

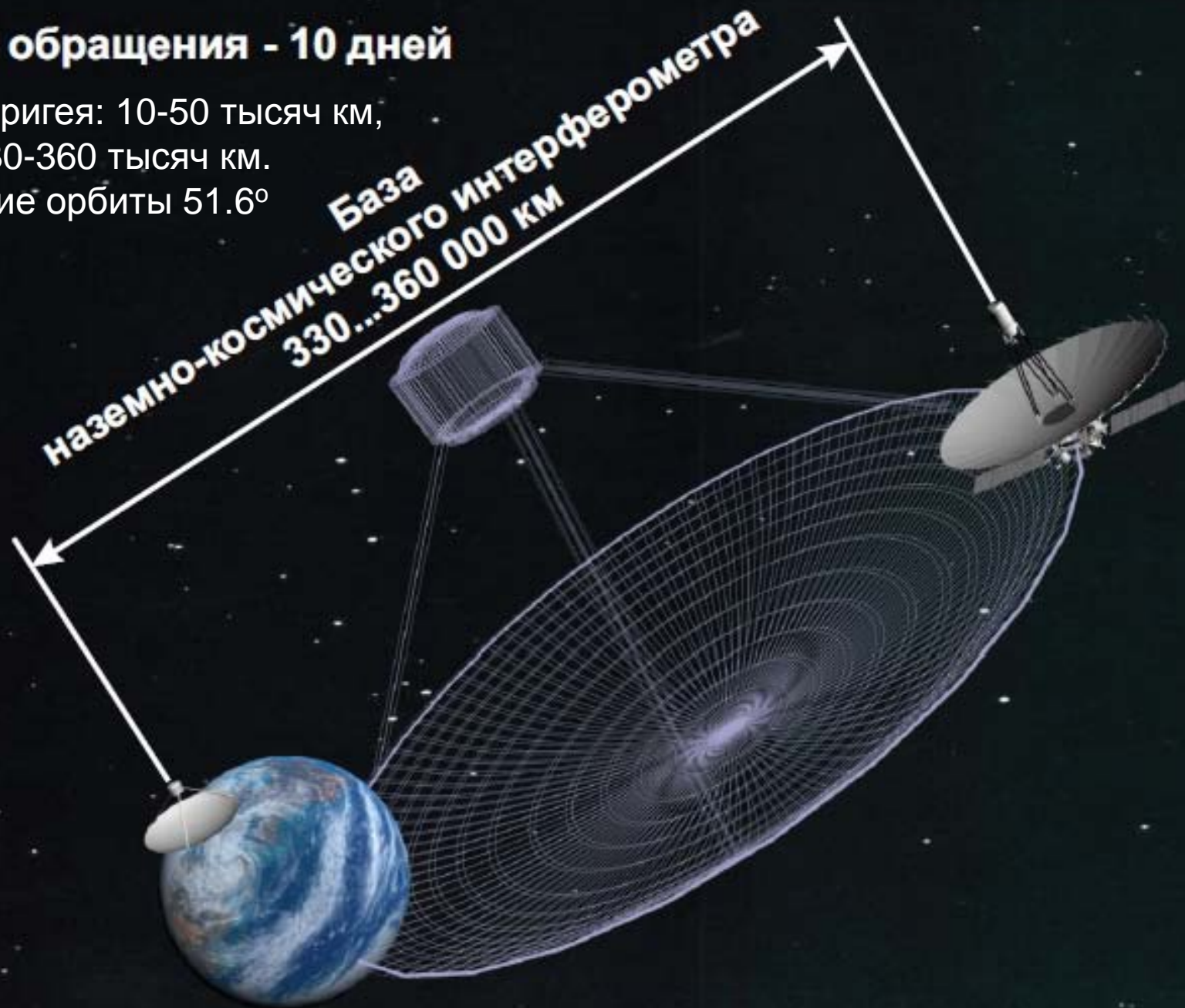
РадиоАстрон

Ю.Ю. Ковалев (АКЦ ФИАН)

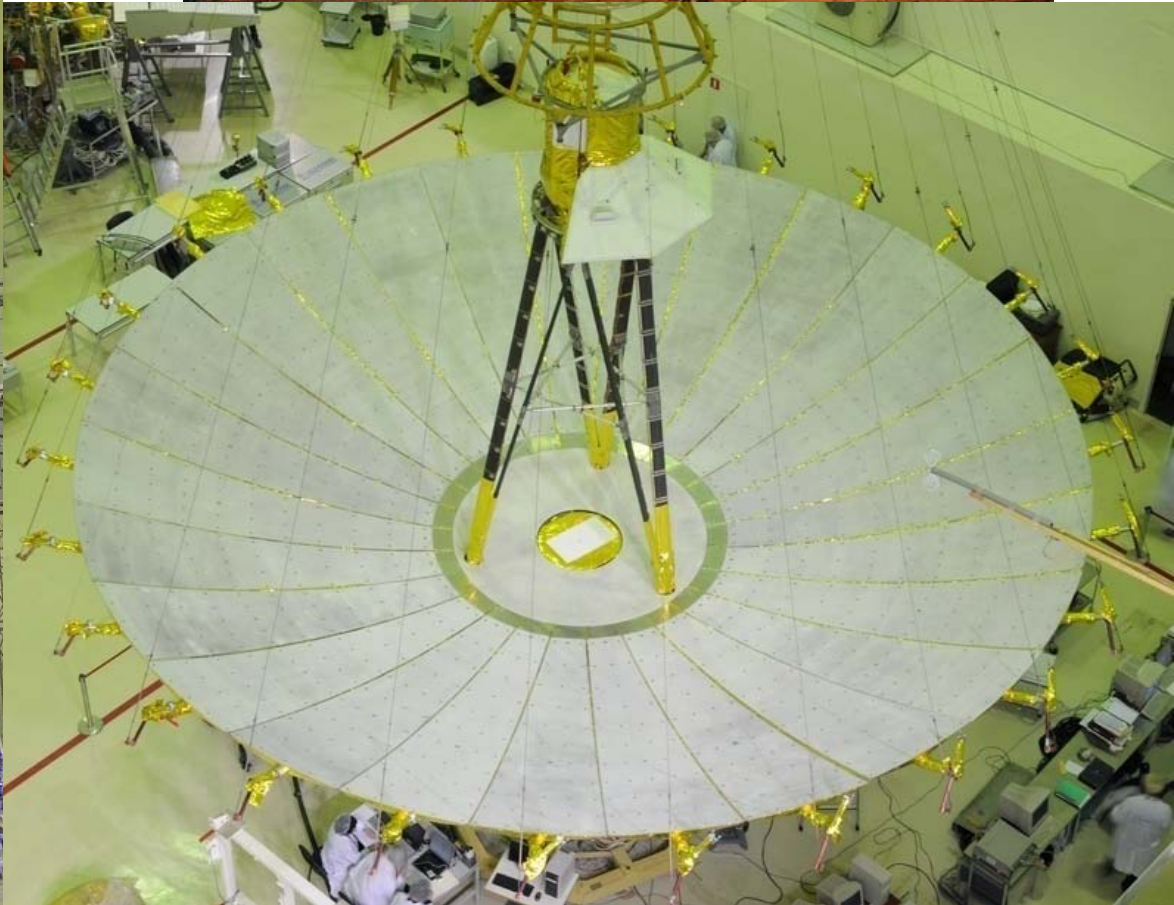


Период обращения - 10 дней

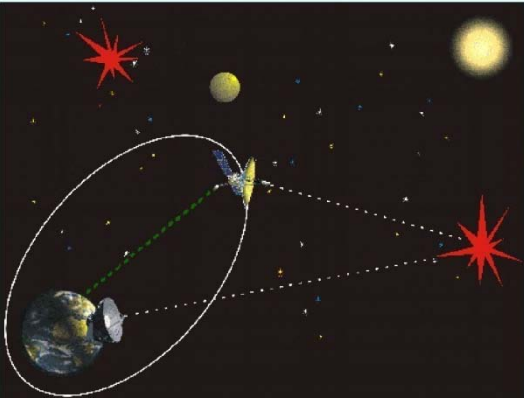
Радиус перигея: 10-50 тысяч км,
апогея: 330-360 тысяч км.
Наклонение орбиты 51.6°



Успешно запущен в 2011 г.



РадиоАстрон: базовая информация



- ✓ Космический радиотелескоп: диаметр 10 метров
- ✓ Запуск в 2011 г.
- ✓ Диапазоны частот: 0.3, 1.6, 5, 22 (18-25) ГГц
- ✓ Наивысшее разрешение (1.3 см): $\sim 7 \mu\text{as}$.
- ✓ Орбита: перигей 1-50,000 км, апогей $\sim 300,000$ км, период ~ 9 дней; эволюционирующая
- ✓ Пять методов определения параметров орбиты, включая Доплер, лазерные измерения, РСДБ
- ✓ Требования на точность восстановления орбиты: расстояние до 500 м, скорость до 2 см/с.
- ✓ Ожидаемое время жизни: 5 лет
- ✓ Станции управления: Уссурийск, Медвежье озеро.
- ✓ Станции слежения: Пуцзино, Россия; Green Bank, США.
- ✓ Ширина потока научных данных с КРТ: 128 Mbps.
- ✓ Два метода временной синхронизации: по бортовому (незамкнутая петля) и наземному (замкнутая петля) водородному стандарту.
- ✓ Программные корреляторы: АКЦ, DiFX-Bonn, JIVE SFXC.

КРТ в полете

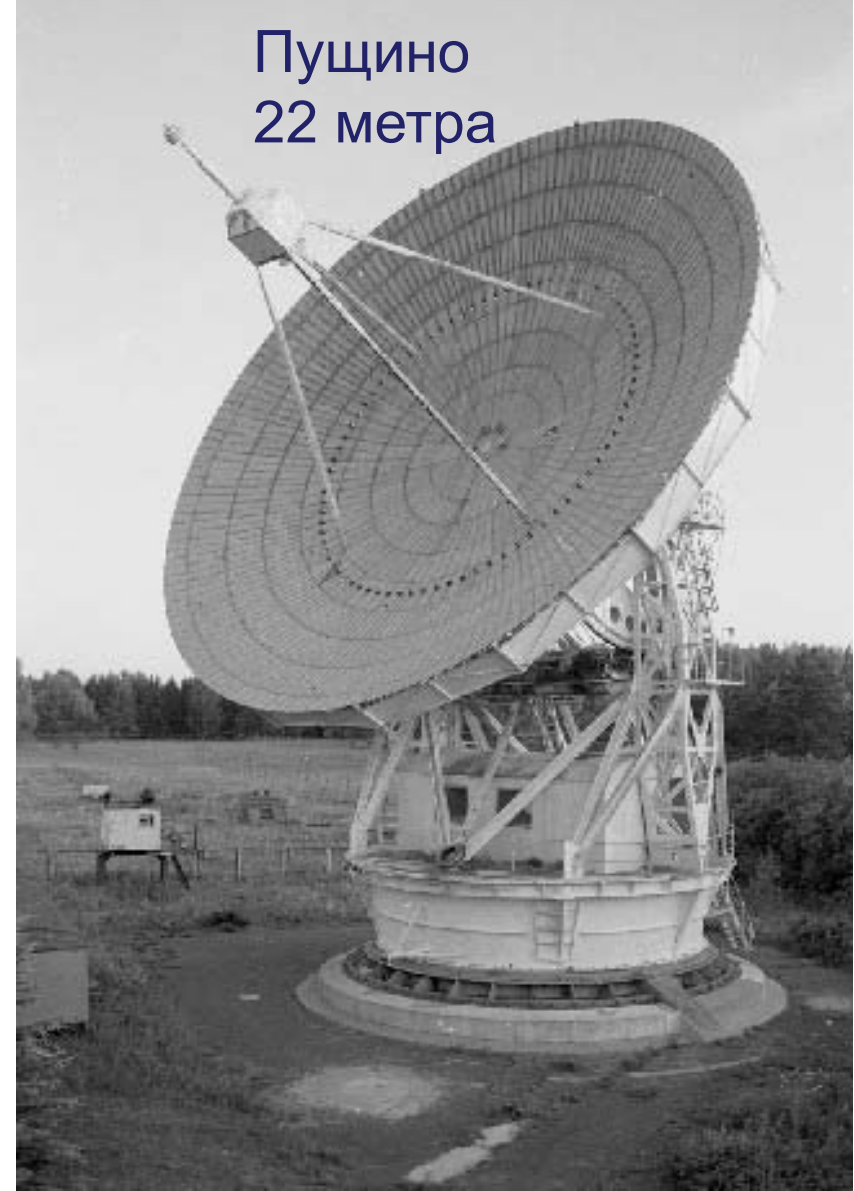
см. Космические исследования № 5 (2014)

Таблица 2. Основные параметры КРТ по [5] и новым измерениям

Параметр	1.35 см	6.2 см	18 см	92 см
	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP
КРТ в полете, 2011–2013:				
1. $(\vartheta_{0.5} \pm 5\%) \cdot (\varphi_{0.5} \pm 5\%)$,	6.0' × 13'	25'	72'	6°.1
2. $A_{\text{eff}} \pm 10\%$, м ² ;	7.5	35	41	30
3. КИП = $A_{\text{eff}}/A_{\text{geom}} \pm 10\%$	0.1	0.45	0.52	0.38
4. $T_{\text{sys}} \pm 13\%$	127; 100	147; —	41.0; 43.5	145; 147
5. $F_{\text{sys}} \pm 10\%$ (SEFD), кЯн	46.7; 36.8	11.6; —	2.76; 2.93	13.3; 13.5
6. Усиление, Ян/К	368	78.9	67.3	92.0
7. $\Delta\vartheta_S$	–1.2' ± 0.2'			
8. $\Delta\varphi_S$	<1.5'			
9. $\Delta\varphi_P$	2.5'			
10. σ_{SVLBI} , мЯн (при $\Delta t = 5$ мин; $\Delta\nu = 16$ МГц)	17; 15	5; —	3; 3	14; 14
11. $\alpha_D = (\vartheta_{0.5} \cdot \varphi_{0.5}) D/\lambda$	1.29 × 2.80	1.17	1.16	1.16

Примечание. В строках 1–11 даны: ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности — 1, эффективная площадь — 2, коэффициент использования площади — 3, эквивалентная температура шума и плотность потока шумового излучения системы — 4 и 5, усиление телескопа — 6, систематическая погрешность при сканировании площадки неба по двум координатам (строки 7 и 8) после ввода постоянной поправки (строка 9) в наведение телескопа, чувствительность интерферометра КРТ — Green Bank Telescope по (1) и [6] — 10, отношение измеренной ширины к идеальной ширине λ/D главного лепестка диаграммы направленности — 11.

Станции слежения и сбора научной информации: РФ и США



Наземное РСДБ плечо

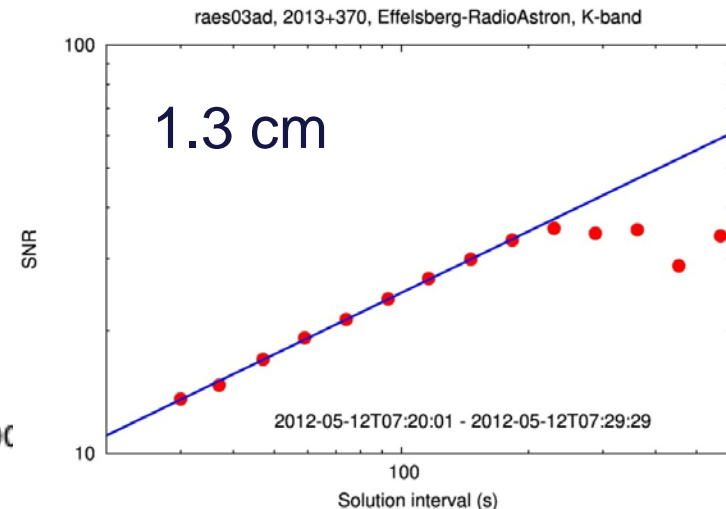
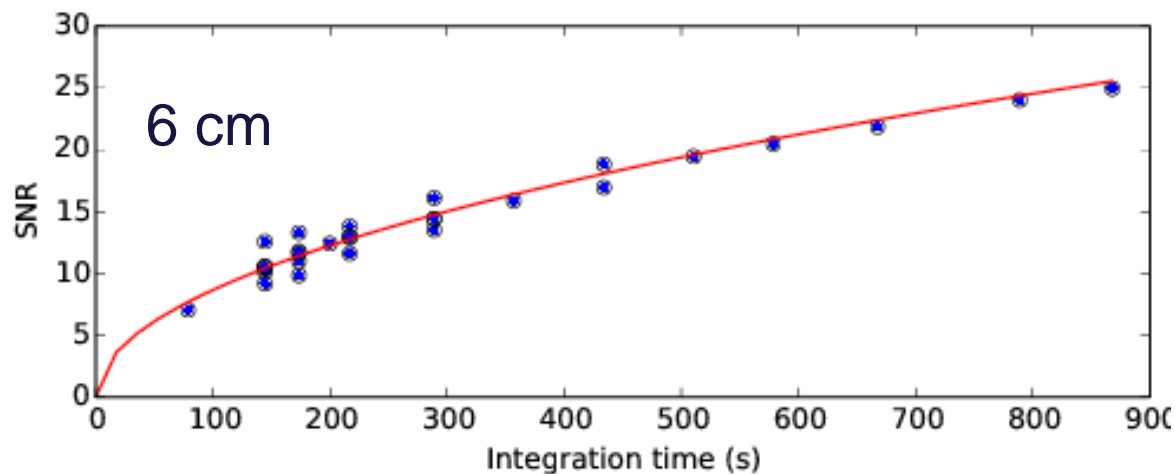
Российская сеть Квazar, Евпатория (Украина), Effelsberg, Medicina, Yebes, WSRT, GBT, Arecibo, VLA, Usuda, EVN, VLBA, и др. Полная поддержка.



Мазер успешно работает на борту ~3 лет

1. Реализовано более длительное, чем на Земле, накопление сигнала.
2. Когерентное использование всей доступной полосы.
3. Корреляция 1 бит против 2 бит.

Результирующий выигрыш чувствительности интерферометра: 2 раза.



Ранняя научная программа: задачи

март 2012 – июнь 2013

Научное руководство и координация: АКЦ ФИАН

- Проверка принципиально новых угловых масштабов и диапазонов длин волн:
 - ✓ Есть ли “жизнь” за 5-10 диаметрами Земли?
 - ✓ Убивает ли нас среда на 6 и 18 см, 92 см?
 - ✓ Первые результаты сложного диапазона 1.3 см
- Переход в регулярный режим оперативного управления обсерваторией.
- Получение первых научных результатов для (1) ядер галактик, (2) пульсаров и межзвездной среды, (3) мазеров, необходимых для подготовки ключевой научной программы.

Все задачи выполнены успешно.

Научные и научно-технические публикации готовятся или уже в журналах или опубликованы.

Открытая научная программа

стартовала с июля 2013 г.

АО-1 целиком состоит из ключевых научных программ.

В АО-2: баланс KSP & GOT.

Оценка чистого наблюдательного времени АО-1: 1000 часов.

Международный комитет отобрал 7 проектов для АО-1 и 12 проектов для АО-2.

Типичное количество со-инвестигаторов: около 200 человек из 20 стран. Примерно у половины проектов российские руководители, у большинства – российские co-Is.

Тематика: AGN (доминирует), мазеры, пульсары, SgrA*, межзвездная среда, гравитация, микроквазары. Российские заявители лидируют в половине проектов, участвуют во всех.

Реализация АО-1: все проекты поставлены в наблюдения в объеме, близком к рекомендованному.

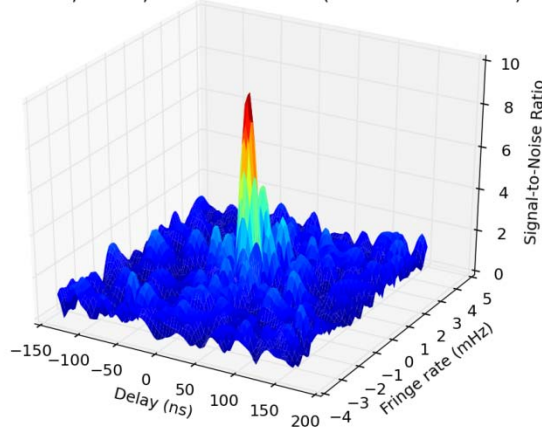
Обзор ядер активных галактик

92 см: 2.5 ED 0235+164 (RA-Ar);
18 см: 27 ED 0048-096 (RA-GBT) – 349,000 км;
6 см: 23 ED 0716+714 (RA-Ef);
1.3 см: 15 ED 0235+164 (RA-GBT).

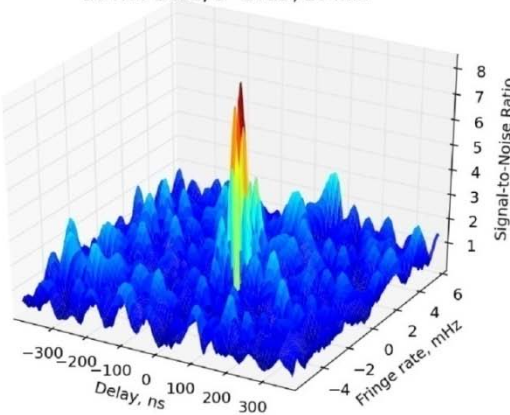
Абсолютный рекорд углового разрешения: 14.5 μ as;

Прокоррелировано и проанализировано 720 экспериментов, значимый интерференционный отклик от 80 AGN найден в 270. Типичные T_b : 10^{12} до $>10^{14}$ К. Требуется релятивистского усиления с $\delta \sim 10$ -100 и выше для случая релятивистских электронов.

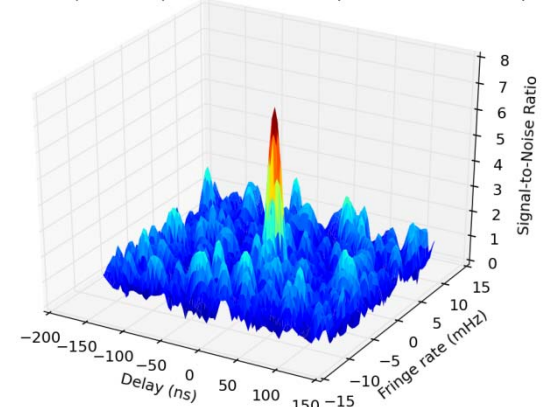
raks01kt (01.12.2013)
0048-097, 18 cm, RadioAstron-GBT (27 Earth Diameters)



BL Lac, 6.2 cm, SRT-Ef,
28 Nov 2012, B=19ED, 20 min



raes03hu (15.12.2012)
0235+164, 1.35 cm, RadioAstron-GBT (15 Earth Diameters)



RadioAstron—EVN: 0716+714, 6 cm

Первое картографирование кварзара

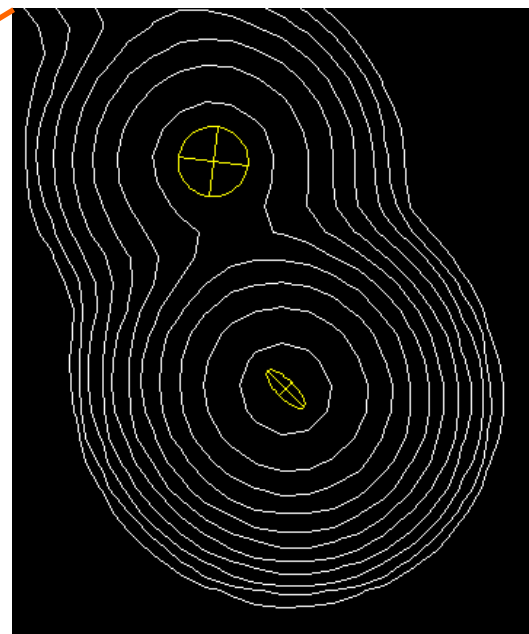
расстояние: 1.6 Гпк

Ширина сопла струи:
0.3 парсека.

Яркость: $2 \cdot 10^{12}$ К.

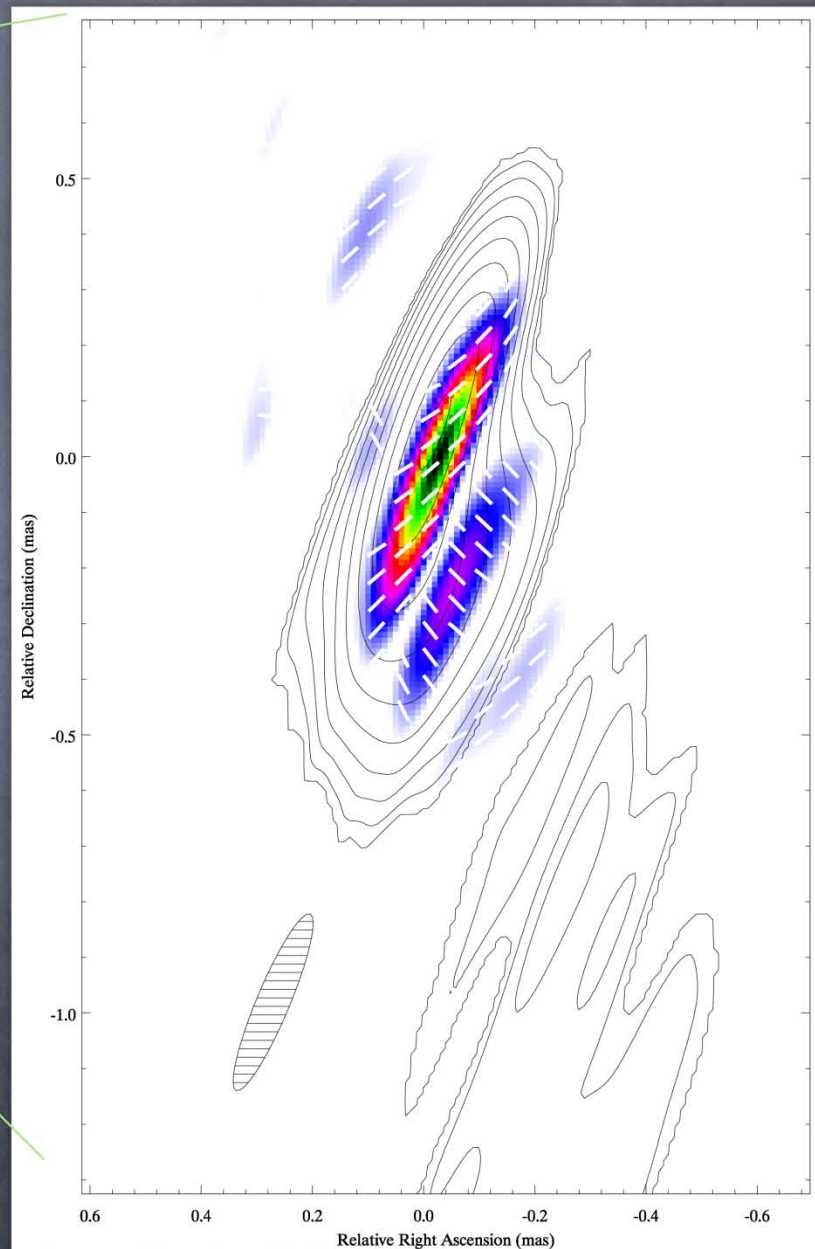
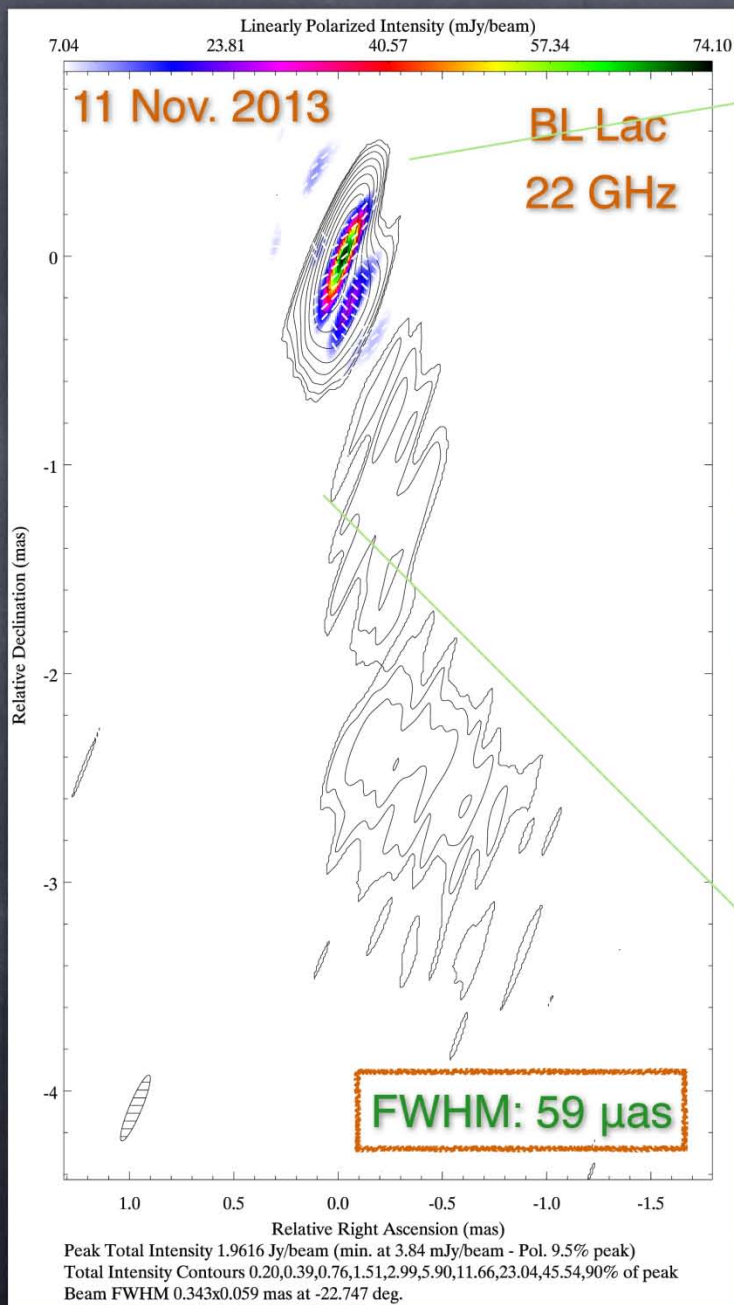
5 parsec
|————|

2012-03-14



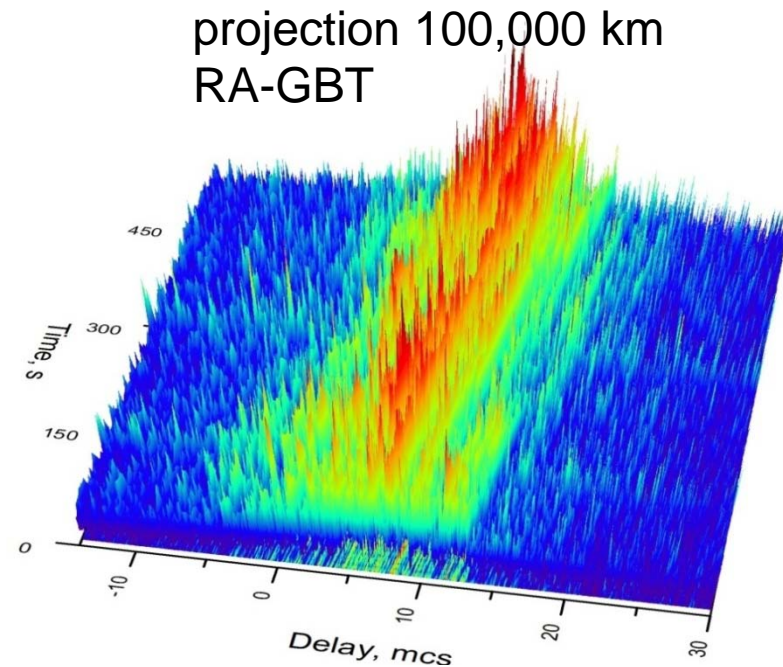
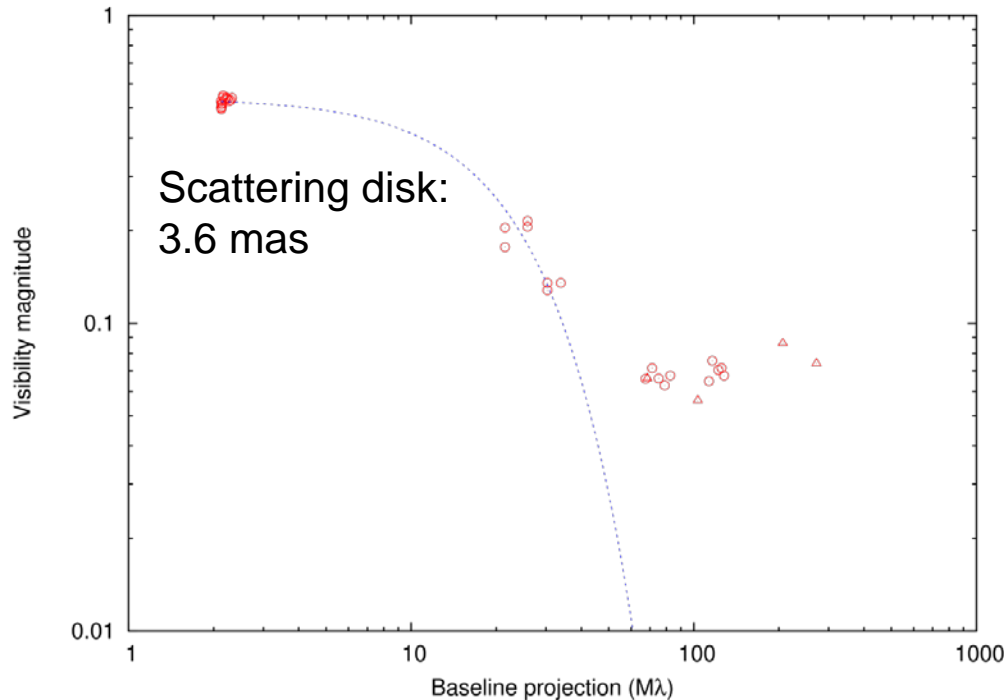
A KSP FOR POLARIMETRIC SPACE-VLBI WITH RADIOASTRON

Gomez, Lobanov, Anderson, et al.



PSR B0329+54: RadioAstrion-GBT, WSRT, Kalyazin at 92 cm

Popov, Gwinn, et al.



- ✓ Fine structure of visibility function in delay and its evolution with time reflects a random interference of many scattered rays.
- ✓ Scattering screen is estimated to be at 2/3 of the distance to the source.
- ✓ The flattening of the visibility function reflects a presence of a refractive substructure within the scattering disk. Provides new tool to probe interstellar density irregularities.

Cosmic masers with RadioAstron

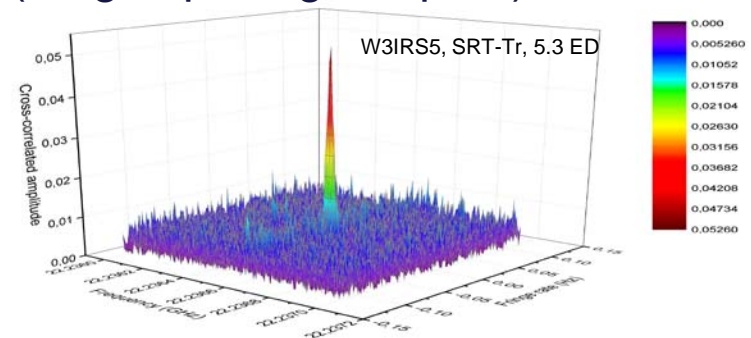
Alakoz et al.

OH (hydroxyl) line at 1665 MHz

- ✓ Current record: 1.8 ED (129 Mλ) for Galactic star-forming region Onsala1 at ~2.5 kpc distance. (fringe spacing ~1.6 mas.)
- ✓ This observations as well as observations of two other sources with VSOP (G34.26+0.15 and W48, Slysh et al. 2002) show that OH masers are detectable with space VLBI even close to the galactic plane.
- ✓ Typical $T_b \sim 10^{12} - 10^{13}$ K

H₂O (water) line at 22.235 GHz

- ✓ Absolute record for a cosmic masers: 5.9 ED (5560 Mλ) for Galactic star-forming region W3 IRS5 at ~1.8 kpc (fringe spacing ~37 μas.)



- ✓ Detected water masers (at 2-4 ED's): W51, Cepheus A, Orion KL.
- ✓ Structures with linear size close to that of the Sun are found ($4-10 \times 10^6$ km)
- ✓ Typical $T_b \sim 10^{14} - 10^{16}$ K

Рекорды миссии РадиоАстрон



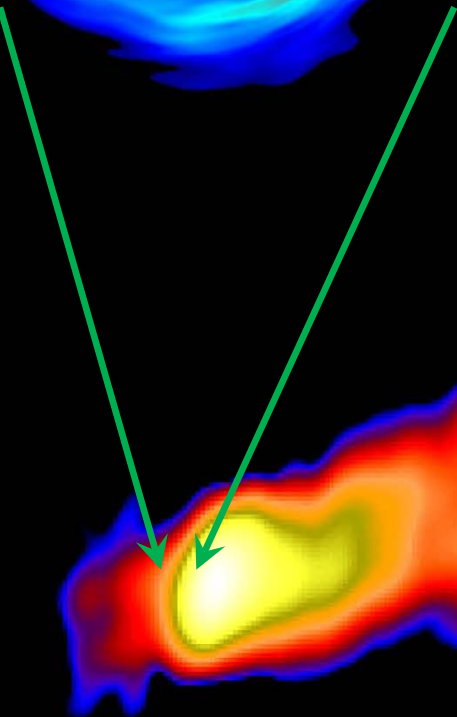
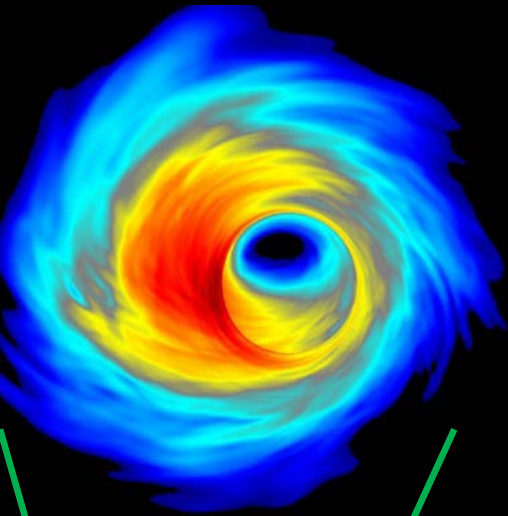
- Впервые реализован наземно-космический интерферометр на длинах волн 92 см и 1.3 см.
- Впервые в космосе реализованы жесткая зеркальная антенна диаметром 10 м и водородный стандарт частоты.
- Впервые реализован интерферометр с проекциями баз:
 - ✓ 20 диаметров Земли (92 см, пульсары),
 - ✓ 2.5 диаметра Земли (92 см, квазары),
 - ✓ 27 диаметров Земли (18 см, квазары),
 - ✓ 22 диаметров Земли (6.2 см, квазары),
 - ✓ 15 диаметров Земли (1.3 см, квазары) и
 - ✓ 5 диаметров Земли (1.3 см, мазеры) –самый крупный измерительный инструмент в истории человечества.
- Достигнуто рекордное в астрономии угловое разрешение 14 микросекунд дуги.

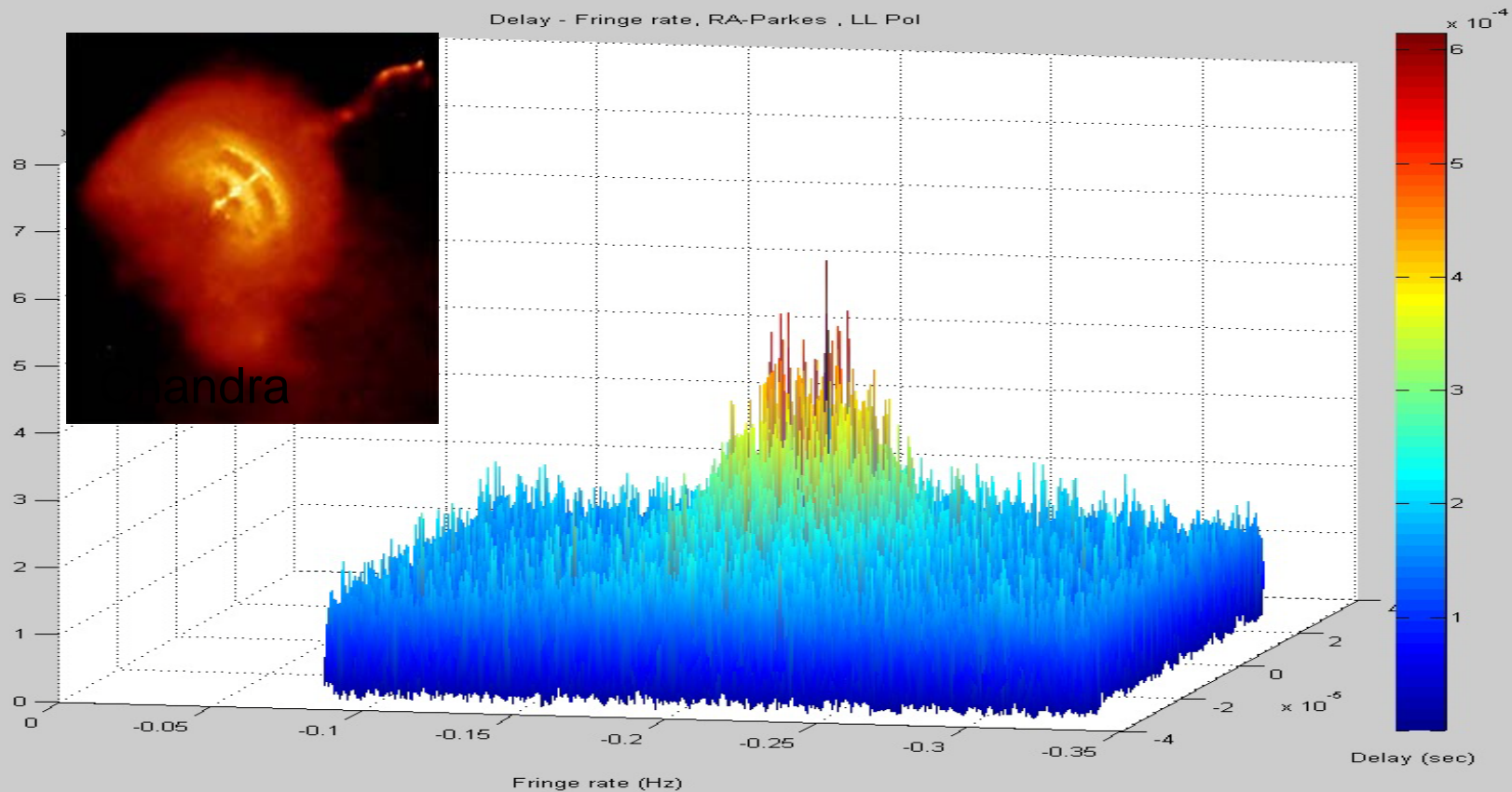
СПАСИБО



Черные дыры: Дева А

2-3 февраля 2013 г.: первый эксперимент с крупнейшими наземными телескопами.
4-5 февраля 2014 г.: картографирование на 1.3 и 6 см.





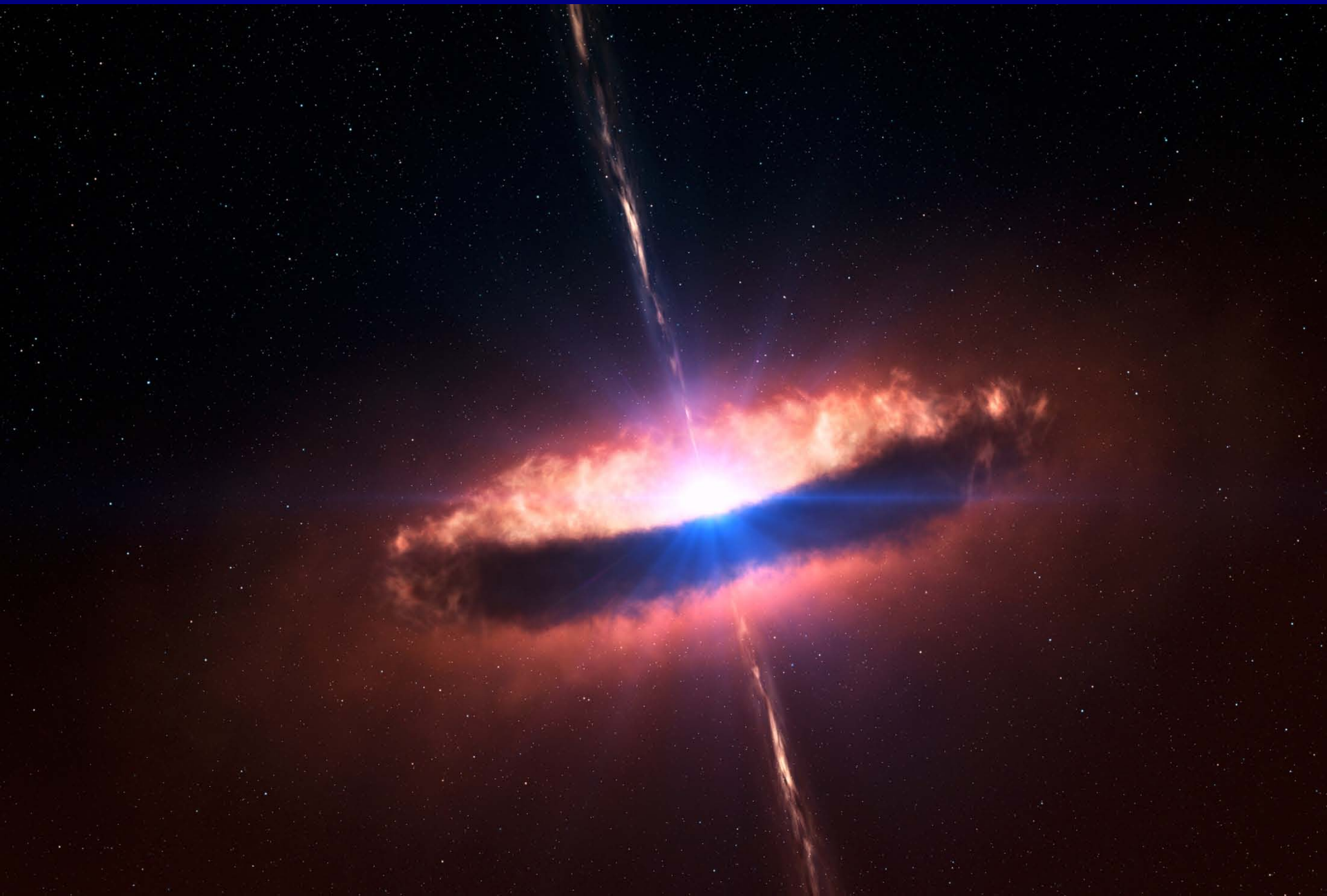
Многокомпонентное изображение пульсара Vela (расстояние 960 св. лет) 10 мая 2012 г за 10 минут наблюдений на волне 18 см, проекция базы Радиоастрон – Паркс (Австралия) около 200 000 км. Это изображение непрерывно меняется, но его статистические параметры повторяются на соседних временных интервалах и даже при наблюдениях 18 мая 2012 г. Оси координат рисунка: по вертикали отложена (и окрашена) мощность источника, по горизонтали - частота интерференции и запаздывание сигнала.

Первые пульсарные мысли

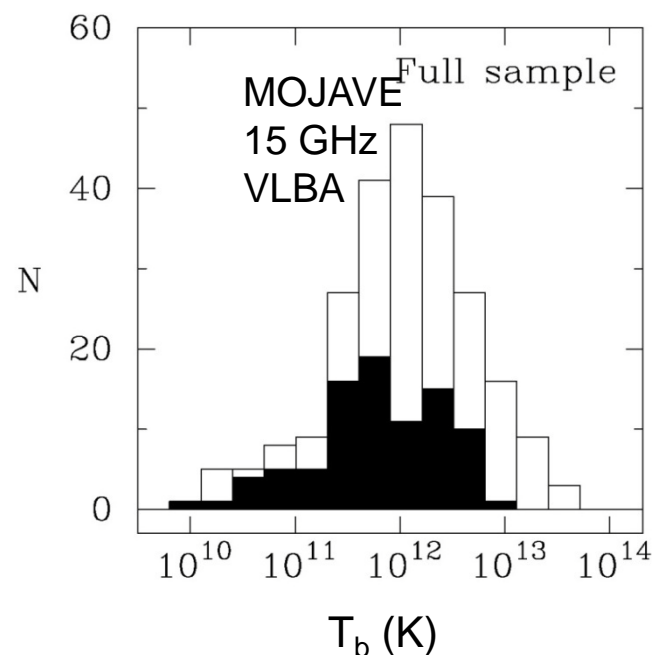
Полученные результаты по межзвездной среде требуют серьезнейшего осмысления. Возможно, существенного пересмотра модели межзвездной среды. Скорее всего, значительно изменят наше представление о структуре межзвездной среды.

Сделано предположение о наличии компактных турбулентных сгустков в межзвездной среде, которые работают как линзы и фокусируют излучение пульсаров во множество обнаруженных в интерференционной картине «иголочек».

Квазары



Обзор ядер галактик: задача



Наземное РСДБ, 2 см:

Med $T_b = 10^{12}$ K, max T_b (предел!) $= 5 \cdot 10^{13}$ K.

Результаты обзора VSOP на 6 см –
аналогичны.

При учете релятивистского усиления (для
Лоренц-фактора до **50**), предел яркости из
обратного Комптона не нарушается.

Но! Много пределов T_b .

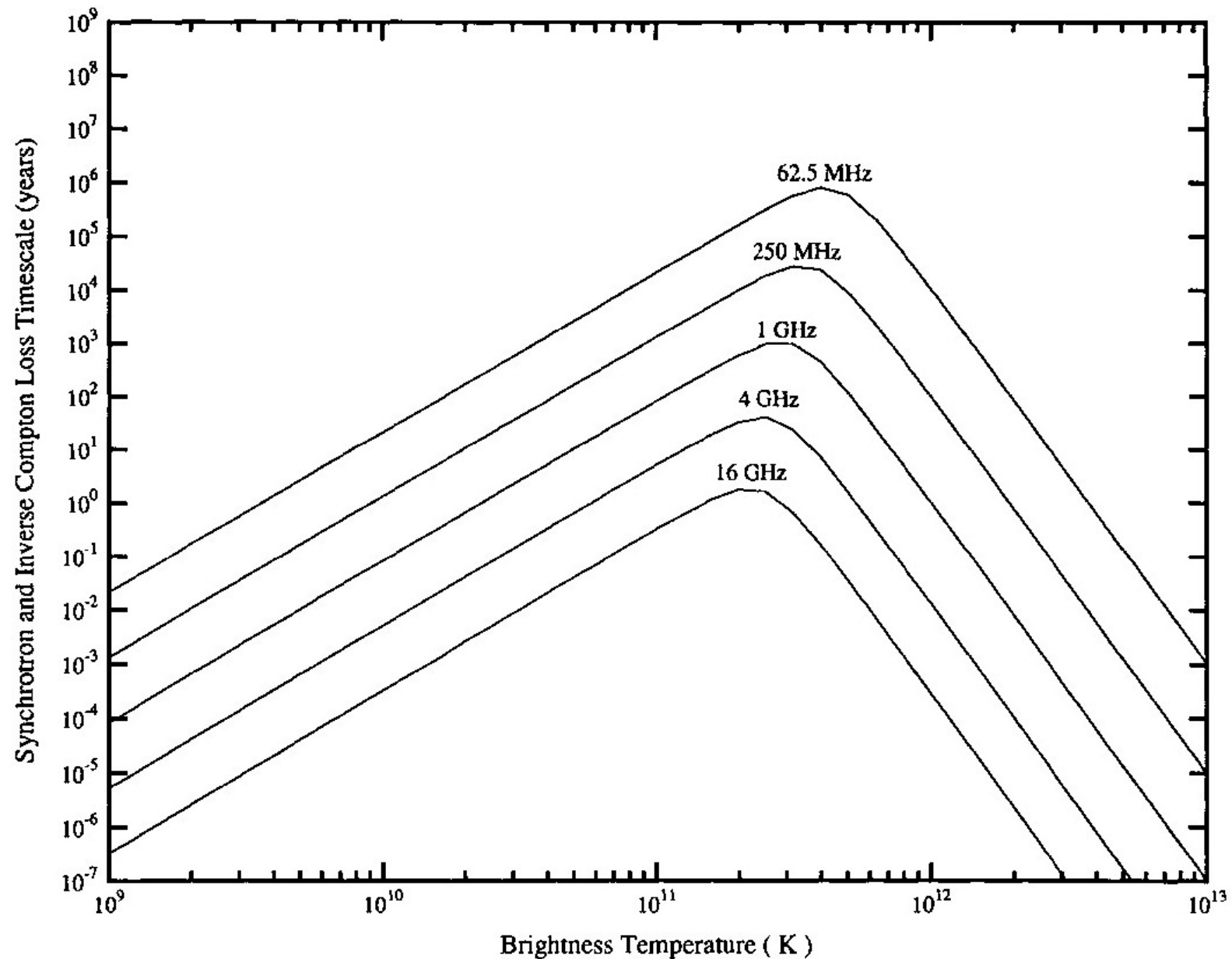
Задача обзора яркости ядер галактик (яркостных температур):

Измерить размеры и яркость ядер галактик.

Проверить предел на обратный Комптон эффект. Возможно только с
помощью наземно-космического РСДБ. Уход на Земле на более
высокие частоты решить задачу не поможет.

Критически важно для проверки механизма излучения.

Радиационные потери



Статистика обнаружения интерференционных откликов квазаров

92 см: 2.5 ED 0235+164 (RA-Ar);

18 см: 27 ED 0048-096 (RA-GBT) – 349,000 км;

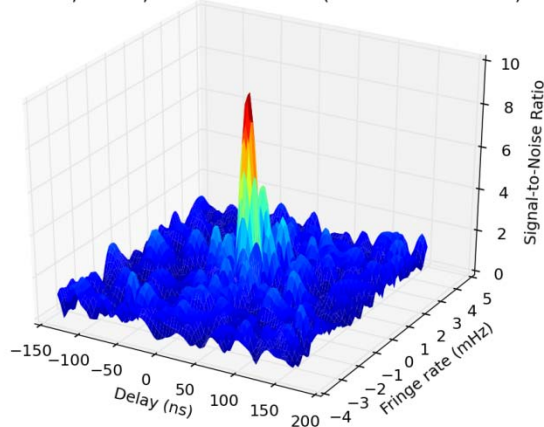
6 см: 23 ED 0716+714 (RA-Ef);

1.3 см: 15 ED 0235+164 (RA-GBT).

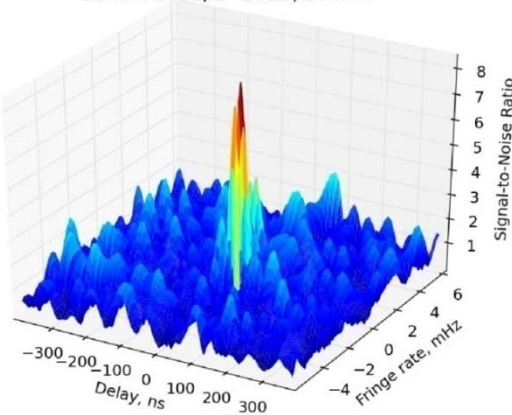
Абсолютный рекорд углового разрешения: 14.5 μ as;

Прокоррелировано и проанализировано 720 экспериментов,
значимый интерференционный отклик от 80 AGN найден в 270.

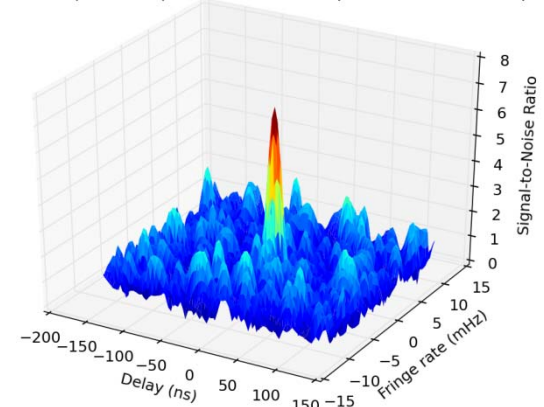
raks01kt (01.12.2013)
0048-097, 18 cm, RadioAstron-GBT (27 Earth Diameters)



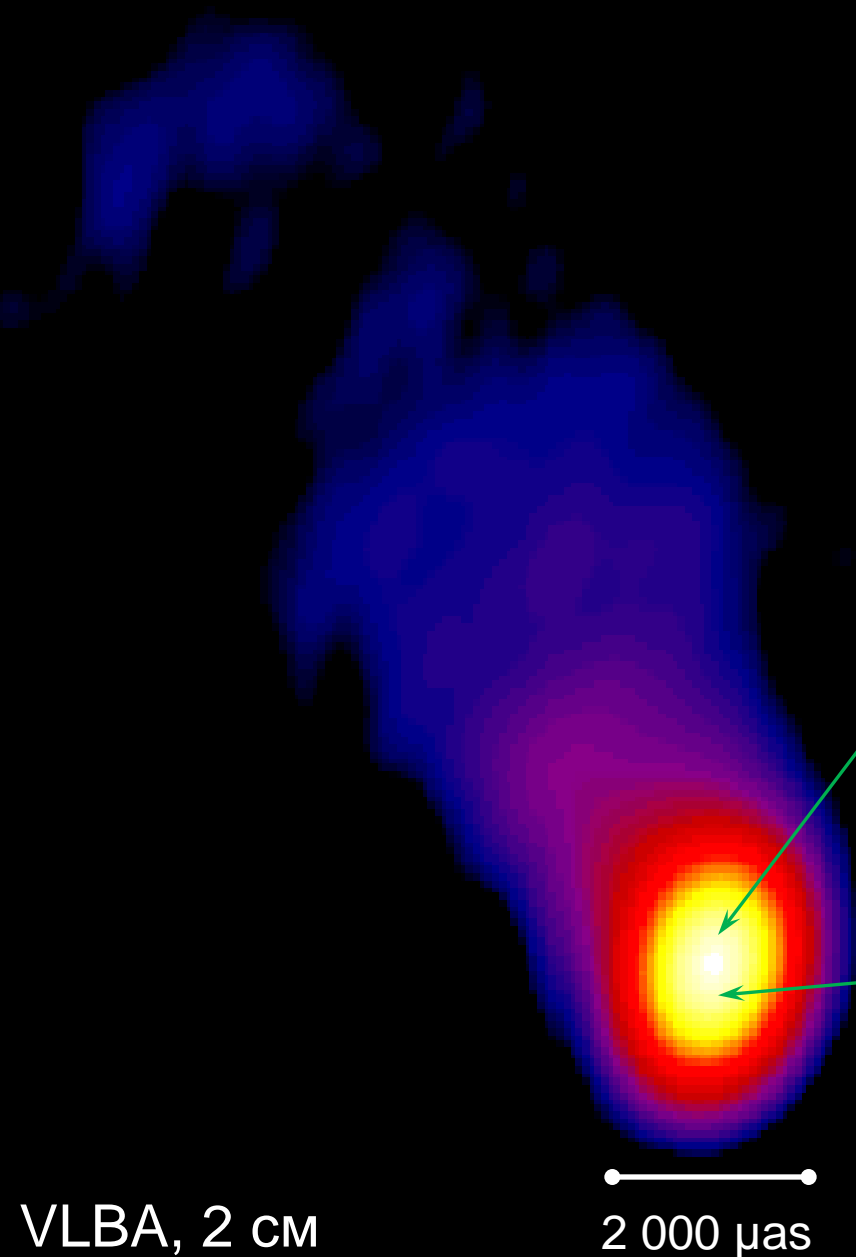
BL Lac, 6.2 cm, SRT-Ef,
28 Nov 2012, B=19ED, 20 min



raes03hu (15.12.2012)
0235+164, 1.35 cm, RadioAstron-GBT (15 Earth Diameters)



Квазар 0529+483



Результаты РадиоАстрон

6.2 см

Размер ядра:

41 μ as (микросекунд дуги);

Яркостная температура:

$3.2 \cdot 10^{13}$ К.

Результаты РадиоАстрон

➤ 18 см

Размер ядра: $< 270 \mu\text{as}$
(микросекунд дуги);

Яркостная температура:
 $\sim > 10^{14} \text{ K}$.

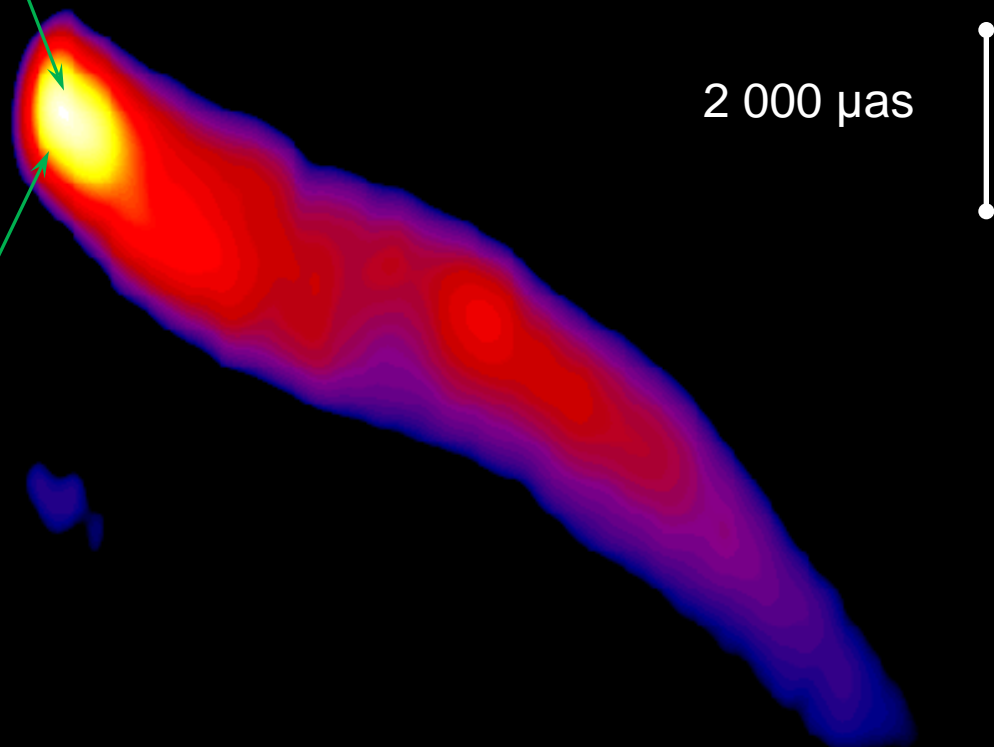
➤ 1.3 см

Размер ядра:
около $23 \mu\text{as}$ (микросекунд
дуги);

рекорд углового разрешения
в мировой астрономии

Яркостная температура:
 $\sim > 4 \cdot 10^{13} \text{ K}$.

Квазар 3C273



2 000 μas

VLBA, 2 см

Обзор ядер активных галактик

предварительные выводы

- Получены детектирования на экстремальных базах до 27 диаметров Земли (апогей), с угловым разрешением до 14 микросекунд дуги около 80 ядер галактик.
- Мерцания на межзвездной среде нас “не убивают”.
- Исследуем диапазон T_b , недоступный ранее. Типичные оценки яркостной температуры ядер пока:
от 10^{13} до $\sim >10^{14}$ К. Много. Варианты объяснения:
 - ✓ Тяжелые частицы – требует очень эффективного ускорения и больших магнитных полей
 - ✓ Когерентные процессы – как?
 - ✓ Непрерывное ускорение частиц
 - ✓ Хитрая геометрия основания струи – не очень спасает
 - ✓ $\delta \sim 100$ – выше типичных оценок из РСДБ кинематики.