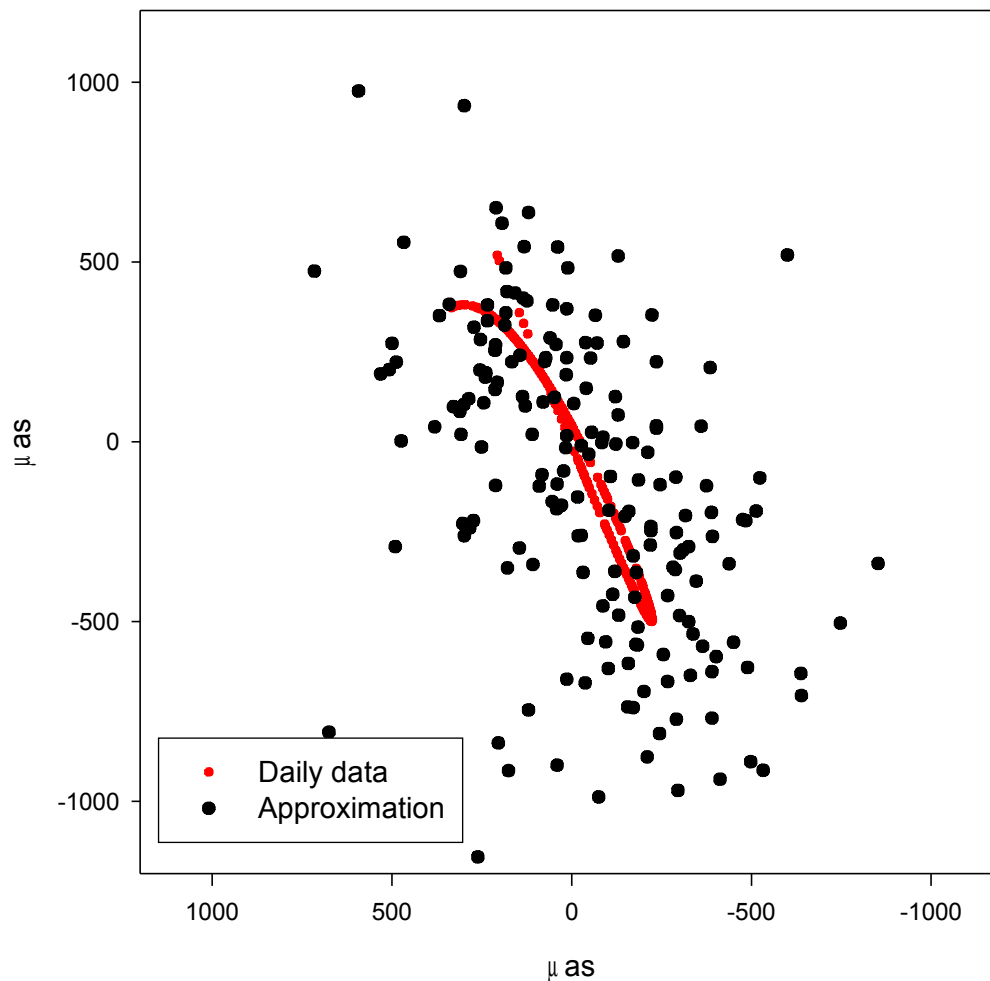


Нестабильность координат квазаров (2201+315, в картинной плоскости, 2001-2004)



Kellermann et al. (2004)

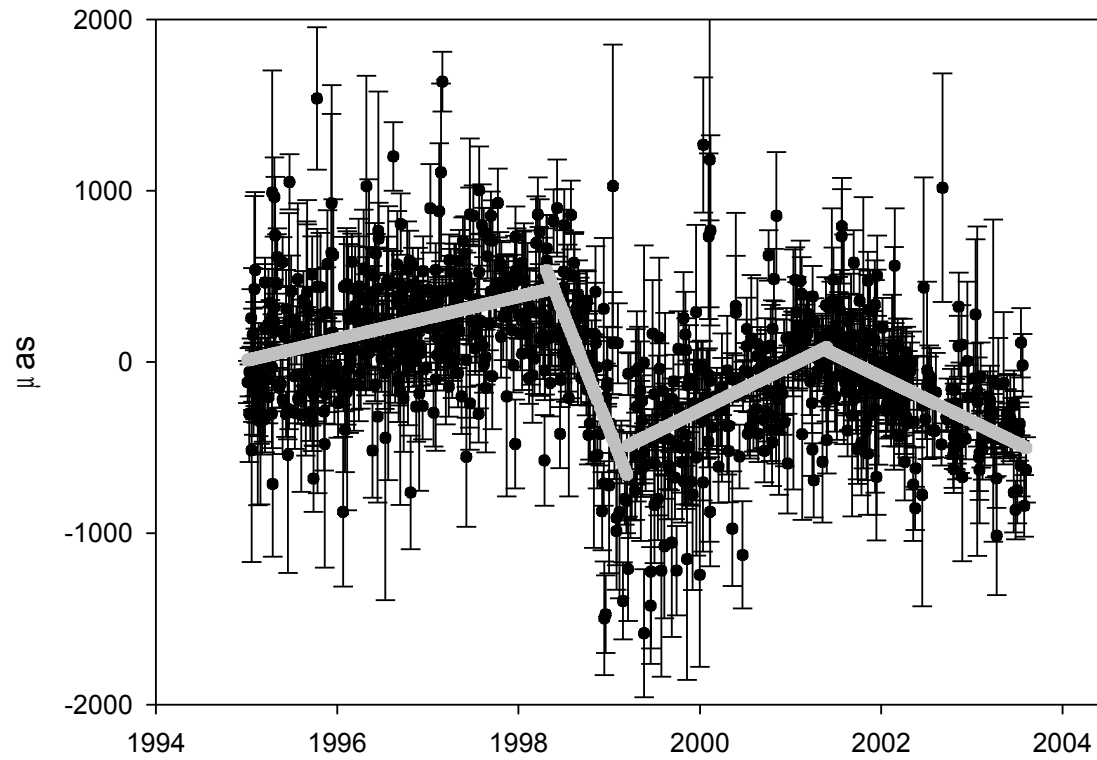
Позиционный угол $\sim 158^\circ$

РСДБ

Позиционный угол $\sim 148^\circ$

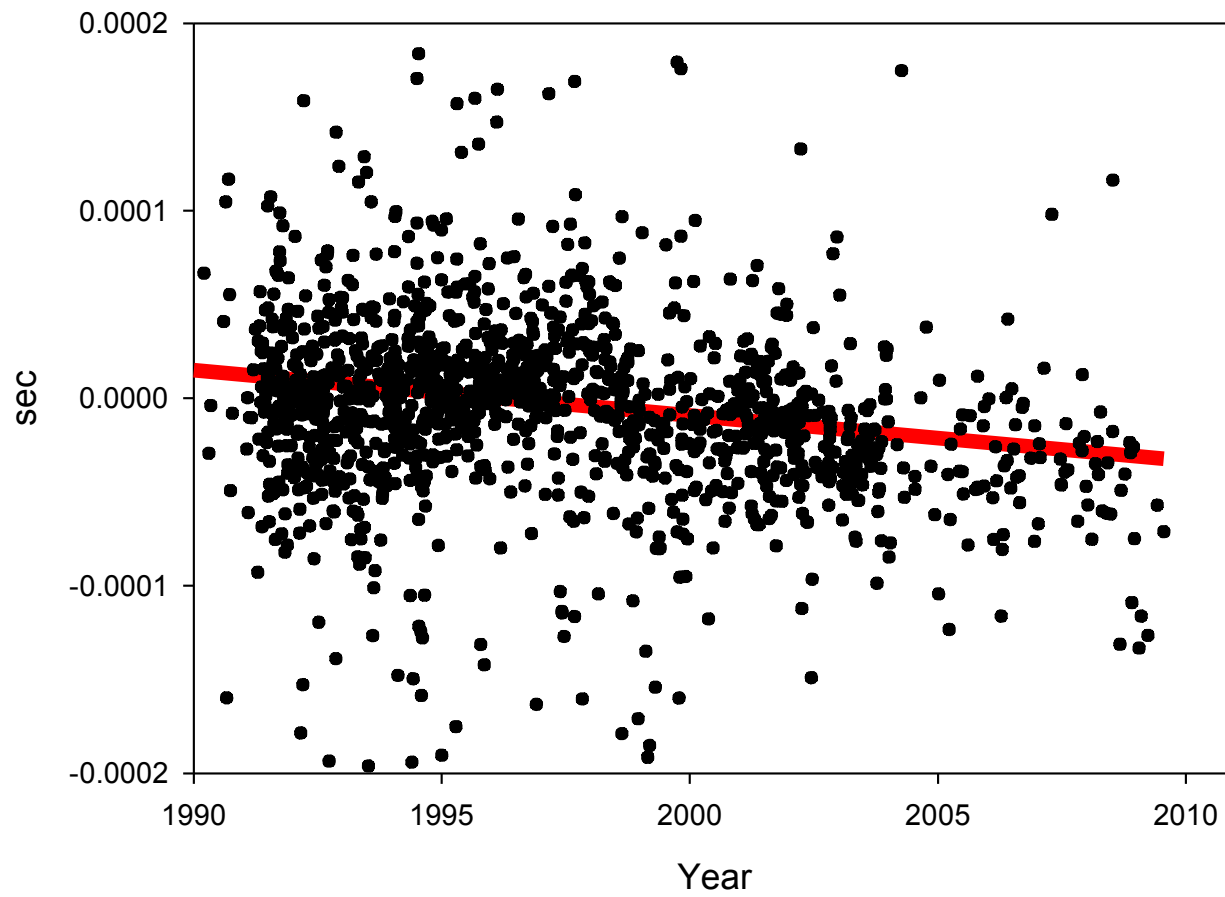
Видимое движение ~ 0.6
mas/year

2145+067

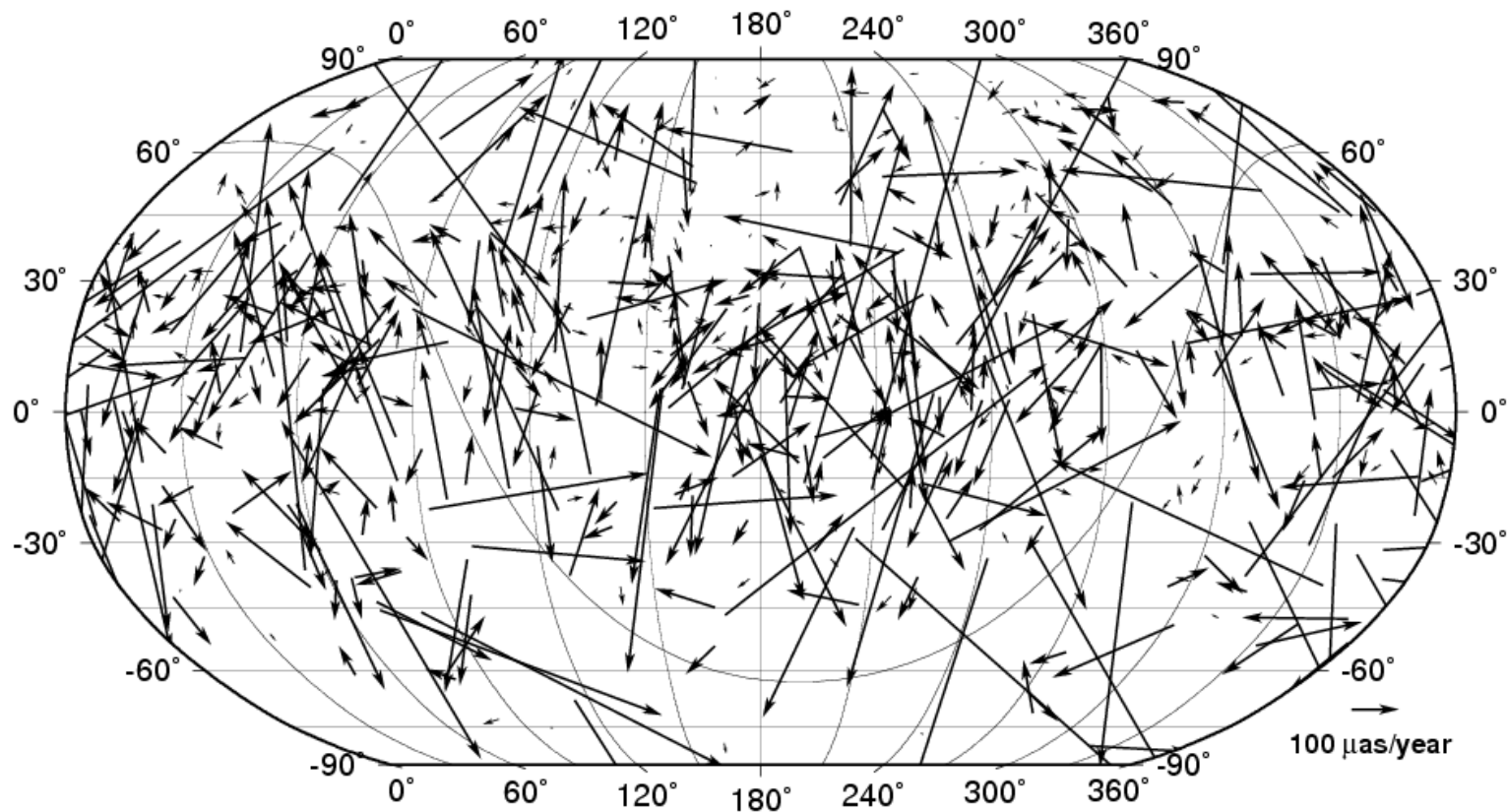


2145+067

RA, 2145+067



Видимые собственные движения



Видимые собственные движения выглядят случайными

Поиск систематики был проведен ранее
(Gwinn, Eubanks et al. 1997;
MacMillan 2003)

FK5 → ICRF2

1988 → 2010

точность координат

0".019 = 19000 μ as → 41 μ as

точность собственных движений

700 μ as/year → 10-100 μ as/year

Предположения для ICRS (1995)

1. Опорные радиоисточники не имеют измеряемых собственных движений [на уровне точности 1995 года]

2. Барицентр Солнечной системы – начало квази-инерциальной системы отсчета

точность координат 19000 μas → 41 μas

точность собственных движений 700 $\mu\text{as}/\text{year}$ → 10-100 $\mu\text{as}/\text{year}$

Причины, почему это предположение может быть некорректно к 2010

1. Дрейф вековой aberrации (ускорение барицентра) (*Bastian, 1995; Sovers et al., 1998, Klioner, 2003*)
2. Анизотропия постоянной Хаббла (*Kristian and Sachs, 1966*)
3. Гравитационные волны в ранней Вселенной (*Kristian and Sachs, 1966; Pyne et al., 1996*)
4. Движение Солнечной системы относительно микроволнового фона
Кардашев (1986), Sovers et al (1998) <14 $\mu\text{as}/\text{year}$ (M81)

1. Ускорение барицентра СС из-за вращения вокруг центра Галактики

Ожидаемое ускорение направлено к центру Галактики

$$(\alpha = 270^\circ, \delta = -30^\circ)$$

$$a = V^2/R$$

$$a = 2 \cdot 10^{-13} \text{ km/sec}^2 \rightarrow \mu = 4 \mu \text{ as/year}$$

1. Ускорение барицентра СС из-за вращения вокруг центра Галактики

$$\mu_{\alpha} \cos \delta = -a_1 \sin \alpha + a_2 \cos \alpha$$

$$\mu_{\delta} = -a_1 \cos \alpha \sin \delta - a_2 \sin \alpha \sin \delta + a_3 \cos \delta$$

$$a_1 = a \cos \alpha_0 \cos \delta_0$$

$$a_2 = a \sin \alpha_0 \cos \delta_0$$

$$a_3 = a \sin \delta_0$$

(α, δ) – координаты объекта

(α_0, δ_0) – координаты центра Галактики

Причины 2 и 3

Собственные движения в расширяющейся Вселенной
(Kristian and Sachs, 1966) “Observations in cosmology”

$$\frac{de^\mu}{dt} = h^{\mu\nu} [e^\beta (\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) +$$
$$+ r \left\{ e^\beta (\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) u_{\mu\nu} - e^\beta E_{\mu\nu} + \frac{1}{2} e^\beta e^\gamma (u_{\nu\beta\gamma} - \varepsilon_{\nu\beta\lambda} H_{\mu\nu}) + \dots \right\}] + \dots$$

2. Анизотропия параметра Хаббла

$$e_{11} = e_{22} = e_{33} = H$$

$$e_{11} \neq e_{22} \neq e_{33}$$

$$V = Hr$$

$$V = H(\alpha, \delta)r$$

$$\mu_{\alpha} = 0$$

$$\mu_{\alpha} \neq 0$$

$$\mu_{\delta} = 0$$

$$\mu_{\delta} \neq 0$$

Закон Хаббла
“обычный”

Анизотропия и
ненулевая систематика

2. Анизотропия параметра Хаббла

Кинематическая интерпретация – диагональные элементы тензора расширения

e_{11}, e_{22}, e_{33} - обобщенный закон Хаббла $H = 0.5(e_{11} + e_{22})$

$$V = \left[H + \left(e_{33} - \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22}) \right) \sin^2 \delta + \frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \cos 2\alpha \cos^2 \delta \right] r$$

$$\mu_\alpha = -\frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \sin 2\alpha \cos \delta$$

$$\mu_\delta = \left(e_{33} - \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22}) \right) \sin \delta \cos \delta - \frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \cos 2\alpha \sin \delta \cos \delta$$

3. Первичные грав. волны (Kristian and Sachs, 1966)

$$\mu = \frac{de^\mu}{dt} = h^{\mu\nu} [e^\beta (\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) +$$
$$+ r \left\{ e^\beta (\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) u_{\mu\nu} - e^\beta E_{\mu\nu} + \frac{1}{2} e^\beta e^\gamma (u_{\nu\beta\gamma} - \varepsilon_{\nu\beta\lambda} H_{\mu\nu}) + \dots \right\}] + \dots$$

σ – “Shear” (деформация)

ω - Вращение

E – гравитационные волны электрического типа

H – гравитационные волны магнитного типа

3. Первичные гравитационные волны

Gwinn et al (1997) – плотность гравитационных волн

$$\Omega_{GW} = \langle \mu^2 \rangle = \frac{3}{10\pi H_0^2} \sum_{(E,M)m} |a_{2,m}^{(E,M)}|^2$$

$$H_0 = 60 \text{ km / sec} * \text{ Mpc} = 2 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1} = 12 \mu \text{ as / year}$$

4. КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ

“The solar system’s velocity relative to the CMB will cause every extragalactic radio source to undergo a regular proper motion” (Кардашев, “Космологическое собственное движение”, 1986) $V=300-400$ км/сек

$$\mu = \frac{V}{r}$$

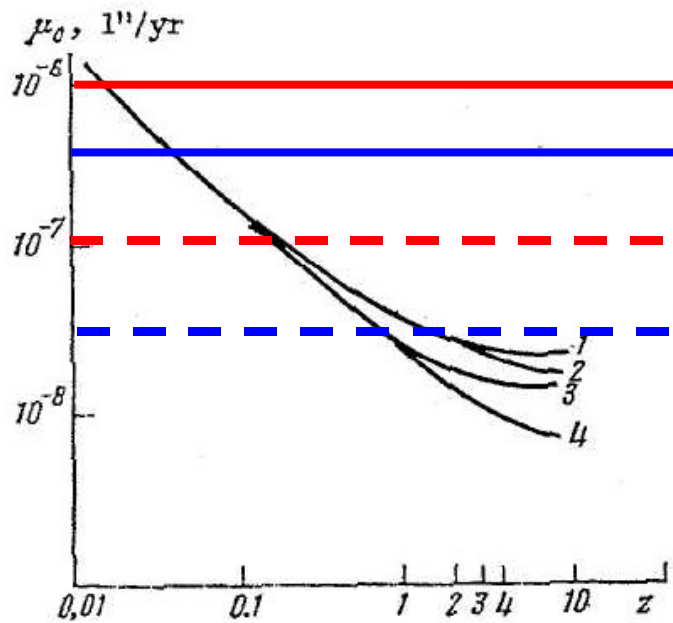
$$\mu = \frac{VH_0}{cz}, z \ll 1$$

$$\mu = \frac{VH_0}{cf(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda)}, z \gg 1$$

4. Зависимость параллактического собственного движения от Z

(Кардашев, 1986)

Parallactic proper motion versus redshift



2010

2020

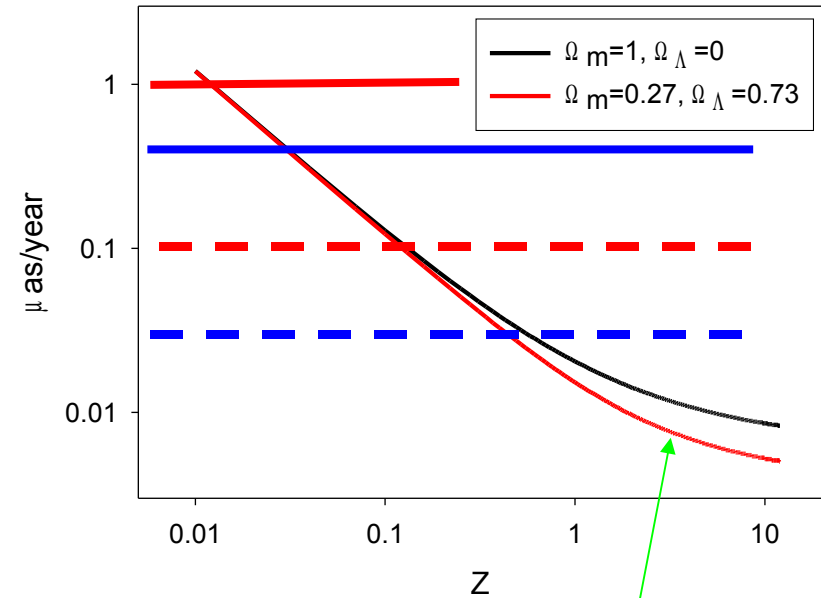


FIG. 1. Redshift dependence of the cosmological proper motion μ_0 for models with: 1) deceleration parameter $q_0 = 0$, space curvature $k = -1$, vacuum-density term $\Lambda = 0$; 2) $q_0 = 1$, $k = +1$, $\Lambda = 0$; 3) $q_0 = 1/2$, $k = -1$, $\Lambda < 0$; 4) $q_0 = 1/2$, $k = 0$, $\Lambda < 0$, string density $\rho_s > 0$.

LCDM model

Можно увеличить точность оценивания дипольной систематики до 0.1 микросек дуги в год к 2020 году без изменения в наблюдательных программах (до 1000 квазаров).

Тогда все объекты с Z до 0.1 окажутся в “зоне наблюдаемости”

Пересмотр стратегии наблюдательных программ (3000 собственных движений к 2020 году) позволит увеличить точность оценивания дипольной компоненты до 0.05 микросек дуги в год.

Тогда в “зоне наблюдаемости” окажутся все объекты с $Z \leq 1$

Пока рассматриваются только первые три возможности

1. Ускорение барицентра (диполь)
2. Вращение
3. Гравитационные волны (вторая гармоника)

Модель для уравнивания собственных ДВИЖЕНИЙ

$$\bar{\mu}(\alpha, \delta) = \sum_{m=-1}^1 a_{1,m}^E \bar{Y}_{1,m}^E + \sum_{m=-1}^1 a_{1,m}^M \bar{Y}_{1,m}^M + \sum_{m=-2}^2 (a_{2,m}^E \bar{Y}_{2,m}^E + a_{2,m}^M \bar{Y}_{2,m}^M)$$

диполь
(ускорение)

вращение

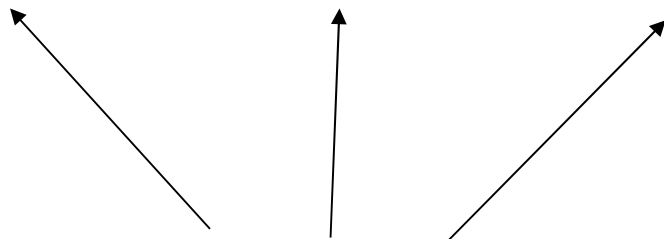
Грав волны
«электрического типа»

Грав волны
«магнитного типа»

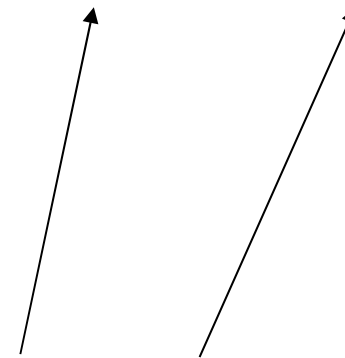
Модель для уравнивания собственных движений (диполь и вращений)

$$\mu_{\alpha} \cos \delta = \frac{1}{c}(-a_1 \sin \alpha + a_2 \cos \alpha) + \frac{1}{c}(\omega_1 \cos \alpha \sin \delta + \omega_2 \sin \alpha \sin \delta - \omega_3 \cos \delta)$$

$$\mu_{\delta} = \frac{1}{c}(-a_1 \cos \alpha \sin \delta - a_2 \sin \alpha \sin \delta + a_3 \cos \delta) + \frac{1}{c}(\omega_1 \sin \alpha - \omega_2 \cos \alpha)$$



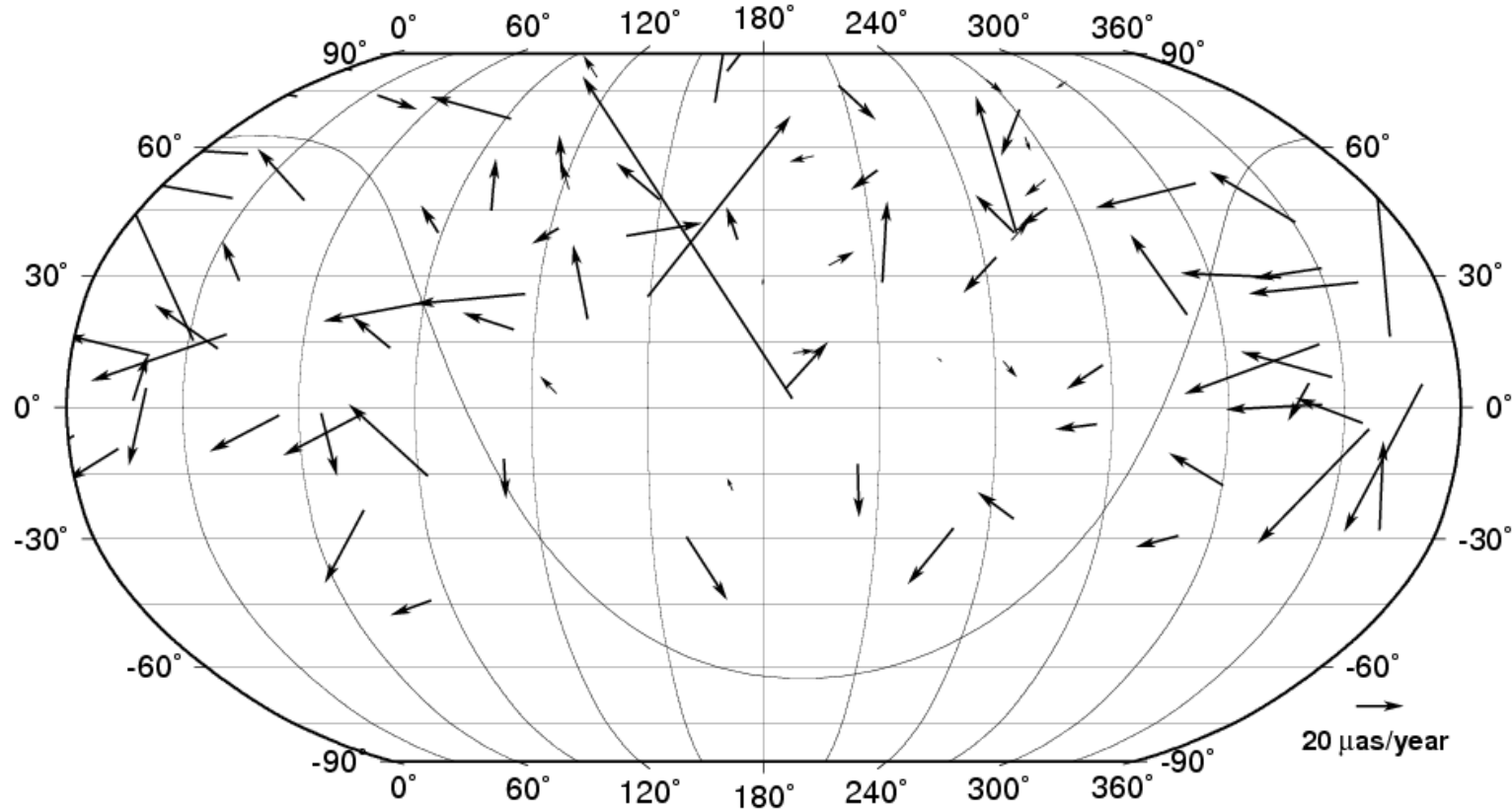
диполь
(ускорение)



вращение

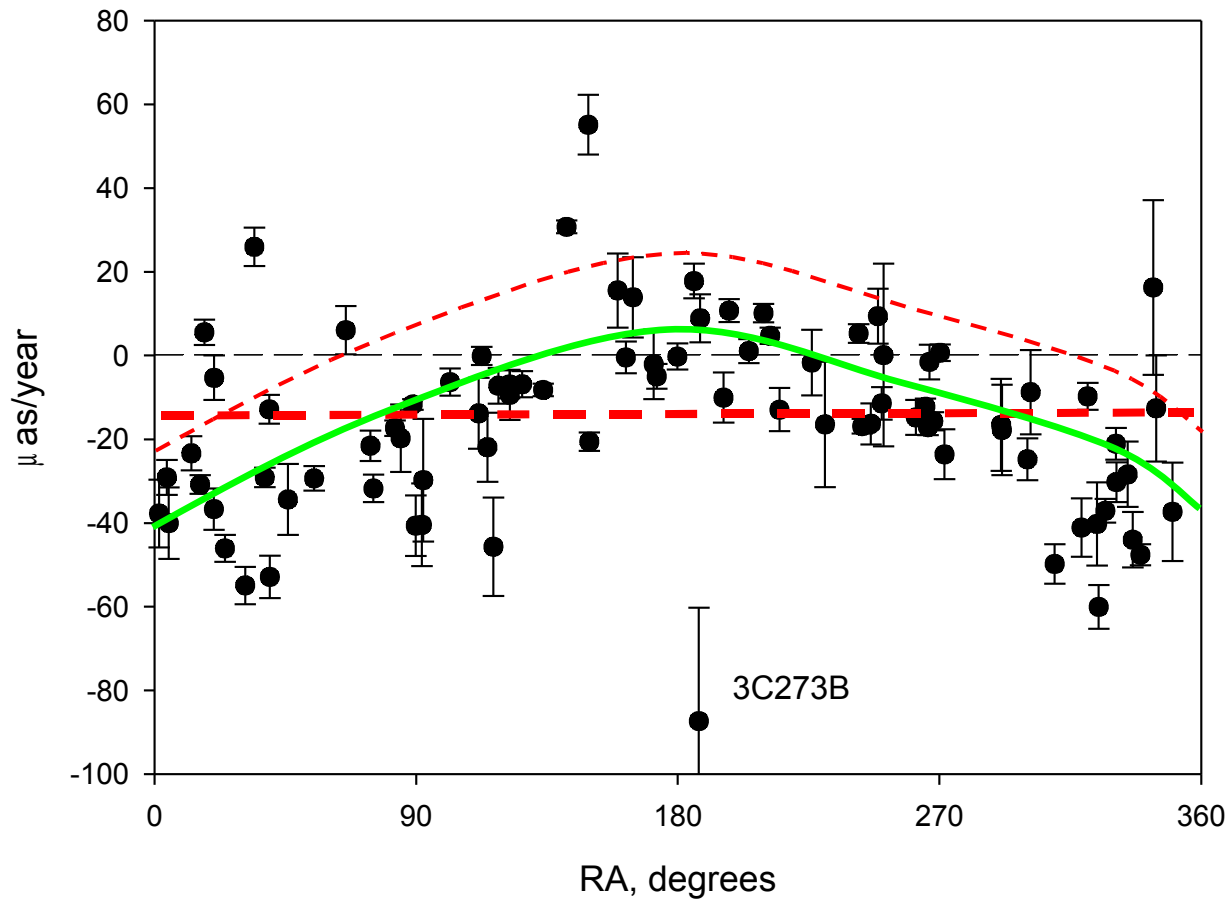
Индивидуальные собственные движения

(86 объектов; ≥ 200 серий, ≥ 15 набл.)



Систематический эффект в собственных ДВИЖЕНИЯХ

$\mu_{\alpha} \cos \delta$ for 86 the most observed radio sources
from VLBI data (1984-2009)



Это НЕ эффект изменений
внутренней структуры квазара,
вызванный сверхсветовым
движением джетов!

Глобальное решение

Проводится обработка большого массива РСДБ наблюдений

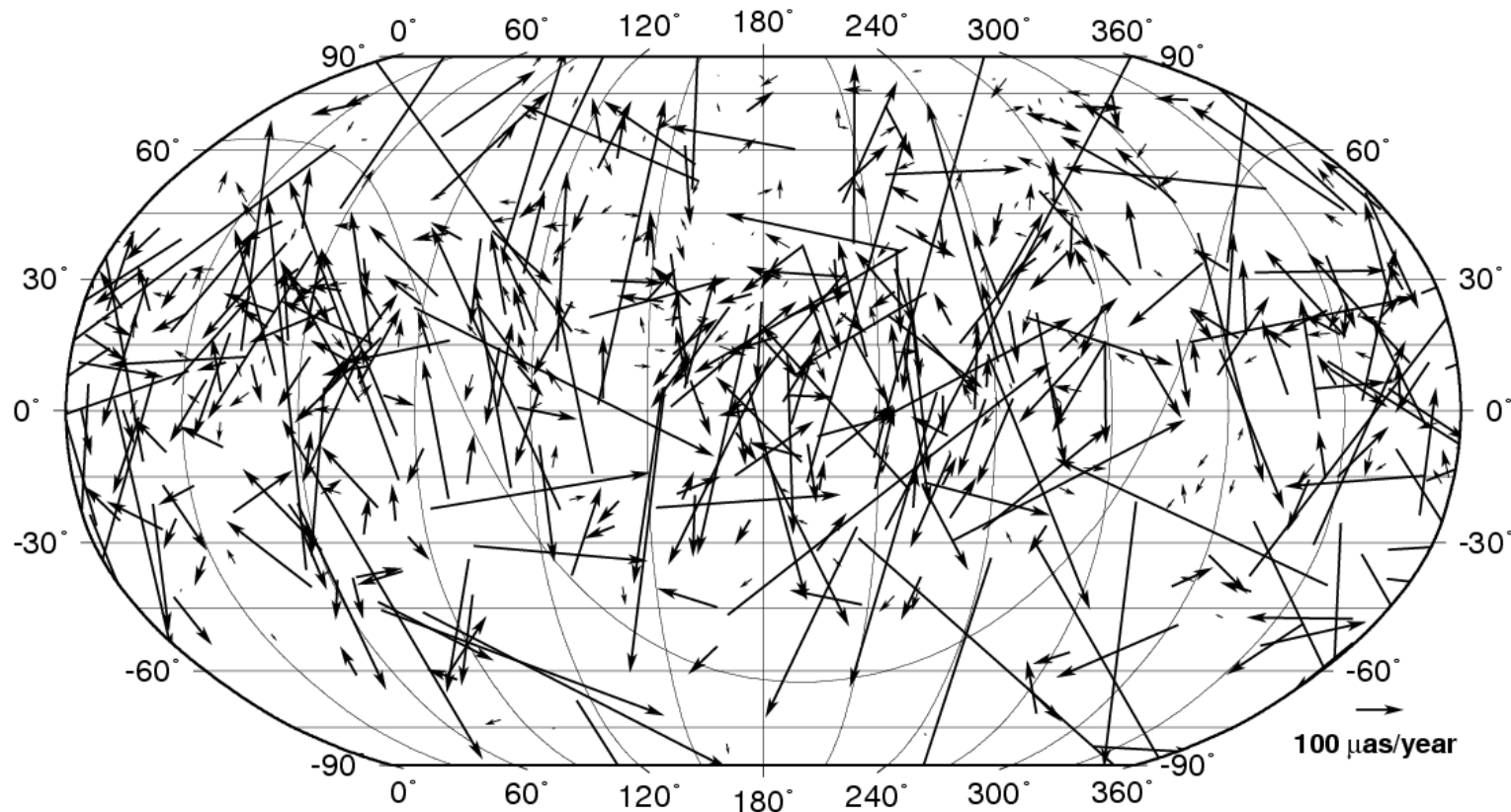
~ 4000 24-часовых серий с 1980 года (~ 30 лет)

~ 5 миллионов наблюдений

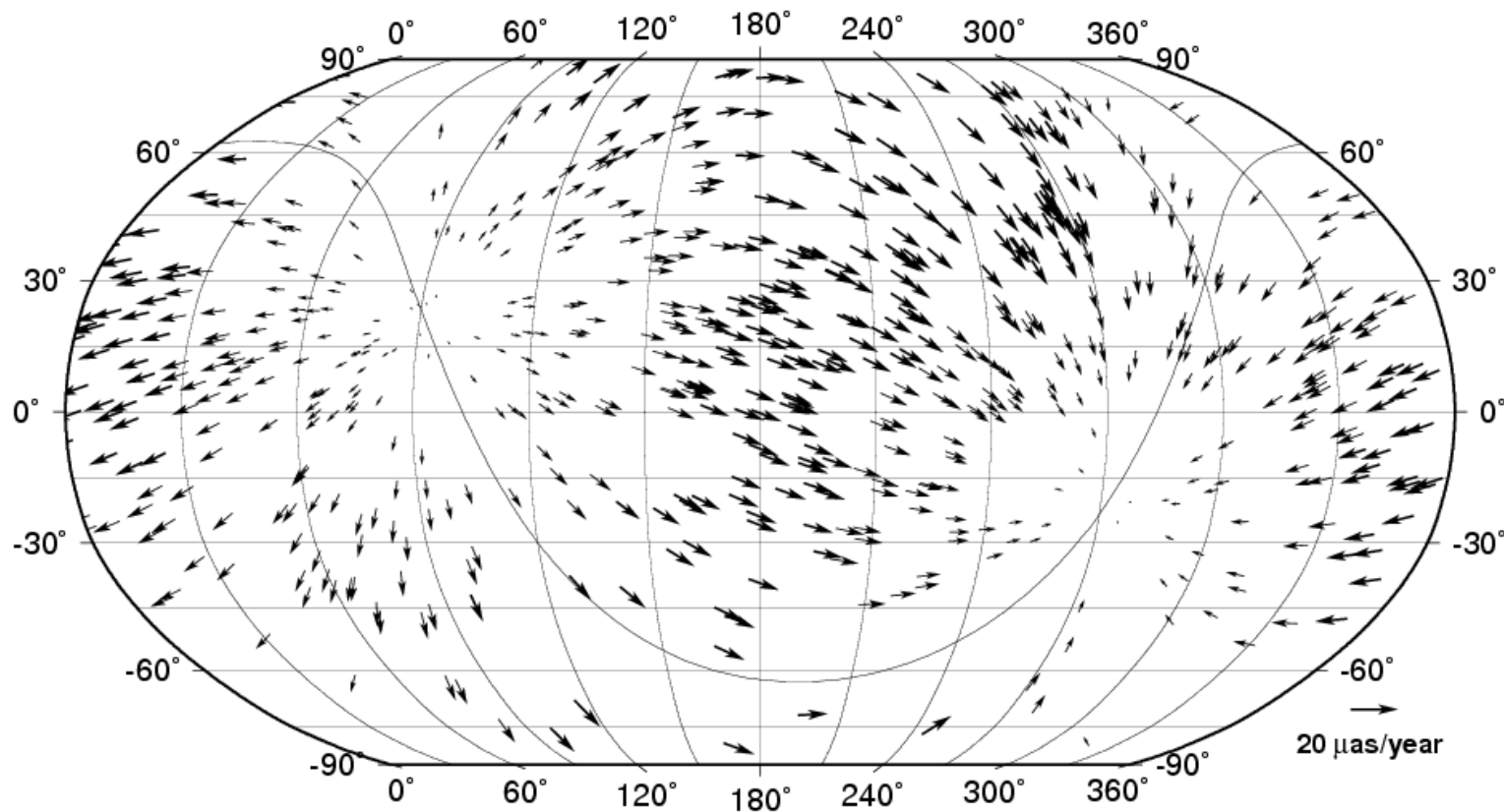
~ 3000 квазаров

Программный пакет OSSAM 6.3

Систематический эффект в собственных движениях (645 квазаров)

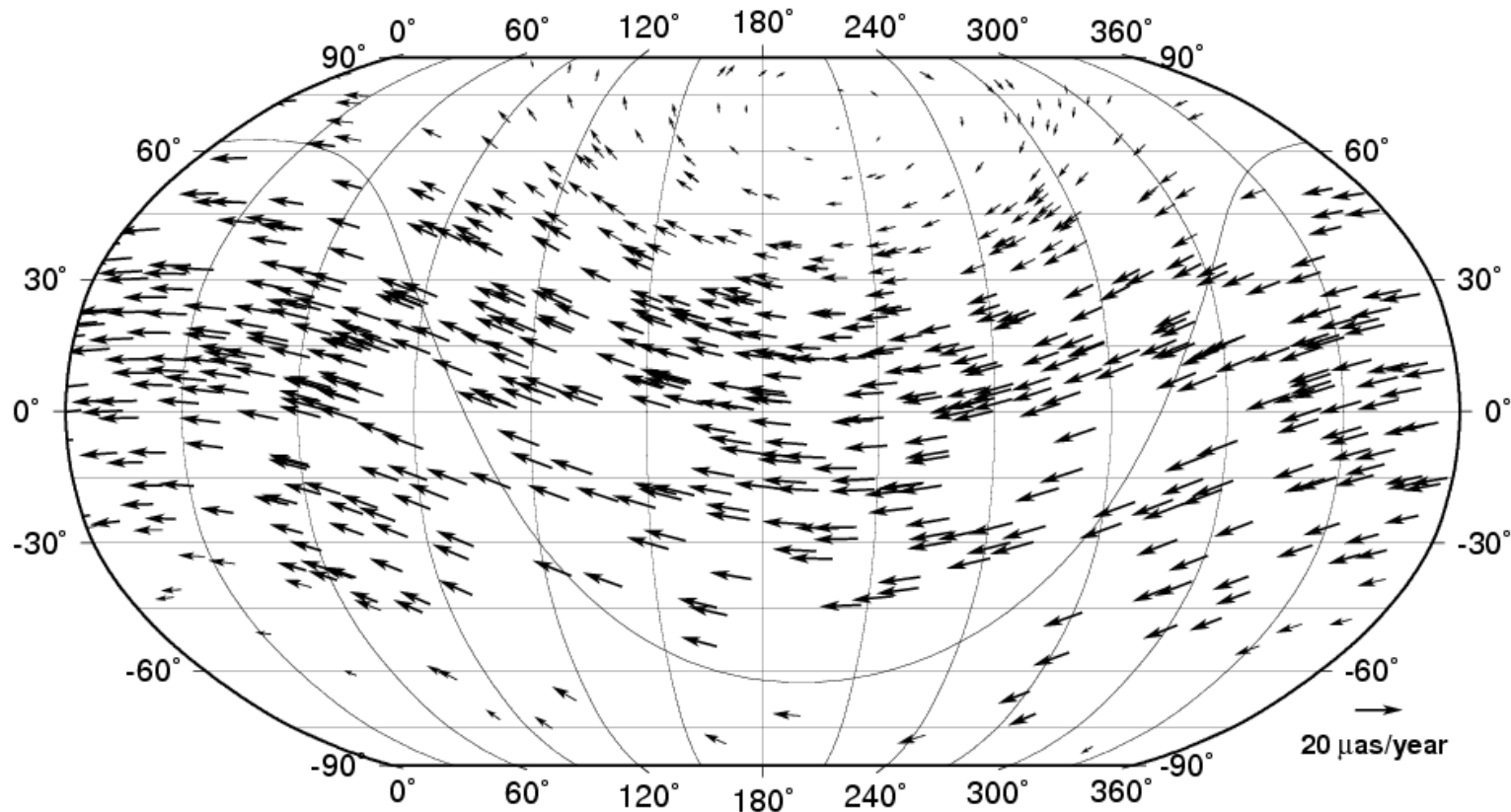


Систематический эффект в собственных движениях (ДИПОЛЬ)



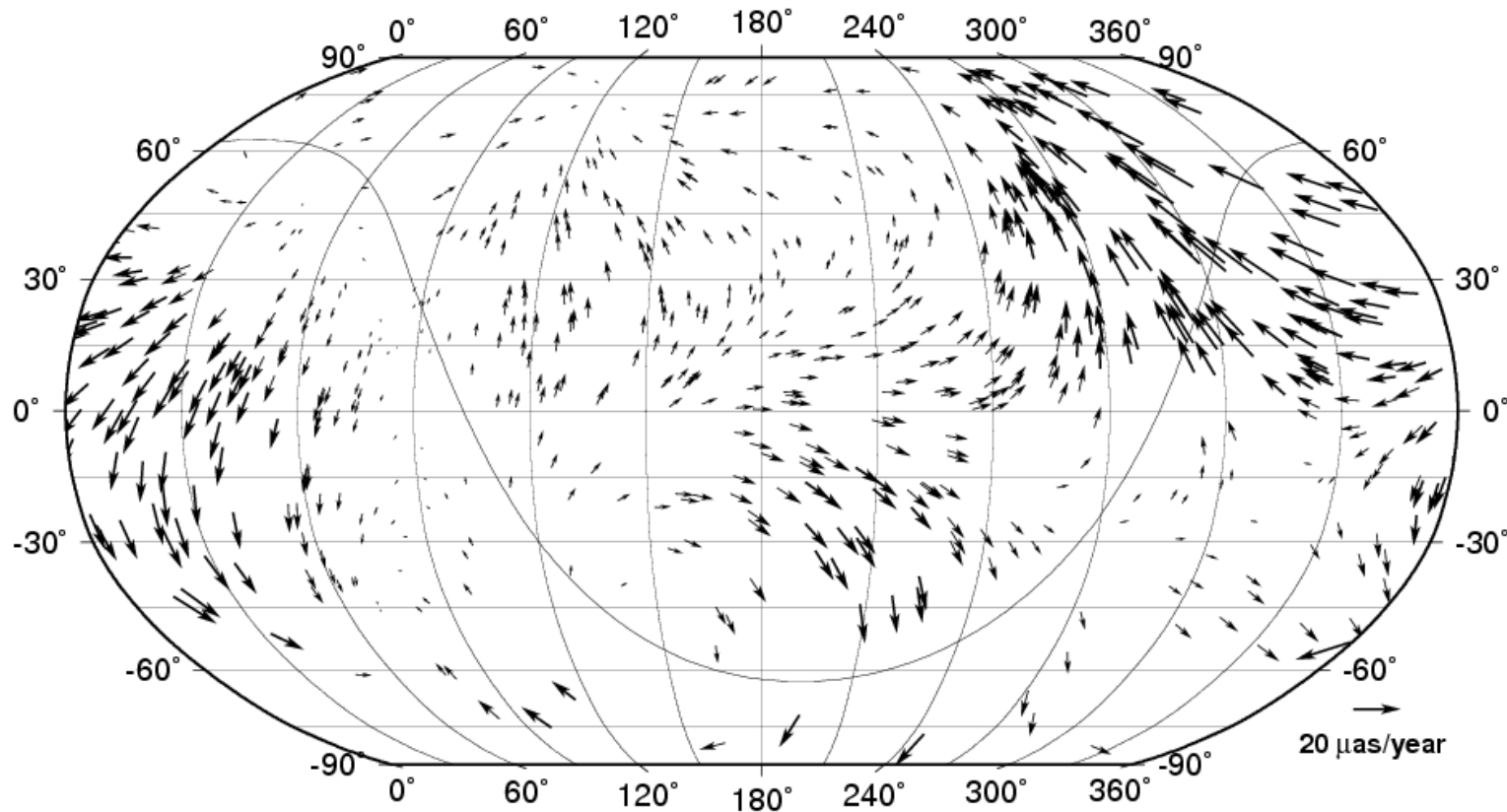
13.5(+/- 1) $\mu\text{as}/\text{year}$

Систематический эффект в собственных движениях (вращение)



20 (+/- 1) $\mu\text{as}/\text{year}$

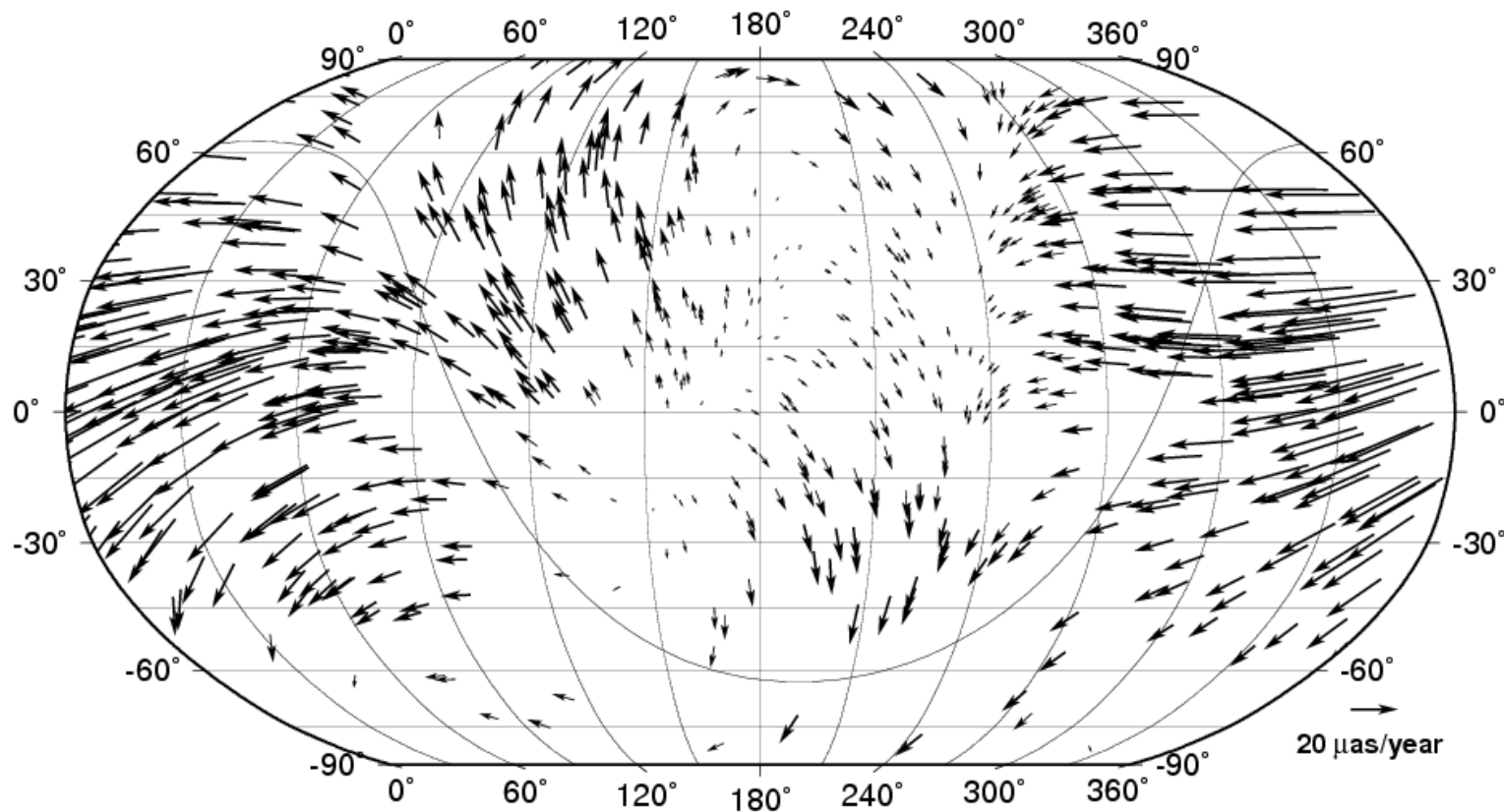
Систематический эффект в собственных движениях (2я гармоник)



$20(+/- 2) \mu\text{as/year}$

$\Omega = 0.068 \pm 0.007$

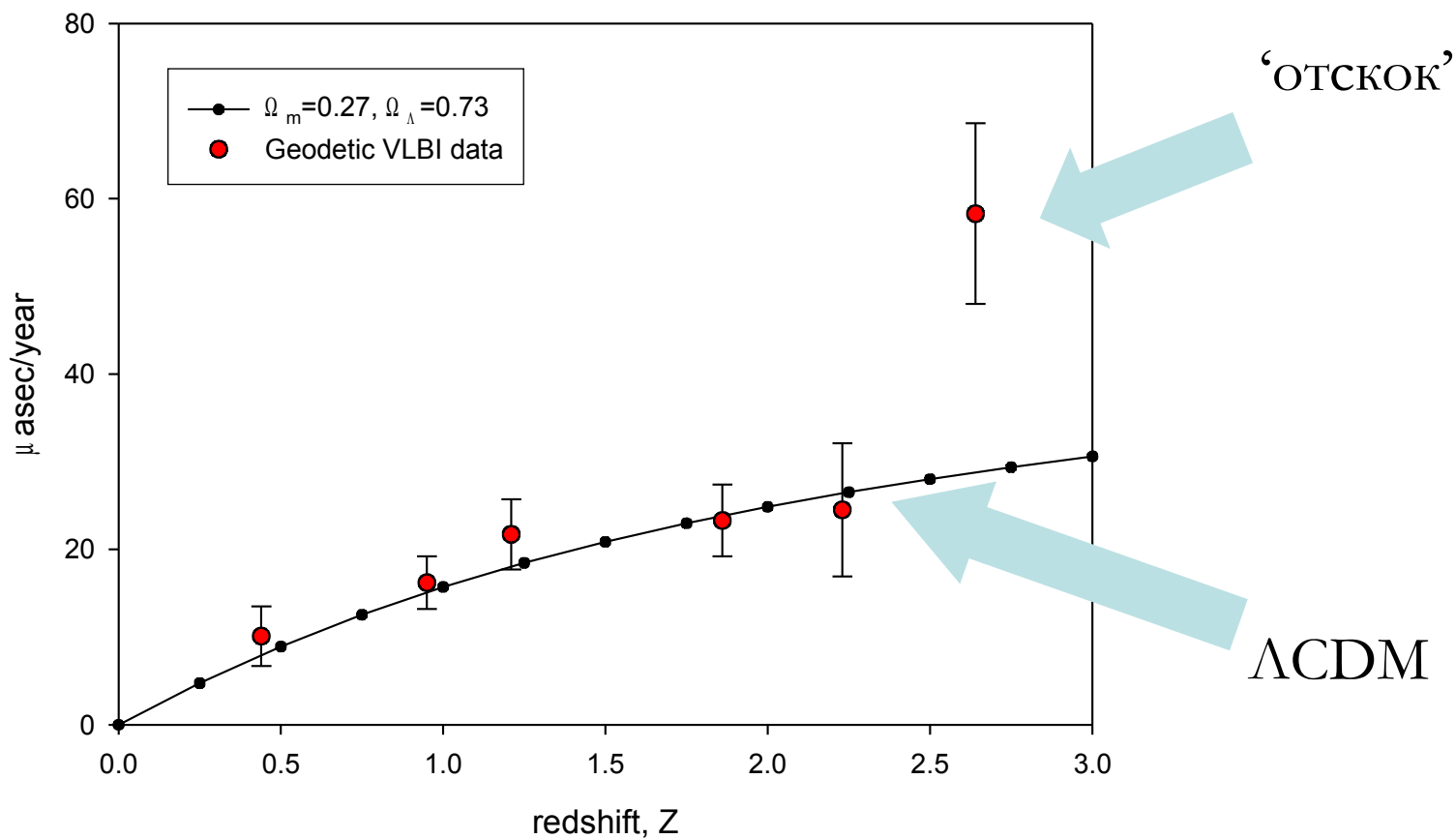
Систематический эффект в собственных движениях (сумма)



до 40 $\mu\text{as}/\text{year}$

Амплитуда гармоника 2й степени в зависимости от красного смещения

$$\langle \mu^2 \rangle^{1/2} \sim f(z)$$

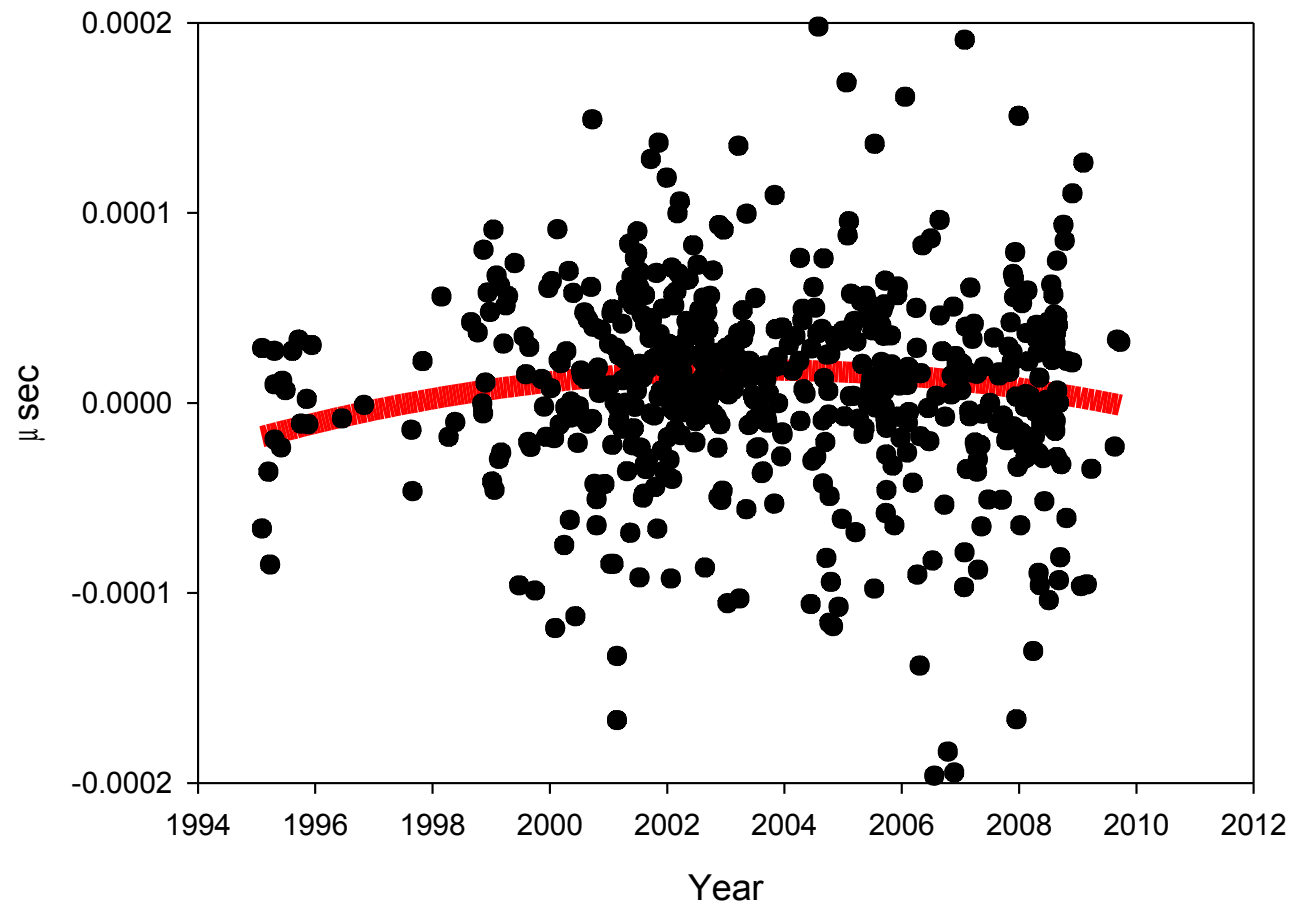


Квадратичные тренды в собственных движениях опорных квazarов

$$\alpha(t) = \alpha(t_0) + \mu_{\alpha} (t - t_0) + \dot{\mu}_{\alpha} (t - t_0)^2$$

Квадратичный тренд во временных рядах

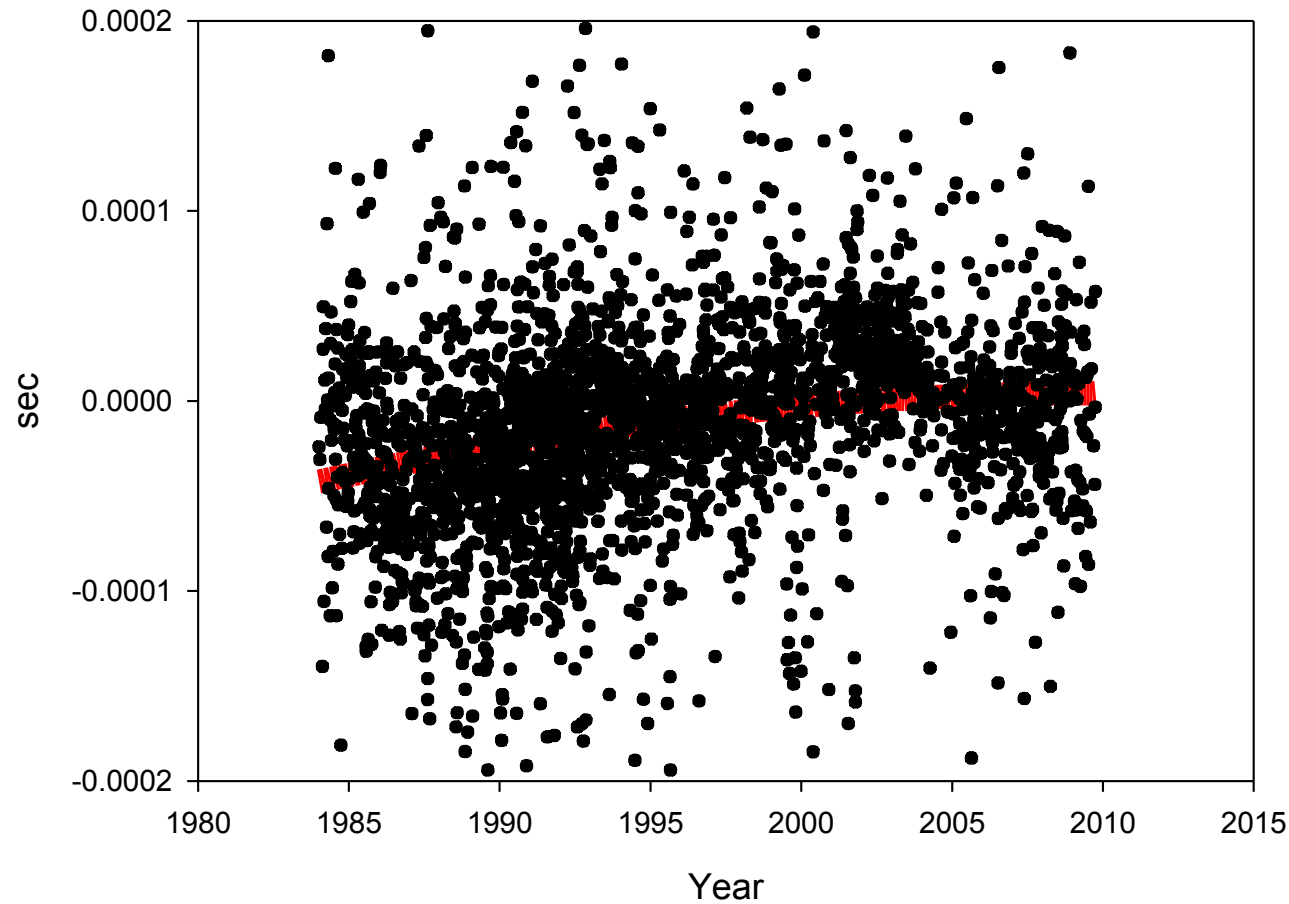
RA time series; 0718+793



$$\ddot{\alpha} \cos \delta = -4 \pm 2 \mu\text{as/y}$$

Квадратичный тренд во временных рядах

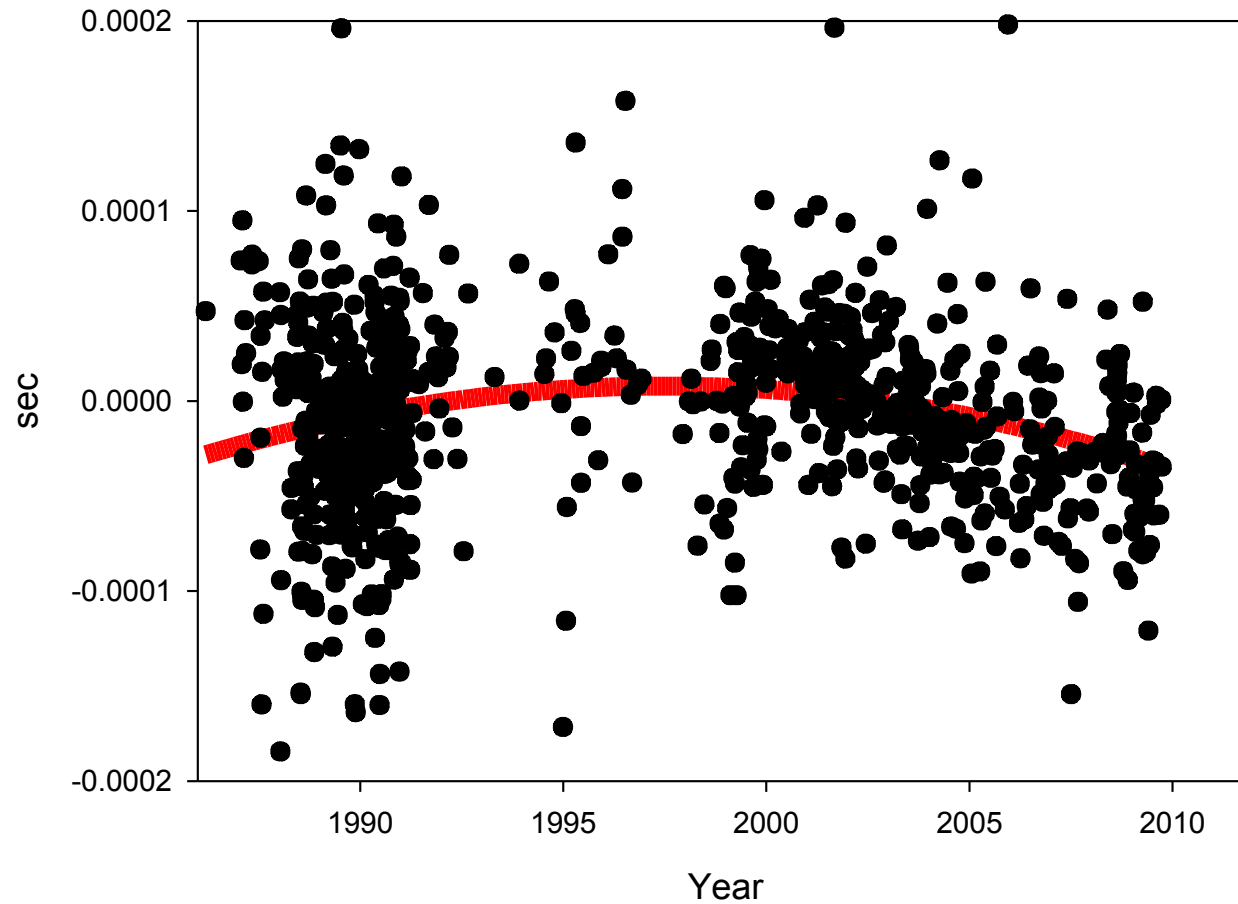
RA time series of 4C39.25



$$\ddot{\alpha} \cos \delta =$$
$$-2.9 \pm 0.2 \mu\text{as/y}$$

Квадратичный тренд во временных рядах

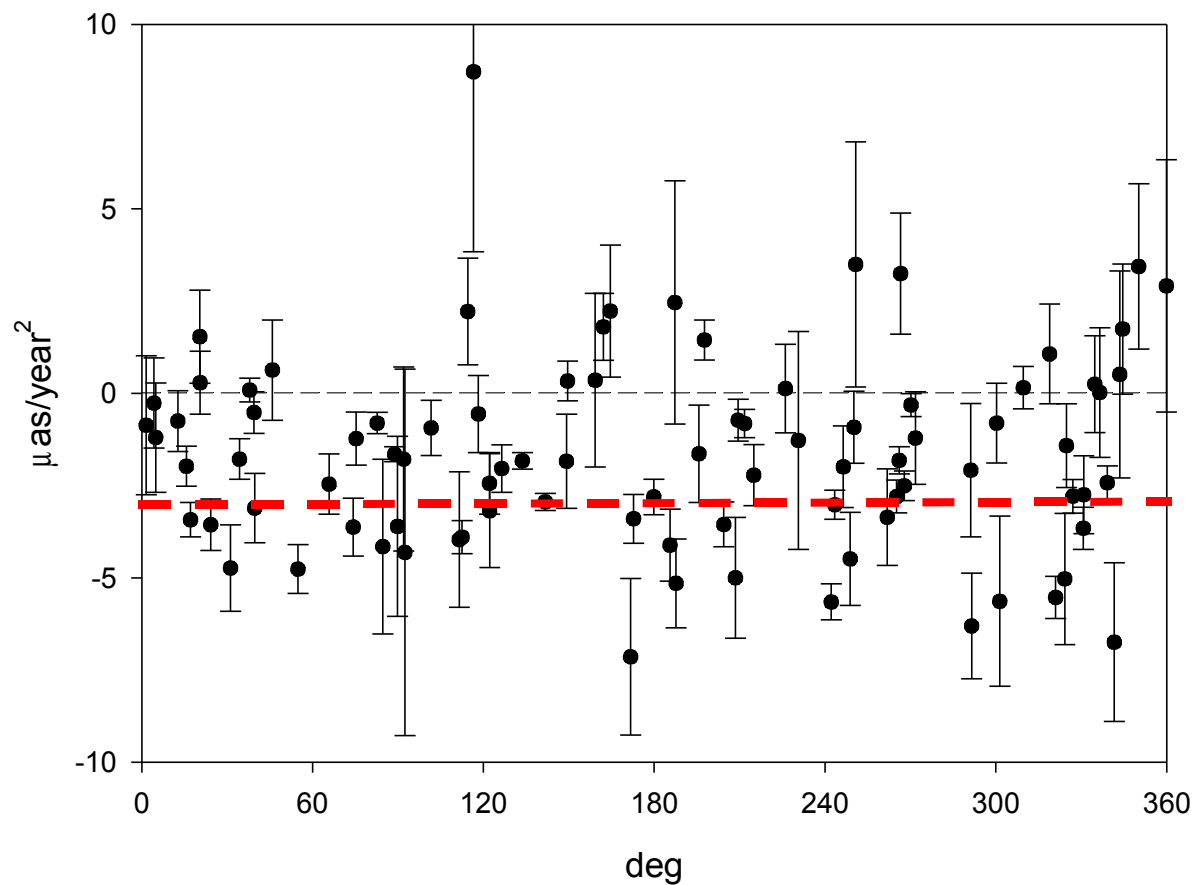
RA time series; 2121+053



$$\ddot{\alpha} \cos \delta =$$
$$-5.5 \pm 0.6 \mu\text{as}/\text{y}$$

Собственное “ускорение” для 86 квазаров

$$\dot{\mu}_\alpha \cos \delta$$



$$\dot{\alpha} \cos \delta = -2.2(\pm 0.4) \mu\text{as} / \text{year}^2$$

Причина появления коллективного квадратичного тренда непонятна

Несовершенство релятивистских эффектов в шкалах времени

Заключение

- Астрометрия принимает ярковыраженный космологический характер

Заключение

- Борьба с собственными движениями “неподвижных” звезд переходит в борьбу с собственными движениями “неподвижных” квазаров

Заключение

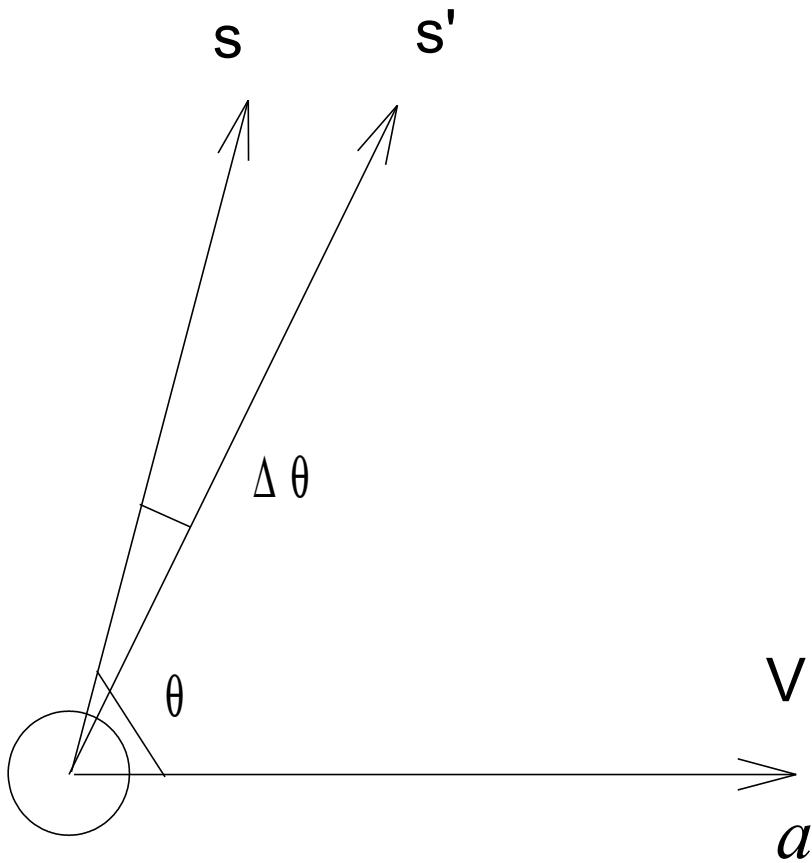
- Если все это подтвердится, то можно будет изучать трехмерную кинематику квазаров
- И делать разные выводы о строении Вселенной

Что делать?

- Программы РСДБ наблюдений
(от 700 собственных движений до 3000 к 2020 году)
- Программы оптических наблюдений Красные
смещения квазаров, чьи собственные движения
измерены

Thank you!

Вековая аберрация и ее дрейф



$$\Delta \theta = - \frac{V}{c} \sin \theta$$

$$\Delta \theta + \mu \Delta t = - \frac{V + a \Delta t}{c} \sin \theta$$

$$\mu \Delta t = - \frac{a \Delta t}{c} \sin \theta$$

$$\mu = - \frac{a}{c} \sin \theta$$

Systematic effect evidence?

MacMillan (2003)

positions. The WRMS of observed proper motion from nearly 2 decades of observations by geodetic networks is at the level of about $30 \mu\text{as/yr}$ in both right ascension and declination. Given this level of observed motion and an observing duration of 1-2 decades, modeling or corrections are needed to make improvement in stability below the nominal noise floor.

There does appear to be a statistically significant pattern in the observed proper motion vector field. The problem, however, is to how to determine how much the observed apparent motion is due to unmodelled source structure effects. To improve the determination of spherical expansion amplitudes, it would be desirable to make more observations of southern declination sources below about -40° .

Second harmonic (interpretation)

- Does the anisotropy depends on red shift?

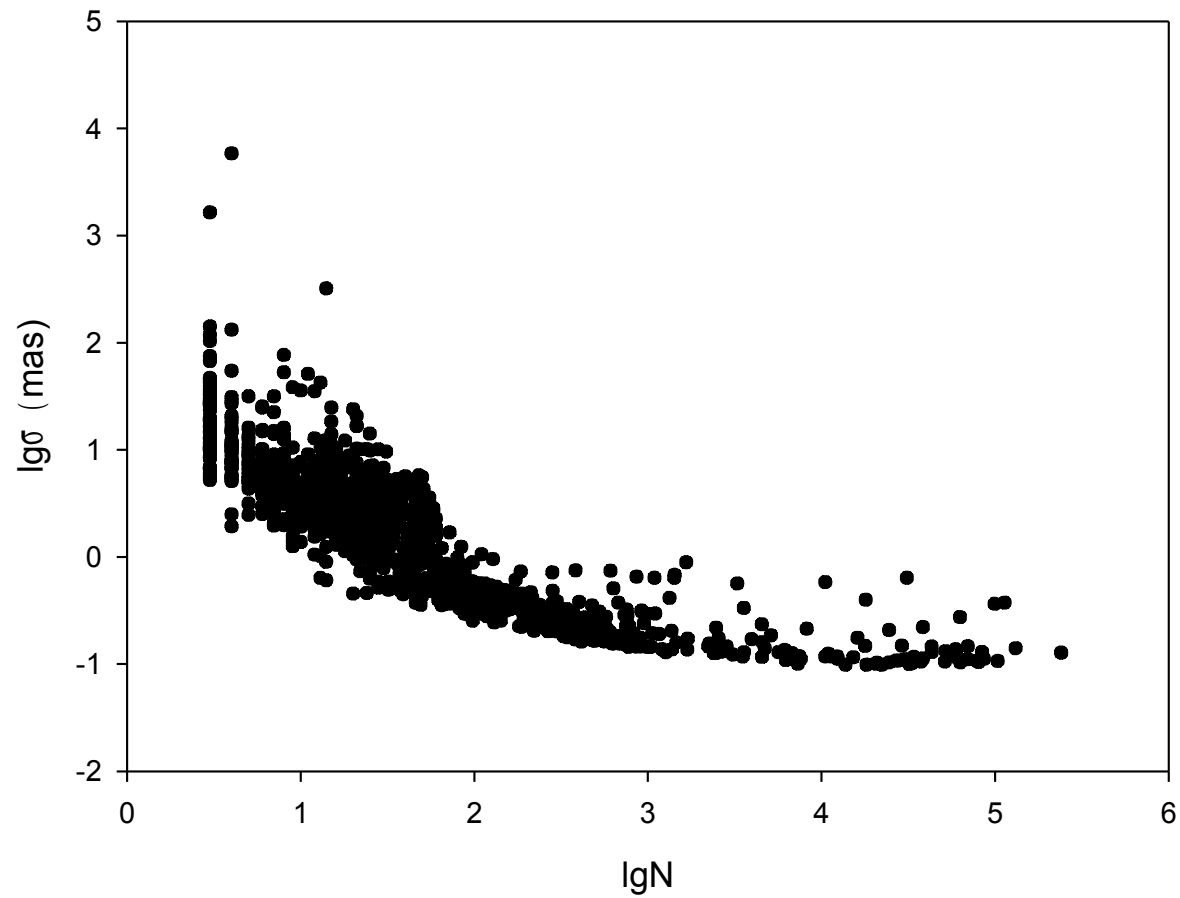
$$H(z) = H_0 \left((1+z)^2 (1 + \Omega_M z) \right)^{1/2}$$

$$\Delta H(z) = \frac{z(1+z)^2 H_0}{2 \left((1+z)^2 (1 + \Omega_M z) \right)^{1/2}} \Delta \Omega_M \sim \Delta \Omega_M z^{3/2}$$

$$\mu_\alpha, \mu_\delta \sim z^{3/2} ??$$

Apparent proper motions

Accuracy vs number of observations



Вычисленный систематический эффект (MacMillan, 2003)

Quasar Apparent Proper Motion Observed by Geodetic VLBI Networks

5

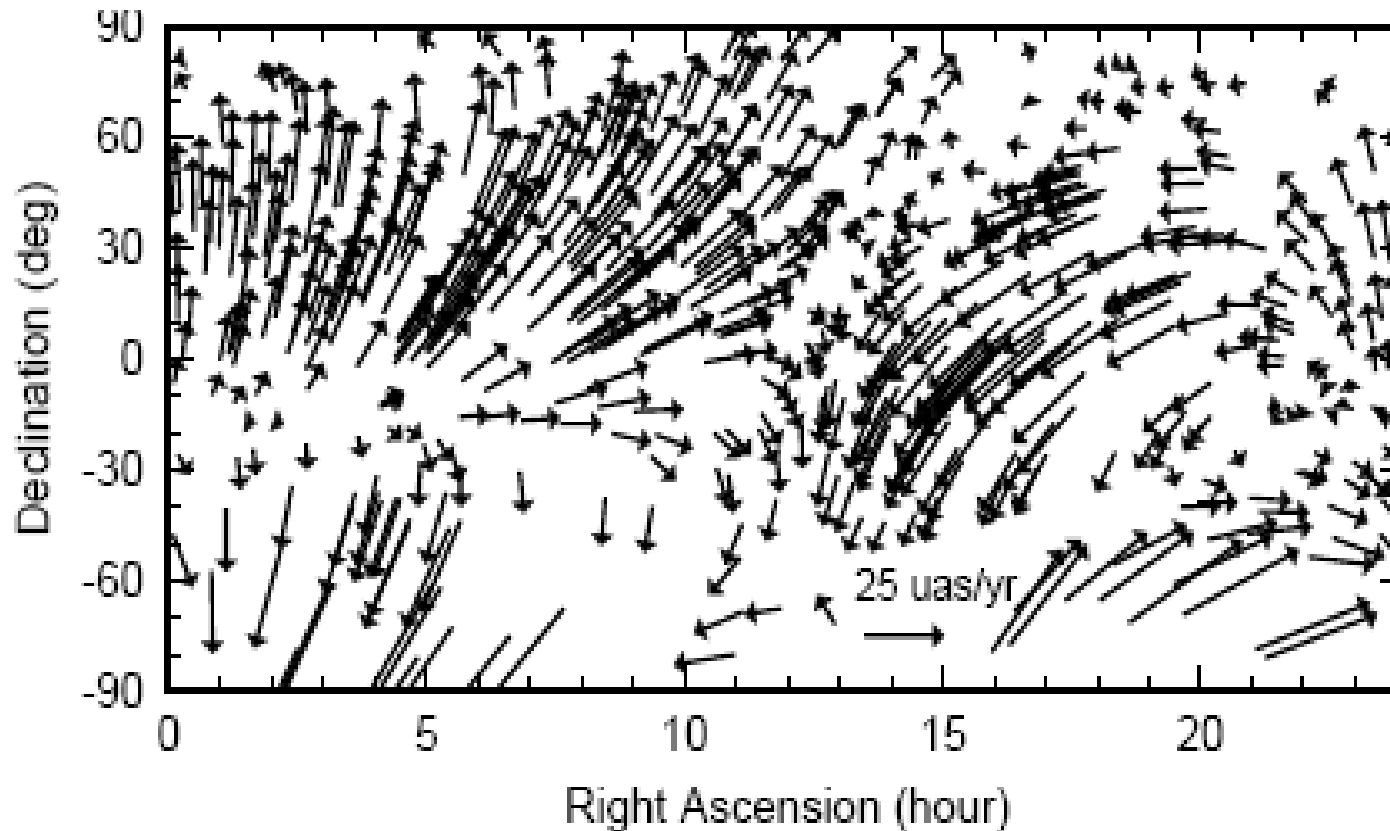
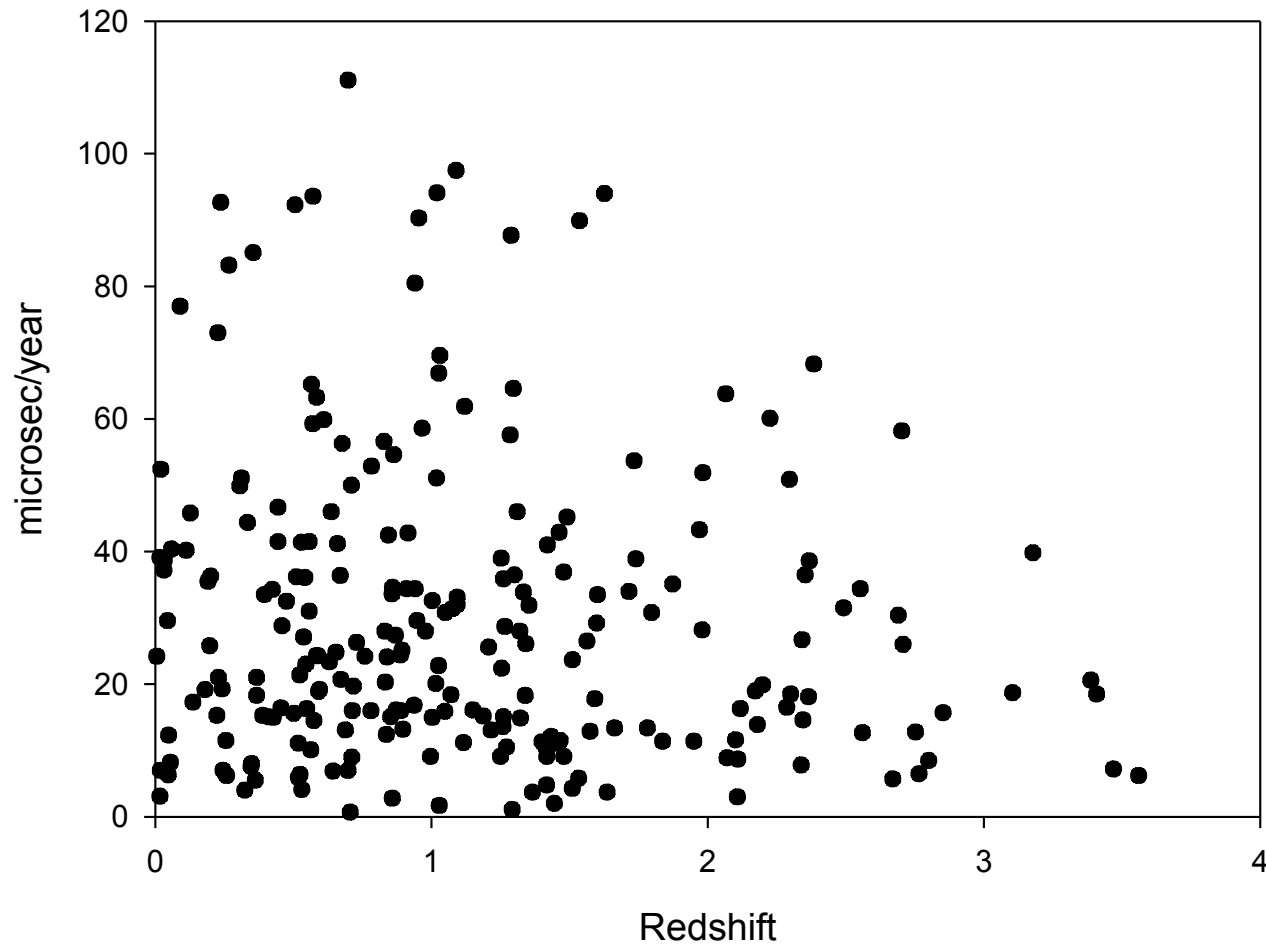


Figure 4. $L=2$ proper motion transverse vector field at the observed source positions

Apparent proper motions vs redshift (only for well observed radio sources)



Формальные ошибки

