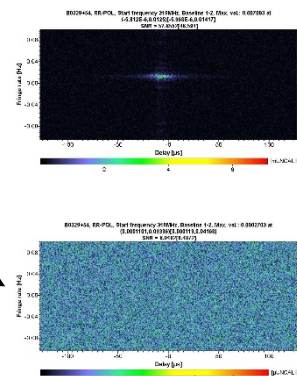
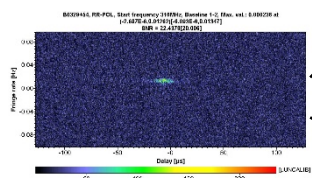
- FX коррелятор
- MPI архитектура
- Полная поддержка всех распространенных форматов входных данных: RDF, Mark5A, Mark5B, VDIF, VLBA, K5.
- Производительность компьютерного кластера 1 Тфлопс.
- Онлайн хранилище исходных данных 80 Тб.
- Онлайн хранилище результатов корреляции 160 Тб.
- Оффлайн архив данных телескопов 2450 Тб на жестких дисках и 2000 Тб на лентах.
- Возможность обработки данных 10 телескопов (45 баз) в режиме реального времени.
- Коррелятор АКЦ имеет специальные режимы для обработки источников непрерывного спектра, спектральных линий, пульсаров.
- Коррелятор АКЦ единственный коррелятор, поддерживающий работу в режиме Когерент Радиоастрона - данный режим подразумевает отказ от бортового Н-мазера и синхронизацию работы КРТ с наземного стандарта частоты.

Корреляционная обработка пульсаров



Пульсары, в отличие от AGN источников “светят” не все время – нужна модель задержки для определения времен прихода импульсов

Гейтинг в корреляторе

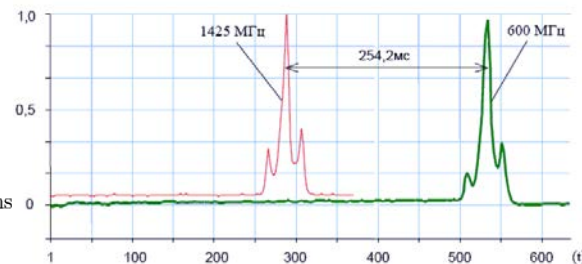


Компенсация межзвездной дисперсии

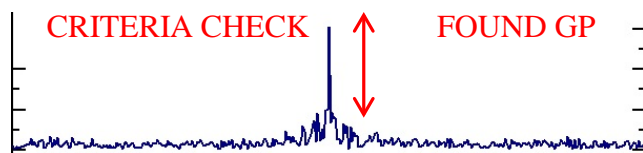
$$\Delta t = k_{DM} \times DM \times \left(\frac{1}{\nu_{lo}^2} - \frac{1}{\nu_{hi}^2} \right)$$

$$DM = \int_0^d n_e dl$$

$$k_{DM} = \frac{e^2}{2\pi m_e c} \approx 4.149 \text{ GHz}^2 \text{ pc}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ ms}$$



Поиск гигантских импульсов



- Коррекция формы полосы пропускания приемника для наземной базы

$$A_{BPcorrected_i} = \frac{A_{signal_i} - A_{noise_i}}{\langle A_{noise_i} \rangle}$$

- Для наземно-космической базы

$$A_{BPcorrected_i} = \frac{A_{signal_i} - \langle A_{noise_i} \rangle}{\langle A_{noise_i} \rangle}$$

- Удаление помех в спектре

$$A_{corrected_i} = A_m + \frac{(A_{m+n} - A_m)(i - m)}{n} + Random_{noise}$$

Глава 3.

Исследование межзвездной плазмы в направлении пульсаров B0950+08, B1919+21, B0525+21

- 25 января 2012 был проведен сеанс наблюдения пульсара PSR B0950+08. Длительность наблюдений составила один час, телескопы RA, AR, WB.

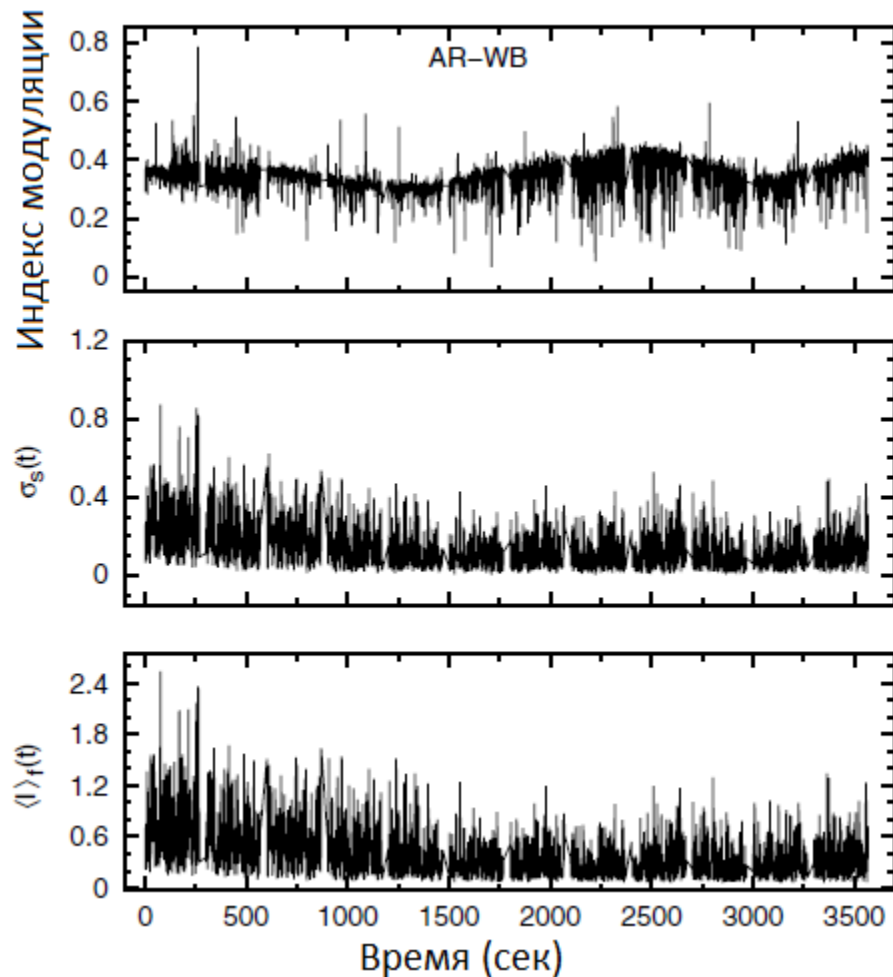
	P	DM	Z	l	b
PSR B0950+08	0.25 сек	2.97	0.26 кпк	228.91	43.7
PSR B1919+21	1.34 сек	12.44	1.0 кпк	55.78	3.5
PSR B0525+21	3.75 сек	50.9	1.6 кпк	183.86	-6.9

- 4 июля 2012 состоялись наблюдения пульсара

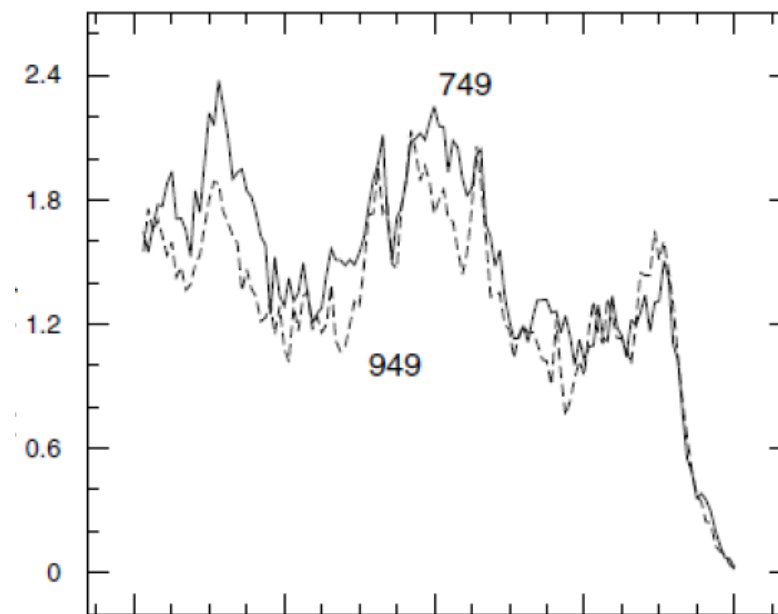
	частота наблюдения	число каналов	время интегрирования	время суммирования (в периодах пульсара)	проекция базы
PSR B0950+08	324 - 340 МГц	128	15 мс	1.0 сек (4 периода)	220000 км
PSR B1919+21	324 - 340 МГц	512	40 мс	5.36 сек (4 периода)	60000 км
PSR B0525+21	1652 - 1684 МГц	1024	37.45 мс	3.75 сек (1 период)	233600 км

PSR B1919+21. Длительность наблюдений составила один час десять минут, телескопы RA, GB, WB.

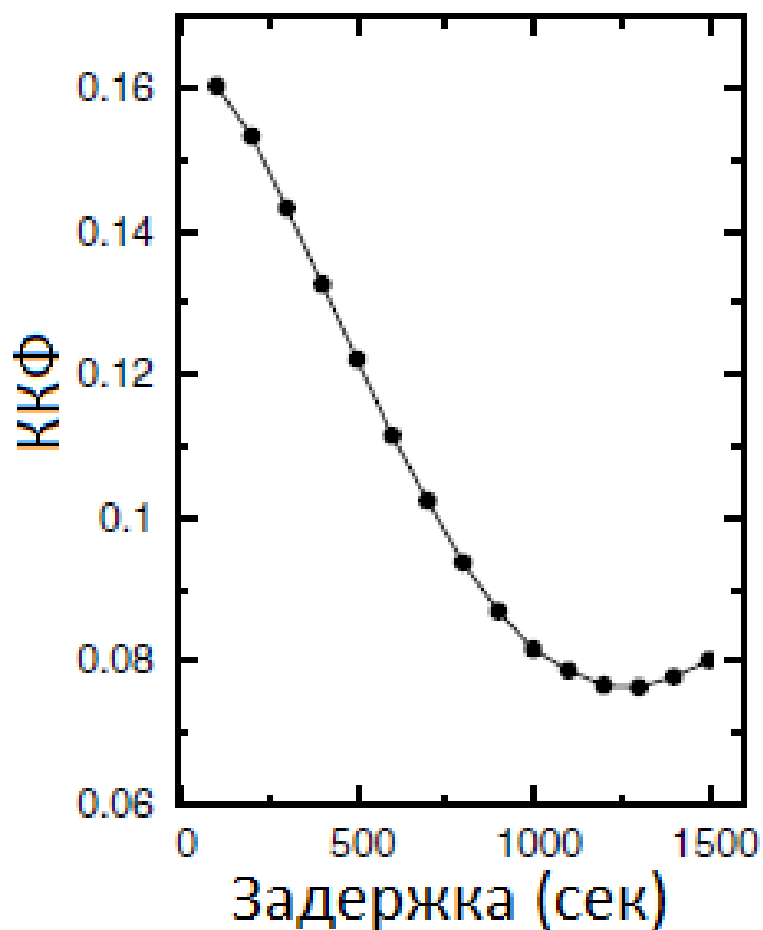
- 18 сентября 2013 в рамках первого года ключевой научной программы (АО-1) были проведены наблюдения пульсара PSR B0525+21. Длительность наблюдений составила 2.5 часа, телескопы RA, GB, AR, KL.
- Первичная обработка данных выполнялась на корреляторе АКЦ



- Высокий уровень собственной переменности
- Индекс модуляции $m = 0.35-0.4$
- Мерцания слабые, т.е. флуктуации фазы $\Delta\Phi_l \ll 2\pi$.



Индивидуальные импульсы PSR 0950+08



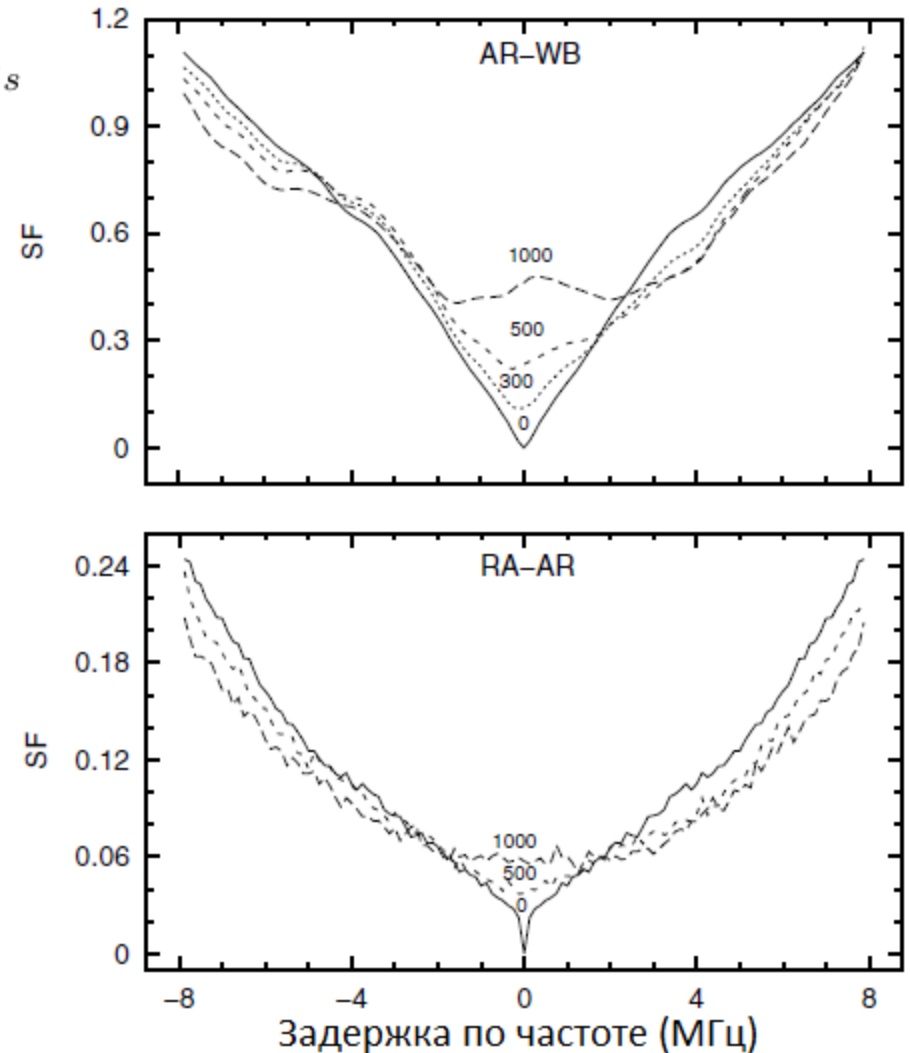
$$CCF(\Delta t) = \langle V(f,t)V^*(f,t + \Delta t) \rangle_{f,t}$$

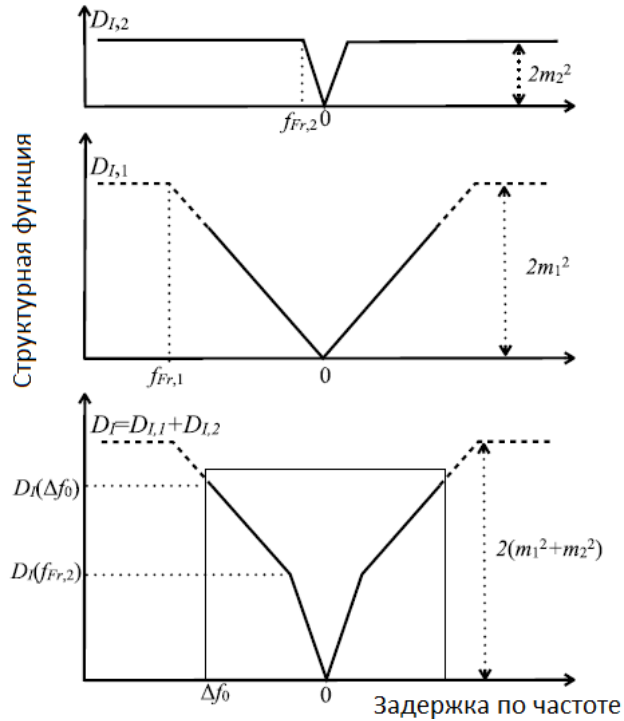
- Из временной ККФ можно определить временной масштаб мерцаний:

$$t_{dif} \approx 1000 \text{ сек}$$

$$D_{\Delta I}(\Delta \vec{\rho}) = \langle (\Delta I(\vec{\rho} + \Delta \vec{\rho}) - \Delta I(\vec{\rho}))^2 \rangle_s$$

В структурной функции на более длинной базе RA-AR присутствует только широкий компонент, узкий компонент на длинной базе исчезает. Также можно заметить, что на наземной базе AR-WB узкий компонент имеется только при малых временных сдвигах, в то время как широкий компонент присутствует как при малых так и при больших временных сдвигах. Два этих частотных масштаба, узкий и широкий, соответствуют двум разнесенным в пространстве эффективным слоям турбулентной плазмы, на которых происходит рассеяние излучения от пульсара.





Структурная функция флуктуаций фазы на экране

$$D_{S,l}(\Delta \vec{x}_l) = (k\Theta_{scat,l}|\Delta \vec{x}_l|)^{\alpha_l}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$$

$$D_{I,l}(\vec{r}_l) = \begin{cases} m^2 \frac{|\vec{r}_l|}{\rho_{Fr,l}}, & |\vec{r}_l| < \rho_{Fr,l} \\ m^2, & |\vec{r}_l| \geq \rho_{Fr,l} \end{cases}$$

$$\frac{|\vec{r}_l|}{\rho_{Fr,l}} = \left| \frac{\Delta \vec{\rho}}{\rho_{Fr,l}} + \frac{\Delta t}{t_{Fr,l}} + \frac{\theta_0 \Delta f}{f_{Fr,l}} \right|$$

- Структурная функция на короткой базе:

$$D_{I,AR-WB} \equiv D_I = D_{I,1} + D_{I,2}$$

$$D_I(\Delta f) = \begin{cases} 2m_1^2 \left| \frac{\Delta f}{f_{Fr,1}} \right| + 2m_2^2 \left| \frac{\Delta f}{f_{Fr,2}} \right|, & |\Delta f| < f_{Fr,2} \\ 2m_1^2 \left| \frac{\Delta f}{f_{Fr,1}} \right| + 2m_2^2, & f_{Fr,1} > |\Delta f| > f_{Fr,2} \\ m_1^2 + m_2^2, & |\Delta f| > f_{Fr,1} \end{cases}$$

- Наклон меняется $\Delta f = f_{Fr,2} = 3.1$ МГц

$$D_I(f_{Fr,2}) \approx 0.5 D_I(\Delta f_0) \quad f_{Fr,2} = 3.1 \text{ МГц и } \Delta f_0 = 8 \text{ МГц}$$

$$\begin{cases} 2m_1^2 \frac{f_{Fr,2}}{f_{Fr,1}} + 2m_2^2 \approx 0.5 \left(2m_1^2 \frac{\Delta f_0}{f_{Fr,1}} + 2m_2^2 \right) \\ D_I(\Delta f_0) = 2m_1^2 \frac{\Delta f_0}{f_{Fr,1}} + 2m_2^2 \approx 2m^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_1 = \sqrt{\frac{f_{Fr,1}}{2\Delta f_0 + 2f_{Fr,2}}} m \\ m_2 = \sqrt{\frac{\Delta f_0 - 2f_{Fr,2}}{2\Delta f_0 - 2f_{Fr,2}}} m = 0.15 \end{cases}$$

- Используя $f_{Fr,1} > \Delta f_0 = 8$ МГц $f_{Fr,1} < 15$ МГц

$$0.32 < m_1 < 0.43$$

- экран 1 ближе к наблюдателю т.к. частотный масштаб Френеля у него больше

Определение расстояния до ближнего экрана

- Узкий компонент SF исчезает при $t \sim 1000$ сек, т.е. временной масштаб дальнего экрана менее 1000 сек.
- Масштаб ближнего экрана можно определить из SF при сдвиге в 1000 сек

$$D_I(\Delta f = 0, \Delta t = 10^3 \text{ сек}) = 0.42 D_I(\Delta f = \Delta f_0, \Delta t = 0)$$

$$\left(\frac{V_1 \Delta t}{\rho_{Fr,1}}\right) m_1^2 + 2m_2^2 = 0.42 \left[2 \left(\frac{\Delta f_0}{f_{Fr,1}}\right) m_1^2 + 2m_2^2\right] \Rightarrow \rho_{Fr,1} = \frac{m_1^2 f_{Fr,1} V_1 \Delta t}{0.42 \Delta f_0 m_1^2 - (1 - 0.42) f_{Fr,1} m_2^2}$$

$$\rho_{Fr,1} = (1.4 - 2.7) \times 10^5 \text{ км}$$

$$V_1 = V_{obs} = 41 \text{ км сек}^{-1}$$

(скорость Земли)

$$\rho_{Fr,1} = (z_1/k)^{1/2} \Rightarrow z_1 = k(\rho_{Fr,1})^2 = (4.4 - 16.4) \text{ пк}$$

Космическая призма и расстояние до дальнего экрана

- Предположим, что между пульсаром и экранами расположена космическая призма, или слой плазмы, имеющий градиент коэффициента преломления. Данная призма будет отклонять излучение от пульсара на частотно-зависимый угол.

$$\vec{\theta}_f = \left(1 - \frac{\nu_0^2}{(f + \nu_0)^2}\right) \theta_0 \approx 2(f/\nu_0) \vec{\theta}_0$$

- Для экрана и космической призмы, расположенной за экраном, видимое смещение источника приводит к смещению картины мерцаний в плоскости наблюдателя на расстояние $\vec{\rho}_{f,1} = z_1 \vec{\theta}_f$

$$f_{Fr,1} = \frac{\nu_0}{2\theta_0} \frac{\rho_{Fr,1}}{z_1} = \frac{\nu_0}{2\theta_0} \sqrt{\frac{1}{kz_1}} \Rightarrow \theta_0 = \frac{\rho_{Fr,1}}{2z_1} \frac{\nu_0}{f_{Fr,1}} \Rightarrow \theta_0 = (1.1 - 4.4) \text{ мсек дуги}$$

$$f_{Fr,2} = \frac{\nu_0}{2\theta_0} \frac{\rho_{Fr,2}(Z - z_2)}{Zz_2} = \frac{\nu_0}{2\theta_0} \sqrt{\frac{Z - z_2}{kZz_2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{Fr,2} = 3.1 \text{ МГц} \\ \theta_0 = (1.1 - 4.4) \text{ мсек дуги} \end{array} \right. \Rightarrow z_2 = (26 - 170) \text{ ПК}$$

$$\rho_{Fr,2} = (z_2 z_2 / (z - z_2) k)^{1/2} \Rightarrow \rho_{Fr,2} = (3.5 - 15) \times 10^5 \text{ км}$$

- Если наблюдатель движется со скоростью перпендикулярной направлению на пульсар, и если экран 1 движется, то пространственное смещение наблюдателя относительно картины мерцаний увеличивается с изменением времени

$$\vec{\rho}_{t,1} = \vec{V}_1 \Delta t = (\vec{V}_{obs} - \vec{V}_{scr,1}) \Delta t$$

- Если смещение наблюдателя параллельно направлению дисперсии космической призмы, то наблюдатель заметит сдвиг картины мерцаний по частоте, как функцию времени
- Для дальнего экрана учитываем сферичность волны:

$$\vec{\rho}_{t,2} = \vec{V}_2 \Delta t = (\vec{V}_{obs} - \frac{Z}{Z - z_2} \vec{V}_{scr,2} + \frac{z_2}{Z - z_2} \vec{V}_{PSR}) \Delta t$$

- Таким образом, задержка во времени эквивалентна изменению местоположения в направлении линейной комбинации векторов $\vec{V}_{obs}, \vec{V}_{scr}, \vec{V}_{PSR}$

Асимметрия структурной функции

- Степень асимметрии:

$$\mathcal{D}(\Delta f, \Delta t) = \frac{D_I(\Delta f, \Delta t) - D_I(-\Delta f, \Delta t)}{D_I(\Delta f, \Delta t) + D_I(-\Delta f, \Delta t)}$$

- На базе AR-WB два экстремума при $\Delta f > 0$.
 $\Delta f_1 \approx 3$ МГц
 $\Delta f_2 \approx 1$ МГц
- Проекции скоростей экранов имеют разный знак
- На базе RA-AR только минимум при $\Delta f_1 \approx 3$ МГц т.к. RA-AR чувствительна только к ближнему экрану то $\Delta f_1 \approx 3$ МГц связан с экраном 1, а $\Delta f_2 \approx 1$ МГц с экраном 2

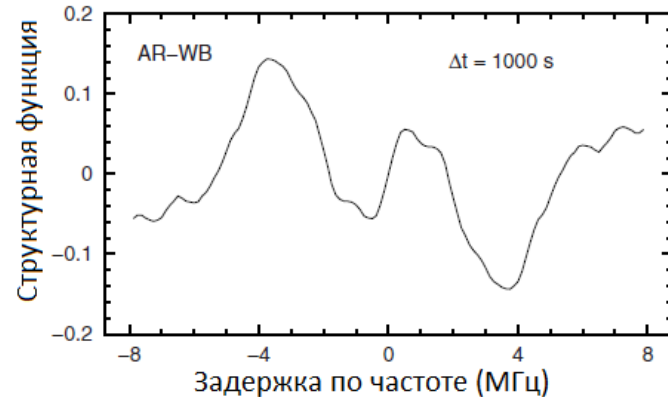
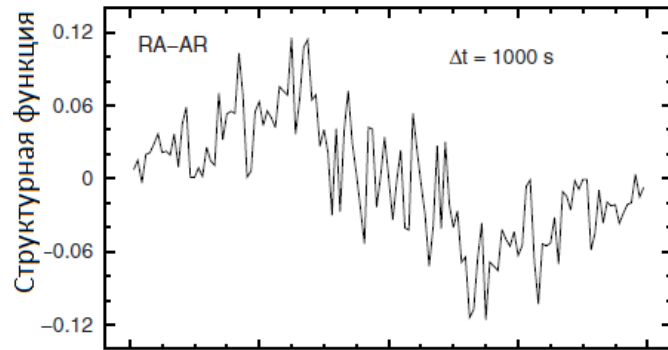
- Для базы AR-WB максимум SF: $\begin{cases} \rho_{Fr,2}/V_2 < \Delta t < \rho_{Fr,1}/V_1 \\ |\Delta \vec{\rho}_{AW}| < \rho_{Fr,2} \end{cases}$

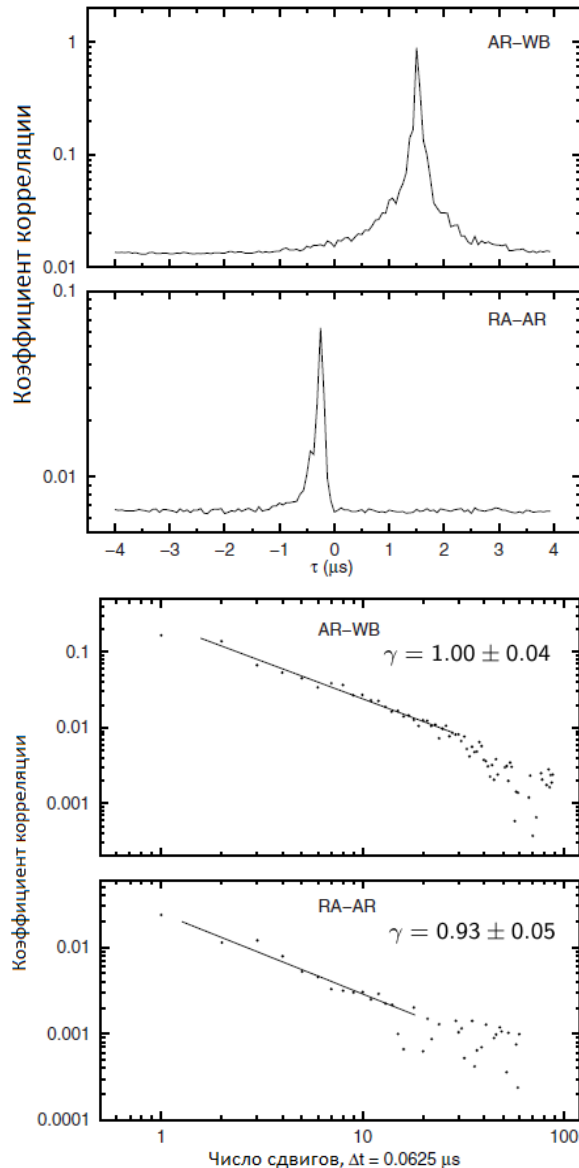
$$\mathcal{D}(\Delta f, \Delta t) \approx \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 \left(\frac{\rho_{Fr,1}}{\rho_{Fr,2}}\right) \cos \beta_2 \approx 0.05 - 0.1 \cos \beta_2$$

$$\mathcal{D}(\Delta f_2, \Delta t = 10^3 \text{ сек}) \approx 0.05 \Rightarrow 0^\circ \leq \beta_2 \leq 60^\circ$$

- Аналогично по минимуму найдем β_1

$$\mathcal{D}(\Delta f, \Delta t) \approx \cos \beta_1 \quad \mathcal{D}(\Delta f_1, \Delta t = 10^3 \text{ сек}) \approx -0.15 \Rightarrow \beta_1 \approx 100^\circ$$





- ККФ имеет узкий компонент и широкий

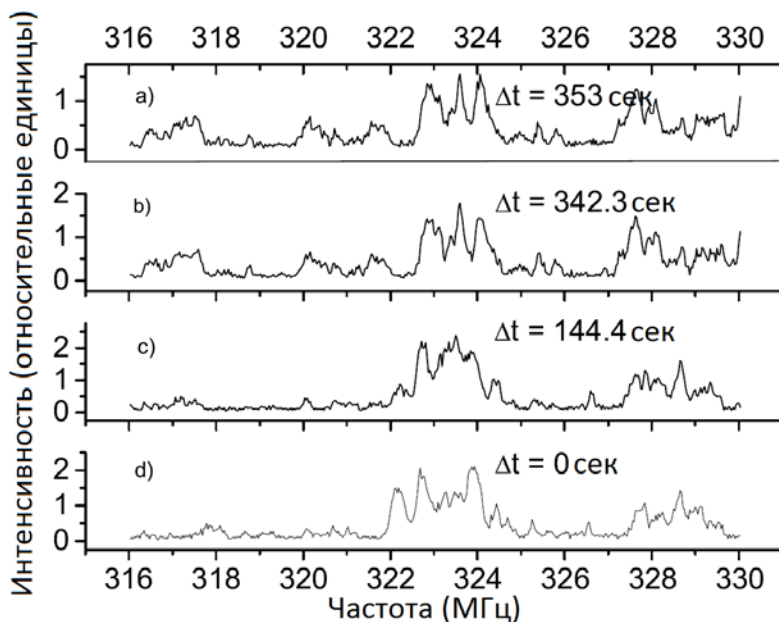
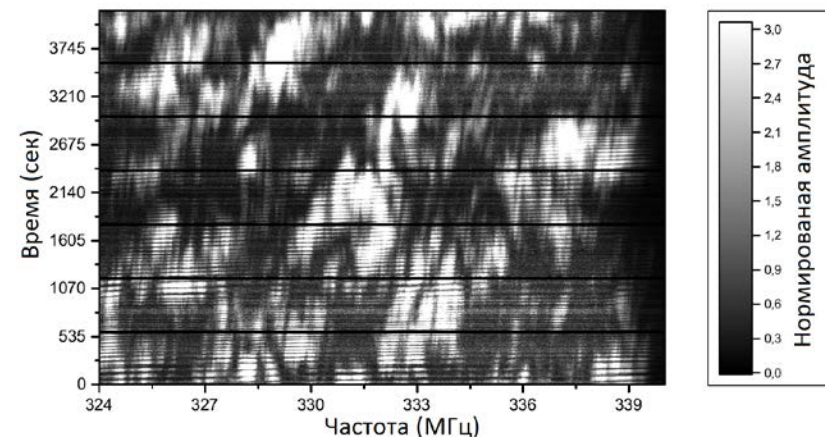
$$\langle |P_I(\tau)| \rangle \sim \tau^{-(\gamma+1)/2}$$

$$n = \gamma + 2$$

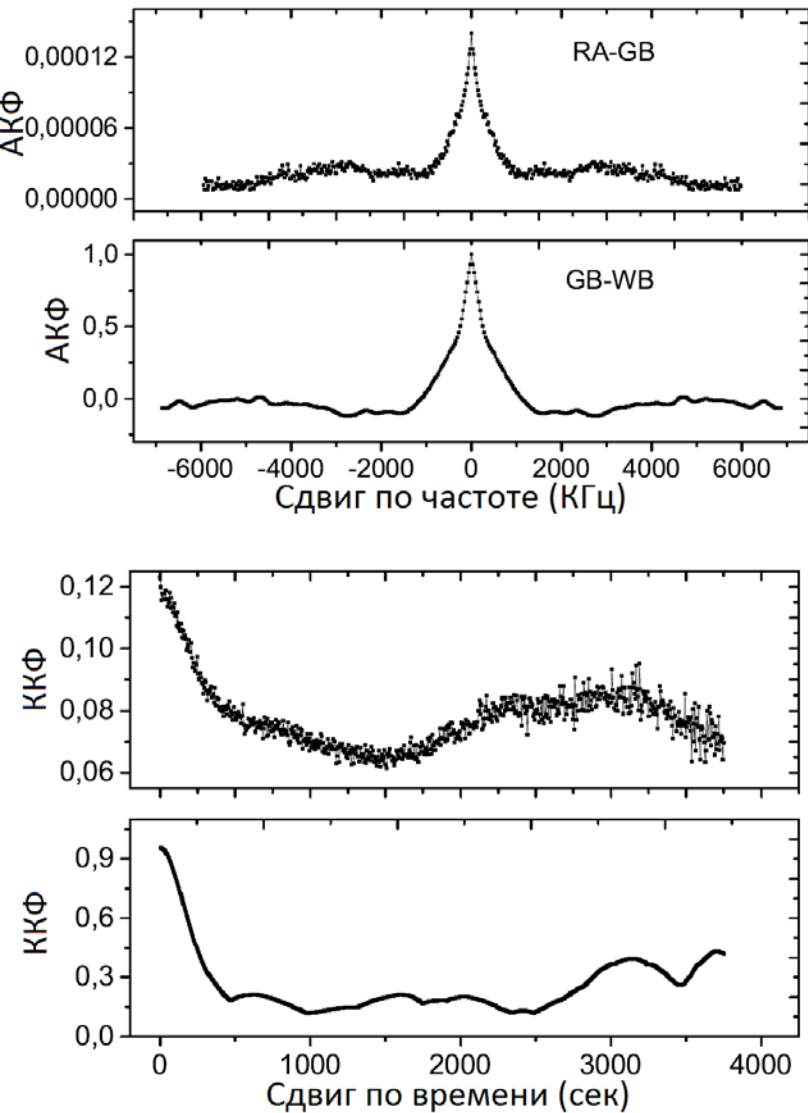
- Малые задержки соответствуют ближнему экрану, большие дальнему
- Т.к. структура симметричная угол преломления \gg угла рассеяния
- На базе AR-WB $n_1 = 3.00 \pm 0.04$
- На базе RA-AR $n_2 = 2.93 \pm 0.05$
- Т.о. спектр неоднородностей похож для обоих экранов.
- Значение показателя спектра соответствует измерениям на 40-112 МГц

- В направлении пульсара PSR B0950+08 были обнаружены два экрана на которых происходит рассеяние, им соответствует двухчастотная структура спектров.
- Определены расстояния до экранов 4.4-16.4 пк и 26-170 пк
- Впервые был получен угол преломления в МЗС, который в направлении на пульсар PSR B0950+08 составил $\theta = 1.1-4.4$ мсек дуги.
- Спектр неоднородностей МЗС в направлении на пульсар PSR B0950+08 подчиняется степенному закону с показателем $n = 3.00 \pm 0.08$

PSR B1919+21



- На спектрах индивидуальных импульсов хорошо видны два частотных масштаба: мелкомасштабный порядка 400 КГц и крупномасштабный порядка 1500 КГц
- Наклон полос обусловлен рефракцией
- Индекс модуляции меняется в пределах от 0.7 до 1.0 на масштабе времени порядка 500 сек.
- Т.к. индекс модуляции близок к 1 можно сделать вывод о том, что в направлении на пульсар PSR1919+21 реализуется модель сильного рассеяния.



- Ковариационная функция на наземной базе:

$$J_2(\vec{b}, \Delta f) = \langle |I(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f, t) I^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f + \Delta f, t)| \rangle$$

- На наземно-космической:

$$J_1(\vec{b}, \Delta f) = |\langle I(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f, t) I^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f + \Delta f, t) \rangle|$$

- Излом ККФ на GB-WB указывает на наличие двухмасштабной структуры
- Отсутствие излома на RA-GB указывает на отсутствие широкомасштабной структуры на большой базе
- Из анализа ККФ можно определить

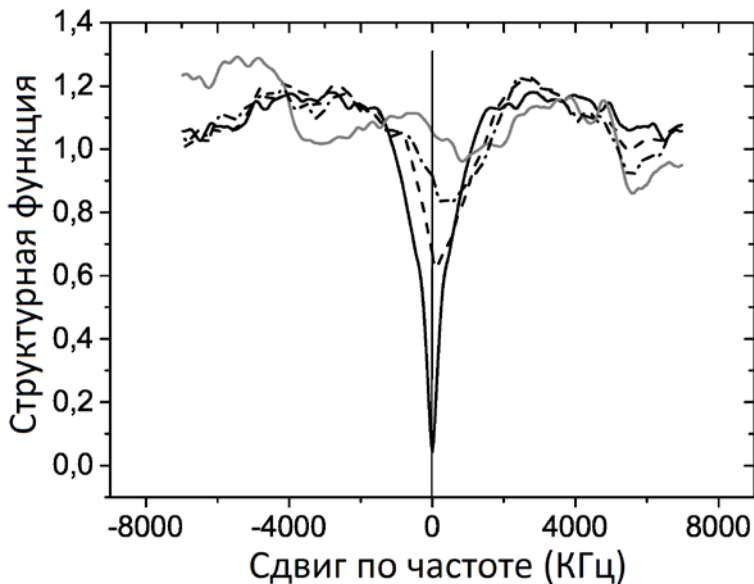
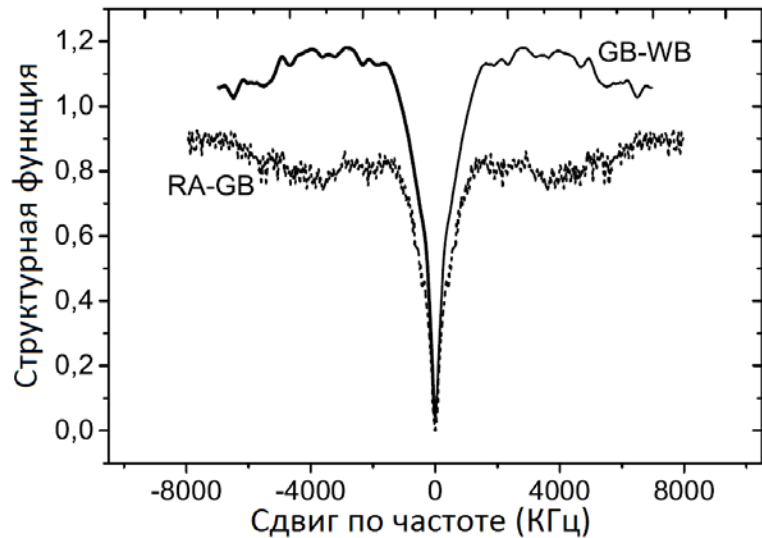
$$\Delta f_{dif} = 330 \text{ КГц и } \Delta f_{wide} = 700 \text{ КГц} \quad \Delta t_{dif} = 290 \text{ сек}$$

- В случае сильных мерцаний:

$$J_1(\vec{b}_s, \Delta f) = |\langle j(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}_s, f, t) j^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}_s, f + \Delta f, t) \rangle| \\ = |B_u(f)|^2 + |B_u(\vec{b}_s)|^2.$$

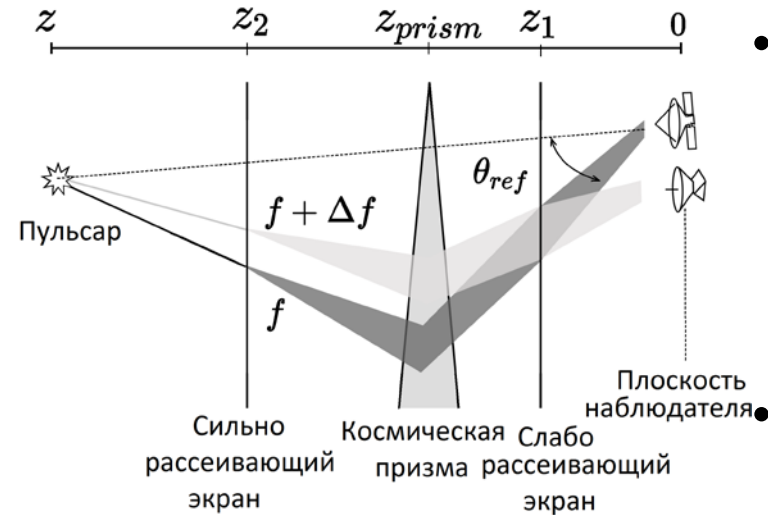
$$\frac{J_1(\vec{b}_s, \Delta f > \Delta f_{dif})}{J_1(\vec{b}_s, \Delta f = 0)} = \frac{|B_u(\vec{b}_s)|^2}{1 + |B_u(\vec{b}_s)|^2} = 0.17$$

$$|B_u(\vec{b}_s)|^2 = 0.20$$



- На короткой базе в структурной функции наблюдается как узкий так и широкий компонент.
- На длинной базе широкий компонент подавлен и остается только узкий. Смещение узкого компонента при временном сдвиге не наблюдается.
- Смещение минимума SF с увеличением временного сдвига обусловлено рефракционным смещением дифракционной картины – наличием призмы на луче зрения за ближним экраном.

Модель среды в направлении пульсара PSR B1919+21



- Нормированная ККФ на наземно-космической базе $|B_u(\vec{b})|^2 = 0.20$ $D_s(\vec{b}) = \left(\frac{|\vec{b}|}{\rho}\right)^\alpha$, $\alpha = n - 2$

$$b_{dif} = \frac{Z}{(Z - z_2)} \frac{1}{k\theta_{scat,2}} = 4.6 \times 10^9 \text{ см}$$

$$z_2/(Z - z_2) = b_{dif}/(|\vec{V}_{PSR}| t_{dif}) = 0.78$$

$$z_2 = 0.44Z, Z = 440 \text{ пк}$$

$$\theta_{scat,2} = 1.2 \text{ мас}$$

При этом в плоскости наблюдателя

$$\theta_{obs,2} = [(Z - z_2)/Z]\theta_{scat,2} = 0.7 \text{ мас}$$

- Из сдвига минимума SF при максимальном разнесении по времени найдем масштабы Френеля для ближнего экрана

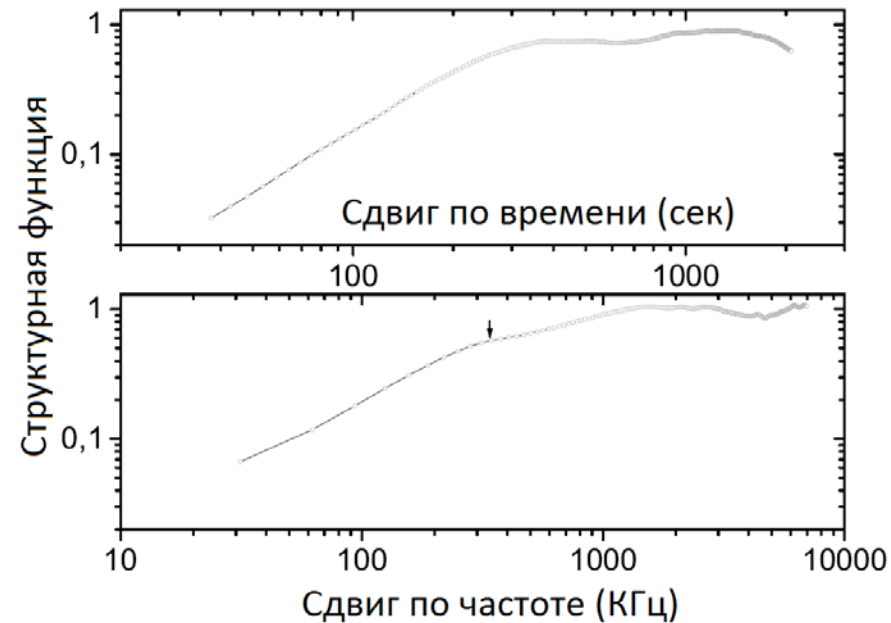
$$f_{1,0} = 1.1 \text{ МГц} \Rightarrow t_{1,0} = f_{1,0}(df/dt)^{-1} = 700 \text{ сек} \Rightarrow \Delta\rho_{1,Fr} = 2^{1/\alpha_1} V_{obs} t_{1,0} = 2.5 \times 10^9 \text{ см}$$

$$\text{и расстояние до экрана } \Delta\rho_{1,Fr} = \sqrt{\frac{z_1}{k}} \Rightarrow z_1 = 0.14 \pm 0.05 \text{ пк} \quad \Delta\vec{\rho}_{1,f} = -2z_1(f/\nu_0)\vec{\theta}_{ref,0} \Rightarrow \theta_{ref,0} = 110 \text{ мас}$$

$$D_{S,1}(\Delta\rho_{1,Fr}) = (k\theta_{scat,1}\Delta\rho_{1,Fr})^{\alpha_1} = 0.15 \Rightarrow \theta_{scat,1} = 0.4 \text{ мас}$$

При условии, что рефракционное смещение меньше масштаба дифракционной картины мерцаний, можно оценить расстояние до призмы

$$2(f_{dif}/\nu_0)z_{prism}\theta_{ref,0} < b_{dif} = 4.6 \times 10^9 \text{ см} \Rightarrow \begin{cases} f_{dif} = 330 \text{ КГц} \\ \theta_{ref,0} = 110 \text{ мас} \end{cases} \Rightarrow z_{prism} \leq 2 \text{ пк}$$



- SF можно аппроксимировать степенными

$$SF(\Delta f) = \frac{1}{2} (\Delta f / \Delta f_{dif})^{\alpha_f} \quad \alpha_f = 0.90 \pm 0.03$$

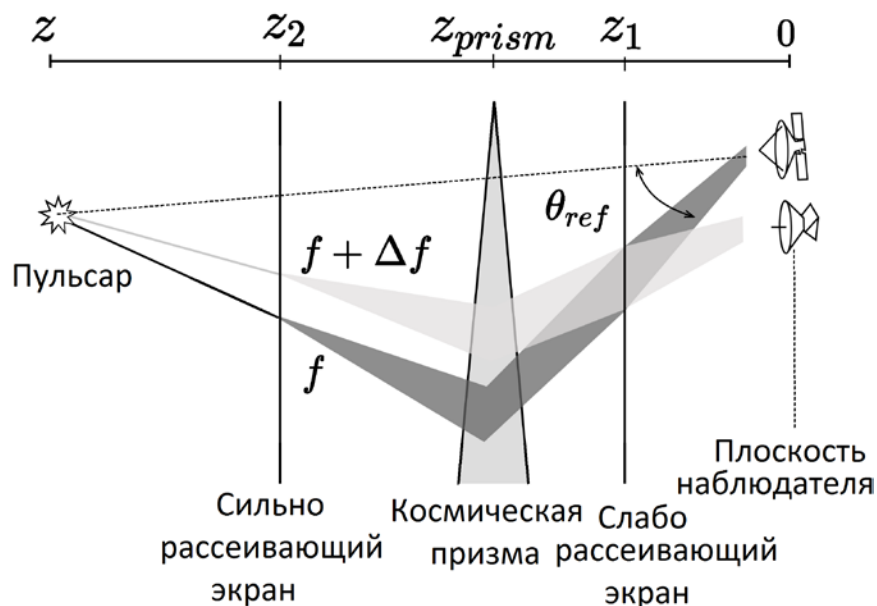
$$SF(\Delta t) = \frac{1}{2} (\Delta t / \Delta t_{dif})^{\alpha_t} \quad \alpha_t = 1.73 \pm 0.02$$

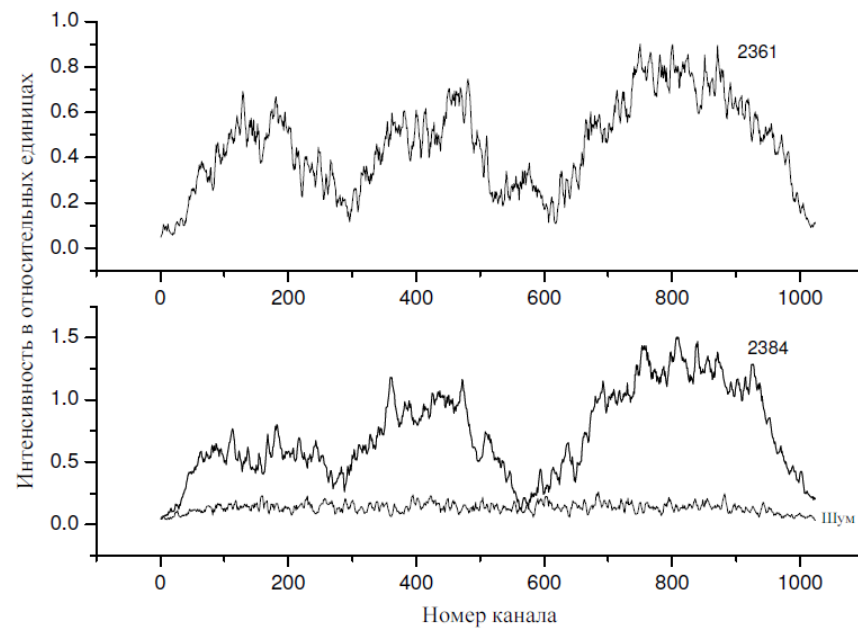
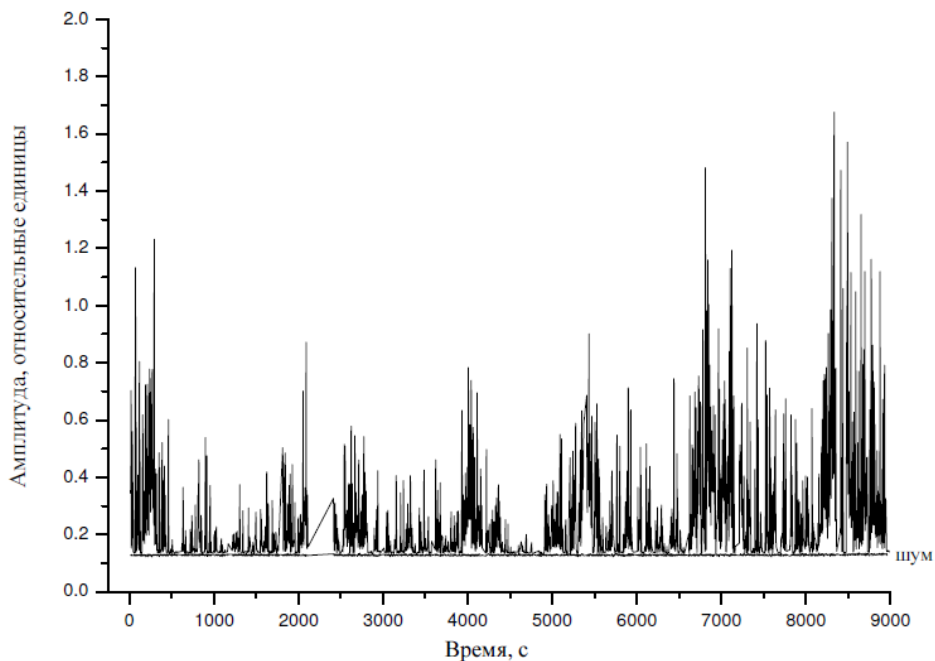
- Показатель степени степенного спектра неоднородностей плотности вызывающих мерцания связан с показателем степени структурной функции

$$n = \alpha_t + 2 = 3.73$$

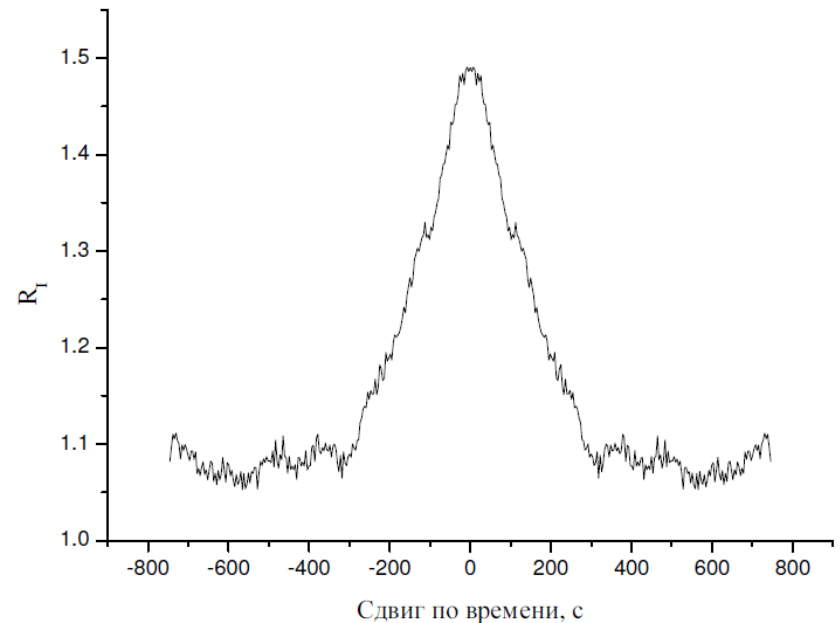
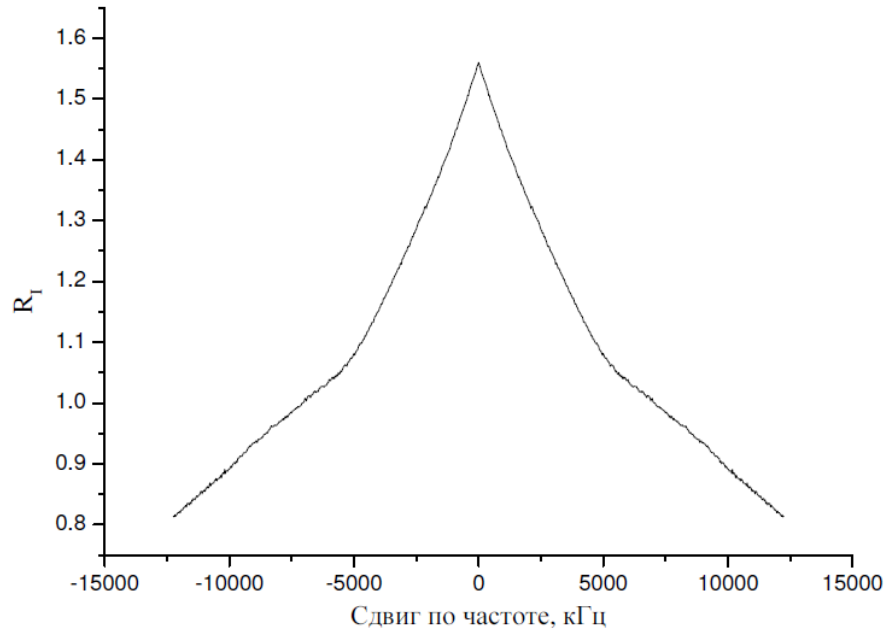
PSR B1919+21. Основные результаты.

- Межзвездные мерцания PSR B1919+21 определяются двумя рассеивающими экранами. Реализуются дифракционные мерцания на дальнем экране, расположенном на расстоянии 440 пк и слабые мерцания на ближнем слое плазмы, расположенном на расстоянии 0.14 пк от наблюдателя.
- Показано существование призмы на луче зрения и определено расстояние до нее менее 2 пк. Угол преломления призмы около 110 mas.
- Показатель спектра неоднородностей 3.73





- Индекс модуляции $m = 0.8 \pm 0.2$
- Мерцания сильные

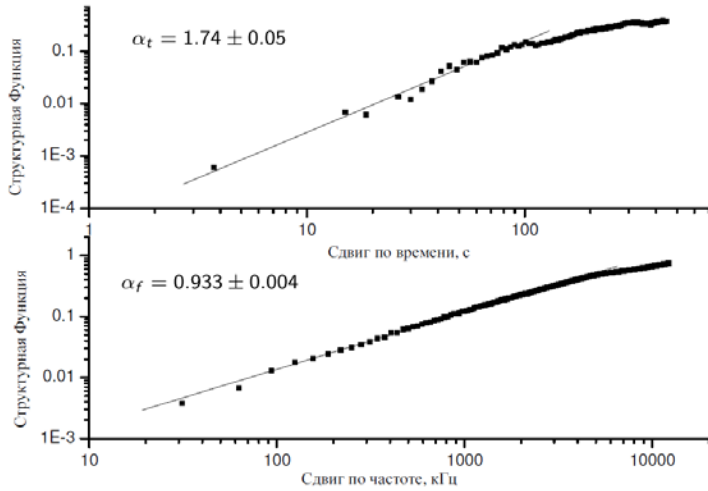


Средняя ККФ по сильным импульсам

$$R_I(\Delta f) = \left\langle \frac{\langle |I(f,t)| \cdot |I(f + \Delta f)| \rangle_f}{[\langle |I(f,t)| \rangle_f]^2} \right\rangle_t$$

Масштабы мерцаний

$$\begin{aligned} f_{dif} &= 3.9 \text{ МГц} \\ t_{dif} &= 160 \text{ с} \end{aligned}$$



- Фазовая SF

$$D_s(\Delta t) = R_I(\Delta t = 0) - R_I(\Delta t) \quad D_s(\Delta t) = (\Delta t/t_{dif})^\alpha \quad \Delta t \leq t_{dif}$$

$$D_s(\Delta f) = R_I(\Delta f = 0) - R_I(\Delta f) \quad D_s(\Delta f) = (\Delta f/\Delta f_{dif})^{\alpha/2} \quad \Delta f \leq \Delta f_{dif}$$

- Наклон SF свидетельствует о дифракционной модели мерцаний

$$\alpha_t = 1.74 \quad \alpha_f = 0.93$$

- Показатель спектра неоднородностей Колмогоровский

$$n = \alpha + 2 \quad \boxed{n = 3.74}$$

- На наземно-космической базе

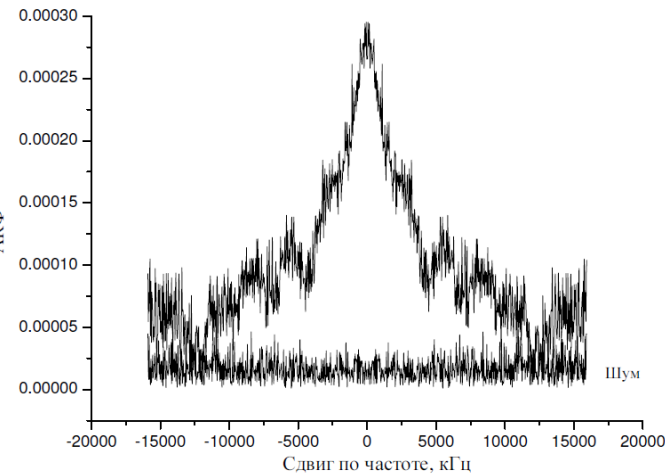
$$J_1(\vec{b}, \Delta f) = |\langle I(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f, t) I^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f + \Delta f, t) \rangle|$$

- В режиме сильных мерцаний

$$J_1(\vec{b}, \Delta f) = |\langle j(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f, t) j^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{b}, f + \Delta f, t) \rangle|$$

$$= |B_u(f)|^2 + |B_u(\vec{b})|^2.$$

$$\frac{J_1(\vec{b}, f > \Delta f_{dif})}{J_1(\vec{b}, \Delta f = 0)} = \frac{|B_u(\vec{b})|^2}{[1 + |B_u(\vec{b})|^2]} = 0.23 \pm 0.05 \Rightarrow \boxed{|B_u(\vec{b})|^2} = 0.30 \pm 0.06$$



- Масштаб когерентности

$$\left\{ \begin{array}{l} B_u(\vec{b}) = \exp[-\frac{1}{2}D_s(\vec{b})] \\ D_s(\vec{b}) = \left(\frac{|\vec{b}|}{\rho}\right)^\alpha, \alpha = n - 2 \\ n = 3.74 \end{array} \right. \Rightarrow \rho = (2.1 \pm 0.2) \cdot 10^5 \text{ км}$$

- Радиус диска рассеяния $\theta_{scat} = 1/k\rho = (0.028 \pm 0.002)$
- Временные флуктуации SF определяются движением пульсара

$$D_s(t) = \int_0^Z dz' D\left(\frac{Z-z'}{Z}\vec{V}t\right)$$

- В случае однородной среды ρ и Vt_{dif} должны быть равны.

$$Z = 1.6 \text{ кпк} \quad V: \text{от } 0 \text{ км/с до } 310 \text{ км/с.} \Rightarrow Vt_{dif} = 49600 \text{ км} \quad \text{т.е. среда неоднородна}$$

$$\Delta f_{dif} = G(\gamma)(kb_s)^2/\pi z_{eff} \quad z_{eff} = z_1(Z - z_1)/Z, \quad b_s = \rho(z_1/Z) \quad G = 0.34$$

$$\frac{z_1/Z}{1 - z_1/Z} = \pi Z \Delta f_{dif} / [G(\gamma)c(k\rho)^2] \left\{ \begin{array}{l} f_{dif} = 3.9 \text{ МГц} \\ \rho = (2.1 \pm 0.02) \cdot 10^5 \text{ км} \\ Z = 1.6 \text{ кпк,} \end{array} \right. \Rightarrow z_1/Z = 0.1 \Rightarrow z_1 = 160 \text{ пк}$$

- Анализ временной и частотной структурных функций позволил сделать вывод, что мерцания на частоте 1668 МГц являются сильными и реализуется дифракционная модель мерцаний.
- Были определены характерные временной и частотный масштабы мерцаний. Показано, что спектр неоднородностей межзвездной плазмы является степенным с показателем спектра $n = 3.74$.
- Был измерен угол рассеяния в направлении пульсара PSR B0525+21: 0.028 мас и было показано, что рассеяние происходит на слое плазмы, находящемся на расстоянии близком к пульсару: $0.1Z$, где $Z = 1.6$ кпк - расстояние от наблюдателя до пульсара.

Заключение – положения выносимые на защиту

1. Разработаны и в течение более 5 лет успешно используются в текущей работе с интерферометром модули программного обеспечения для обработки наблюдений пульсаров, в настоящий момент являющиеся частью коррелятора АКЦ - основного коррелятора проекта Радиоастрон.
2. В результате наблюдений на частоте 324 МГц на наземно-космическом интерферометре Радиоастрон впервые показано, что локальная межзвездная плазма оказывает существенное влияние на мерцания близких пульсаров (PSR B0950+08 и PSR B1919+21). Определено расстояние до эффективных экранов, на которых происходит рассеяние излучения. В направлении пульсара PSR B0950+08 рассеяние происходит на двух выделенных слоях плазмы (экранах), расстояние до которых составляет 4.4 - 16.4 пк и 26 - 170 пк соответственно. В направлении пульсара PSR B1919+21 рассеяние излучения происходит на экранах, расстояние до которых составляет 0.14 ± 0.05 пк и 440 пк. В результате наблюдений на частоте 1668 МГц в направлении пульсара PSR B0525+21 показано, что рассеяние излучения происходит на слое плазмы, находящемся на близком к пульсару расстоянии $0.1Z$, где $Z = 1.6$ кпк - расстояние от наблюдателя до пульсара.
3. Определены показатели спектра неоднородностей в направлении на пульсары PSR B0950+08, PSR B1919+21 и PSR B0525+21. Показано, что спектр флуктуаций электронной плотности в направлении на пульсар PSR B0950+08 является степенным с показателем степени 3.00 ± 0.08 . Спектр флуктуаций плотности в направлении на пульсар PSR B1919+21 является степенным с показателем степени 3.73 ± 0.05 , а в направлении на пульсар PSR B0525+21 показатель спектра равен 3.74 ± 0.06 .

Заклучение – положения выносимые на защиту

4. Показано, что в направлении пульсаров PSR B0950+08 и PSR B1919+21 существуют космические призмы, существенно влияющие на наблюдаемую картину мерцаний. Впервые определены углы рефракции этих космических призм. В направлении на пульсар PSR B0950+08 угол преломления призмы составляет 1.1 - 1.4 миллисекунд дуги, при этом направление рефракции практически перпендикулярно вектору скорости наблюдателя. В направлении на пульсар PSR B1919+21 угол преломления призмы равен 110 ± 30 миллисекунд дуги, а расстояние до призмы составляет менее 2 пк.

5. Измерены углы рассеяния в направлении пульсаров PSR B0525+21 и PSR B1919+21. Угол рассеяния в направлении пульсара PSR B0525+21 составил $\theta_{scat} = 0.028 \pm 0.002$ миллисекунд дуги на частоте 1668 МГц. Угол рассеяния в направлении пульсара PSR B1919+21 составляет $\theta_{scat} = 0.7 \pm 0.2$ миллисекунд дуги на частоте 327 МГц.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

A1 Smirnova T. V., Shishov V. I., Popov M. V., Gwinn C. R., Anderson J. M., Andrianov A. S., Bartel N., Deller A., Johnson M. D., Joshi B. C., Kardashev N. S., Karuppusamy R., Kovalev Y. Y., Kramer M., Soglasnov V. A., Zensus J. A., Zhuravlev V. I. RADIOASTRON STUDIES OF THE NEARBY, TURBULENT INTERSTELLAR PLASMA WITH THE LONGEST SPACE-GROUND INTERFEROMETER BASELINE // *Astrophysical Journal* - 2014 - V. 786, P. 115

A2 Андрианов А.С., Гурин И.А., Жаров В.Е., Костенко В.И., Лихачев С.Ф., Шацкая М.В. Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра "РАДИОАСТРОН" // *Вестник "НПО имени С.А. Лавочкина"*. - 2014. - Т. 24, № 3. - С. 55.

A3 Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С., Артюхов М. И., Баан В., Бабышкин В. Е., Бартель Н., Баяндина О. С., Вальтц И. Е., Войцук П. А., Воробьев А. З., Гвинн К., Гомез Х. Л., Джиованнини Г., Джонси Д., Джонсон М., Имаи Х., Ковалев Ю. Ю., Куртц С. Е., Лисаков М. М., Лобанов А. П., Молодцов В. А., Новиков Б. С., Погодин А. В., Попов М. В., Привезенцев А. С., Рудницкий А. Г., Рудницкий Г. М., Саволайнен Т., Смирнова Т. В., Соколев А. М., Согласнов В. А., Соколовский К. В., Филиппова Е. Н., Чурикова М. Е., Ширшаков А. Е., Шишов В. И., Эдвардс Ф. "РАДИОАСТРОН": Итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета // *Вестник "НПО имени С.А. Лавочкина"*. - 2016. - Т. 33, № 3. - С. 4 - 24.

A4 Shishov, V. I., Smirnova, T. V., Gwinn, C. R., Andrianov, A. S., Popov, M. V., Rudnitskiy, A. G., Soglasnov, V. A. Interstellar scintillations of PSR B1919+21: space-ground interferometry // 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* - 2017 - v. 468 p. 3709-3717

A5 Андрианов А. С., Смирнова Т. В., Шишов В. И., Гвинн К., Попов М. В. Распределение межзвездной плазмы в направлении пульсара PSR B0525+21: наземно-космическая интерферометрия // *Астрономический журнал*. - 2017. - Т. 94, № 6. - С. 516-523

Тезисы докладов научных конференций:

Б1 *Andrianov A., Kostenko V., Guirin I, Chibisov A., Likhachev S.* Data Compatibility for Radioastron Mission // Труды конференции 10th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2010

Б2 *Andrianov A.* Radioastron pulsar early science program: Current status and results // Труды конференции 11th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2012

Б3 *Andrianov A., Smirnova T.V., Shishov V.I., Popov M.V., Kardashev N.S., Soglasnov V.I.* Study of scattering material with RadioAstron-VLBI observations // Труды конференции 12th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2014

Спасибо за внимание