

УДК 629.78:522.59

**РАДИОАСТРОН (ПРОЕКТ «СПЕКТР-Р») –
РАДИОТЕЛЕСКОП МНОГО БОЛЬШЕ ЗЕМЛИ.
НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Ю.А.Александров**, *В.В. Андреев**, *Н.Г.Бабакин**, *В.Е.Бабышкин***, *К.Г.Белоусов**, *А.А.Беляев****, *А.В. Бирюков**, *А.Е. Бубнов**, *А.А. Быкадоров*, *В.И. Васильков**, *И.С. Виноградов**, *А.С. Гвамичава**, *А.Н. Зиновьев**, *Р.В. Комаев***, *Б.З. Каневский**, *Н.С. Кардашев**, *Ю.А. Ковалёв**, *Ю.Ю. Ковалёв**, *А.В. Коваленко**, *Ю.А. Корнеев**, *В.И. Костенко**, *Б.Б. Крейсман**, *А.Ю. Кукушкин**, *М.Г. Ларионов**, *С.Ф. Лихачёв**, *Л.Н. Лихачёва**, *С.Ю. Медведев****, *М.В. Мелёхин***, *Т.А. Мизякина**, *Н.Я. Николаев**, *Б.С. Новиков**, *И.Д. Новиков**, *Ю.К.Павленко****, *Ю.Н. Пономарёв**, *М.В. Попов**, *В.Н. Пышинов**, *В.М. Рожков*****, *Б.А. Сахаров****, *В.А. Серебренников***, *А.И. Смирнов**, *В.А. Степаньянц*****, *С.Д. Федорчук**, *М.В. Шацкая**, *А.И. Шейхет***, *А.Е. Ширишаков***, *В.Е. Якимов**

Космический интерферометр «Радиоастрон» работает совместно с крупнейшими радиотелескопами Мира. Наземные станции слежения обеспечивают приём информации, определение параметров орбиты для центров обработки информации. Проект рассчитан на систематические исследования изображений радиоизлучающих областей, их координат и изменений со временем в районах сверхмассивных чёрных дыр ядер галактик, черных дыр звёздных масс, нейтронных и кварковых звёзд, районов образования звёзд и планетных систем в нашей и других галактиках, структуры межпланетной и межзвёздной плазмы, гравитационного поля Земли.

Ключевые слова: космический интерферометр; синтез изображения; поток; интенсивность; поляризация; корреляционный центр обработки.

«RADIOASTRON» («SPEKTR-R» PROJECT) IS A RADIO TELESCOPE WHICH IS MUCH GREATER THAN THE EARTH. GROUND SEGMENT AND MAIN AREAS OF SCIENTIFIC STUDIES

Yu.A. Alexandrov, V.V. Andreyanov, N.G. Babakin, V.E. Babyshkin, A.A. Belyaev, K.G. Belousov, A.V. Biryukov, A.E. Bubnov, A.A. Bykadorov, V.I. Vasilkov, I.S. Vinogradov, A.S. Gvamichava, A.N. Zinoviev, R.V. Komaev, B.Z. Kanevskiy, N.S. Kardashev, Yu.A. Kovalev, Yu.Yu. Kovalev, A.V. Kovalenko, Yu.A. Korneev, V.I. Kostenko, B.B. Kreisman, A.Yu. Kukushkin, M.G. Larionov, S.F. Likhachev, L.N. Likhacheva, S.Yu. Medvedev, M.V. Melekhin, T.A. Mizyakina, N.Ya. Nikolaev, B.S. Novikov, I.D. Novikov, Yu.K. Pavlenko, Yu.N. Ponomarev, M.V. Popov, V.N. Pyshnov, V.M. Rozhkov, B.A. Sakharov, V.A. Serebrennikov, A.I. Smirnov, V.A. Stepanyants, S.D. Fedorchuk, M.V. Shatskaya, A.I. Sheikhet, A.E. Shirshakov, V.E. Yakimov

Space interferometer «Radioastron» operates jointly with world's major radio telescopes. Ground tracking stations provide with data reception, determination of orbit parameters for data processing centers. The project is aimed at carrying out systematic analysis of images of radio emitting areas, its coordinates and changes with the lapse of time in regions of super massive black holes of galactic nuclei, black holes of stellar masses, neutron and quark stars, regions of stars and planetary systems formation in our and other galaxies, composition of interplanetary and interstellar plasma, the Earth gravitational field.

Key words: space interferometer; image synthesis; flow; intensity; polarization; correlation processing centre.

*Учреждение Российской Академии Наук. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Астрокосмический центр, Россия, г. Москва.

**ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

***Закрытое Акционерное Общество «Время-Ч», Россия, г. Нижний Новгород.

****Учреждение Российской Академии Наук. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Россия, г. Москва.

*****Открытое Акционерное Общество «Российские Космические Системы», Россия, г. Москва.

Введение

Перспектива начала исследований астрономических объектов с угловым разрешением в 30 раз лучше достигнутого определяется запуском космического радиотелескопа (КРТ), который образует с наземными радиотелескопами интерферометр Земля-Космос с базой до 350 000 км. В таблице 1 приведён список всех крупных радиотелескопов с эффективным диаметром антенны более 60 метров и указаны диапазоны КРТ, для которых возможны совместные интерферометрические наблюдения. Более подробные данные содержатся на сайте [1].

1 Высокоинформативная радиолиния КРТ

В процессе реализации проекта «Радиоастрон» была разработана и создана высокоинформативная радиолиния, предназначенная для передачи с борта космического аппарата на наземный приемный комплекс научной информации для последующей её об-

работки и служебной информации о состоянии КА и КРТ для передачи потребителям.

В состав высокоинформативной радиолинии входят бортовой радиокомплекс ВИРК (рисунок 1) и наземная станция слежения на базе радиотелескопа РТ-22 обсерватории АКЦ ФИАН в Пушино (рисунок 2).

В состав радиокомплекса ВИРК входят:

- передатчик на частоте 15 ГГц научных и служебных данных, полученных при проведении научных наблюдений; Мощность передатчика: 40 Вт Тип модуляции передатчика данных ДОФМ;
- передатчик на частоте 8.4 ГГц с выходной мощностью 2 Вт;
- высокочувствительный приемник сигналов на частоте 7.2 ГГц (Тш=70 К);
- антенно-фидерная система с остронаправленной антенной диаметром 1.5 м со следящим приводом, предназначенным для точного наведения на НСС.

Таблица 1. Большие наземные радиотелескопы.

Телескоп	Диаметр антенны (м)	Диапазоны КРТ
Аресибо (США)	300	P, L, C
GMRT (Индия)	246	P
VLA (США)	125	P, L, C, K
GBT (США)	100	P, L, C, K
Effelsberg (Германия)	100	L, C, K
WSRT (Нидерланды)	93	P, L, C
Jodrell Bank (Англия)	76	P, L, C
DSN Goldstone (США)	70	L, K
DSN Robledo (Испания)	70	L, K
DSN Tidbilla (Австралия)	70	L, K
Евпатория (Украина)	70	P, L, C, K
Уссурийск (Россия)		P, L, C, K ?
Parkes (Австралия)	64	P, L, C, K
Калязин (Россия)	64	L, C
Usuda (Япония)	64	L, C, K
Sardinia (Италия)	64	P, L, C, K

Радиотелескопы с диаметром антенны более 60 м, привлекаемые по отдельным программам для наблюдений с радиотелескопом «Радиоастрон»



Рисунок 1. Бортовой высокоинформативный радиокомплекс



Рисунок 2. Наземная станция слежения на базе РТ – 22 (Пушино)



**а - хранилище информации на 220 ТБ; б - устройство резервного копирования.
Рисунок 3. Вычислительный кластер из 10 серверов (производительность 1 Тфлоп/с)**

Наземная станция слежения (НСС) предназначена для решения следующих задач:

1. Наведение антенны НСС на КА и слежение за ним в течение сеанса связи.
2. Прием с борта КА потока научных и служебных данных и регистрация их на магнитных носителях.
3. Передача на борт КА фазостабилизированного опорного сигнала, синхронизированного Н-мазером НСС.
4. Прием когерентно преобразованного на борту КА ответного сигнала, измерение текущей частоты остаточного доплеровского сдвига и текущей разности фаз ответного и запросного сигнала и их регистрацию с привязкой к текущему времени.
5. Прием внешних данных, необходимых для работы НСС и выдача потребителям информации о состоянии НСС.

Для решения этих задач был разработан и создан наземный аппаратный комплекс, работающий на совмещенных с бортовым комплексом ВИРК частотах: высокочувствительная система приема научных и служебных данных на частоте 15 ГГц, приемопередающая система на частотах 7.2/8.4 ГГц, система регистрации и первичной обработки научных и служебных данных, а также система опорных частот с Н-мазером и служба времени с GPS приемником. Антенна РТ-22 была оснащена специально разработанной антенно-фидерной системой (АФС), позволяющей работать на указанных выше частотах.

С бортовым ВИРК проведены все виды испытаний и проверок, в том числе, в составе бортового научного комплекса КРТ. Отработка комплекса наземной станции слежения (НСС) проведена по специальной программе наземной отработки, а также совместно с бортовым научным комплексом КРТ. Подтверждена надежная работа по приему научной и служебной информации по линии БОРТ-ЗЕМЛЯ.

2 Центр обработки информации космического интерферометра

Конечная обработка и интерпретация результатов научных исследований на космическом интерферометре производится в центре обработки АКЦ ФИАН и в центрах обработки других участников проекта. Здесь в первую очередь выполняется кросскорреляционная обработка потоков данных, записанных на отдельных радиотелескопах, включая космический сегмент КРТ, с помощью созданной в АКЦ ФИАН системы регистрации RDR-1 с плотностью записи 256 Кбит/сек.

Программный FX-коррелятор АКЦ построен на базе эффективного вычислительного кластера с производительностью 1 Тфлоп/сек и RAID-системой хранения информации емкостью до 220 Тбайт (рисунок 3).

Компьютерная реализация вычисления кросскорреляционной функции сигналов отдельных интерферометров выглядит в виде следующей последовательности операций:

«Преобразование Фурье – Перемножение - Обратное преобразование Фурье».

По сравнению с существующими аппаратными корреляторами данная последовательность позволяет существенно повысить производительность обработки данных, управлять функциональностью и многомодовостью этого процесса без дополнительных финансовых затрат.

Программный коррелятор АКЦ ФИАН воспринимает данные в любом из существующих в текущей практике РСДБ форматов. Для синхронизации потоков данных с микросекундной точностью в миссии используются прецизионные аналитические модели движения космического аппарата «Радиоастрон» и фактические результаты дистанционных баллисти-

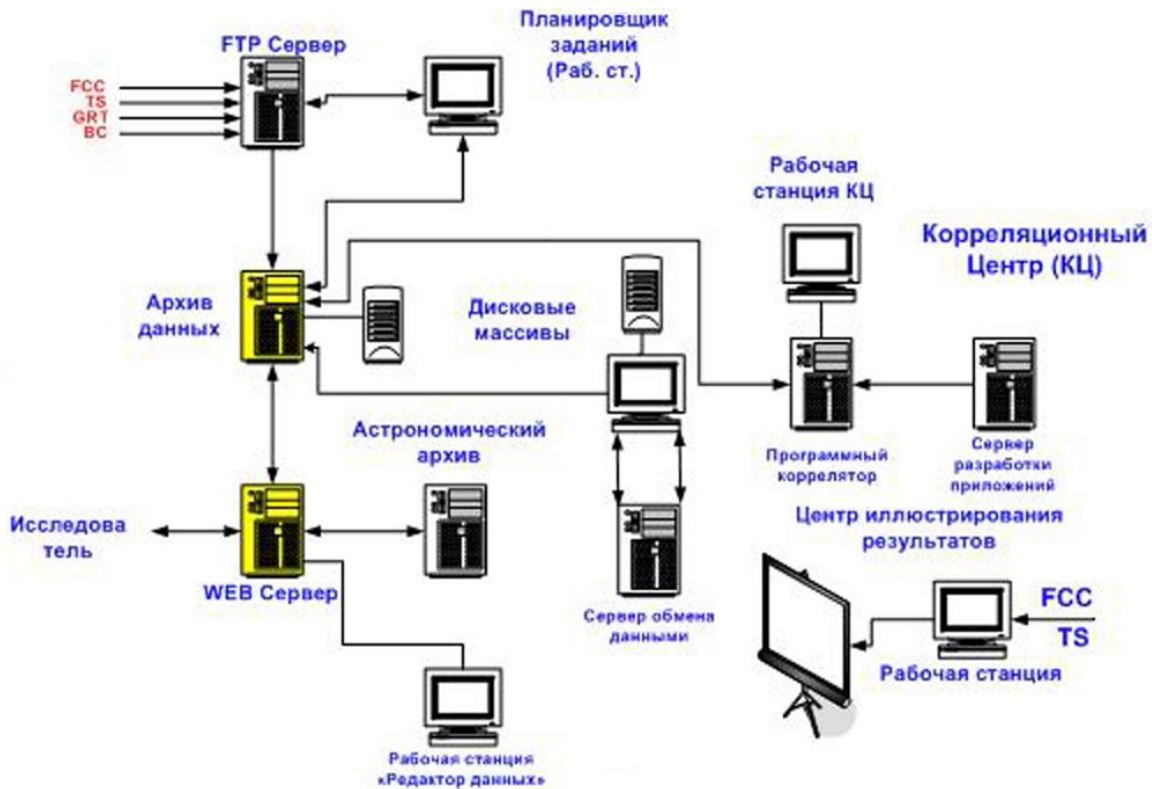


Рисунок 4. Схема функционирования центра обработки данных АКЦ ФИАН

ческих измерений параметров его орбиты, поставляемых центром интерпретации траекторных измерений Института прикладной математики РАН (рисунок 4).

Операционная скорость кластера АКЦ позволяет принимать поток данных от десяти станций (включая КРТ Радиоастрон) с общей плотностью 2.56 Гбит/сек и, соответственно, обрабатывать потоки от 45 формируемых в эксперименте интерферометров. Это происходит практически без снижения темпа поступающих в реальном времени данных наблюдений.

Помимо коррелятора, в центре обработки поддерживается собственное пользовательское приложение ASL, в котором реализованы конкретные программы решения астрофизических задач:

- для источников с непрерывным спектром излучения;
- для источников монохроматического мазерного излучения (молекулярные линии OH и H₂O);
- для источников импульсного излучения с непрерывным спектром (пульсаров) и определения параметров среды распространения импульсов в Галактике.

В 2010 – 2011 гг. на диапазонах КРТ АКЦ ФИАН с участием отечественных и зарубежных радиотелескопов был проведен цикл интерферометрических экспериментов для проверки технического и программного обеспечения обработки проекта «Радиоастрон». Чувствительность эмулированного инструмента и качество результатов показали их полное соответствие принятым требованиям.

3 Основные направления научных исследований с КРТ

Предполагается, что для самых коротких волн (К-диапазон) в проекте РадиоАстрон будет реализовываться метод многочастотного синтеза (МЧС) изображений [2]. При этом один канал с круговой поляризацией будет работать на фиксированной частоте 22.232 ГГц. Второй, одновременно работающий, канал с круговой поляризацией противоположной ориентации, будет иметь возможность переключаться в интервале 18.392-25.112 ГГц, т.е. $f_{\max} / f_{\min} = 1.37$. Это позволит получать одномерные изображения за время, определяемое временем интегрирования для каждого канала, умноженного на число переключаемых частот. Двухмерные изображения можно будет получать дважды за виток с максимальным угловым разрешением и $1 - (f_{\min} / f_{\max})^2 = 46\%$ заполнением эллиптической области на плоскости пространственных частот UV. Важно отметить, что эта величина не зависит от размеров и других параметров орбиты. В целом, канал с фиксированной частотой полностью совместим с наземными радиотелескопами. Канал с перестраиваемой частотой будет, совместим с такой же полосой К-диапазона специально подготовленных наземных радиотелескопов.

Некоторые преимущества МЧС-метода:

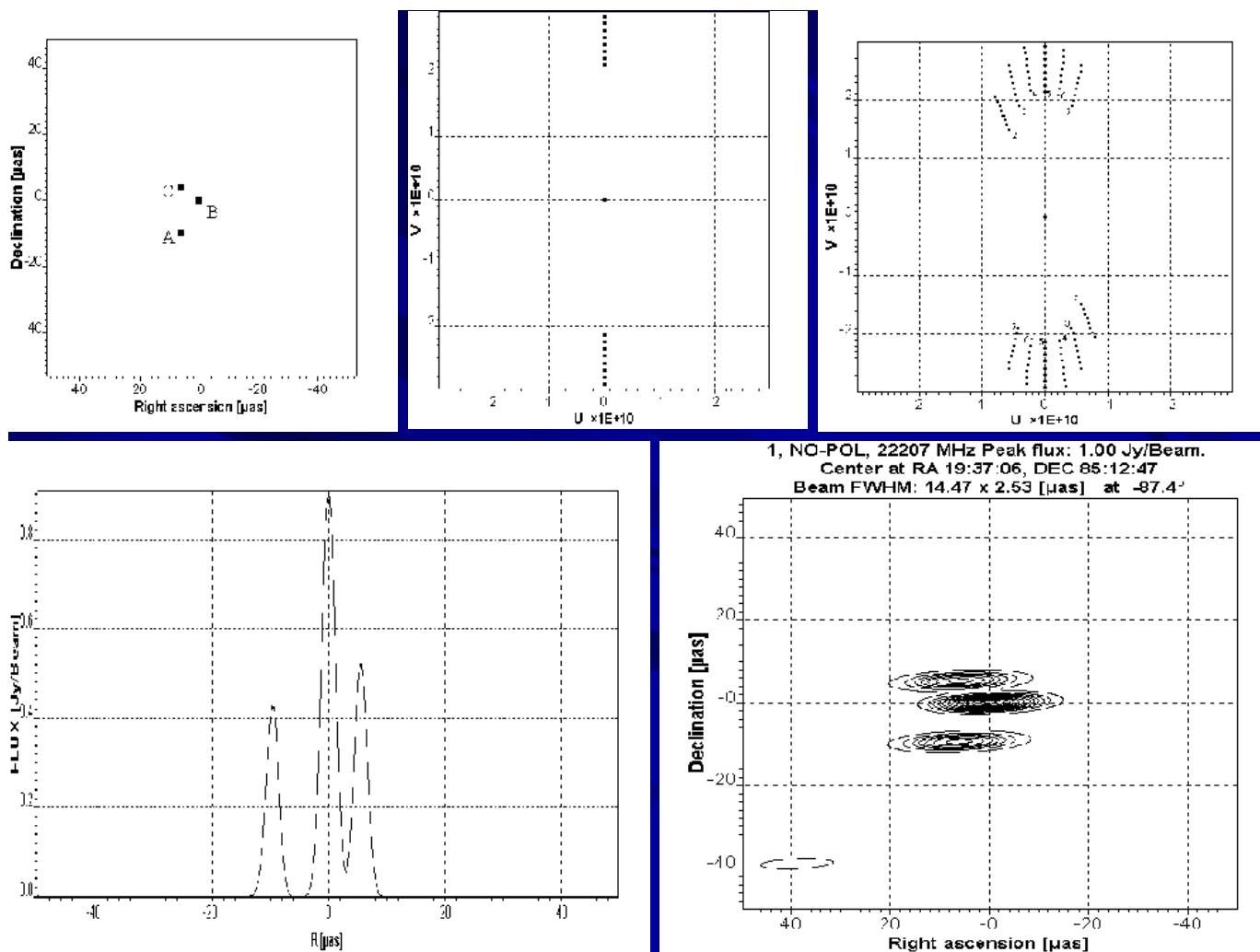
- возможность получения одномерных изображений источников с экстремально высоким угловым разрешением меньше чем за час и для любой части орбиты;

- двумерные изображения могут быть получены за 3-5 дней в любой части орбиты или за 0,5 - 1 день вблизи перигея;
- возможность получения спектра в К - диапазоне для различных деталей изображения;
- определение зависимости углового размера изображения от частоты, связанной с рассеянием, поглощением или другими физическими процессами;
- создание карты линейной поляризации и карты мер Фарадеевского вращения или карты круговой поляризации, а также определение зависимости степени поляризации от частоты;
- возможность определения дифференциальных координат и собственных движений с экстремально высокой точностью;

- исследование физической переменности структуры источников и/или переменности за счет межзвездной плазмы или плазмы в оболочке источника как функции частоты.

Для реализации указанных целей может быть выбрана соответствующая мода наблюдений, определяемая центральной частотой настраиваемого канала, а именно 18.392, 19.352, 20.312, 21.272, 22.232, 23.192, 24.152, 25.112 ГГц. Ширина полосы для каждой частоты равна 32 МГц.

На рисунке 5 показаны результаты численного моделирования одномерной и двумерной карты источника, состоящего из трёх точечных компонент [5].



Слева сверху – истинное изображение (три точечных источника с потоками $F_A = 0.5$, $F_B = 1.0$ и $F_C = 0.5$ условных единиц, $AB = 12$ мкс, $AC = 15$ мкс, $BC = 9$ мкс; в центре сверху – заполнение UV-плоскости при переключении 8 частот К канала; слева внизу – одномерное изображение в результате этого; справа сверху – заполнение UV-плоскости после пяти таких переключений частоты при движении по орбите в течение пяти дней; справа внизу – соответствующее двумерное изображение.

Рисунок 5. Моделирование применения МЧС метода в проекте «РадиоАстрон» [2]

Таблица 2 - Наиболее сильные и интересные компактные внегалактические источники

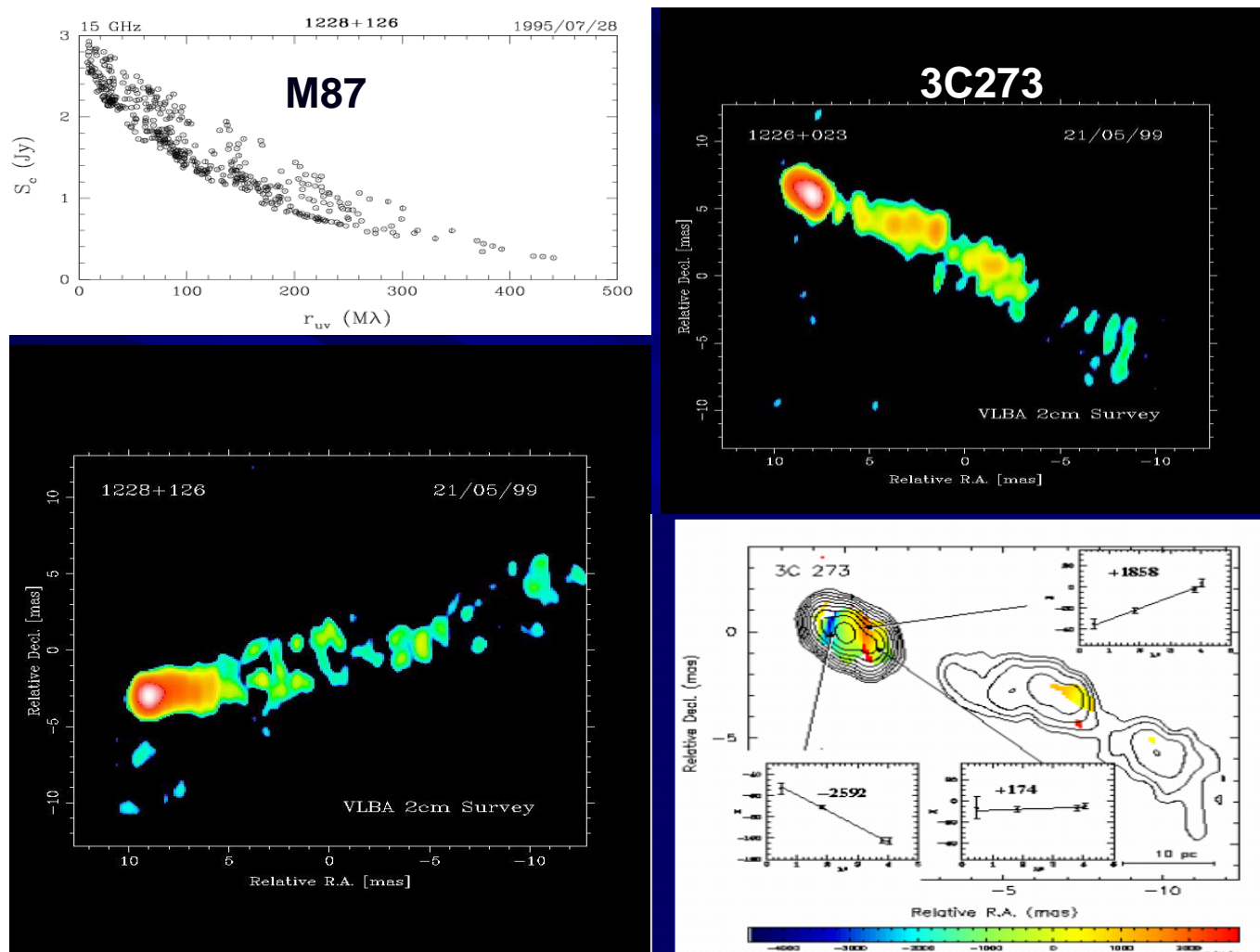
IAU И.Н.А.З.В.А.Н.И.Е	Другие названия	z	S (Ян)	Θ_{\max} (мс дуги)	Θ_{\min} (мс дуги)	T_b (10^{13} К)	N_0	N
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0420-014		0.915	7.62	0.09	<0.02	>5.18	6	4
0528+134		2.07	4.21	0.22	<0.03	>2.06	6	3
0716+714		(0.3)	2.51	0.08	<0.01	>1.85	6	5
1055+018	4C+01.28	0.888	4.28	0.23	<0.02	>1.36	8	5
1334-127		0.539	7.17	0.16	<0.01	>3.19	6	4
1730-130	NRAO530	0.902	7.49	0.23	<0.03	>1.50	7	5
1741-038	OT-068	1.057	4.55	0.16	<0.02	>2.03	3	1
1749+096	4C+09.57	0.320	5.13	0.16	<0.02	>1.34	6	4
2230+114	CTA 102	1.037	3.11	0.12	<0.03	>1.27	9	5
2255-282		0.927	5.50	0.13	<0.02	>2.24	2	1
0642+449	OH471	3.408	1.67	0.21	0.08	0.43	6	4
0851+202	OJ 287	0.306	3.32	0.12	<0.05	>0.39	10	7
1226+023	3C 273	0.158	7.36	0.13	<0.06	>0.17	15	11
1228+126	M87	0.004	0.73	0.41	<0.27	>0.007	13	5
1253-055	3C279	0.538	11.21	0.30	<0.05	>0.88	14	8
1508+572	VSOP	4.309	(0.1)					
1937-101		3.787	0.16	0.30	0.12	0.015	2	0
2200+420	BL Lac	0.069	2.78	0.37	<0.03	>0.15	14	10
2251+158	3C454.3	0.859	3.77	0.26	0.11	0.105	11	4

Колонки: 1 – IAU название источника; 2 – другие названия; 3 – красное смещение; 4, 5, 6, 7 – поток, максимальный и минимальный размер и яркостная температура неразрешенной детали на 15 ГГц; 8 – количество эпох наблюдений; 9 – количество эпох наблюдений, когда наблюдалась неразрешенная деталь [3].

Одной из основных задач научной программы космического интерферометра «Радиоастрон» будет исследование структуры и динамики центральных областей внегалактических радиоисточников синхротронного излучения, которые вероятно позволят получить информацию из районов вблизи горизонта событий сверхмассивных чёрных дыр. Массовое исследование структуры и спектров внегалактических объектов и выявление неразрешенных на Земле компонент было проведено на многих наземных радиотелескопах и глобальном интерферометре VLBA, на частоте 15 ГГц [3]. Некоторые наиболее сильные и интересные компактные источники собраны в таблице 1.

На рисунке 6 слева показаны изображение и зависимость величины наблюдаемого потока радиоизлучения от базы интерферометра, т.е. от углового разрешения при наблюдениях на волне 2 см с антенной решеткой VLBA радиогалактики Дева А (M87).

В центре M87 находится сверхмассивная черная дыра, одна из самых больших, которые известны в настоящее время. Её масса – 6.6 миллиардов солнечных масс [4]. Из рисунка видно, что центральная часть объекта не разрешается при самых больших базах. С помощью интерферометра «Радиоастрон» можно будет впервые исследовать строение самых внутренних частей этого объекта или даже заглянуть внутрь (если это не чёрная дыра, а, например, вход в кротовую нору). Минимальная ширина лепеска интерферометра «Радиоастрон» семь микросекунд дуги и, в зависимости от отношения сигнал-шум, можно будет измерить размер источника с точностью до доли лепестка, например одну десятую лепестка, т.е. ожидаемое угловое разрешение будет лучше микросекунды (мс) дуги. Ожидаемые размеры силуэта, т.е. диаметр Шварцшильдовской сферы чёрной дыры будет $2R_S = 4GM/c^2 = 14.6$ мкс. Ожидаемый диаметр



Слева сверху – зависимость для M87 функции видности от проекции базы наземного интерферометра VLBA на частоте 15 ГГц; внизу – её изображение; справа сверху – изображение 3C273 на том же инструменте; внизу – зависимость угла поляризации от частоты наблюдений.

Рисунок 6. Радиогалактика M87 и квазар 3C273 – важнейшие внегалактические объекты для исследований в программе «Радиоастрон»

круговой орбиты для света около невращающейся черной дыры ($a=0$) $(108)^{0.5}GM/c^2 = 37.8$ мкс. Диаметр силуэта с предельным вращением ($a=1$) $9GM/c^2 = 32.8$ мкс, смещение центра изображения $(5)^{0.5}GM/c^2 = 8.1$ мкс (4).

На рисунке 6 справа показаны также изображение квазара 3C273 на волне 2 см [3] и данные по исследованию изменения плоскости поляризации с частотой наблюдения [5]. Объект является одним из самых сильных по наблюдаемому потоку радиоизлучения. Он интересен особенно тем, что имеет, по видимому, односторонний выброс релятивистских частиц. Одно из возможных предположений для объяснения такой структуры – это не сверхмассивная чёрная дыра, а вход в кротовую нору [6].

Важнейшим при измерении поляризации обоих этих объектов является вопрос о том, какова структура

магнитного поля вокруг центрального объекта - дипольная или, может быть, монополярная? Или же, какая-то, более сложная? Если магнитное поле обусловлено вращающимся вокруг сверхмассивной черной дыры аккреционным диском, то ожидается дипольный характер поля. В работе [5] было выяснено по измерению Фарадеевского вращения около ядра 3C273, что противоположные края относительно центрального объекта имеют противоположный знак вращения и, следовательно, противоположный знак магнитного поля. Это, возможно, говорит о том, что наблюдается монополярная структура магнитного поля. А если это так, то указывает на возможность существования входа в кротовую нору или черной дыры с магнитным зарядом (бывшую кротовую нору).

Еще одно важное направление исследований – обнаружить, где во Вселенной находятся источники

космических лучей. По наблюдениям обсерватории им. Пьера Оже космические частицы около Земли самых высоких энергий прилетают из ближайшей радиогалактики Центавр-А (NGC5128), до которой расстояние 3.5 Мпс, масса чёрной дыры 5.5×10^7 солнечных, т.е. примерно в сто раз меньше, чем M87. Тем самым показано, что внегалактические источники мощного синхротронного излучения являются одновременно генераторами космических лучей самых высоких энергий; а раз так, то и в самих этих источниках релятивистские протоны могут давать синхротронное излучение, которое можно попытаться обнаружить [8].

Отношение предельных яркостных температур для релятивистских протонов и электронов (если интенсивность ограничивается комптоновским рассеянием того же излучения) $T_p/T_e = (m_p/m_e)^{6/5} = (1830)^{6/5} = 8821$, m_p и m_e – массы покоя протона и электрона. Если предельная температура синхротронного излучения релятивистских электронов $T_e = 10^{12}$ К, то ожидаемая предельная температура излучения релятивистских протонов $T_p = 8 \times 10^{15}$ К. Для заданного потока излучения $F_\nu \propto (T/\lambda^2)\Omega \propto T/B^2$, где T – яркостная температура; Ω – телесный угол источника; B_e и B_p – проекции базы интерферометра на картинную плоскость (для излучающих в источнике электронов или протонов), необходимые для разрешения источника с данным потоком для предельных яркостных температур. Тогда $B_p/B_e = (m_p/m_e)^{3/5} = 90$. Поэтому для разрешения источников синхротронного излучения протонов требуются интерферометры с существенно большей базой, чем для электронов.

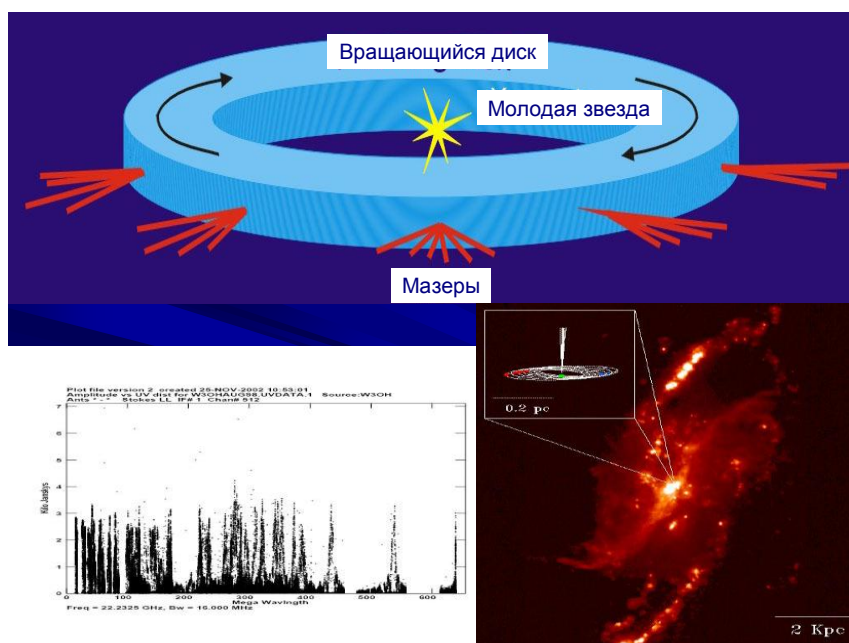
Синхротронное излучение релятивистских протонов может быть выявлено по обнаружении очень высоких яркостных температур, превышающих предел для релятивистских электронов. Здесь, при проведении наблюдений, важно будет также учесть возможное увеличение яркостной температуры за счёт движения источника в сторону наблюдателя (доплеровское усиление), что может контролироваться измерениями угловой скорости собственного движения или расширения источника. Только использование высокого углового разрешения позволит установить – наблюдается ли стабильный источник с температурой, например, 10^{15} К. Это будет говорить о том, что действительно наблюдается генератор космических лучей, и все его параметры тем самым можно исследовать.

Многие внегалактические источники показывают сильную переменность наблюдаемого потока радиоизлучения. Эти наблюдения позволяют также дать нижнюю границу яркостной температуры. Так, из переменности на интервалах времени менее суток источника 0716+714 следует, что его яркостная тем-

пература более 10^{15} К и даже 10^{19} К [9]. Такая яркостная температура в модели доплеровского усиления должна соответствовать Лоренцовскому фактору 90, и это может быть проверено только с помощью космического интерферометра.

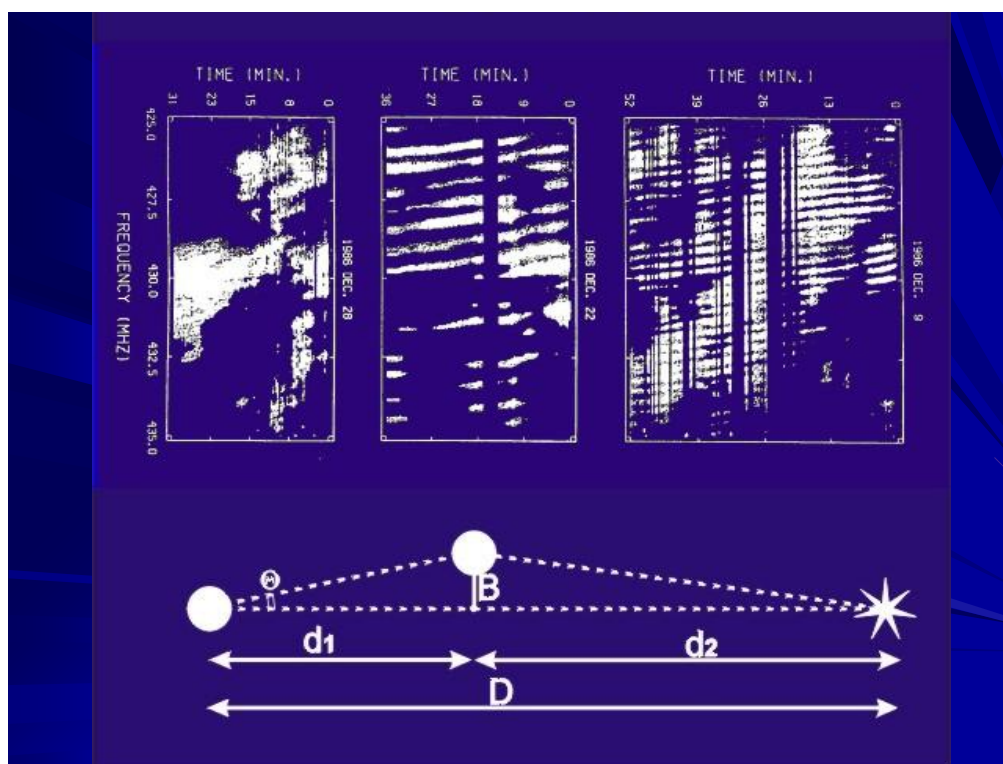
Предыдущие части программы исследований были связаны с изучением источников синхротронного излучения, охватывающего многие диапазоны частот. Качественно другой тип источников большой интенсивности – это объекты с узкополосным мазерным излучением. Мощное узкополосное излучение наблюдается в линиях некоторых молекул для областей образования молодых звёзд и планетных систем. На рисунке 7 показана модель формирования такого излучения для района звездообразования и результаты наблюдений линии водяного пара в диапазоне 22 ГГц на интерферометрической решетке VLBA источника W3(OH) [10]. По горизонтальной оси отложена база интерферометра, по вертикальной – коррелированный поток. Видно, что источник исключительно компактный и не разрешен для самых больших баз. Рисунок 7 показывает также источники мазерного излучения в той же линии около ядра другой галактики NGC4258 [11]. Вокруг центрального объекта (возможно, черной дыры) наблюдаются компактные области, излучающие в линии водяного пара. Они показаны точками; красные и синие точки означают движение от нас и на нас. Наблюдается целый класс подобных объектов (мегамазеры), отдельные детали которых до сих пор не разрешены и будут являться объектами для исследования. Ожидаемые предельные яркостные температуры до 10^{16} К [10]. Кроме определения структуры комплексов звездообразования и размеров отдельных областей, очень важным направлением исследований с космическим интерферометром представляется определение параллаксов и собственных движений мазерных источников для построения модели нашей и других галактик, а также и космологии.

Когерентный механизм излучения обеспечивает и более высокие яркостные температуры. Этот механизм вероятно ответственен за радиоизлучение пульсаров – нейтронных звёзд. Однако их размеры настолько малы, что и космический интерферометр не сможет разрешить даже ближайшие объекты. На рисунке 8 показан метод, который фактически еще не использовался в радиоастрономии. Он может быть реализован только с помощью специальных наблюдений с космическим интерферометром. Этот метод предполагает наблюдения мерцаний коррелированного сигнала, обусловленных неоднородностями межзвёздной плазмы. Мерцания являются результатом сложения сигналов, прошедших через эту



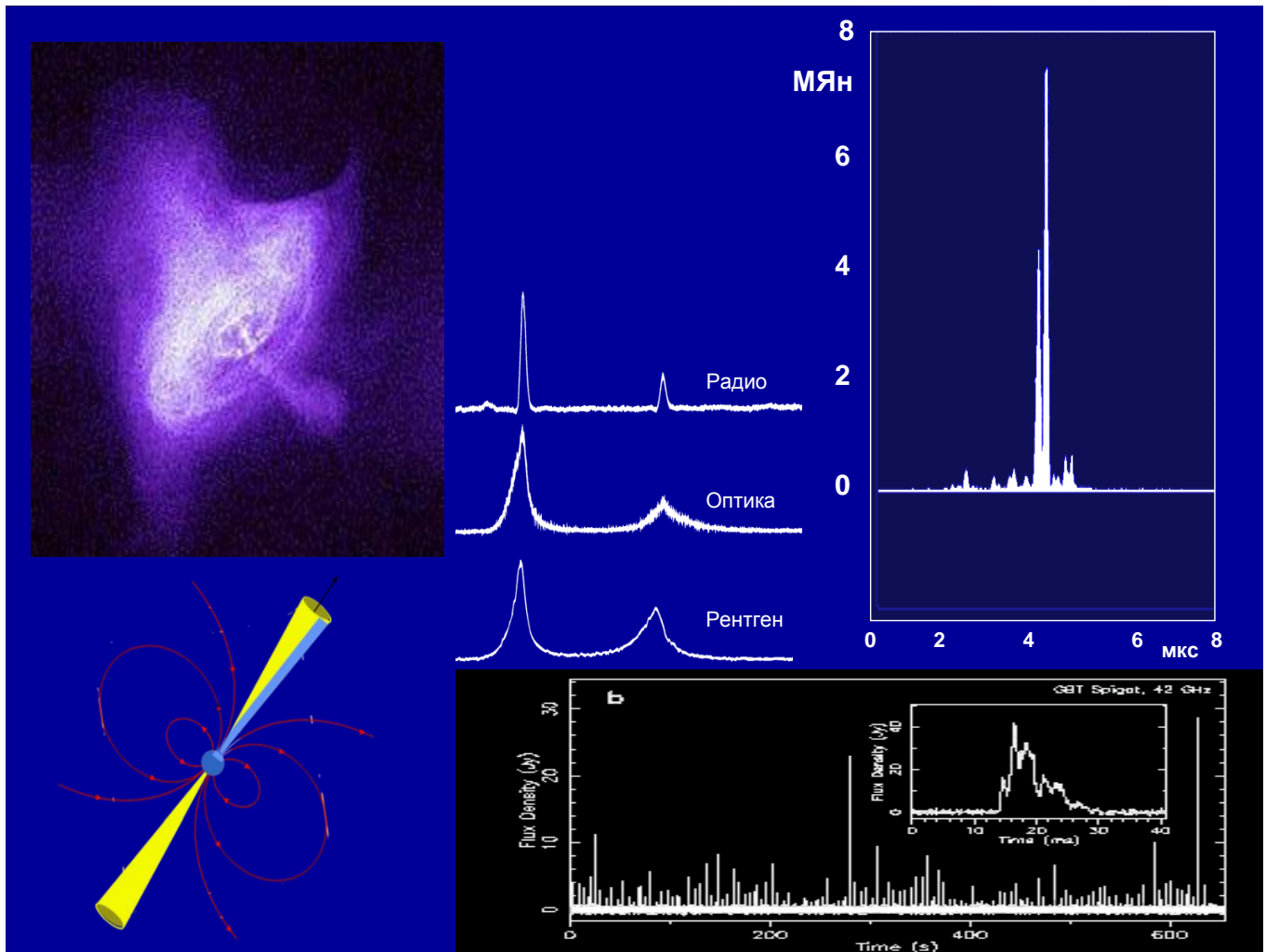
Вверху - модель области звездообразования с мазерами; внизу слева – зависимость наблюдаемого VLA коррелированного потока H_2O мазера (22 МГц) для области W3(OH) от базы интерферометра (на горизонтальной оси обозначения в миллионах длин волн) [10]; внизу справа – H_2O мегамазер и изображение в линии $\text{H}\alpha$ галактики NGC4258, расстояние 6.4 Мпк [11].

Рисунок 7. Модель формирования узкополосного излучения



Вверху – динамический спектр пульсара PSR 1237+25, период 1.4 секунды, расстояние 560 пс, наблюдения на телескопе Аресибо, диапазон 430 МГц [12]; внизу – схема двулучевого «межзвёздного» интерферометра.

Рисунок 8. Результаты наблюдений динамического спектра мерцаний пульсара PSR1237+25 с радиотелескопом Аресибо на частоте 430 МГц [12]



Справа сверху - сверхгигантский радиоимпульс пульсара в Крабовидной туманности: поток около Земли 7 млн. Ян в диапазоне 2,2 ГГц, яркостная температура $T > 10^{40}$ К, электромагнитное поле $H > 10^{12}$ Гс, наблюдения на РТ-64 в Калязине [15]; слева – изображение Крабовидной туманности в рентгеновском диапазоне – обсерватория Chandra и модель вращающейся нейтронной звезды с магнитным полем; в центре – запись в течение периода вращения нейтронной звезды 33 миллисекунды нормальных импульсов в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах; справа внизу – запись источника ХТЕ J1810-540, это иногда радиоизлучающий магнетар, период 5.54 секунды, магнитное поле 2.6×10^{14} Гс, наблюдения с телескопом GBT на частоте 42 ГГц [14].

Рисунок 9. Данные наблюдений ХТЕ J1810-540

среду по разным траекториям. То есть интерферометр с много большими базами естественно возникает при прохождении лучей через облака межзвёздной плазмы. На рисунке 8 приведены также результаты наблюдений динамического спектра мерцаний пульсара PSR1237+25 с радиотелескопом Аресибо на частоте 430 МГц [12]. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – частота. Чёткая полосатая картина соответствует ожидаемой для двухлучевого распространения сигналов, т.е. для двухантенного интерферометра с очень большой космической базой, но пока нет информации, как выглядит эта картина в разных частях пространства около Земли. Такая чёткая интерференция, соответствующая

двухлучевому распространению сигналов, наблюдается редко. Обычно виден более сложный динамический спектр и имеет место многолучевое распространение сигнала, но и в этих случаях можно определить параметры эффективного межзвёздного интерферометра [13]. С помощью «Радиоастрона» этот метод, вероятно позволит получить разрешение еще в сотни и тысячи раз более высокое, чем с помощью интерферометра Земля-Космос.

Недавно открыт новый класс пульсаров-магнетаров (PSR J1550-5418 – период 2.069 с и ХТЕ J1810-5408 – период 5.54 секунды), обладающих аномальным спектром – плоским или даже растущим для более высоких частот в сантиметровом и милли-

Гравитационное поле Земли и ОТО

- Измерение аномальных ускорений с точностью 10^{-10} м/с^2 и построение гравитационного потенциала Земли на больших расстояниях.
- Проверка эффектов ОТО (поперечный эффект Доплера, ход часов, уточнение величины красного смещения частоты на 2 порядка, проверка гравитационного взаимодействия тел $1/R^2$).

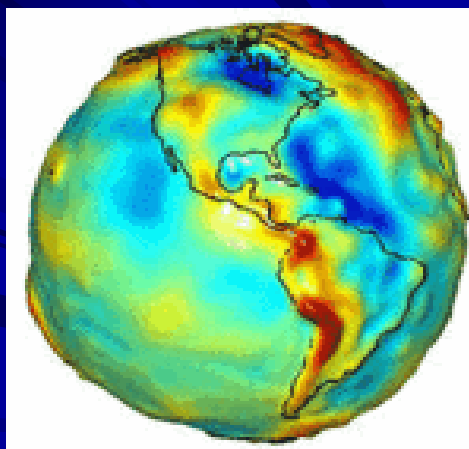


Рисунок 10. Направления изучения гравитационного поля Земли с помощью анализа данных, получаемых из интерферометрических наблюдений и высокоточных наблюдений орбиты и её эволюции для миссии «Радиоастрон»

метровом диапазоне [14]. Проблема возникновения когерентного излучения на столь высоких частотах (т.е. образования мельчайших неоднородностей заряда) представляется исключительно интересной. Эти объекты одновременно являются транзитными рентгеновскими источниками, Их пульсирующее радиоизлучение тоже возникает спорадически. На рисунке 9 (справа внизу) показаны данные наблюдений ХТЕ J1810-540.

Для некоторых пульсаров были обнаружены отдельные импульсы, амплитуда которых на много порядков превосходит среднее значение. В частности, такие импульсы от пульсара в Крабовидной туманности наблюдаются примерно раз в час. Для таких импульсов зарегистрирован абсолютный рекорд яркостной температуры 10^{40} К [15]. Помимо исключительно интересного направления исследований, направленных на выяснение того, где и как возникают такие явления в магнитосфере нейтронной звезды, возможно очень важное прикладное применение наблюдений гигантских импульсов - синхронизация времени на всей Земле, если его наблюдать во многих точках и на «Радиоастроне» (рисунок 10).

На рисунке 10 показана также карта гравитационных аномалий, построенная по наблюдениям с низколетящего спутника GRACE [16], а «Радиоастрон» сможет построить гравитационное поле вплоть до очень больших расстояний.

Запуск космической обсерватории «Радиоастрон» планируется в текущем году, ресурс программы научных исследований, в соответствии с технологическими возможностями - не менее пяти лет.

Список литературы

1. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>.
2. Multi-frequency Reception Method for Radio Images Synthesis in the RADIOASTRON project, in the book «Radioastronomical Tools and Techniques» / V.V. Andreyanov [et al.] // Kardashev N.S. & Dagkesamanski R.D. ed's, Cambridge Sc. Publishers, 2007. P. 17-26.
3. Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., Vermeulen R. C., Cohen V. H., Ros E., Kadler M., Lobanov A. P., Zensus J. A., Kardashev N.S., Gurvits L.I., Aller M. F. & Aller H. D., AJ, 130, 2473, 2005; Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., Vermeulen R. C., Cohen M. H., Ros E., Kadler M., Zensus J. A., and Kovalev Y. Y., ApJ, 609, 539 2004; Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Kardashev N. S., Larionov M. G., ARep, 52, 429, 2008; Mingaliyev M. G., Sotnikova Yu. V., Bursov N. N., Kardashev N. S., Larionov M. G.,
4. Gebhardt, K. A., J., Richstone, D., Lauer, T., Gultiken, K., Murphy, J., Faber, S., Tremaine, S., arXiv: 1101.1954; Broderick A.T. & Loeb F., arXiv: 0812.0366.
5. Zavala R. T. & Taylor G. B. Time-Variable Faraday Rotation Measures of 3C 273 and 3C 279 // ApJ, 550, L147, 2001.

6. Кардашев Н.С., Новиков И.Д., Шацкий А.А. Магнитные тоннели (кротовые норы) в астрофизике // *Астрономический журнал*, 2006. 83. 675 с.

7. Johannes Bluemer for the Pierre Auger Collaboration, arXiv:0807.4871.

8. Кардашев Н.С. Синхротронное радиоизлучение от протонов и электронов в пульсарах и квазарах // *Астрономический журнал*, 2000. 77. 813 с.

9. Fuhrmann L. and 34 coauthors Testing the inverse-Compton catastrophe scenario in the intra-day variable blazar S5 0716+71. III. Rapid and correlated flux density variability from radio to sub-mm bands // arXiv:0809.2227.

10. Slysh V.I. Self-Stark Limit on Brightness Temperature in Cosmic Masers // *ASP Conf. Proc.*, 2003. 300. 239 с.

11. Miyoshi, M., Moran, J., Herrnstein, J., Greenhill, L., Nakai, N., Diamond, P., Inoue, M. Evidence for a black hole from high rotation velocities in a sub-parsec region of NGC4258 // *Nature*, 1995. 373. 127 с.

12. Wolszczan A. & Cordes J.M. Interstellar interferometry of the pulsar PSR 1237+25// *ApJ*, 320, L35, 1987; Shishov V.I. Turbulent Interstellar Plasma and Ultrahigh Angular Resolution in Radio Astronomy // *ARep*, 2001.45. 195 с.

13. Шишов В.И. Межзвёздные мерцания и наносекундное разрешение в радиоастрономии // *Астрономический журнал*, 2010. Т. 87. С. 1-4.

14. Camilo, F., Ransom, S. M., Halpern, J. P., Reynolds, J., Helfand, D. J., Zimmerman, N., Sarkissian, J., Transient pulsed radio emission from a magnetar // *Nature*, 2006. 442. P. 892.

15. Popov, M. V., Soglasnov, V. A., Kondratiev, V. I., Bi-lous, A. V., Moshkina, O., Oreshko, V. V., Ilyasov, Yu. P., Sekido, M., Kondo, T. Multifrequency Study of Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar with the K5 VLBI Recording Terminal // arXiv:0903.2652; Soglasnov V.; Amazing properties of giant pulses and the nature of pulsar's radio emission // arXiv:astro-ph/0701190.

16. <http://nasascience.nasa.gov/missions/grace/>.