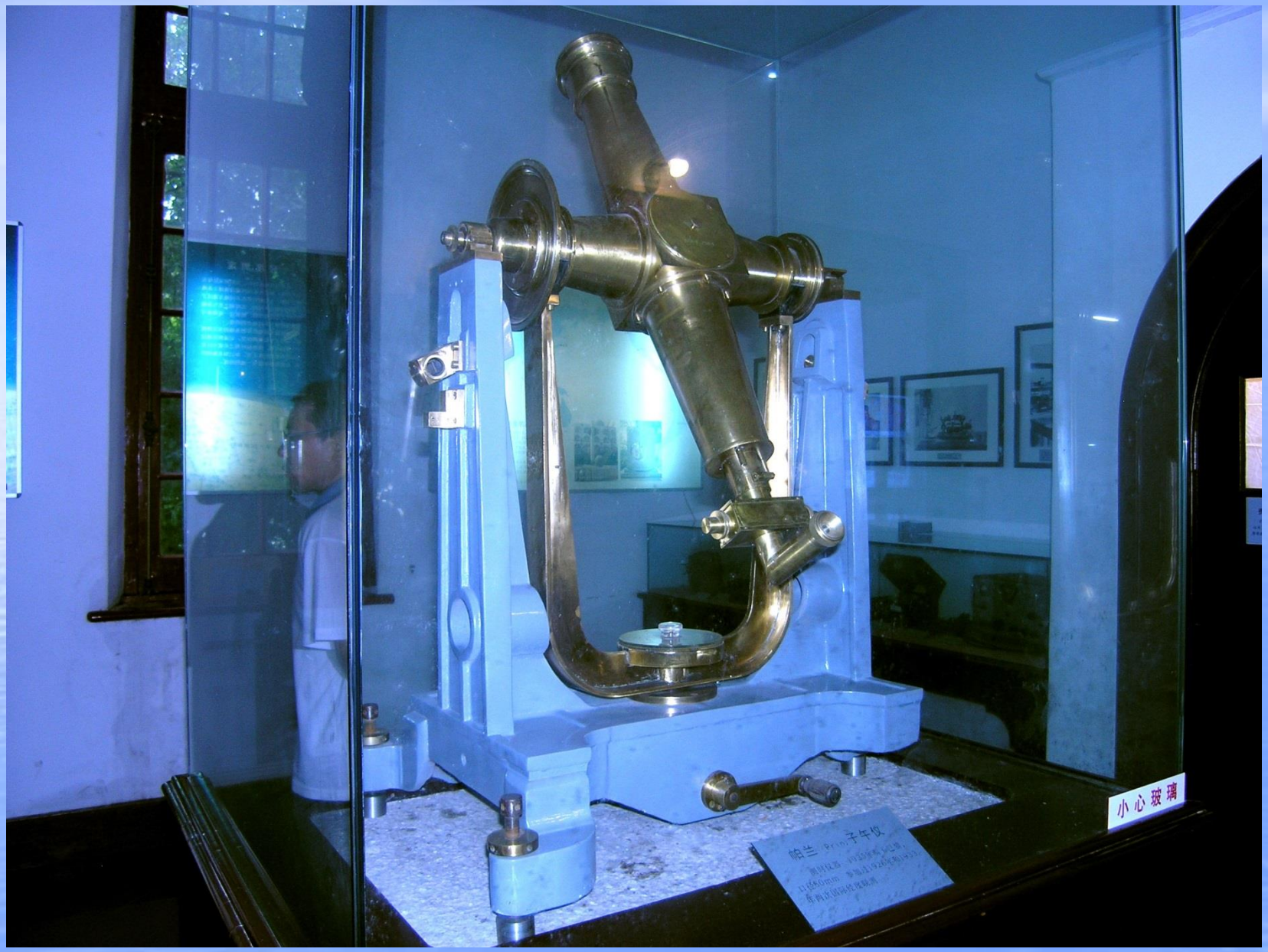
Космологическая астрометрия

Олег Титов (Geoscience Australia)

Санкт-Петербургский Университет

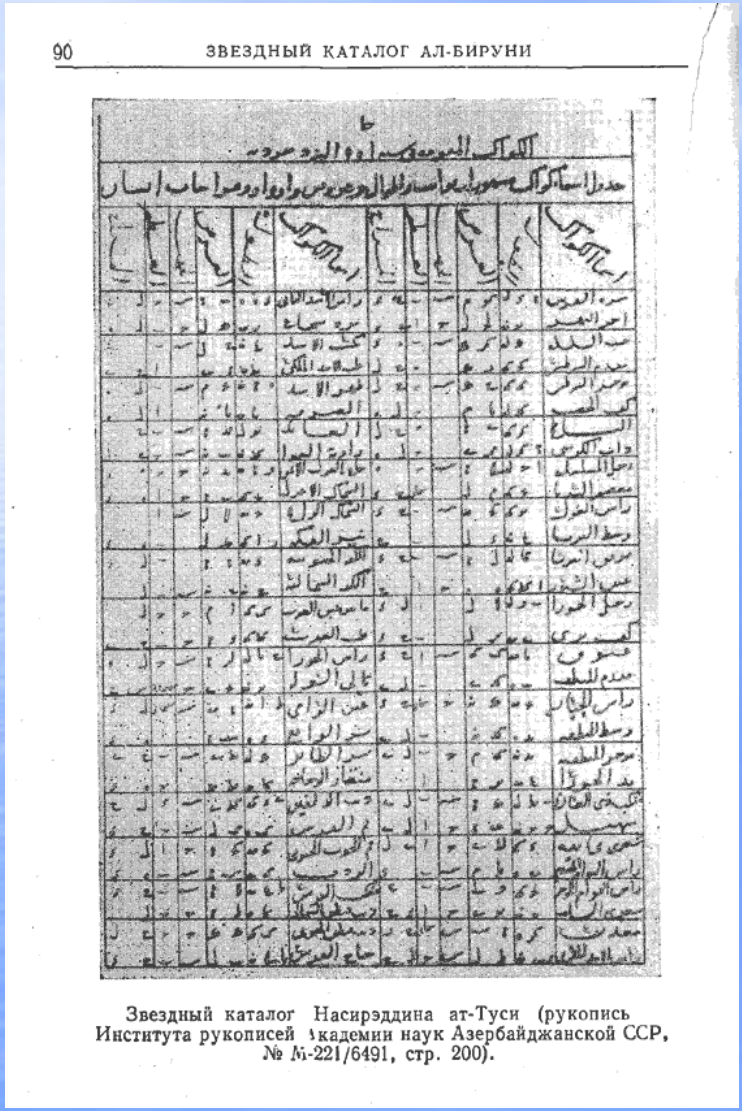
29 апреля 2015

За последние 2000 лет в астрометрии произошли некоторые изменения...

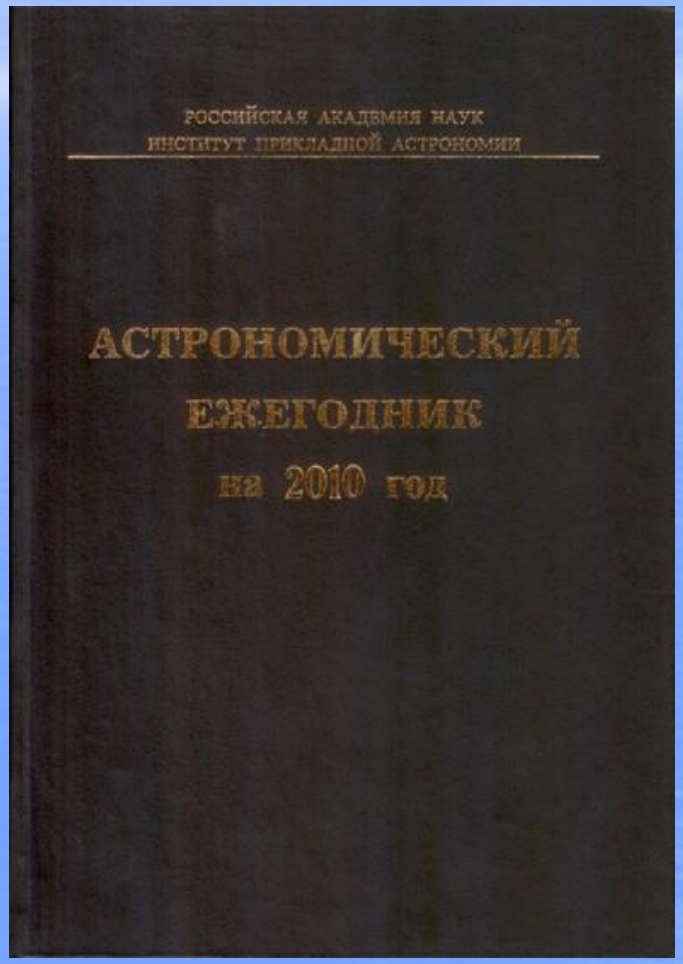

小心玻璃

Приборы для измерения времени

Система записи данных


90 ЗВЕЗДНЫЙ КАТАЛОГ АЛ-БИРУНИ

Звездный каталог Насирэддина ат-Туси (рукопись Института рукописей Академии наук Азербайджанской ССР, № М-221/6491, стр. 200).



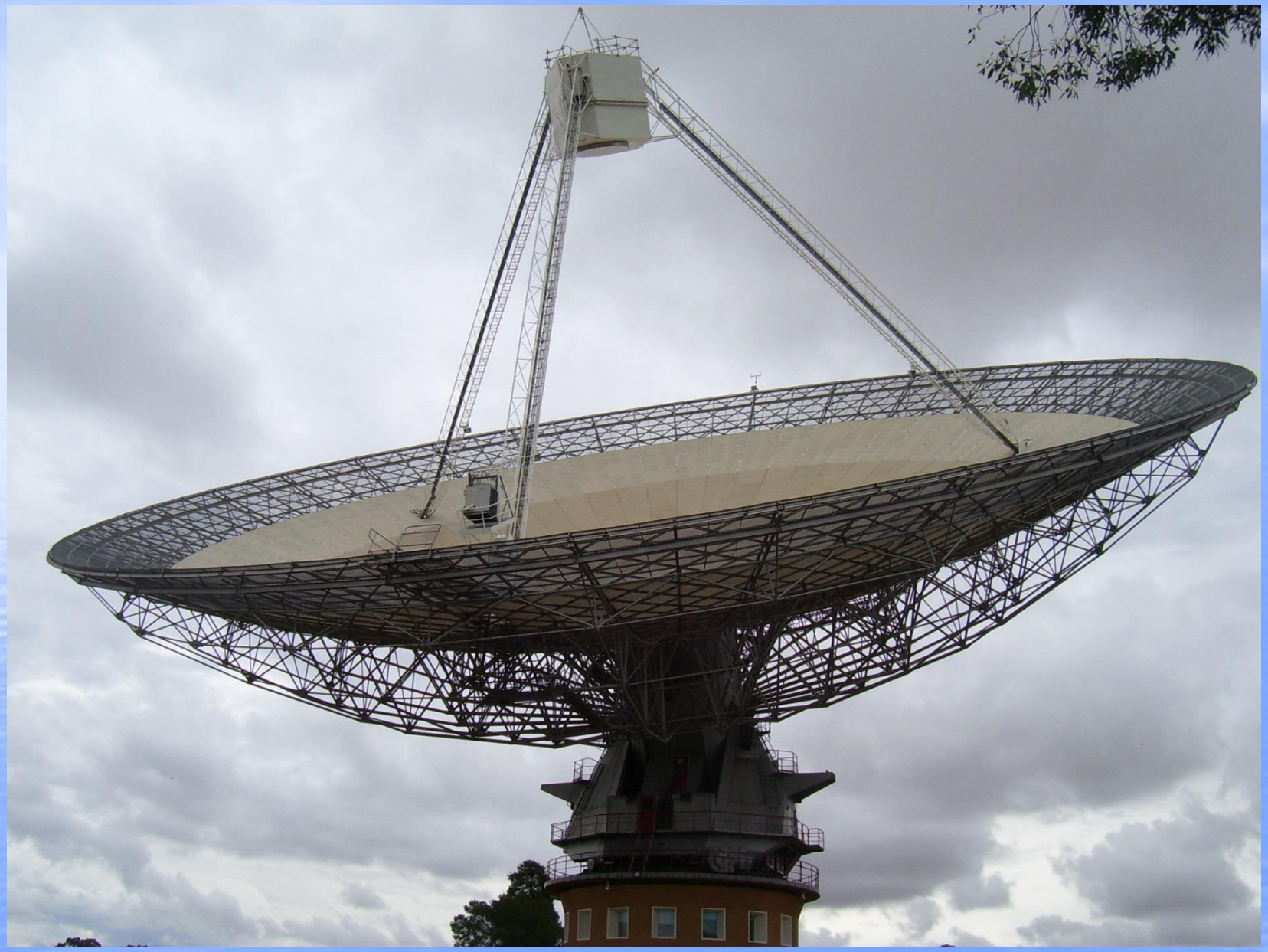
Так продолжалось до 1991 года…

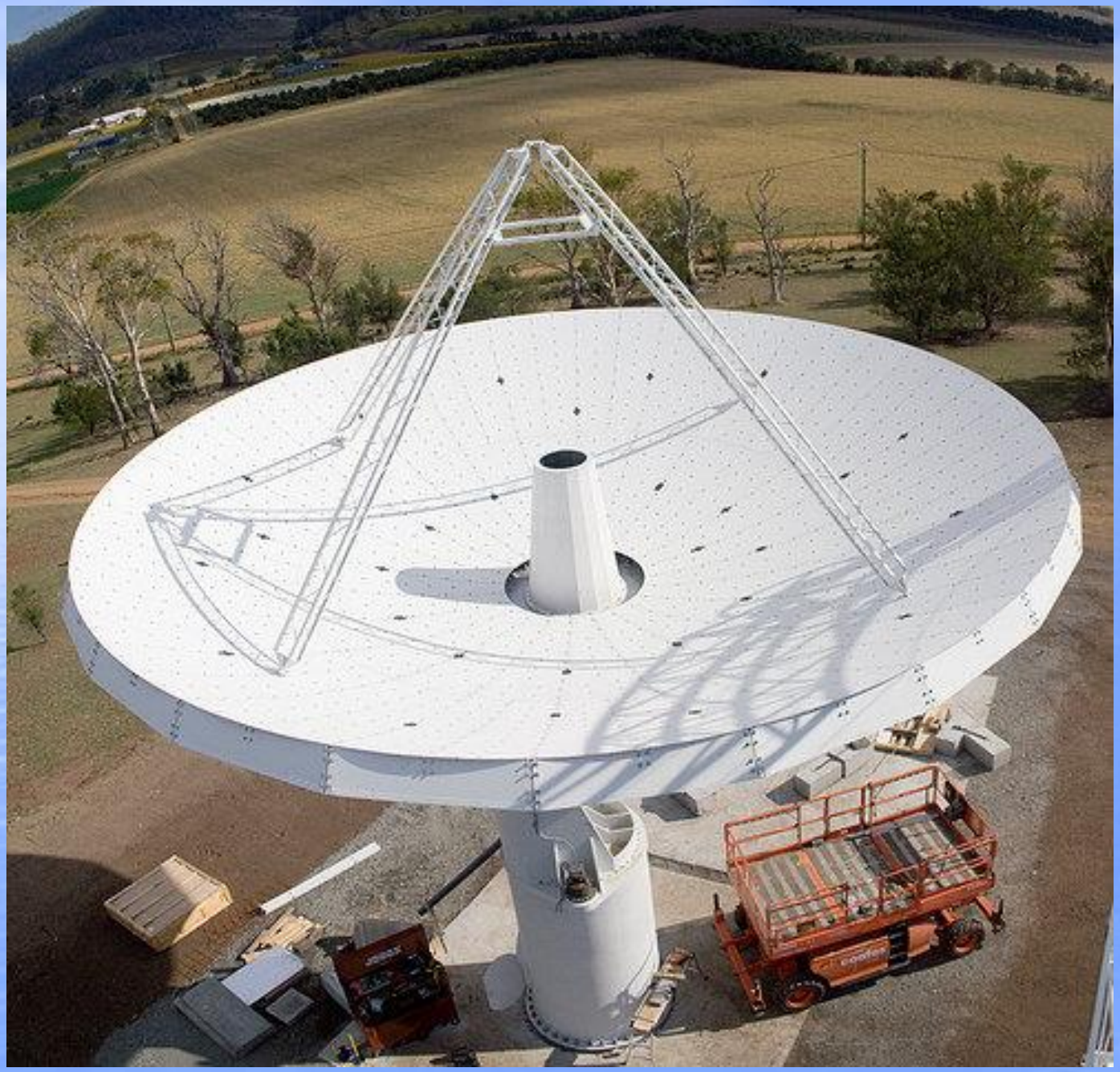
…когда очередная ГА МАС приняла решение, что новая фундаментальная система координат будут строиться на основе РСДБ наблюдений.

Астрометрия звезд (~2000 лет)

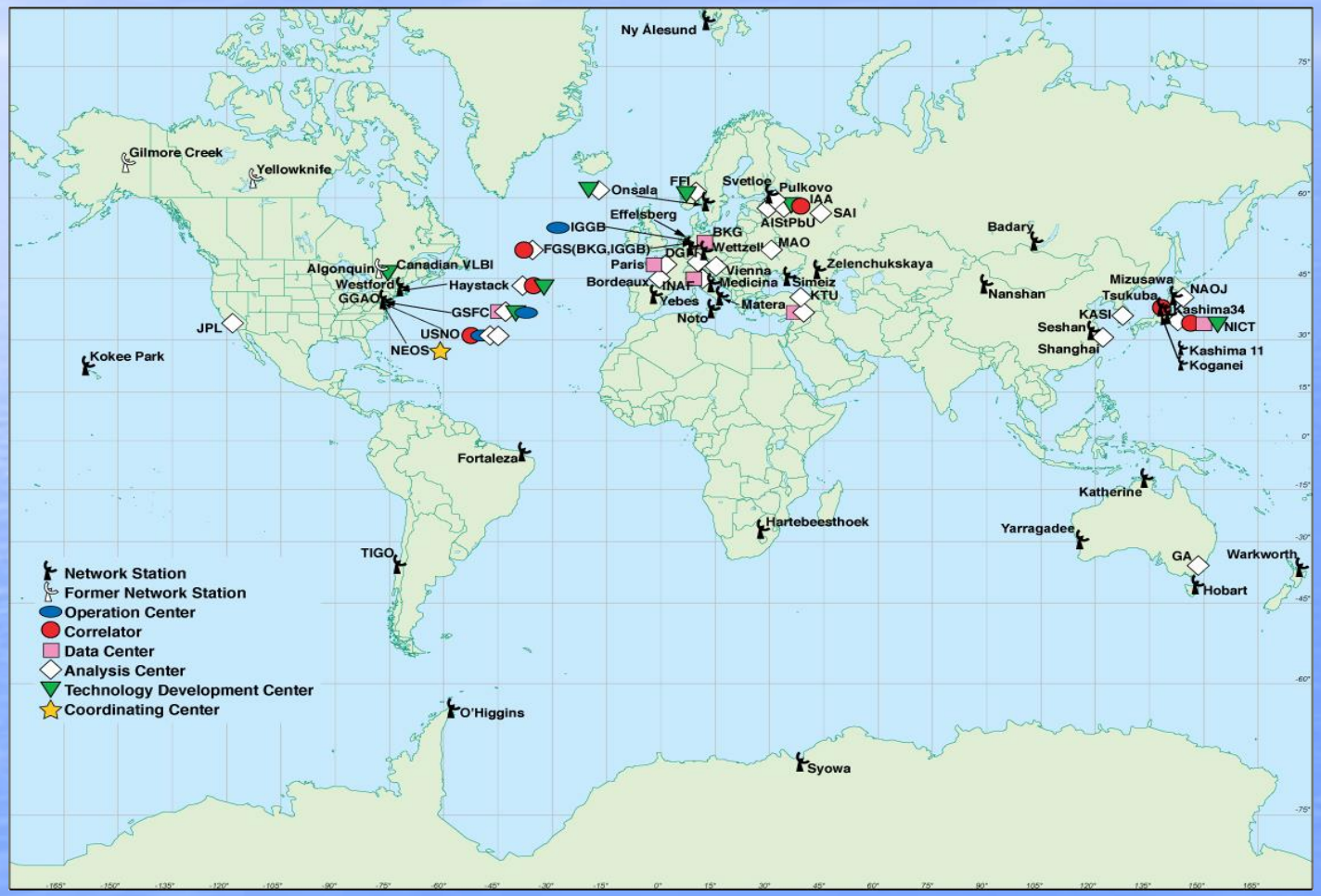
↓

Астрометрия квазаров (~25 лет)

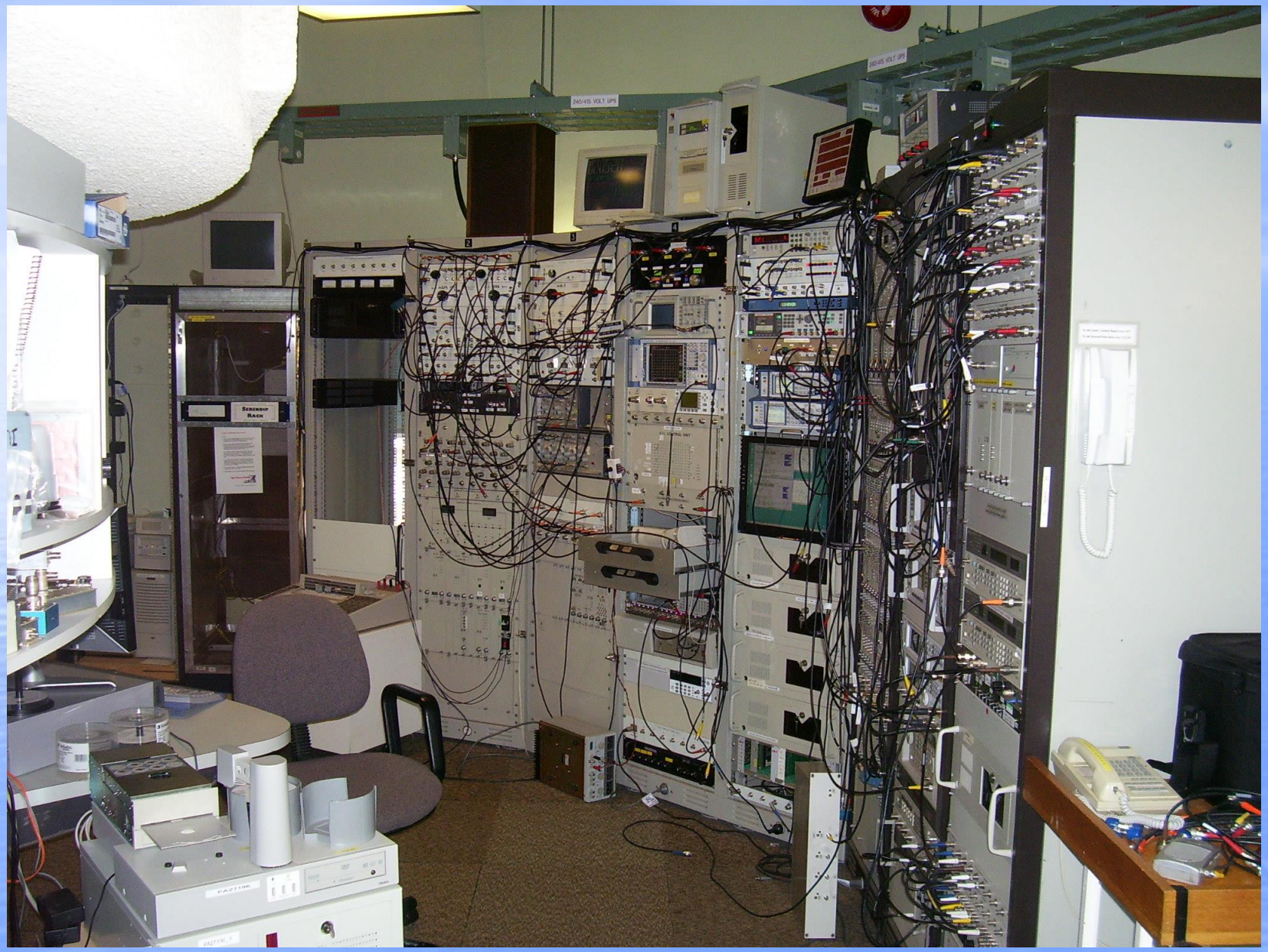




IVS сеть РСДБ антенн (2015)



ATOMIC HYDROGEN MASER
SHANGHAI OBSERVATORY
ACADEMIA SINICA
H14


240/415 VOLT UPS
240/415 VOLT UPS
SERENDIP RACK

VACREE

FK5 → ICRF2

1988 → 2010

точность координат
0”.019= 19000 μas → 41 μas

точность собственных движений
700 μas/year → 10-100 μas/year

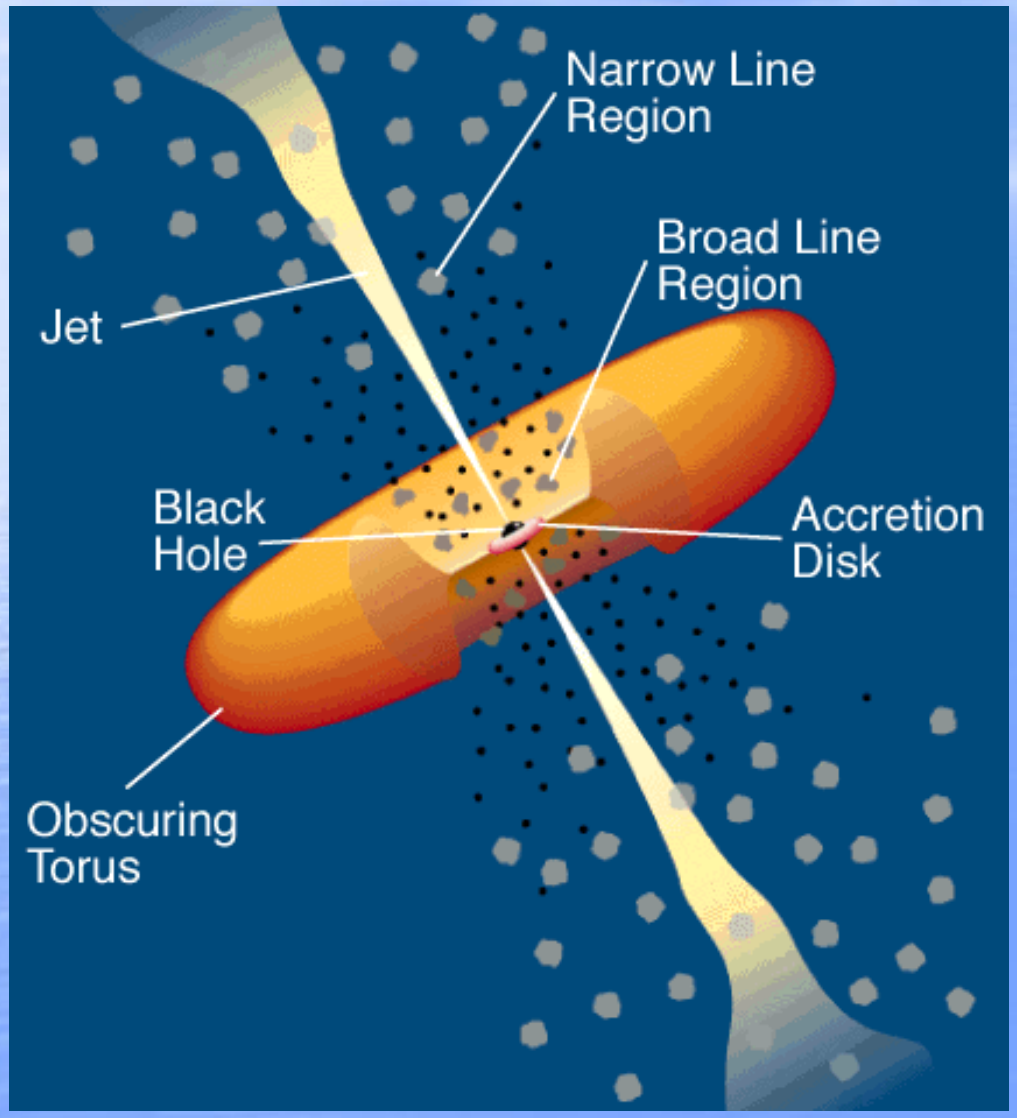
Предыстория

- 1. В 1991 году было принято решение, что следующая фундаментальная система координат будет построена “на квазарах”
- 2. International Celestial Reference Frame (ICRF) в виде каталога координат 212 радиоисточников (1979-1995) принята Международным Астрономическим Союзом в 1997 году
- 3. ICRF2 – 295 источников (МАС 2009 года)
- 4. ICRF3 – МАС 2018 года
- 5. В рамках МАС создана рабочая группа по созданию ICRF3 и первый пробный вариант будет обсуждаться на МАС в августе 2015 года (Гонолулу).

Предыстория (цифры)

	ICRF1	**ICRF2**	**ICRF3**
defining	212	295	
Non-defining	294	922	
other	102		
VCS		2197	
всего	608	3414	
“specially-handled”		39	
Формальная точность	60 мкс	6 мкс	
Принятая точность	250 мкс	40 мкс	

Модель активного галактического ядра (AGN)



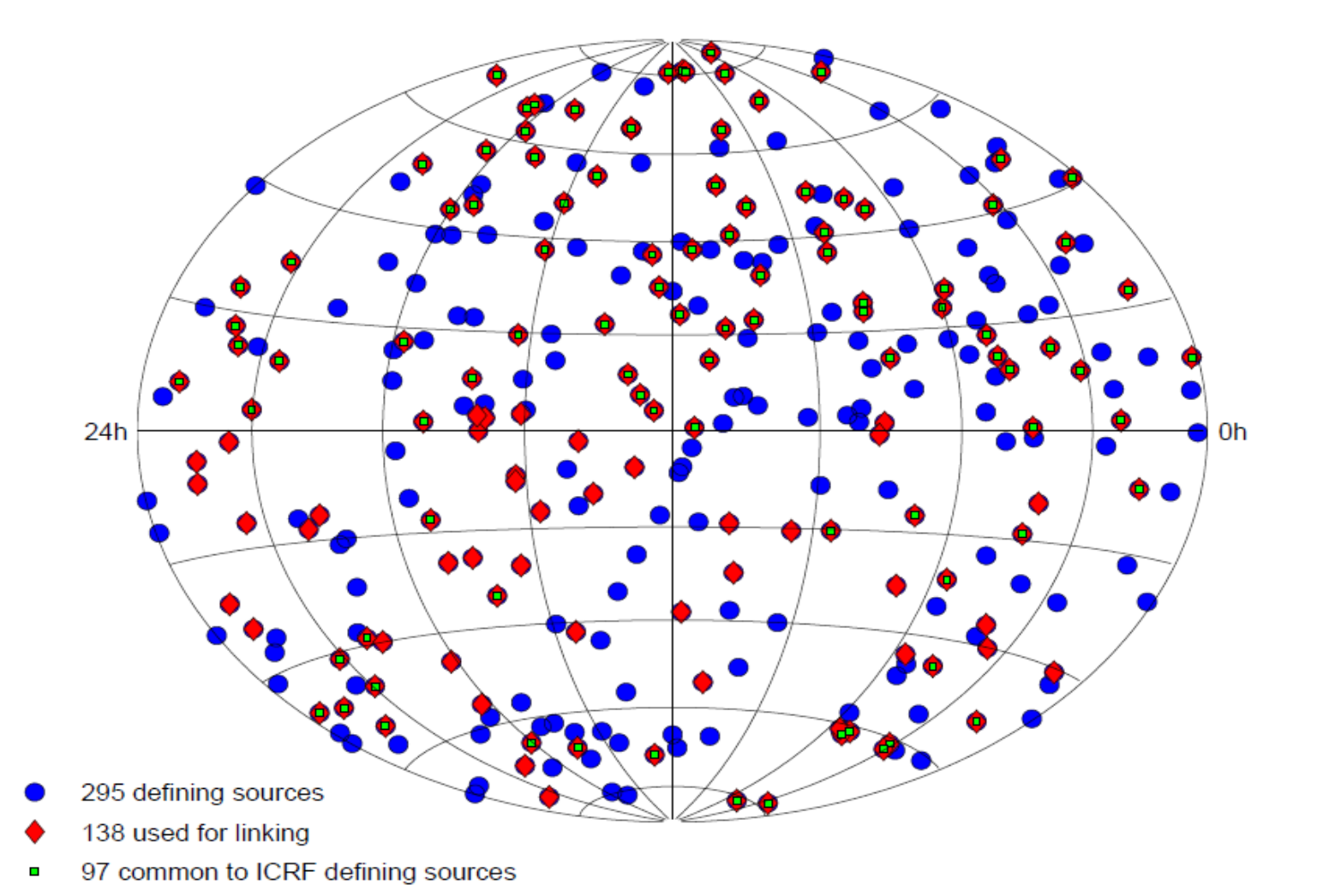
http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn_model.html

Credit: C.M. Urry and P. Padovani, 1995

Schematic of
Active Galactic Nuclei
Redshift z~ 0.1 to 5
Distance:
billions light years
Parallax = 0
Proper motion
< 0.1 nrad/yr

Видимый размер центральной области излучения (черная дыра) становится меньше с ростом частоты наблюдения
Ka-band (32 GHz)
лучше, чем
X-band (8.4 GHz)

ICRF2

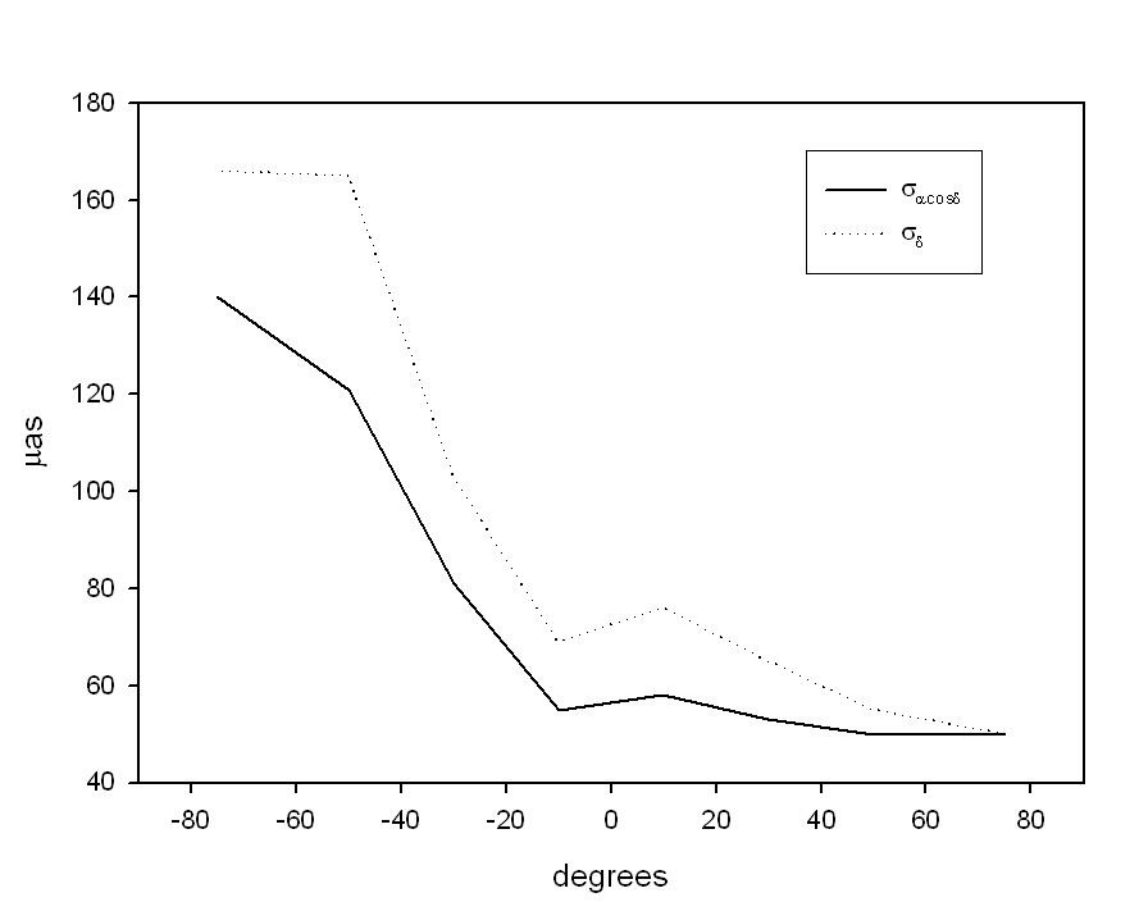

24h
0h
295 defining sources
138 used for linking
97 common to ICRF defining sources

Каталог ICRF2 (2009)

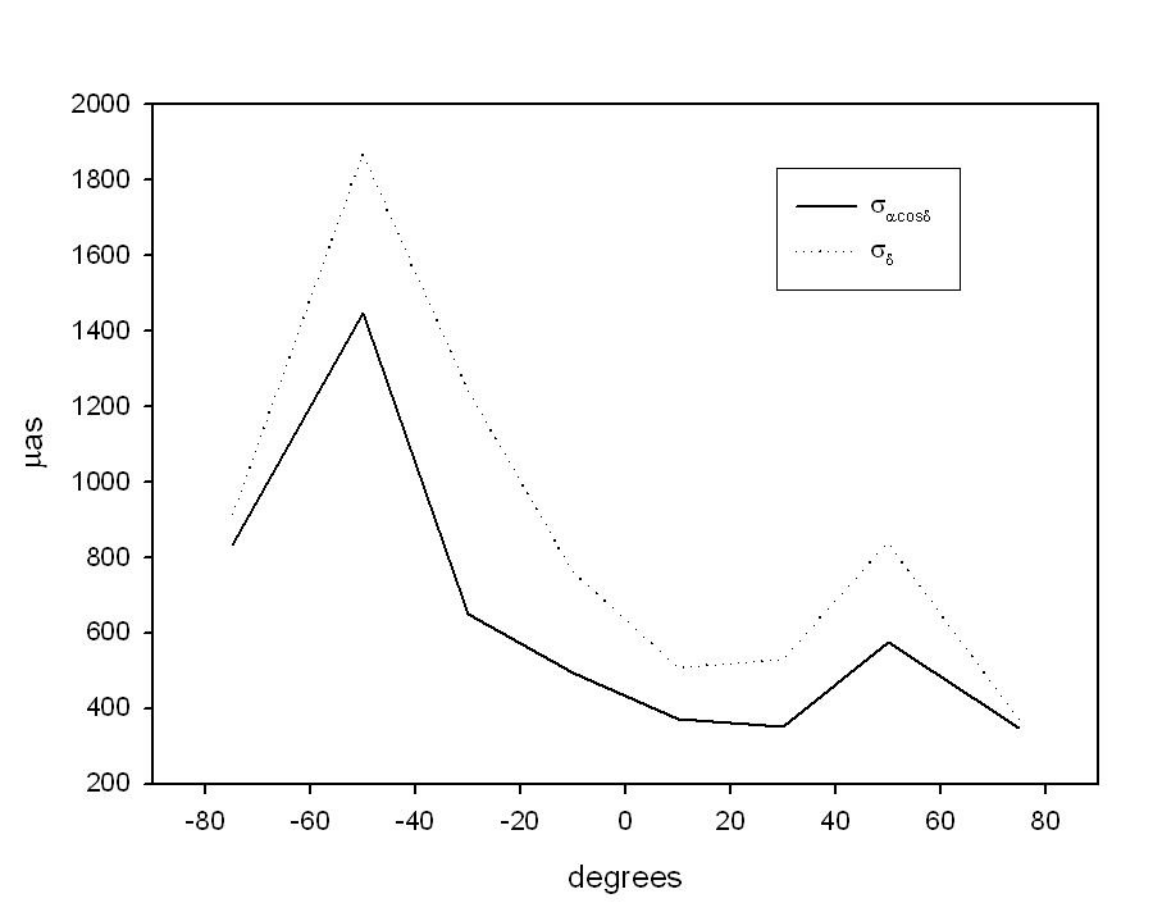
3414 объектов, разделенных на 3 группы

1. **295 “defining” радиоисточников, точность ДО ~0.04 mas**
2. **922 “non-defining” радиоисточников**
3. **2197 VCS радиоисточников (VLBA Calibrator Survey)**

Точность для for 295 ‘defining’ радио источников



Точность для 1217 ‘non-defining’ радиоисточников



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 μas/year → 10-100 μas/year

Причины, почему это предположение может быть некорректно к 2010

1. Дрейф вековой аберрации (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 μas/year (M81)

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

Ожидамое ускорение направлено к центру Галактики
(RA= 270º, DE = -30º)
с амплитудой $a = V^2/R$

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

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

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

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

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

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

$$a_3 = a \sin\delta_0$$

$(\alpha, \delta) - coordinates\ \ of$
$of\ \ the\ source$

$(\alpha_0, \delta_0) - coordinates\ \ of$
$of\ \ the\ accelerati\,on\ vector\ \ directon$

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

$$\frac{de^{\mu}}{dt} = h^{\mu\nu}[e^{\beta}(\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) +$$

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

2. Анизотропия параметра Хаббла

Кинематическая интерпретация – диагональные элементы тензора расширения

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

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

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

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

2. Анизотропия параметра Хаббла

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

$$V = Hr$$

$$\mu_\alpha = 0$$

$$\mu_\delta = 0$$

Закон Хаббла “обычный”

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

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

$$\mu_\alpha \neq 0$$

$$\mu_\delta \neq 0$$

Анизотропия и ненулевая систематика

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

$$\mu = \frac{de^{\mu}}{dt} = h^{\mu\nu}[e^{\beta}(\sigma_{\nu\beta} + \omega_{\nu\beta}) +$$

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

σ – “Shear” (деформация)

ω - Вращение

E – гравитационные волны электрического типа

H – гравитационные волны магнитного типа

3. Первичные гравитационные волны

Gwinn et al (1997) – power density of gravitational waves

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

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

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, “Космологические собственные движения”, 1986) V=300-400 km/sec

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

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

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

4. Зависимость парралактического собственного движения от z

(Кардашев, 1986)

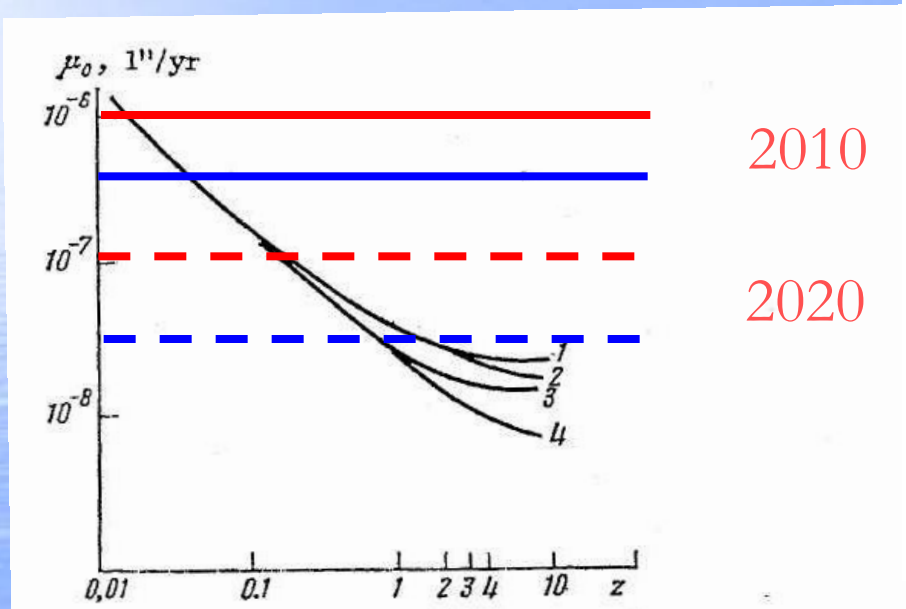
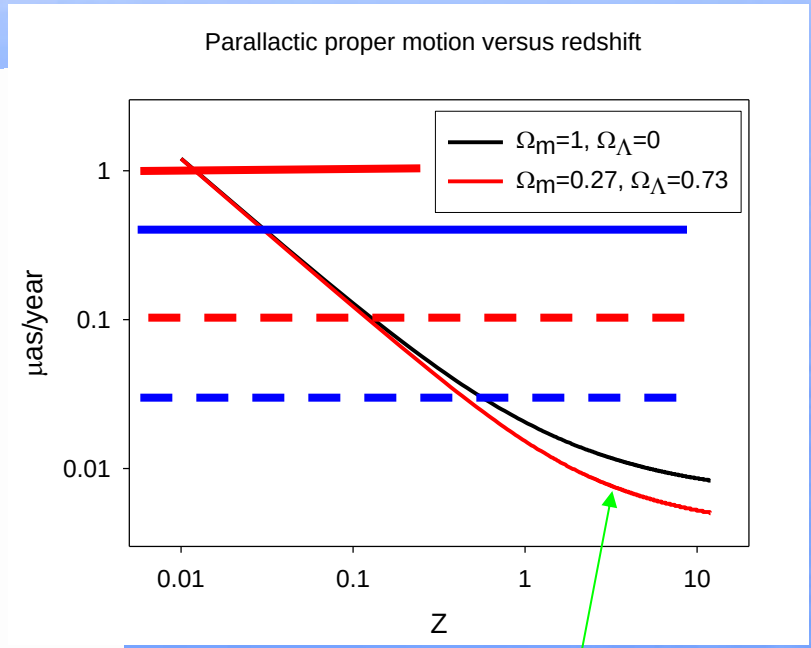


FIG. 1. Redshift dependence of the cosmological proper motion μ_0 for models with: 1) deceleration parameter $q_0 = 0$, space curvature $k = -1$, vacuum-density term $\Lambda = 0$; 2) $q_0 = 1$, $k = +1$, $\Lambda = 0$; 3) $q_0 = 1/2$, $k = -1$, $\Lambda < 0$; 4) $q_0 = 1/2$, $k = 0$, $\Lambda < 0$,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

2010

2020



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

Пересмотр стратегии наблюдательных программ (3000 собственных движений к 2020 году) позволит увеличить точность 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. Диполь
2. Вращение
3. Вторая сферическая 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

Вторая гармоника
«электрического типа»

Вторая гармоника
«магнитного типа»

Модель для уравнивания собственных движений (диполь и вращение)

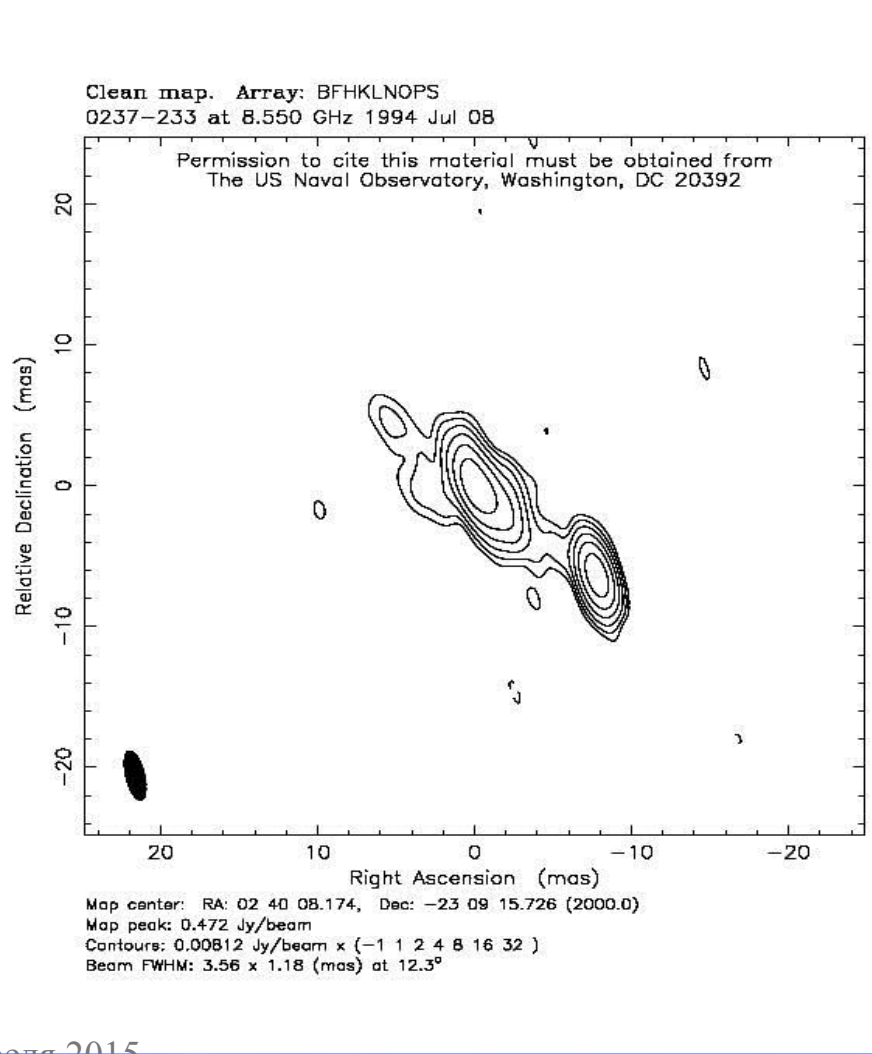
$$\mu_\alpha \cos\delta = \frac{1}{c}(-a_1 \sin\alpha + a_2 \cos\alpha) + \frac{1}{c}(\omega_1 \cos\alpha \sin\delta + \omega_2 \sin\alpha \sin\delta - \omega_3 \cos\delta)$$

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

диполь
(ускорение)

вращение

Структура радиоисточников (Charlot, 1990, AJ, 99, 1309)



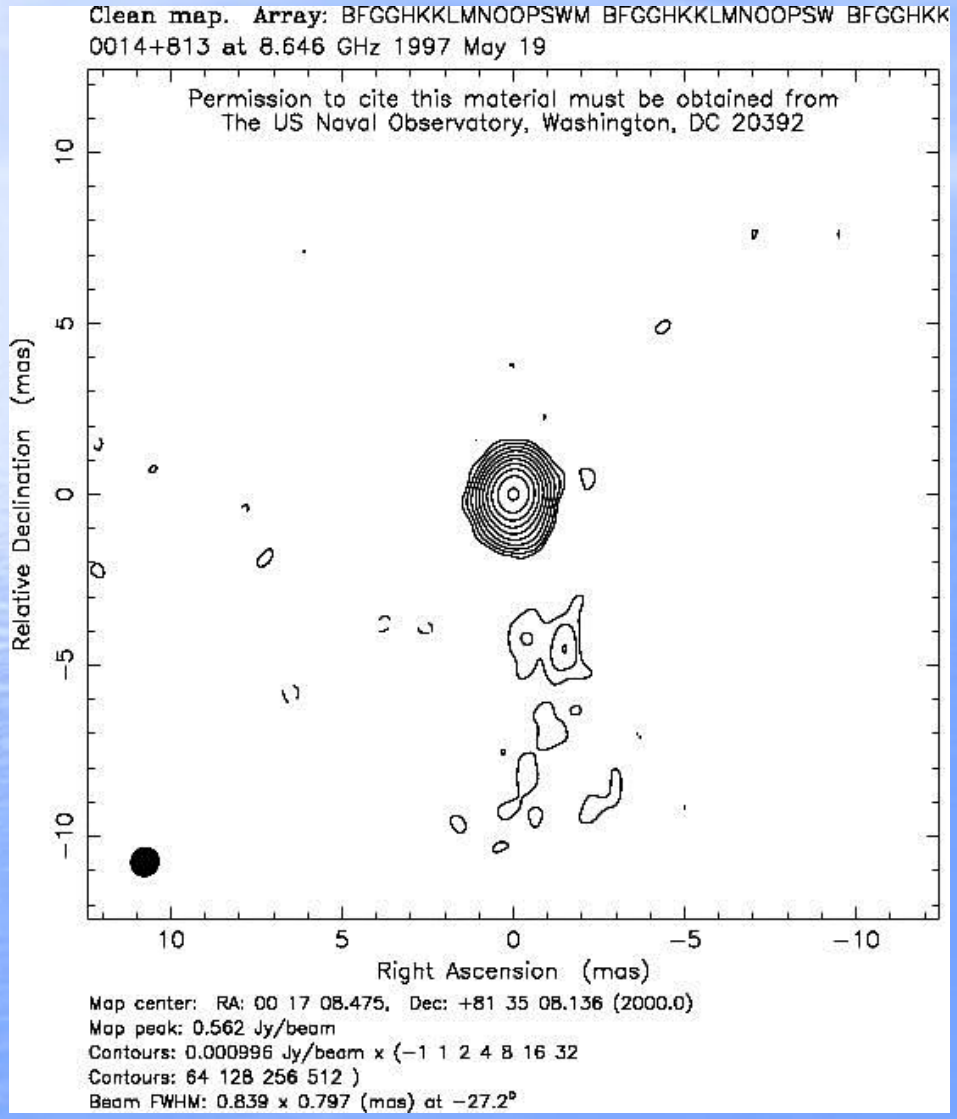
This research has made use of the United States Naval Observatory (USNO) Radio Reference Frame Image Database (RRFID).

Структура непостоянна!

Движения (сверхсветовые) релятивистских джетов вызывают быстрые изменения в структуре радиоисточников

“Несобственные” собственные движения

Radio source 0014+813



This research has made use of the United States Naval Observatory (USNO) Radio Reference Frame Image Database (RRFID).

Шкала

Квазар 0014+813 (Титов, 2007, ПАЖ, 33, 542)

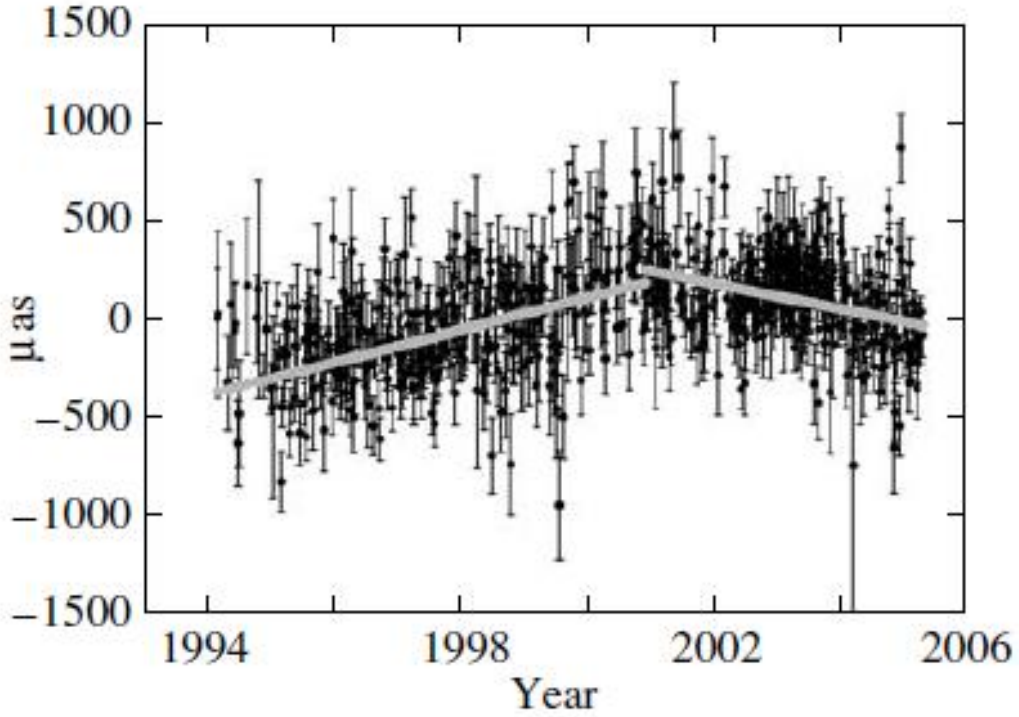
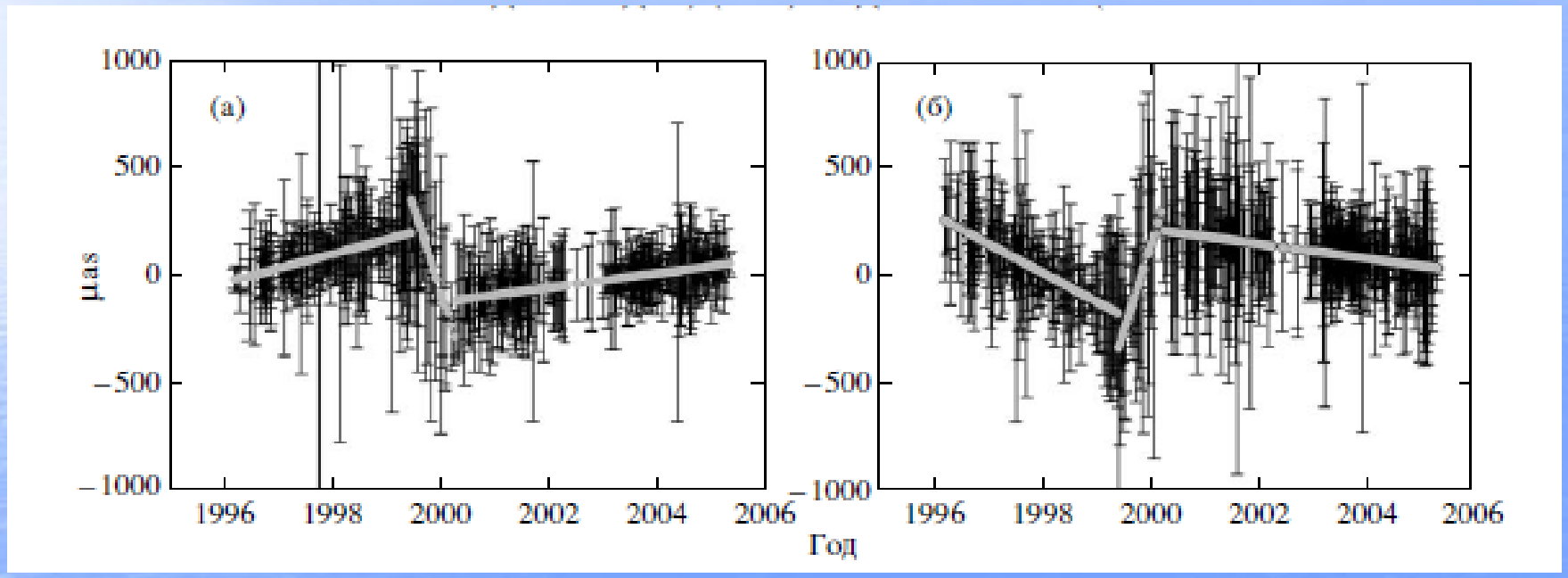
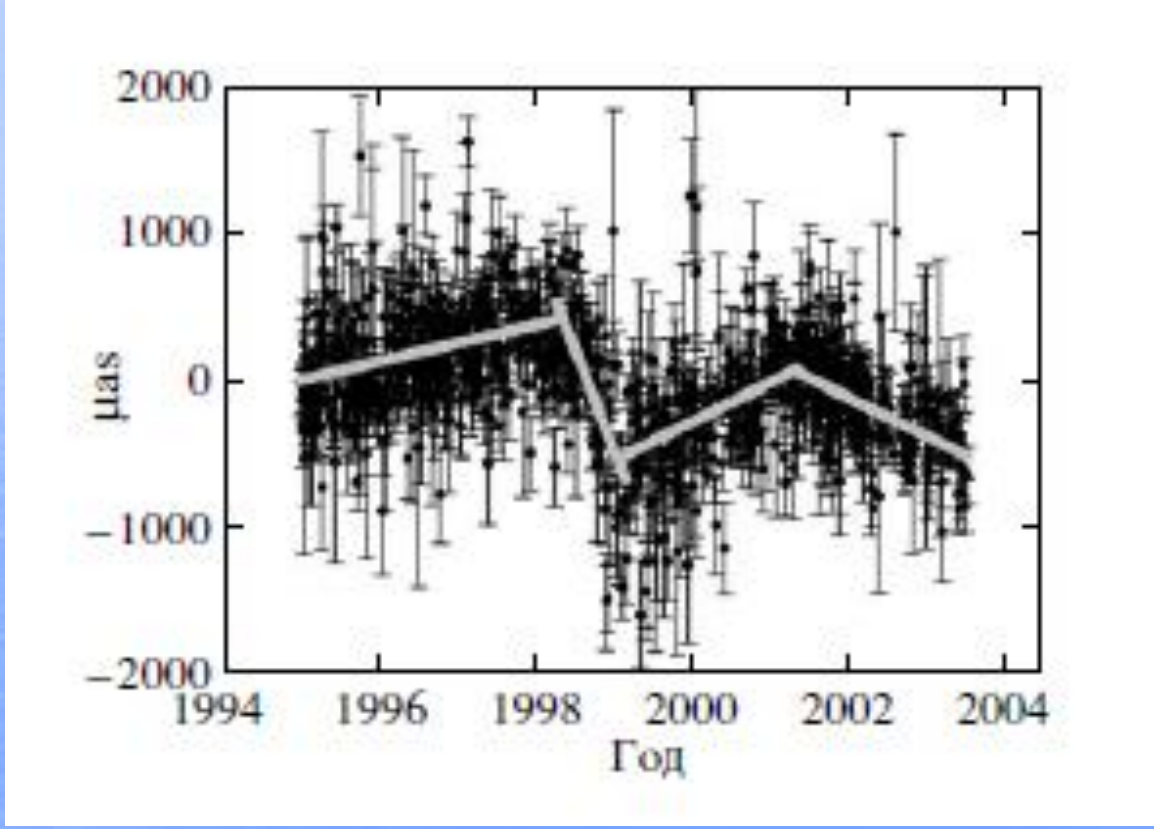


Fig. 3. Daily estimates of the coordinates for the quasar 0014+813 in declination and approximation by linear splines.

Квазар 1739+522 (Титов, 2007, ПАЖ, 33, 542)



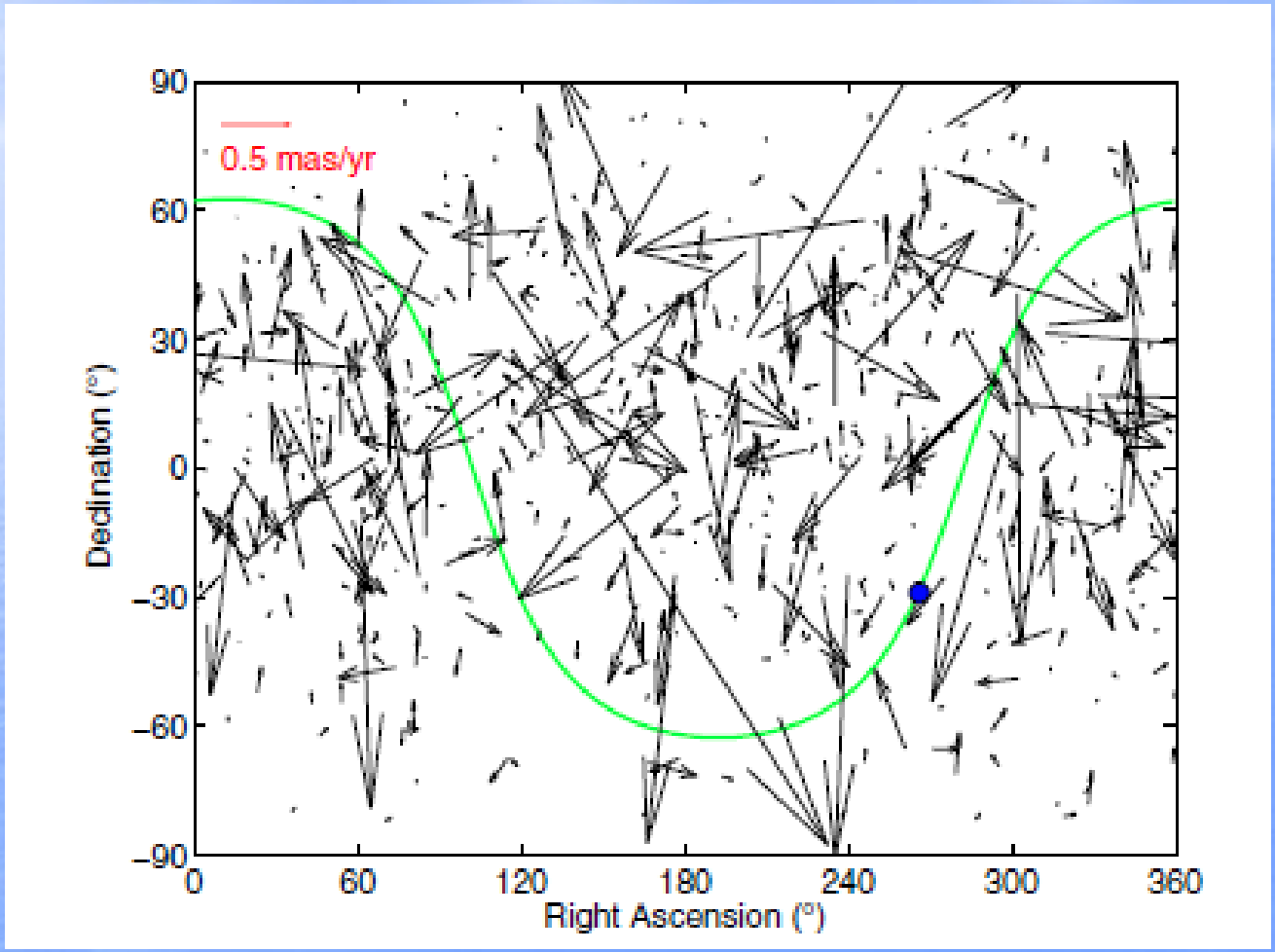
Квазар 2145+067 (Титов, 2007, ПАЖ, 33, 542)



Оценки собственных движений
(Титов, 2007, ПАЖ, 33, 542)

Квазар	Интервал времени	Прямое восхождение	Склонение
0014+813	1994 - 2001 2001 – 2005	- -	81 +/- 7 -64 +/- 9
4C39.25	1995 - 2003 2003 – 2006	65 +/- 2 -166 +/- 10	- -
1739+522	1996 - 1999 1999 - 2000 2000 - 2005	67 +/- 11 -804 +/- 141 33 +/- 5	-134 +/- 13 800 +/- 158 -35 +/- 6
2145+067	1995 – 1998 1998 – 1999 1999 – 2001 2001 - 2004	124 +/- 16 -1346 +/- 149 262 +/- 29 -258 +/- 23	- - - -

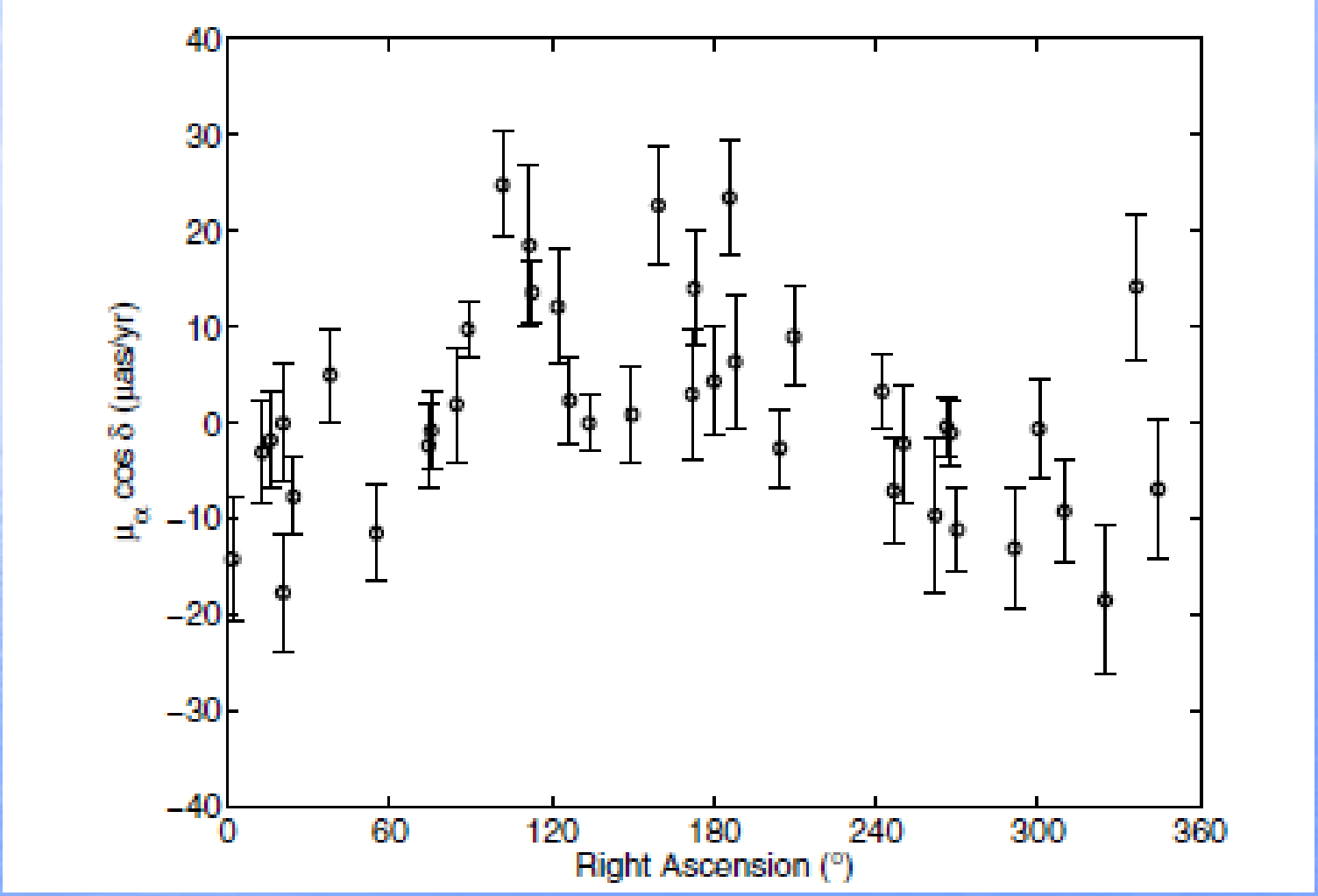
Диполь (Titov, Lambert, Gontier, A&A, 2011)



Индивидуальные движения – все квазары

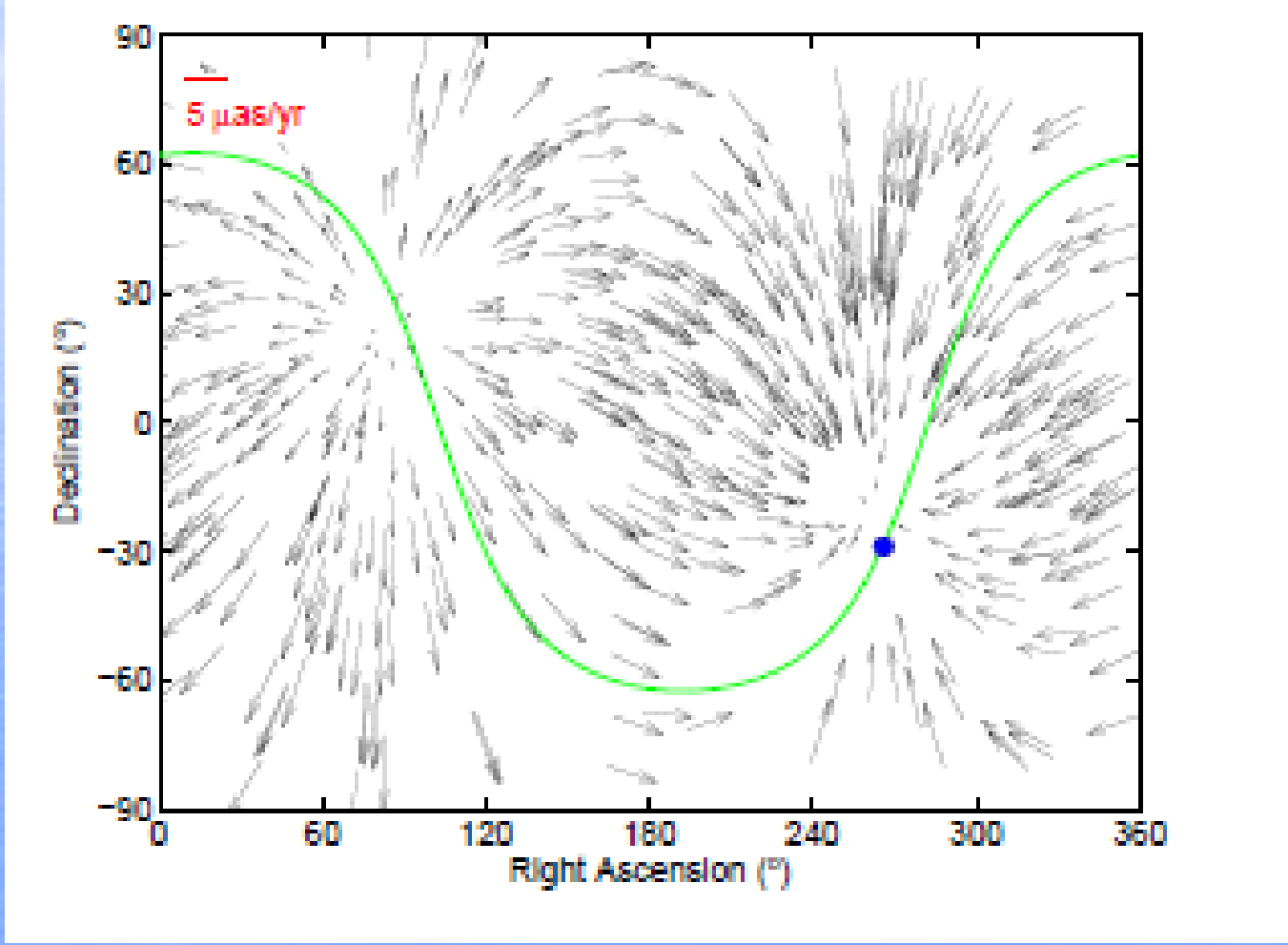
ХАОС!

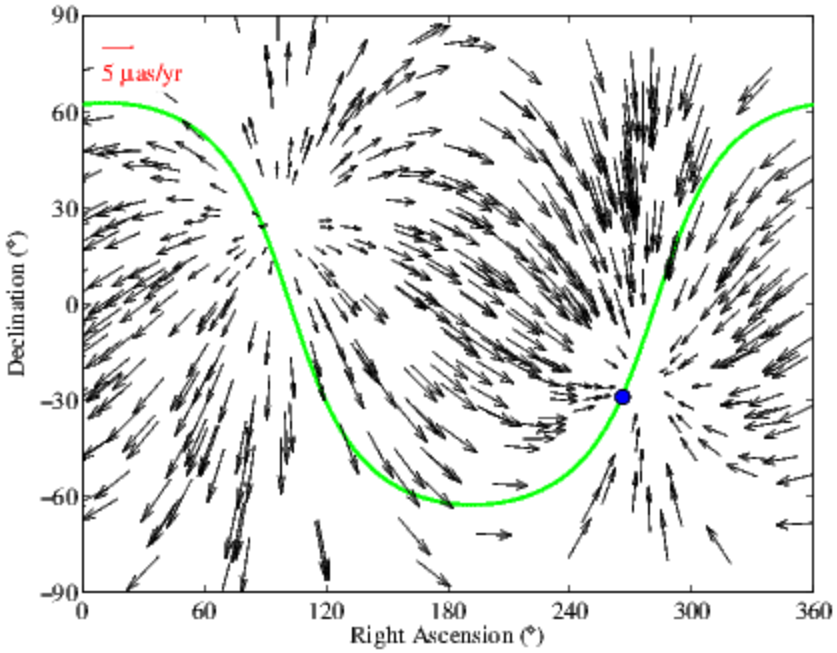
Диполь (Titov, Lambert, Gontier, A&A, 2011)



Собственные движение 40 наиболее часто наблюдавшихся квазаров (1000 и более РСДБ сессий)

Диполь (Titov, Lambert, Gontier, A&A, 2011)




5 μas/yr
90
60
30
0
-30
-60
-90
Declination (°)
0
60
120
180
240
300
360
Right Ascension (°)

Ускорение барицентра СС из-за вращения вокруг центра Галактики

Ожидамое ускорение направлено к центру Галактики (RA= 270º, DE = -30º) с амплитудой $a = V^2/R$

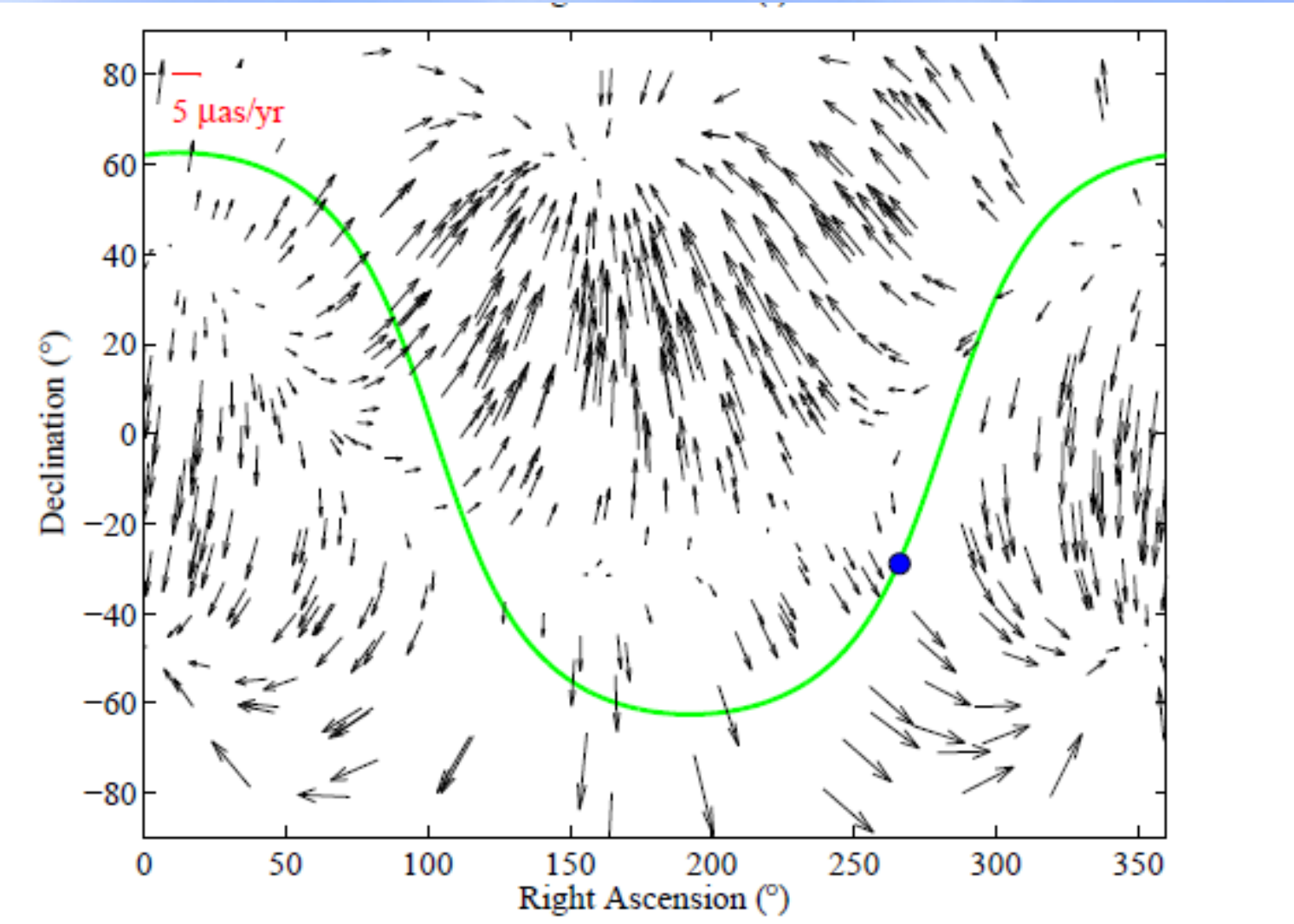
$$a = 2 \cdot 10^{-13} km/\sec^2 \rightarrow \mu = 4\ \mu as/year$$

Оценка по РСДБ наблюдениям
6.4 +/- 1.5 μas/year,
Направление (RA= 263º, DE = -20º)

Квадруполь (в статью не включен)

$$
\begin{aligned}
\Delta\mu_\alpha \cos\delta &= a^{M}_{2,0} \sin 2\delta \\
&+ \sin\delta \left(a^{E,\mathrm{Re}}_{2,1} \sin\alpha + a^{E,\mathrm{Im}}_{2,1} \cos\alpha \right) \\
&- \cos 2\delta \left(a^{M,\mathrm{Re}}_{2,1} \cos\alpha - a^{M,\mathrm{Im}}_{2,1} \sin\alpha \right) \\
&- 2\cos\delta \left(a^{E,\mathrm{Re}}_{2,2} \sin 2\alpha + a^{E,\mathrm{Im}}_{2,2} \cos 2\alpha \right) \\
&- \sin 2\delta \left(a^{M,\mathrm{Re}}_{2,2} \cos 2\alpha - a^{M,\mathrm{Im}}_{2,2} \sin 2\alpha \right), \\
\Delta\mu_\delta &= a^{E}_{2,0} \sin 2\delta \\
&- \cos 2\delta \left(a^{E,\mathrm{Re}}_{2,1} \cos\alpha - a^{E,\mathrm{Im}}_{2,1} \sin\alpha \right) \\
&- \sin\delta \left(a^{M,\mathrm{Re}}_{2,1} \sin\alpha + a^{M,\mathrm{Im}}_{2,1} \cos\alpha \right) \\
&- \sin 2\delta \left(a^{E,\mathrm{Re}}_{2,2} \cos 2\alpha - a^{E,\mathrm{Im}}_{2,2} \sin 2\alpha \right) \\
&+ 2\cos\delta \left(a^{M,\mathrm{Re}}_{2,2} \sin 2\alpha + a^{M,\mathrm{Im}}_{2,2} \cos 2\alpha \right).
\end{aligned}
$$

Квадруполь (в статью не включен)



Зависимость амплитуд диполя и квадруполя от z (Titov, Lambert, Gontier, A&A, 2011)

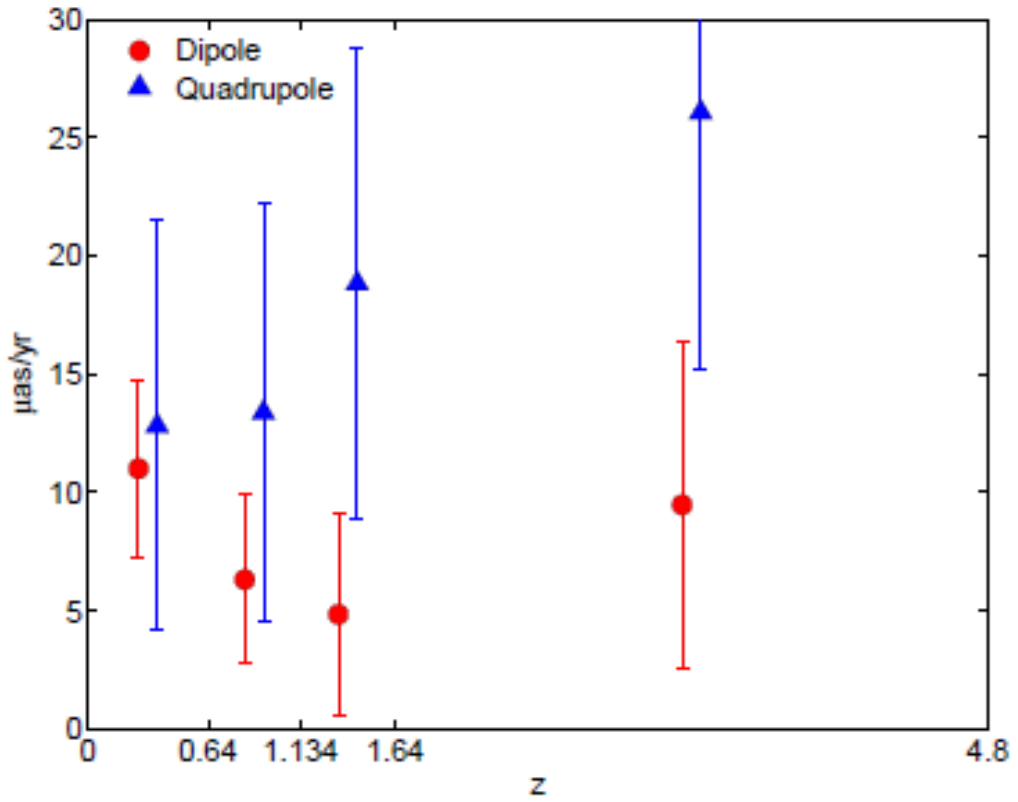


Fig. 4. The dipole (red disks) and quadrupole (blue triangles) amplitudes as functions of the redshift. Uncertainties are 1σ.

Заключение

- Астрометрия принимает ярковыраженный космологический характер

Заключение

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

Что делать?

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

Благодарю за внимание!