

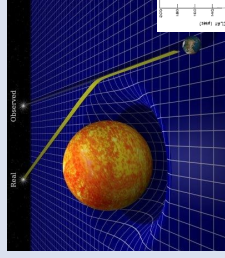
## Влияние неоднородностей гравитационных полей на наблюдаемые характеристики астрономических объектов

Татьяна Ларченкова

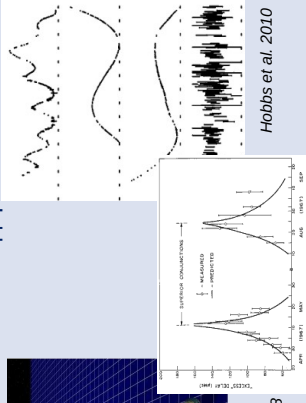
Искажения характеристик исследуемого сигнала при распространении к наблюдателю

Изменение видимого положения источника

Шумы хронометрирования, задержка сигнала

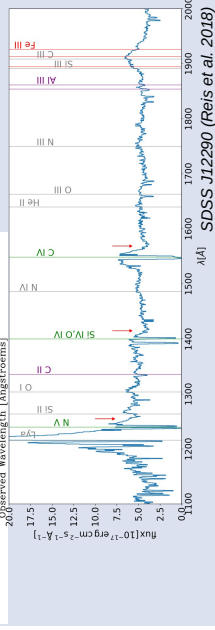
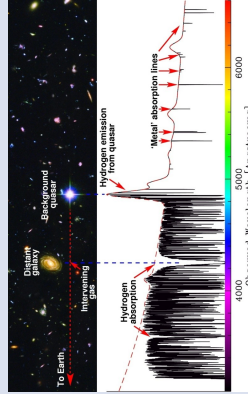


Shapiro I. 1964, 1968



Hobbs et al. 2010

## Искажения спектров источников (квazarов)



SDSS J12290 (Reis et al. 2018)

**Доступная в измерениях информация содержит не только сведения непосредственно о самом изучаемом объекте или явлении, но и о среде, в которой распространяется его излучение.**

## Цели диссертации

Расчет и моделирование искажений наблюдаемых пространственных, временных и спектральных характеристик излучения космических объектов и явлений, возникающих вследствие неоднородностей гравитационных полей, вызываемых расположенными на луче зрения или вблизи него массивными объектами.

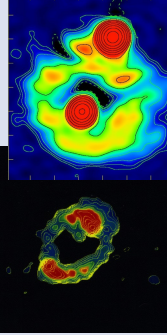
Разработка методов поиска, определения физических характеристик и установления природы скрытого вещества и объектов, не излучающих или слабо излучающих в электромагнитном диапазоне, но проявляющих себя посредством гравитационного взаимодействия.

## Искажения из-за сильного гравитационного линзирования



PKS1830-211

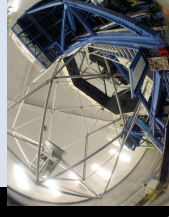
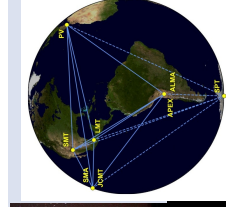
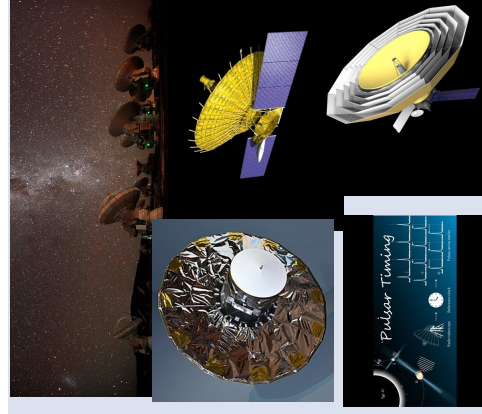
VO218+357



MERLIN

Wucknitz et al. 2004

- Появление множественных изображений
- Временное запаздывание между изображениями
- Усиление наблюдаемого потока
- Линии линзирующего объекта в спектре источника
- Пространственная деформация протяженных объектов



## Достижимые точности современных инструментов

Точность определения координат в радиодиапазоне:

**до 30 мкс дуги** для источников из каталога ICRF3 (Charlot et al. 2020)

Точность GAIA (GAIA EDR3):

The position uncertainties are **0.01-0.02 mas** for  $G < 15$ , 0.05 mas at  $G = 17$ , 0.4 mas at  $G = 20$ , and 1.0 mas at  $G = 21$  mag.  
The parallax uncertainties are **0.02-0.03 mas** for  $G < 15$ , 0.07 mas at  $G = 17$ , 0.5 mas at  $G = 20$ , and 1.3 mas at  $G = 21$  mag.

The proper motion uncertainties are **0.02-0.03 mas/yr** for  $G < 15$ , 0.07 mas/yr

РадиоАстрон: **рекордное угловое разрешение 8 мкс дуги** мегамазер воды в NGC 4258.

Пульсарный тайминг: точность определения МПИ **-50 нс** (Osłowski et al. 2013)

HIRES (High Resolution Echelle Spectrometer) КЕСК: разрешение 25000 и 85000 на длине волны 0.3 мкм и 1.0 мкм, **-5 км/сек.**;  
для экзопланет точность лучевых скоростей HARPS **-1 мксек**

## Влияние неоднородностей Галактики на позиционную точность внегалактических источников излучения

## Международная небесная система координат (ICRS) – это набор договоренностей и принципов построения системы координат.

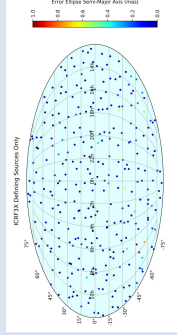
Две опорные координатные системы:

Year	ICRF1	ICRF2
1995	2009	
Number of defining sources	212	295
Formal error ( $\mu$ as)	60	7
Inflated error ( $\mu$ as)	250	41

ICRF – в радиодиапазоне  
HCRF – в видимом свете

ICRF2 – 3414 источников, 295 - опорные

ICRF3 – 4536 источников, 303 - опорные  
Точность определения положения 30-60 мкс дуги (для 500 источников)



Charlot et al. (2020)

1. Угол отклонения света в гравитационном поле произвольно перемещающихся в пространстве тел является **случайной функцией** времени, положений и скоростей отклоняющих тел.

$$a_a^i(t) = \frac{4Gm_a}{c^2} \frac{1 - k^i v_a^i}{\sqrt{1 - v_a^2}} \frac{P_{ij}^i v_a^j}{|P_{ij}^i v_a^j|^2}$$

$$v_a = \text{const}$$

(Korpeikin, Schafer 1999)

$$\dot{x}_a = \dot{x}(t) - \dot{x}_a$$

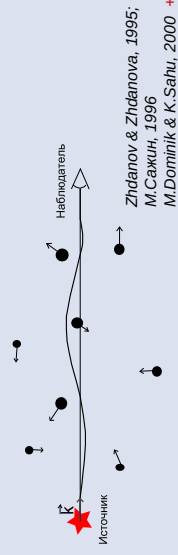
$$P_{ij} = \delta_{ij} - k_i k_j$$

2. Наличие локальных возмущений плотности Галактики при ее стационарности на больших масштабах.

3. Приближение непрерывной среды.

4. Рассматриваемые параметры (масса, скорость и пространственное распределение объектов) не коррелированы между собой:

$$f(\mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a) = Af(\mathbf{X}_a)f(m_a)f(\mathbf{v}_a)$$



Zhdanov & Zhdanova, 1995;  
M.Sajin, 1996  
M.Domtlik & K.Sahu, 2000 +

Функция  $\alpha(t, m_a, \mathbf{X}_a, \mathbf{v}_a)$  описывает реализацию случайного процесса отклонения лучей света источника при распространении в Галактике.

Если  $\langle \alpha \rangle = \text{const}$ , то случайный процесс можно рассматривать как стационарный.

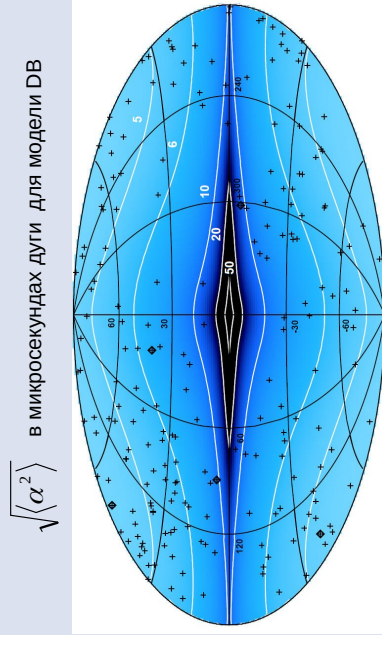
$$\text{Ср. кв. отклонение } \sqrt{\langle \alpha^2 \rangle} = \sqrt{\int dm_a d\mathbf{X}_a d\mathbf{v}_a f(\mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a) \alpha^2(\mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a)}$$

$$\mathfrak{R}(\tau) = \langle \alpha(t + \tau) \alpha(t) \rangle = \int dm_a d\mathbf{X}_a d\mathbf{v}_a f(\mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a) \times \alpha(t, \mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a) \alpha(t + \tau, \mathbf{X}_a, m_a, \mathbf{v}_a),$$

Автокорреляционная функция  
Спектральная плотность мощности  $S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i\omega\tau) \mathfrak{R}(\tau) d\tau$

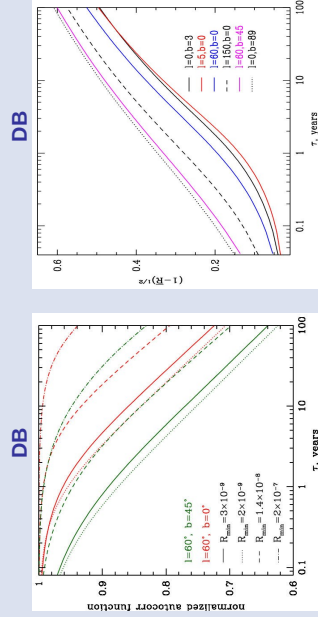
### Что необходимо знать об отклоняющихся телах:

1. Распределение по скоростям:  
усеченная функция Максвелла  
дисперсия для звезд диска и балджа  $\sigma=30$  км/с  
дисперсия для звезд гало  $\sigma=100$  км/с
2. Распределение в пространстве:  
модель Галактики (Dehnen & Binney 1998),  
модель Галактики (Balsall & Soneira 1980; Balsall 1986)
3. Распределение по массам:  
современные функции масс (PDMF) для разных  
компонент Галактики, учет коричневых карликов  
(Chabrier 2003; Kroupa 2002)



Larshenkova et al. 2017

### Автокорреляционная функция



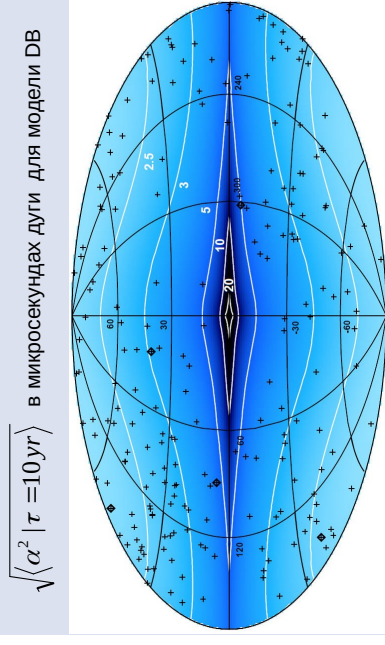
$$\overline{\alpha}(\tau) = \sum_i N_i \exp\left(-\frac{\tau}{T_i}\right)$$

$$\langle \alpha^2 | \tau \rangle = \langle \alpha^2 \rangle (1 - \overline{\alpha}(\tau))$$

### Промежуточные выводы I

1. Построены двумерные карты распределения по небесной сфере среднего квадратичного отклонения угла  $\alpha$  для современных моделей Галактики. Показано, что в направлении на ГЦ величина среднего квадратичного разброса измерений положения источника может достигать **десятков мкс дуги**, уменьшаясь до **нескольких мкс дуги** в направлении высоких галактических широт.
2. Показано, что для времени наблюдений (~10 лет) величина среднего квадратичного отклонения смещения положения источников будет ~3  $\mu\text{as}$  на высоких широтах, увеличиваясь до нескольких десятков  $\mu\text{as}$  в центральных областях Галактики.
3. Определены статистические свойства рассматриваемого процесса – автокорреляционные функции и спектральная плотность мощности,

$$\text{PSD} \propto \frac{T^2}{1 + 4\tau^2 T^2 \omega^2}$$



Larshenkova et al. 2017

Можно ли обнаружить эффект  
дрожания координат современными  
инструментами?

Какова методика наблюдений?

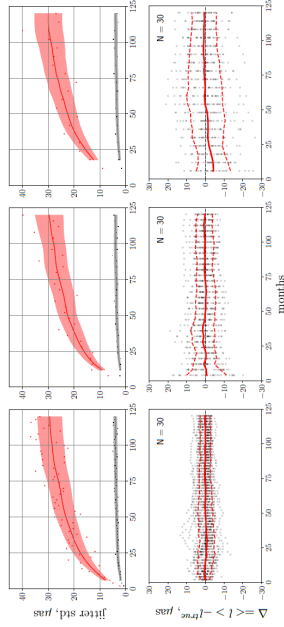
## Другие эффекты

1. Атмосферные: тепловой шум, задержки в ионосфере, задержки в нейтральной атмосфере. Растут линейно с ростом углового расстояния между источниками (*Марти-Видал и др., 2010*).
2. Вспышечная активность АЭГ (30-100 мкс дуги, *Листер и др., 2019*). Наличие компактного компонента в струе (до 1 мс дуги, *Петров, Ковалев, 2017*).
3. Сдвиг ядра (100-200 мкс дуги, зависимость от частоты, *Главин и др., 2019*; уменьшается с частотой, *Абеля и др., 2019*).
4. Рассеяние в МЗС (квадрат частоты, *Пушкарев, Ковалев, 2015*)

## Методика наблюдений – дифференциальная астрометрия

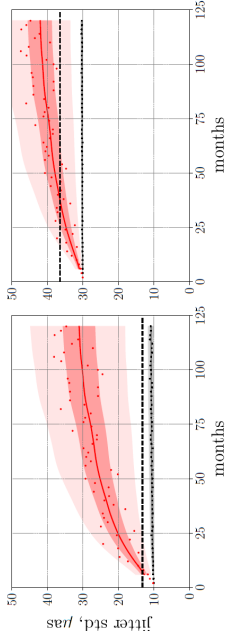
1. Тесные пары (1 - 2 гр.)
2. Высокие частоты (> 22 ГГц)
3. Одновременные наблюдения на нескольких частотах
4. Две выборки источников: целевая и контрольная.
5. Измерять расстояния в парах.

## «Чистый» сигнал



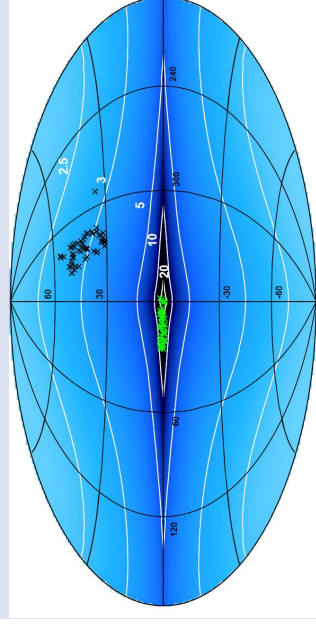
Сравнение дисперсий расстояний в парах для двух выборок источников: целевой (красный) и контрольной (серый). В каждой выборке 30 источников. Наблюдения каждые 2, 4 и 6 месяцев. Проверка сходимости среднего расстояния в парах к «истинному» со временем.

## «Зашумленный» сигнал



Эффект дрожания в зашумленных наблюдениях для целевой (красный) и контрольной (серый). Штриховая линия – 3-сигма уровень значимости различий двух выборок.

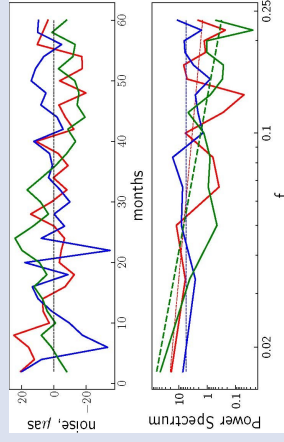
Точность дифференциальной астрометрии 10-30 мкс дуги (Рид, Хонга 2014; Zhao et al. 2018)



Наблюдение двух групп источников: целевой и контрольной.

Larchenkova et al. 2020

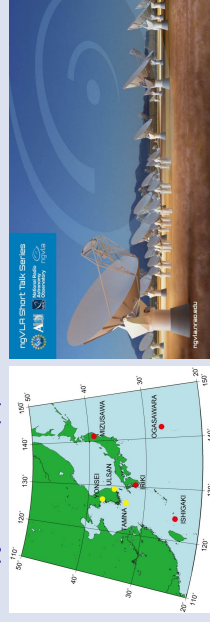
## Моделирование шумов



Реализация шумов трех видов: белого (синий цвет), фликер (красный цвет) и красный (зеленый цвет).

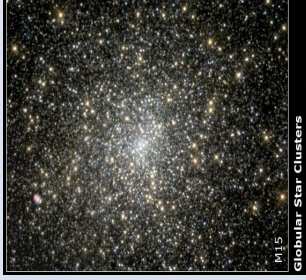
## Промежуточные выводы II

С использованием дифференциальной астрометрии, предложена методика проведения эксперимента для регистрации эффекта гравитационного «шума», вызываемого неоднородностями гравитационного поля Галактики, основанная на наблюдении двух выборок внегалактических источников, – целевой и контрольной. Показано, что современные интерферометры могут обнаружить этот эффект на масштабе нескольких лет.



## Влияние неоднородностей Галактики на временную модуляцию излучения пульсаров

## Пульсары в шаровых звездных скоплениях



	M15	47 Tuc	Ter 5
$l; b(^{\circ})$	65.01; -27.31	305.9; -44.89	3.84; 1.67
$D_r(\text{kpc})$	10.2	4.1	10.3
$r_c(\text{pc})$	0.07	0.52	0.40
$r_s(\text{pc})$	11.6	11.0	10.6
$\sigma(\text{km/s})$	$2 \times 10^6$	$6 \times 10^4$	$5 \times 10^5$
$\rho_0(M_{\odot} \text{pc}^{-3})$	60.8	60.3	21.9
$r_1(\text{pc})$	11.2	9.1	1.0

$D_{gc}(\text{kpc})$

Hubble Space Telescope

157 пульсаров в 30 скоплениях  
Ter 5 – 38, 47 Tuc - 25  
www.paic.edu/pfreire/GCpsr

Эффект Шапиро – запаздывание сигнала в гравитационном поле массивного объекта



В двойных системах

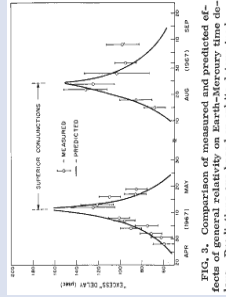
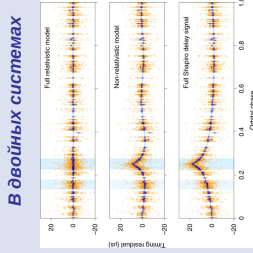


FIG. 3. Comparison of modeled and predicted effects of general relativity on Earth-Mercury time delay. Predictions are based on orbits determined.

Shapiro I. 1964, 1968

Можно обнаруживать невидимые объекты!



Хронометрирование пульсаров

$$r(t, \theta) = \frac{N_{obs} - N(t, \theta)}{\nu} \quad \text{- остаточные отклонения}$$

$$N(t) = N_0 + \nu t + \frac{1}{2} \nu t^2 + \frac{1}{6} \nu t^3 + \nu \varepsilon(t) \quad \text{- фаза вращения пульсара}$$

$$\sigma_z(\tau) = \frac{\tau^2}{2\sqrt{5}} \sqrt{M_{44}} \quad \text{- характеристика стабильности пульсара}$$

$$M_{44}(\tau) = \sum_{c=1}^4 \sum_{d=1}^4 L_{4c}^{-1} L_{4d}^{-1} \times \left[ \sum_{i=1}^{mN} \sum_{j=1}^{mN} \psi_c(t_i) \psi_d(t_j) \Re(t_i, t_j) \right]$$

$$\Re(t_+, \tau) = \int dm d\vec{a} d\vec{\alpha} \cdot (m, \vec{x}, \vec{v}) f(m, \vec{x}, \vec{v}) \times \left( t_+^2 - \frac{\tau^2}{4} - 2t_+ T + T^2 \right)$$

Ларченкова, Колейкин 2006

Стохастический эффект Шапиро – случайный разброс интегрального времени прохождения сигнала до наблюдателя – причина низкочастотного шума хронометрирования пульсаров в ШС

$$\Delta(t, t_0) = - \sum_{\alpha=1}^N \frac{2GM_{\alpha}}{c^3} \ln \frac{r_{\alpha} - (k_0 \vec{r}_{\alpha}^{\wedge})}{r_{0\alpha} - (k_0 \vec{r}_{0\alpha}^{\wedge})}$$

$$\vec{r}_{\alpha} = \vec{x}(t) - \vec{x}_{\alpha}(s),$$

$$\vec{r}_{0\alpha} = \vec{x}_0(t_0) - \vec{x}_{\alpha}(s_0),$$

$$= \sum_{\alpha=1}^N \frac{2GM_{\alpha}}{c^3} \left[ \ln \left( 1 + 2(t - T) \frac{d_{\alpha}^{\wedge}(T_0) \vec{v}_{\alpha}(T_0)}{d_{\alpha}^{\wedge}(T) \vec{v}_{\alpha}(T)} \right) - \ln \left( 1 + \frac{(-\vec{q} - \vec{K}_0) \vec{V}_{0\alpha}(T_0)}{Q_{0\alpha} + \vec{K}_0 \vec{Q}_{0\alpha}} (t - T) \right) \right],$$

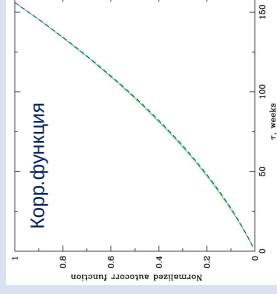
где  $\vec{V}_{0\alpha} = \vec{v}_0(T_0) - \vec{v}_{\alpha}(T_0)$ ,  $\vec{Q}_{0\alpha} = \vec{x}_{\alpha}(T_0) - \vec{x}_0(T_0)$ ,  $Q_{0\alpha} = (\vec{Q}_{0\alpha} \vec{Q}_{0\alpha})^{1/2}$ ,  $\vec{q} = \vec{Q}_{0\alpha} / Q_{0\alpha}$  – единичный вектор.

Ларченкова, Колейкин 2006

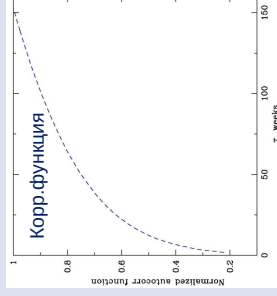
Определение стат. параметров шума, вызываемого СЭШ

Численные расчеты (модель Кинга, модель ИС)

Большие значения прицельных параметров

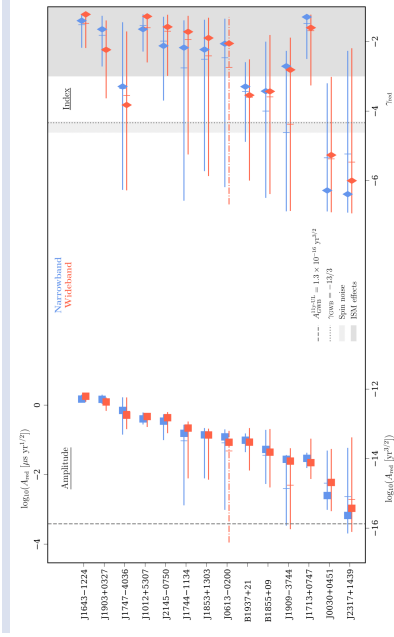


Малые значения прицельных параметров

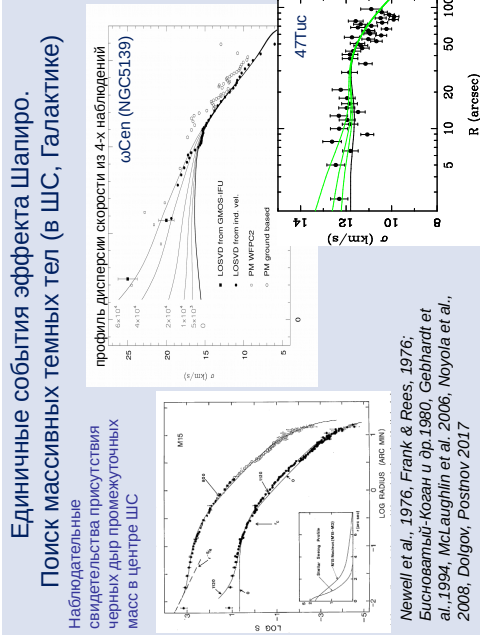


Спектральный индекс:  $\nu \sim 1.8$

$\nu \sim 1.5$



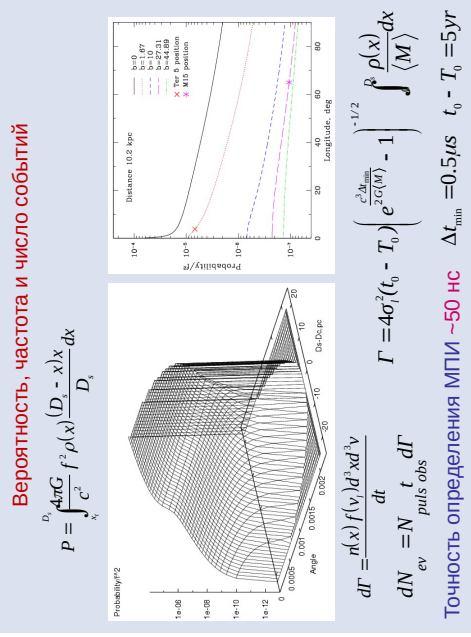
Md. Alam et al. 2021  
The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Wideband Timing of 47 Millisecond Pulsars



Newell et al., 1976, Frank & Rees, 1976;  
Бисноватый-Козан и др.1980, Gebhardt et al.,1994, McLaughlin et al., 2006, Neuhöf et al., 2008, Dolgov, Postnov, 2017

Единичные события эффекта Шапиро.  
Поиск массивных темных тел (в ШС, Галактике)

Наблюдательные свидетельства присутствия черных дыр промежуточных масс в центре ШС



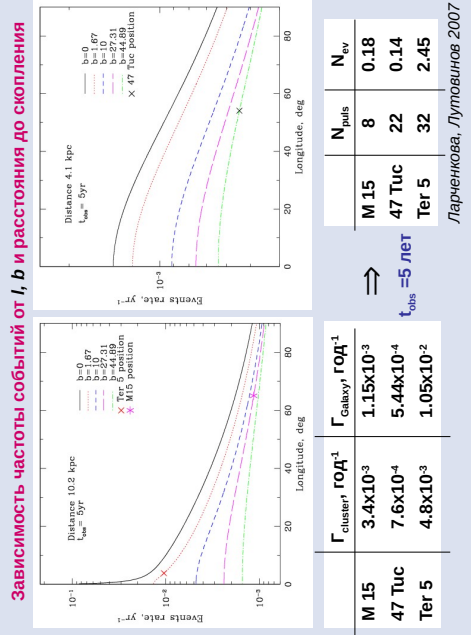
Вероятность, частота и число событий

$$P = \int_{x_1}^{D_1} \int_{x_2}^{D_2} f^2 \rho(x) \frac{(D_1 - x)^2}{D_1^3} dx$$

$$d\Gamma = \frac{n(x) f(v) d^3v}{4\pi} dt$$

$$dN_{ev} = N_{puls} \frac{d\Gamma}{obs}$$

Точность определения МПИ  $\sim 50$  нс  $\Delta t_{min} = 0.5 \mu s$   $t_0 - T_0 = 5 \mu s$



Зависимость частоты событий от l, b и расстояния до скопления

M 15	$3.4 \times 10^3$	$\Gamma_{cluster}, \text{год}^{-1}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$\Gamma_{Galaxy}, \text{год}^{-1}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$N_{ev}$	8	0.18
47 Tuc	$7.6 \times 10^4$		$5.44 \times 10^{-4}$			M 15	47 Tuc	22
Ter 5	$4.8 \times 10^3$		$1.05 \times 10^{-2}$			Ter 5	32	2.45

$t_{obs} = 5$  лет

Ларченкова, Лутовинов 2007

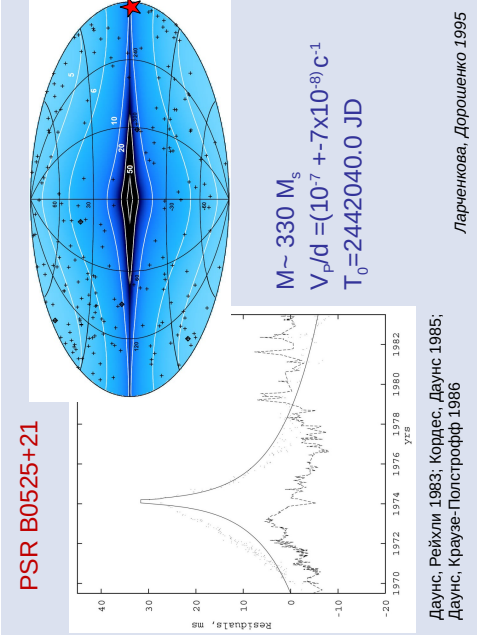


Пульсары на мин.угловых расстояниях от центра ШС

PSR (ШС)	$r_h$ (нс)	offs (")	$d_m$ (a.e.)	$\Delta I_{+,3}$ нс	$\Delta I_{+,4}$ нс
J0024-72040(47 Tuc)	3.33	0.06	14762	45	450
J1748-2446C(Ter 5)	2.49	0.17	105070	0.9	8.9
B1745-20(NGC6440)	1.42	0.04	20162	24	240
J1750-3703D(NGC6441)	2.18	0.05	35103	8.0	80
B1820-30A(NGC6624)	1.88	0.05	23702	17.5	175
J1910-5959B(NGC6752)	2.72	0.10	24002	17.1	171
B2127+11D(M15)	3.18	0.019	11743	71	710

$r_h$  - радиус, внутри которого сосредоточена половина массы скопления,  $D_{ds}$ : offs - угловое расстояние до центра скопления;  $d_m$  - соответствующий прицельный параметр;  $\Delta I_{+,3}$  и  $\Delta I_{+,4}$  - величины ожидаемого запаздывания сигнала для ЧД с массами  $10^3 M_{sun}$  и  $10^4 M_{sun}$ .

Ларченкова, Лутовинов 2009



PSR B0525+21

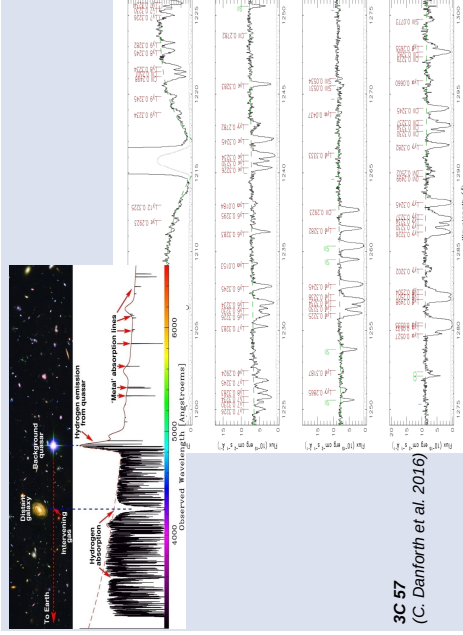
$M \sim 330 M_{\odot}$   
 $V_p/d = (10^{-7} + 7 \times 10^{-8}) \text{ c}^{-1}$   
 $T_0 = 2442040.0 \text{ JD}$

Даунс, Рейли 1983; Кордес, Даунс 1985;  
Даунс, Краузе-Полстрофф 1986

Ларченкова, Дорошенко 1995

### Промежуточные выводы III

- Определены статистические свойства стохастического эффекта Шапиро для пульсаров в шаровых скоплениях (автокорреляционные функции, спектральный индекс  $\Gamma \sim (-1.5-1.8)$ ).
- Показана принципиальная возможность использования хронометрирования миллисекундных пульсаров в шаровых скоплениях для обнаружения как невидимых объектов звездной массы, так и ЧД средних масс, находящихся в их центрах.
- Первая потенциальная регистрация массивного объекта при хронометрировании пульсаров.



## Влияние крупномасштабных неоднородностей на спектральные характеристики квазаров

Цель – разработка подхода, который позволит связать наблюдаемые характеристики спектров поглощения квазаров с физическими параметрами поглощающих объектов, в том числе, с параметрами гало, содержащими малое количество бариев.

Проанализированы три каталога систем линий поглощения металлов и Лайман-альфа для разных  $z$  (Боксенберг и Саргент, 2015; Демянский и др., 2006; Данфорс и др., 2016)

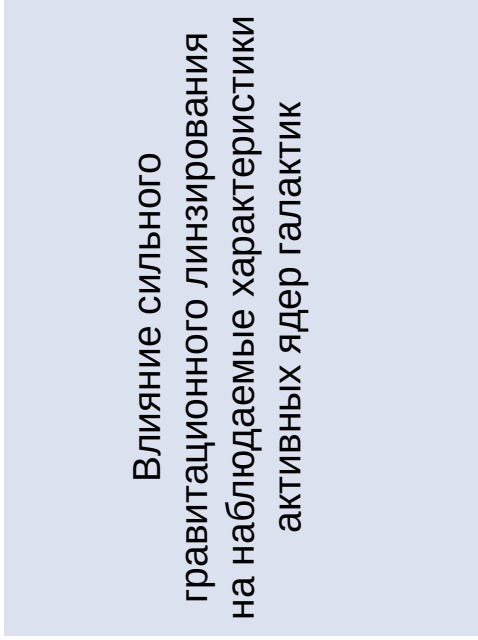
### Результаты

$N_{sys}$	линии металлов	$L_{50}, z \sim 3$	$L_{50}, z < 1$
$\langle z \rangle$	160	780	1222
$\langle b \rangle$ км/с	3	3	0.3
$\langle v_{vir} \rangle$ км/с	$41(1 \pm 0.1)$	$29(1 \pm 0.1)$	$30(1 \pm 0.1)$
$\langle M_{sep}^* \rangle$ Мпк	$125(1 \pm 0.2)$	$16(1 \pm 0.1)$	$5.3(1 \pm 0.1)$
$\langle M_{vir}^* / M_{\odot} \rangle$	$450(1 \pm 0.2)$	$40(1 \pm 0.3)$	$70(1 \pm 0.3)$
$\langle R_{vir}^* \rangle$ кпк	$\sim 10^{12}$	$\sim 3 \times 10^8$	$\sim 4 \times 10^8$
$\langle \Sigma_{vir}^* \rangle$	$120(1 \pm 0.4)$	$15(1 \pm 0.5)$	$23(1 \pm 0.7)$
$\langle G_p^* \rangle 10^{-4}$	$18(1 \pm 0.8)$	$1 \pm 0.2$	$1 \pm 0.5$
$\langle G_s^* \rangle$	$22(1 \pm 0.9)$	$0.25(1 \pm 0.4)$	$0.8(1 \pm 0.8)$
	$1.4(1 \pm 0.3)$	$4.1(1 \pm 0.1)$	$14(1 \pm 0.9)$

### Промежуточные выводы IV

- Предложен метод, позволяющий связать параметры наблюдаемых спектров поглощения квазаров с физическими параметрами поглощающих объектов.
- Получено указание на существование двух типов объектов с разными свойствами. Параметры поглощающих объектов для систем линий металлов близки к параметрам галактик, для систем линий Лайман-альфа отличаются от галактических и близки к параметрам большого числа гало в численных моделях. Последние представляют собой значительную популяцию невидимых и маломассивных объектов Вселенной.

## Влияние сильного гравитационного линзирования на наблюдаемые характеристики активных ядер галактик



### B0218+357

1. Крупномасштабная струя протяженностью ~ 1 Мпк.
2. Удаленность от других внегалактических источников.
3. Измерено временное запаздывание между изображениями компактного ядра  $\Delta t = 10.1$  дней.
4.  $Z$ (источника) = 0.944 (пеккулярные скорости меньше скорости потока Хаббла).

**Независимое определение постоянной Хаббла**

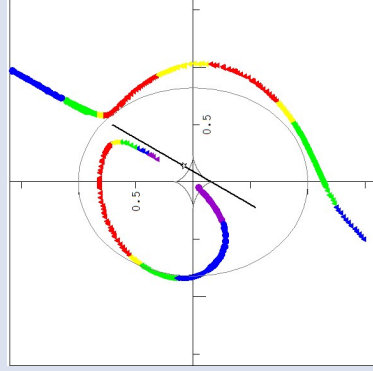
#### НО! Наблюдательные проблемы

1. Неизвестно относительное положение источника и линзы с достаточной точностью.
2. Линза – маломассивная спиральная галактика, угловое расстояние между изображениями ядра ~335 mas, оптические наблюдения линзы проблематичны. В ИК нет инструментов с необходимым разрешением.

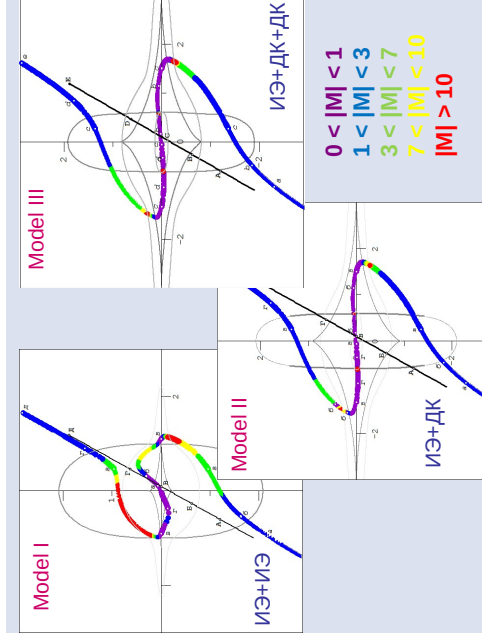
**Необходимо моделирование**

Усиление  
изображений

- 0 < |M| < 1
- 1 < |M| < 3
- 3 < |M| < 7
- 7 < |M| < 10
- |M| > 10



Для появления протяженных ярких дуг необходимо, чтобы струя пересекала тангенциальную каустику практически по касательной к ее каспам



- 0 < |M| < 1
- 1 < |M| < 3
- 3 < |M| < 7
- 7 < |M| < 10
- |M| > 10

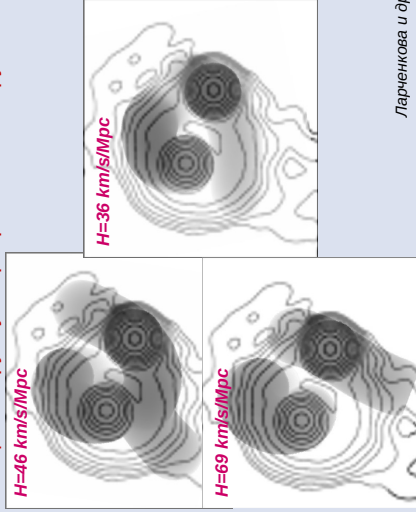
Для B0218+357 существуют разные наборы параметров, которые воспроизводят наблюдаемую крупномасштабную структуру системы:

- Отношение потоков изображений  $F(A)/F(B)$ : (2.2 – 3.9) в зависимости от частоты
- Расстояние между изображениями компактного ядра  $\approx 335$  mas
- Угол наклона крупномасштабной струи по отношению к отрезку, соединяющему изображения А и В,  $\varpi \approx 75^\circ$
- Наличие кольцеобразной структуры
- НО! Каждый набор параметров дает разную Н!

$$\tau = \frac{1 + z_L}{H_0} \frac{d_L ds}{d_{LS}} \left[ \frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi_{2D}(\vec{\theta}) \right]$$

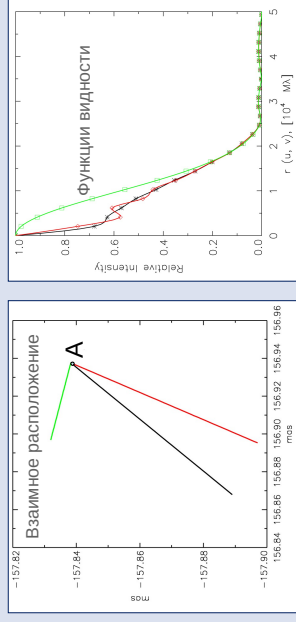


Сравнение с результатами для B0218+357: учет конечной толщины струи, учет разрешения инструмента



Ларченкова и др. 2011b

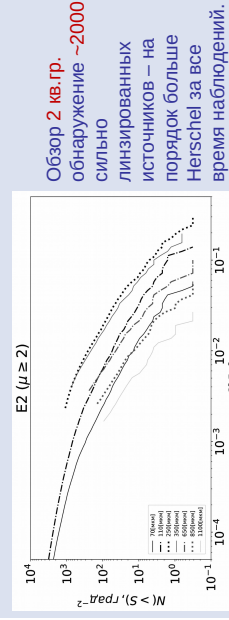
Введение дополнительного параметра, позволяющего ограничить круг моделей. Переход к наблюдениям со сверхвысоким угловым разрешением.



### Промежуточные выводы V

1. Проведено моделирование изображений релятивистских струй, возникающих в результате гравитационного линзирования на галактиках позднего и раннего типов. Получены условия формирования крупномасштабных кольцевых структур, наблюдаемых для ряда объектов, в том числе для B0218+357
2. Показано, что оценки постоянной Хаббла для гравитационно-линзированных систем модельнонезависимы.
3. Предложен дополнительный параметр моделирования (позиционный угол изображений струи), позволяющий ограничить круг моделей, и получены функции видности для изображения A B0218+357 на масштабах десятков микросекунд дуги.

Ларченкова и др. (2019)



Обзор 2 кв. гр. обнаружение ~2000 сильно линзированных источников – на порядок больше Herschel за все время наблюдений.

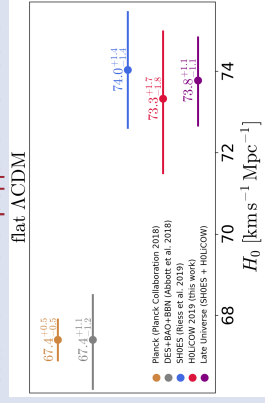
Обзор 2 кв. гр. за 7 часов на 70 мкм и на порядок быстрее на 110-250 мкм.

### Обсерватория «Миллиметрон»

- диаметр главного зеркала 10 м
- охлаждение <10 К
- поле зрения 6'x6'
- чувствительность широкополосной фотометрии до 10 мкЯн для длин волн 50-400 мкм

	Длина волны (мкм)	FWHM (угл. сек.)
Длинноволновый матричный приемник		
Полоса 1	3000–1500	42
Полоса 2	1500–850	22
Полоса 3	850–450	12
Полоса 4	450–300	7.5
Коротковолновый матричный приемник		
Полоса 1	50–90	1–2
Полоса 2	90–160	2–4
Полоса 3	160–300	4–6
Полоса 4	300–450	6–10

### Независимое определение постоянной Хаббла



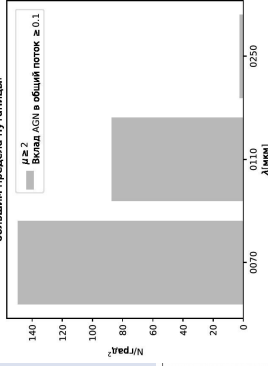
6 линзир. квазаров – точность 2.4 %  
40 линзир. систем – точность 1 %  
Wong et al. (2019)

Wong et al. (2019)  
 $H_0$  [km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>]

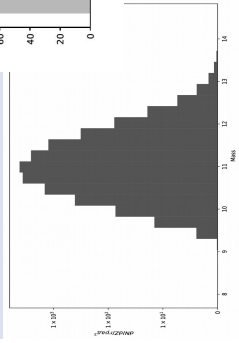
Обнаружение в обзорх малых площадей подходящих гравитационно-линзированных систем в дальнейшем ИК и субмиллиметрах.

## Сильно линзированные АЯГ в обзоре MM

Количество линзированных АЯГ с потоком, большим предела Пуанкаре.



расстояние между изображениями  $1''$  для  $\sim 50\%$  АЯГ,  $2''$  для  $\sim 15\%$



Выборка из  $\sim 40$  объектов в обзоре 2 кв. гр.

## Положения, выносимые на защиту

- 1) Построены карты неба, показывающие, что локальные флуктуации гравитационного поля Галактики ограничивают точность определения координат внегалактических источников на уровне микросекунд – десятков микросекунд, дуги в зависимости от направления на небе. Определены основные статистические и спектральные характеристики гравитационного шума, обусловленного такими флуктуациями.
- 2) Предложена методика проведения эксперимента для регистрации эффекта гравитационного шума, вызываемого неоднородностями гравитационного поля Галактики. Показано, что современные интерферометры могут обнаружить этот эффект на масштабе нескольких лет.

3) Определены спектральные характеристики низкочастотного шума хронометрирования миллисекундных пульсаров, вызываемого движением звезд в шаровых скоплениях. Для пульсаров в нескольких шаровых скоплениях рассчитаны вероятность и частота событий релятивистского временного запаздывания моментов прихода импульсов, вызываемых пролетом вблизи луча зрения массивных тел.

4) Предложен способ обнаружения массивных темных объектов, в том числе, черных дыр промежуточных масс, по регистрации запаздывания моментов прихода импульсов миллисекундных пульсаров. Для пульсара PSR B0525+21 обнаружена модуляция временного запаздывания моментов прихода импульсов, предположительно связанная с близким к лучу зрения пролетом массивного темного тела.

- 5) Предложен оригинальный метод анализа наблюдаемого леса линий поглощения Лайман-альфа и линий металлов в спектрах квазаров для определения физических параметров поглощающих объектов. Показано, что эти объекты представляют две разные популяции: с параметрами типичных галактик с массой  $\sim (10^{11} - 10^{12}) M_{\odot}$  и маломассивные темные гало с массой  $\sim 10^8 M_{\odot}$ .
- 6) Показано, что крупномасштабные кольцевые структуры в изображениях активных ядер галактик могут возникать из-за сильного гравитационного линзирования релятивистских струй на галактиках. Предложено использовать угол выхода струи для линзированных изображений на сверхмалых угловых масштабах и скорость движения пустков струи в качестве дополнительных параметров для независимого определения постоянной Хаббла.
- 7) Для космической обсерватории «Миллиметрон» проведен подсчет ожидаемых сильно линзированных источников, получены их распределения по красным смещениям и коэффициентам усиления. Получена оценка числа гравитационно-линзированных активных ядер галактик, подходящих для определения постоянной Хаббла.

Спасибо за внимание!