

75 ЛЕТ ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

"Радиоастрон" — радиотелескоп много больше Земли. Научная программа

Н.С. Кардашев

Интерферометр, образуемый радиотелескопами на Земле и одним в космосе на орбите с апогеем порядка расстояния Земля–Луна, позволяет исследовать астрономические объекты (пульсары, районы звездообразования и чёрные дыры) с угловым разрешением до нескольких микросекунд дуги. Впервые открываются возможности изучения физических процессов около горизонта чёрной дыры, областей ускорения космических лучей и предполагаемых входов в кротовые норы.

PACS numbers: 01.30.Bb, 95.55.Jz, 95.85.Bh, 95.85.Fm, 97.60.Gb

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911e.1191

Радиоастрономия ФИАНа начиналась с двух постоянных экспедиций в Крым. Было организовано несколько станций для проведения радиоастрономических наблюдений — основная, самая крупная, располагалась в районе Симеиза (на горе Кошка и в посёлке Кацевели), где были построены крупнейшие в то время радиотелескопы.

На рисунке 1 приведены фотографии основоположников радиоастрономии ФИАНа [1–4]. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров каждое лето приезжали в Крымскую экспедицию и помогали в организации всех работ, а И.С. Шкловский регулярно в Москве и Крыму обсуждал с сотрудниками ФИАНа наиболее интересные научные программы радиоастрономических наблюдений. Однако первые научные результаты были получены в экспедиции не на земле, а на теплоходе. Работой руководил С.Э. Хайкин, в ней участвовали В.Л. Гинзбург и И.С. Шкловский. Экспедиция направилась на теплоходе "Грибоедов" к берегам Бразилии, в залив Баии, где можно было наблюдать солнечное затмение. До этого Виталий Лазаревич Гинзбург сделал оценки и показал, что тепловое радиоизлучение Солнца генерируется в солнечной короне, что и подтвердили наблюдения с помощью радиотелескопа на борту "Грибоедова". Павел Дмитриевич Калачёв — основной конструктор крупнейших радиотелескопов, которые были созданы в Крымской экспедиции, а потом и в Пушинской радиоастрономической обсерватории. После Семёна Эммануиловича Хайкина коллектив радиоастрономов ФИАНа возглавил Виктор Витольдович Виткевич, кото-



Рис. 1. Основоположники радиоастрономии ФИАНа.

рый обеспечил работу новых радиотелескопов и радиоинтерферометров. Александр Ефимович Саломонович вместе с П.Д. Калачёвым построили в Пушино крупнейший в мире рефлекторный радиотелескоп 22-метрового диаметра миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн.

В настоящее время основными перспективными проектами ФИАНа являются два наземных радиотелескопа — многолучевая антенная решётка метровых волн, которая сможет одновременно и непрерывно контролировать всё небо, и полноповоротный радиотелескоп миллиметрово-сантиметрового диапазона РТ-70 на плато Суффа в Узбекистане. Как основные проекты Федеральной космической программы ФИАН совместно с "Роскосмосом" и привлечением широкой кооперации разрабатывают два космических радиотелескопа — "Радиоастрон" и "Миллиметр".

Перспектива начала исследований в течение ближайшего года — запуск космического радиотелескопа

Н.С. Кардашев. Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 333-21-89, (495) 334-85-06
Факс (495) 333-23-78
E-mail: nkardash@asc.rssi.ru

Статья поступила 15 июня 2009 г.



Рис. 2. (а) Испытания космического радиотелескопа в Пушино. (б) Участники международной кооперации по проекту "Радиоастрон" около лётной модели КРТ в НПО им. С.А. Лавочкина (осень 2008 г.).

Таблица 1. Основные параметры миссии "Радиоастрон"

| | | | | |
|---|-----|-----|-----|---------|
| Диапазон (λ , см) | 92 | 18 | 6,2 | 1,2–1,7 |
| Ширина диапазона | 4 | 32 | 32 | 32 |
| Ширина интерференционного лепестка (мс дуги) при базе 350000 км | 540 | 106 | 37 | 7,1–10 |
| Чувствительность по потоку (σ , мЯн), на Земле антенна GBT*, 300 с накопление | 10 | 1,3 | 2 | 5 |
| * GBT — Green Bank Telescope. | | | | |

"Радиоастрон" [5], который образует с наземными радиотелескопами интерферометр Земля–космос. Его основные параметры приведены в табл. 1. Объекты исследования миссии "Радиоастрон" ("Спектр-Р") следующие:

- ядра галактик (синхротронное излучение, космические лучи, мегамазеры, новая физика);
- космология, тёмная материя, тёмная энергия, пространство-время;
- области образования звёздных планетных систем (мазеры);
- чёрные дыры звёздных масс и нейтронные звёзды;
- межзвёздная и межпланетная среда;
- сверхточная система небесных координат и фундаментальная астрометрия;
- сверхточная баллистика и гравитационное поле Земли.

На рисунке 2 показаны космический радиотелескоп (КРТ) во время испытаний в Пушино и Научно-производственном объединении (НПО) им. С.А. Лавочкина и фотография участников международного совещания по проекту в 2008 г.

Метод радиоинтерферометрии со сколь угодно большими базами (в том числе, космическими) появился и активно развивался именно в ФИАНе [6]. С самого начала, со времени запуска первых космических аппаратов, в Крыму были созданы первые интерферометры. Эти интерферометры были связаны кабелями и давали угловое разрешение, намного превышающее то, которое можно было получить с помощью единичных антенн. Именно интерферометры обеспечили высокоточную

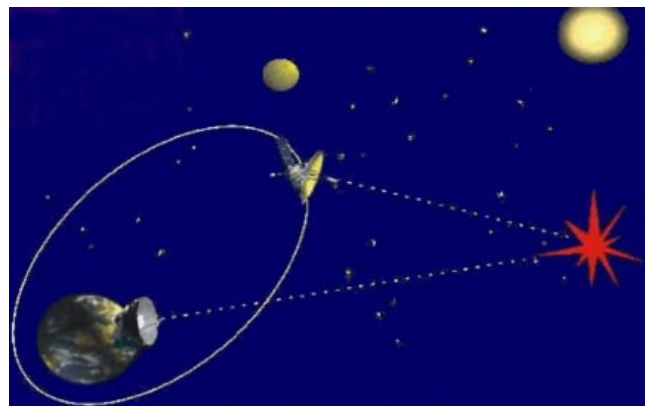


Рис. 3. Орбита космической обсерватории "Радиоастрон" [7]. Средний орбитальный период 9,5 дней (изменение периода от 7 до 10 дней), половина большой оси 189000 км, наклонение орбиты $51,6^\circ$. Радиус перигея от 10 до 70 тыс. км, апогея от 310 до 390 тыс. км, нормаль к плоскости орбиты за три года описывает на небесной сфере овал, большая ось которого 150° , малая — 40° .

посадку первых космических аппаратов на поверхность Луны. Сразу же после приобретения опыта работы по точному определению координат космических аппаратов возникла идея о том, что интерферометр можно сделать и без кабелей и регистрировать независимо в разных точках пространства сигнал от исследуемого источника излучения, используя высокостабильные генераторы для синхронизации и обрабатывая записанные сигналы на ЭВМ независимо от момента наблюдений.

На рисунке 3 показана предполагаемая орбита интерферометра "Радиоастрон" [7], которая была выбрана так, что она специальным образом эволюционирует под действием Луны. Средний орбитальный период 9,5 дней (изменение периода — от 7 до 10 дней), половина большой оси составляет 189000 км, наклонение орбиты — 51° . Радиус перигея — от 10 до 70 тыс. км, апогея — от 310 до 390 тыс. км, нормаль к плоскости орбиты за три года описывает на небесной сфере овал, большая ось которого 150° , малая — 40° . Вследствие эволюции орбиты около 80 % источников в какой-то момент оказывается вблизи плоскости орбиты, т.е. для таких

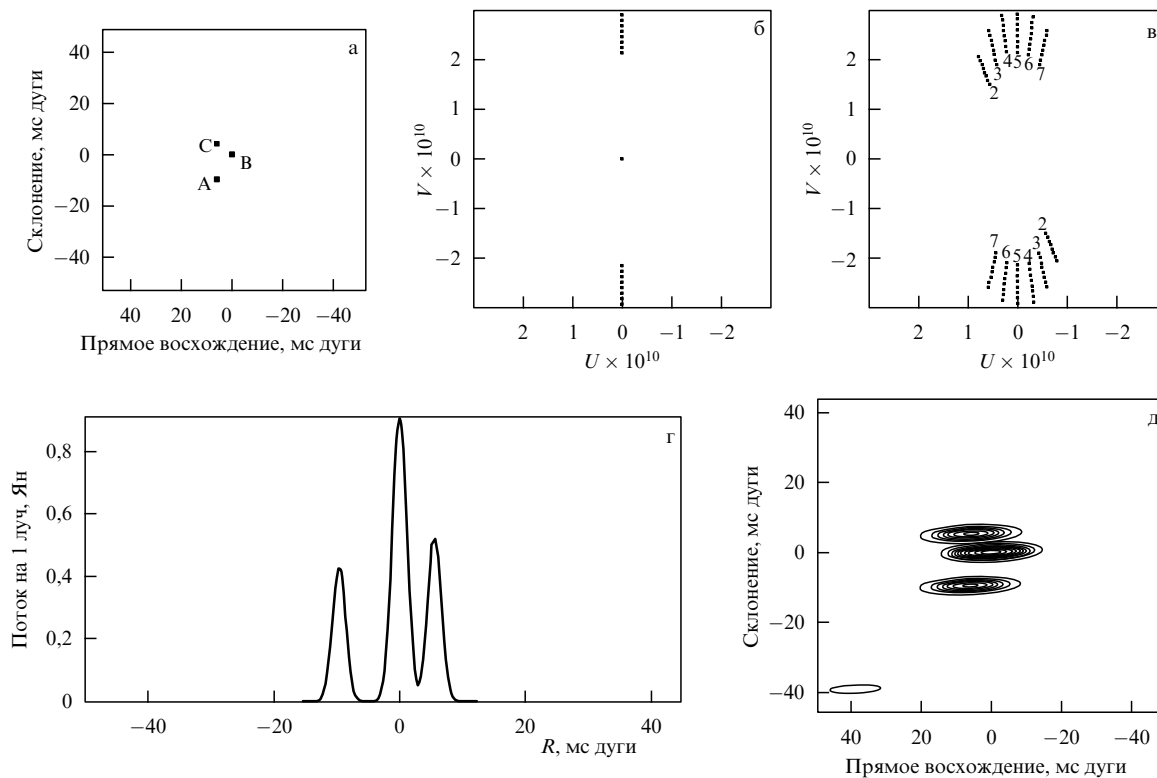


Рис. 4. Моделирование применения МФС-метода в проекте "Радиоастрон" [8]. (а) Истинное изображение (три точечных источника с потоками $F_A = 0,5$, $F_B = 1,0$ и $F_C = 0,5$ условных единиц, $AB = 12$ мкс, $AC = 15$ мкс, $BC = 9$ мкс). (б) Заполнение UV -плоскости при переключении восьми частот К-канала, (г) одномерное изображение в результате этого. (в) Заполнение UV -плоскости за пять таких переключений частоты в течение пяти дней; (д) соответствующее двумерное изображение.

источников можно получать изображения и с высоким, и с умеренным угловым разрешением.

Предполагается, что для самых коротких волн в проекте "Радиоастрон" (диапазон К) будет реализовываться метод многочастотного синтеза (МЧС) изображений [8]. 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 частот 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, умноженным на число переключаемых частот. Двумерные изображения можно будет получать дважды за виток с максимальным угловым разрешением и 46%-ным заполнением $(1 - (f_{\min}/f_{\max})^2 = 0,46)$ эллиптической области на UV -плоскости пространственных частот. Важно отметить, что эта величина не зависит от размеров и других параметров орбиты. В целом, канал с фиксированной частотой полностью совместим с каналами наземных радиотелескопов. Канал с перестраиваемой частотой будет совместим с такой же полосой К-диапазона специально подготовленных наземных радиотелескопов.

Некоторые преимущества МЧС-метода:

- получение одномерных изображений источников с экстремально высоким угловым разрешением менее чем за 1 час для любой части орбиты;
- получение двумерных изображений 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;

- определение дифференциальных координат и собственных движений с рекордно высокой точностью;

- возможность исследования физической переменности структуры источников и/или переменности, обусловленной межзвёздной плазмой или плазмой 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 и 25,112 ГГц. Ширина полосы для каждой частоты 32 МГц.

На рисунке 4 приведены результаты численного моделирования одномерной и двумерной карт источника, состоящего из трёх точечных компонентов [8].

Одна из основных задач научной программы космического интерферометра "Радиоастрон" — исследование структуры и динамики центральных областей внегалактических радиоисточников синхротронного излучения, которое, вероятно, позволит получить информацию из областей, находящихся вблизи горизонта событий сверхмассивных чёрных дыр. На рисунке 5 показана общая карта неба с источниками, которые предполагается

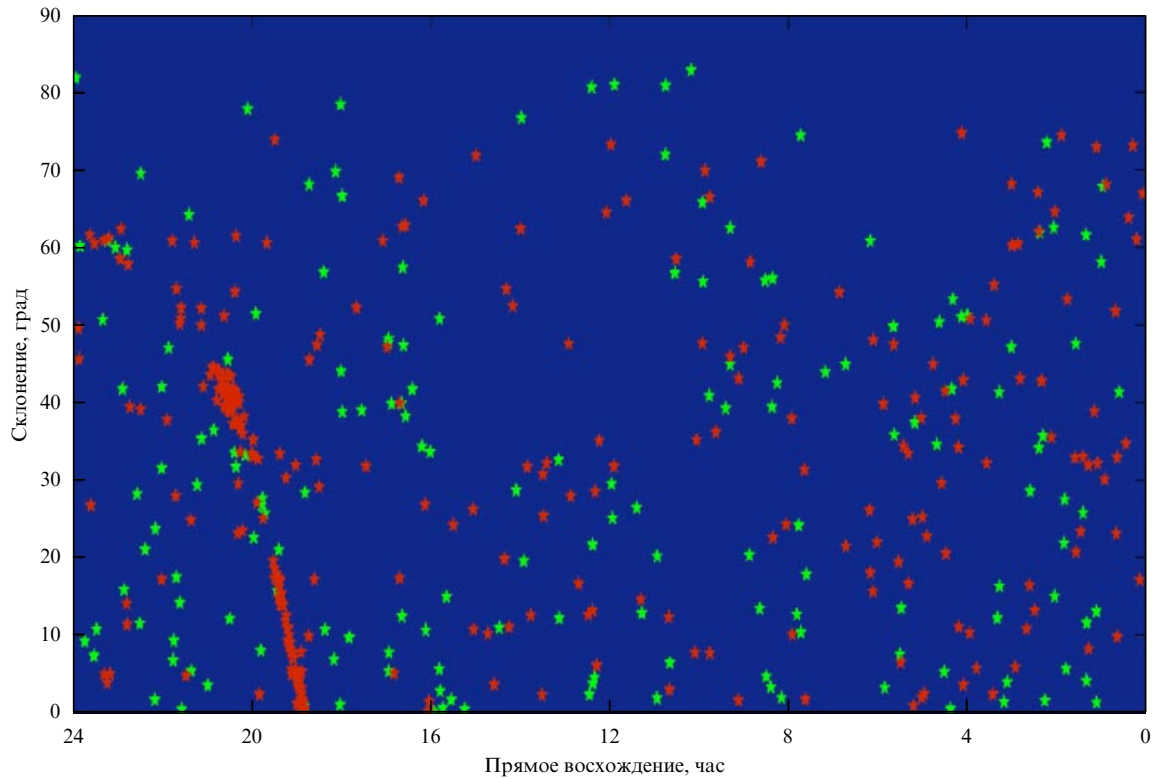


Рис. 5. Радиоисточники Северного полушария для подготовки программы исследований по проекту "Радиоастрон". Красные источники имеют нормальные спектры, зелёные — плоские и инвертированные, вероятно наиболее компактные [9]. (См. электронную версию рисунка на <http://www.ufn.ru>.)

исследовать с помощью космического интерферометра. Большой каталог источников подготовлен по наблюдениям в Крымской и Северо-Кавказской обсерваториях [9, 10]. Разными цветами на рис. 5 указаны источники с различными спектрами. Наиболее компактными являются источники с плоскими или инвертированными (т.е. растущими в сторону высоких частот) спектрами — они указаны зелёным цветом. Красным цветом обозначены менее компактные источники синхротронного излучения, поток которых убывает с возрастанием частоты, или источники теплового излучения с плоским спектром — облака горячей плазмы. Массовое исследование структуры внегалактических объектов и выявление неразрешённых на Земле компонент было проведено на глобальном интерферометре VLBA (Very Long Baseline Array) на частоте 15 ГГц [11, 12]. Некоторые наиболее сильные и интересные компактные источники представлены в табл. 2.

На рисунке 6 показаны ожидаемые размеры объектов в ядре радиогалактики Дева А (M87) и структура магнитного поля. В центре M87 находится сверхмассивная чёрная дыра, одна из самых больших, которые известны в настоящее время. С помощью интерферометра "Радиоастрон" можно будет впервые исследовать строение самых внутренних частей этого объекта или даже заглянуть внутрь его (если это не чёрная дыра, а, например, вход в кротовую нору). На рисунке 7 приведены характерные размеры для модели M87 с чёрной дырой. Минимальная ширина лепестка интерферометра 7 мкс дуги и в зависимости от отношения сигнал/шум можно будет измерить размер источника с точностью до доли лепестка, например до его одной десятой, т.е.

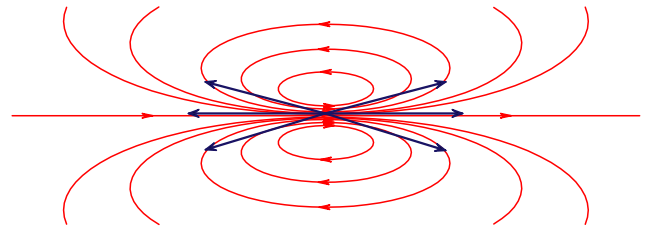


Рис. 6. Магнитное поле в центральной области радиогалактики M87: дипольное поле аккреционного диска и монопольное поле кротовой норы. Возможная структура радиогалактики M87 [13]. Расстояние 16 Мпк, масса чёрной дыры $3,4 \times 10^9 M_{\odot}$. Шварцшильдовский диаметр $2R_S = 4GM/c^2 = 8,4$ мкс. Диаметр силуэта без вращения ($a = 0$) $(108)^{0,5} GM/c^2 = 22$ мкс. Диаметр силуэта с предельным вращением ($a = 1$) $9GM/c^2 = 19$ мкс, смещение $(5)^{0,5} GM/c^2 = 4,9$ мкс. Полуширина лепестка проекта "Радиоастрон" 7 мкс.

ожидается получить угловое разрешение лучше, чем 1 мкс дуги. Ожидаемый размер силуэта, т.е. диаметр круговой орбиты для света около не вращающейся чёрной дыры составляет 22 мкс, т.е. в три раза превышает размер лепестка. Если эта чёрная дыра вращается с предельной скоростью, то диаметр силуэта должен составлять 19 мкс, правый и левый края изображения относительно оси вращения должны быть темнее и ярче, а также должно наблюдаться смещение центра яркости [13].

На рисунке 7 также показаны изображение на длине волны 2 см [11, 12] и данные по исследованию поляризации радиоизлучения квазара 3C273 [14]. Этот объект является одним из самых сильных по наблюдаемому

Таблица 2. Наиболее сильные и интересные компактные внегалактические источники*

| МАС-название | Другие названия | z | S , Ян | Θ_{\max} , мс дуги | Θ_{\min} , мс дуги | T_b , 10^{13} К | N_0 | N |
|--------------|-----------------|-------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------|-------|-----|
| 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 | 3C273 | 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 |

* МАС — Международный астрономический союз, z — красное смещение, S — поток неразрешённой детали источника, Θ_{\max} и Θ_{\min} — максимальный и минимальный размеры, T_b — яркостная температура неразрешённой на частоте 15 ГГц детали, N_0 — число эпох наблюдений, N — число эпох наблюдений, при которых наблюдалась неразрешённая деталь [11, 12].

потоку радиоизлучения. Он особенно интересен тем, что имеет, по-видимому, односторонний выброс релятивистских частиц. Одно из возможных предположений для объяснения такой структуры состоит в том, что это не сверхмассивная чёрная дыра, а вход в кротовую нору [15–18].

Важнейшим при измерении поляризации обоих объектов, представленных на рис. 7, является вопрос о том, какова структура магнитного поля вокруг центрального объекта. Дипольная она или монополярная? Или, может быть, какая-то более сложная? Если магнитное поле обусловлено вращающимся вокруг сверхмассивной чёрной дыры аккреционным диском, то ожидается дипольный характер поля. В работе [14] по данным измерения фарадеевского вращения около ядра 3C273 было выяснено, 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, что, в свою очередь, указывает на возможность существования входа в кротовую нору или чёрной дыры с магнитным зарядом (бывшей кротовой норы).

Ещё одно важное направление исследований — источники космических лучей. Рисунок 8 демонстрирует результаты наблюдений обсерватории им. Пьера Оже [19]. Обнаружено, что большинство космических частиц самых высоких энергий приходят к нам от ближайшей радиогалактики Центавр А (NGC5128), расстояние до которой 3,5 Мпк, масса чёрной дыры $5,5 \times 10^7$ солнечных

масс, т.е. примерно в сто раз меньше, чем масса М87. 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 [20]. Характерная частота спектра синхротронного излучения релятивистской частицы

$$\nu_c = \frac{3}{4\pi} \frac{eH_{\perp}\gamma^2}{mc} . \quad (1)$$

Здесь H_{\perp} — проекция напряжённости магнитного поля, перпендикулярная лучу зрения, γ — лоренц-фактор. Если синхротронное излучение обусловлено искривлением силовых линий дипольного магнитного поля, то характерная частота излучения

$$\nu_c = \frac{9}{16\pi} \frac{cr\gamma^3}{R^2} , \quad (2)$$

где r и R — расстояния от излучающей частицы до оси магнитного диполя и до его центра соответственно.

Отношение предельных яркостных температур для релятивистских протонов и электронов (если интенсивность ограничивается комптоновским рассеянием того же излучения)

$$\frac{T_p}{T_e} = \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{6/5} = (1830)^{6/5} = 8821 . \quad (3)$$

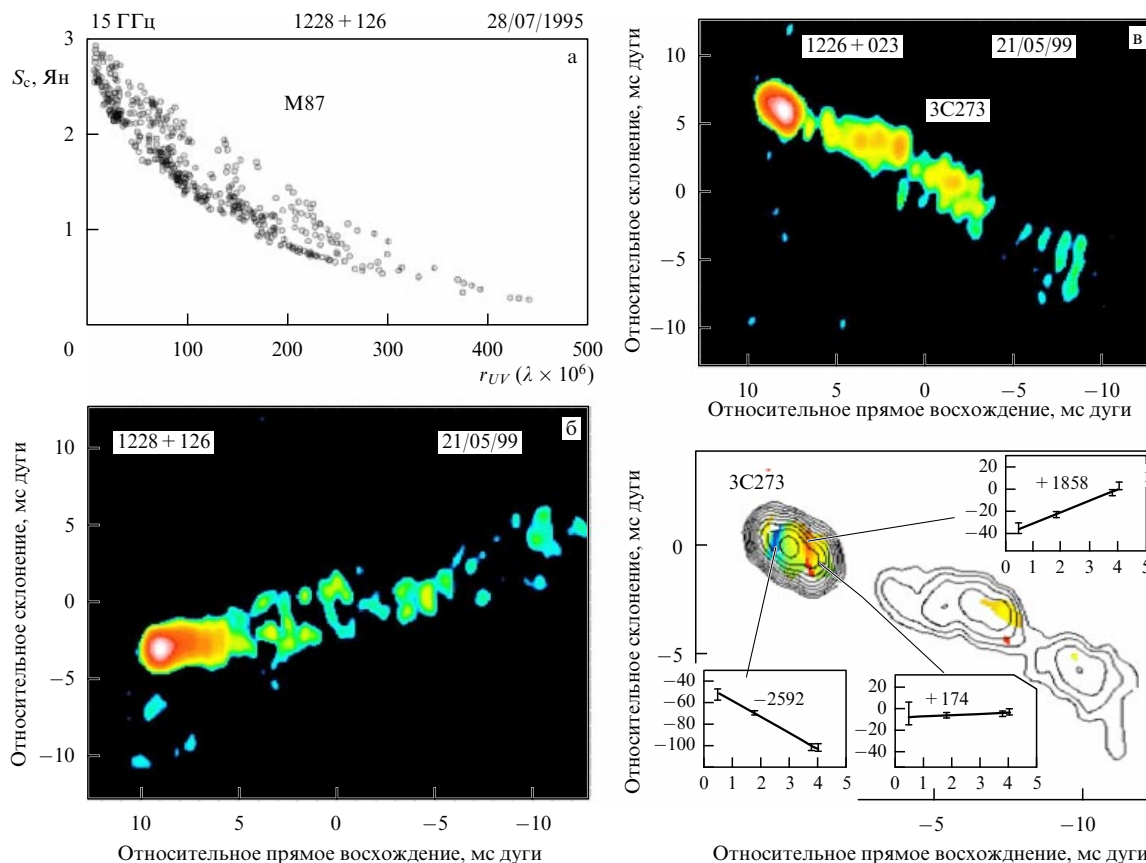


Рис. 7. Физика около горизонта чёрной дыры или входа в кротовую нору. M87 и 3C273 — "розетские камни" исследований в программе "Радиоастрон". (а) Зависимость для радиогалактики M87 потока радиоизлучения S_c , регистрируемого интерферометрической решёткой VLBA на длине волны 2 см, от проекции базы r_{UV} на картинную плоскость UV . (б) Изображение M87. (в) Изображение квазара 3C273 и (г) вращение плоскости поляризации для различных участков этого изображения; на вставках по горизонтальной оси отложена частота в МГц, по вертикальной отложен позиционный угол линейной поляризации в градусах; числа внутри вставок — мера вращения плоскости поляризации, рад м^{-2} .

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 $F_v \propto (T/\lambda^2)\Omega \propto T/B^2$, где T — яркостная температура, Ω — телесный угол источника. Если 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, то отношение

$$\frac{B_p}{B_e} = \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{3/5} = 90. \tag{4}$$

То есть для разрешения источников синхротронного излучения протонов могут понадобиться интерферометры с существенно большей базой, чем для электронов.

Результаты расчёта [20] показывают, что если области ускорения космических лучей соответствуют компактным областям наблюдаемых внегалактических радиоисточников, то синхротронное излучение релятивистских протонов может быть выявлено по наблюдениям очень высоких яркостных температур, превышающих предел для релятивистских электронов. При проведении таких 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.

На рисунке 9 приведена гистограмма яркостных температур, полученных по наблюдениям ядер внегалактических радиоисточников с космическим интерферометром VSOP (VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Space Observatory Program) в диапазоне 6 ГГц [13, 21]. Для значительной части (более половины) источников яркостная температура превышает 10^{12} К, т.е. возможно, что излучение приходит не от релятивистских электронов, а от релятивистских протонов. Хотя, как уже отмечалось, есть и другие модели, связанные с движением излучающей области и вследствие этого с направленностью излучения и усилением яркостной температуры. Только использование высокого углового разрешения позволит выяснить: наблюдается ли стабильный источник с температурой, например, 10^{15} К? Обнаружение такого источника будет говорить о том, что действительно наблюдается генератор космических лучей и все его параметры, следовательно, можно исследовать.

Многие внегалактические источники показывают сильную переменность наблюдаемого потока радиоизлучения. Эти наблюдения позволяют также определить нижнюю границу яркостной температуры. Так, из переменности на интервалах времени менее суток источ-

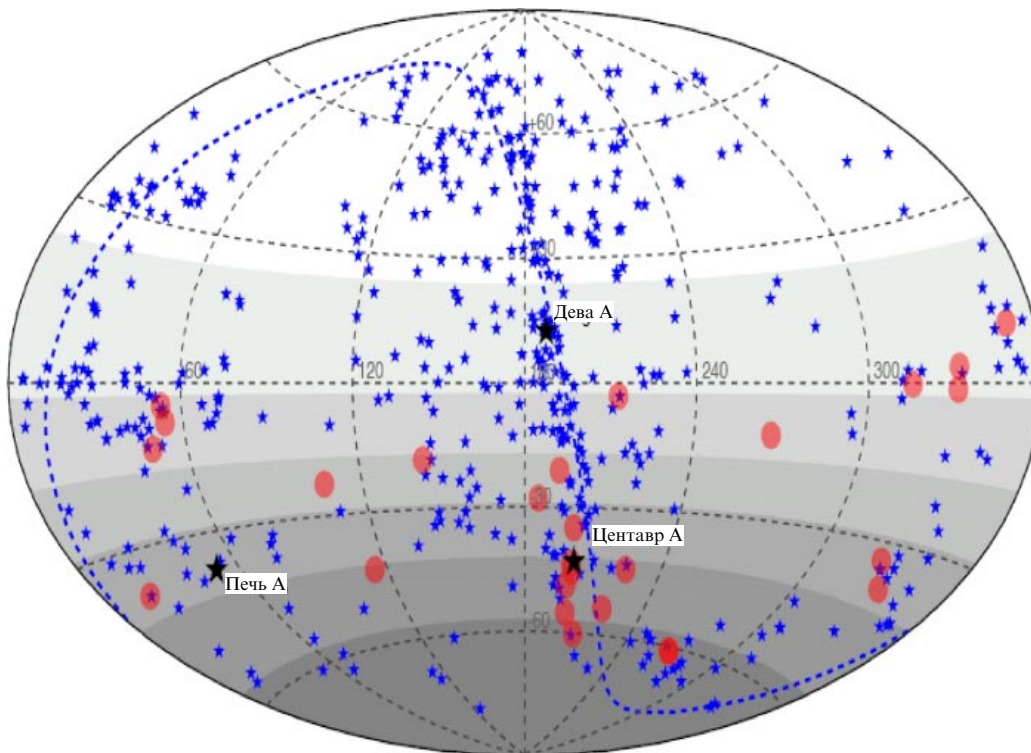


Рис. 8. Положение на небесной сфере (экваториальная система координат) 27 источников космических лучей самых высоких энергий по данным Обсерватории им. Пьера Оже (кружки) и 472 близких ($z < 0,018$) активных галактик (звёздочки) [19].

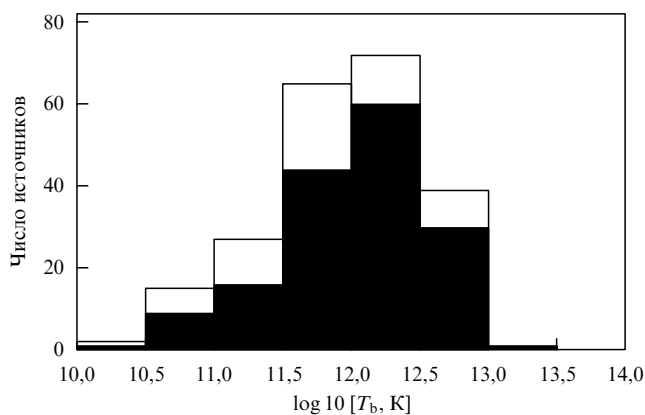


Рис. 9. Гистограмма яркостных температур, полученных в результате обзора 242 внегалактических источников [21].

ника 0716+714 следует, что его яркостная температура превышает 10^{15} К и даже 10^{19} К (!) [22, 23]. Такая яркостная температура в модели доплеровского усиления должна соответствовать лоренцевскому фактору 90, и это может быть проверено только с помощью космического интерферометра.

На рисунке 10 приведены данные наблюдений квазипериодических изменений потока радиоизлучения [24, 25]. Периодические изменения потока могут быть обусловлены двойными системами сверхмассивных чёрных дыр. Для наблюдений подготовлен целый список таких источников (табл. 3). Предполагается исследовать их структуру, магнитное поле и то, как они образуются и какова эволюция этих объектов. На рисунке 10 показано также изображение одного такого двойного радиоисточ-

ника. Собственное движение компонентов источника пока не измерено, т.е. не установлено, как меняется эта картина со временем.

Возможность применения сверхвысокого разрешения для фундаментальных проблем космологии может быть связана с измерениями зависимости угловых размеров внегалактических радиоисточников или их собственных движений от красного смещения. На рисунке 11 крестиками показана зависимость углового диаметра радиоисточника от красного смещения [26, 27]. Точки в левой части рисунка получены другим методом, по наблюдениям яркости сверхновых звёзд, и пересчитаны для соответствующего углового размера. Правая верхняя точка, которая также пересчитана для размеров внегалактических радиоисточников, соответствует измерениям пространственной структуры реликтового фона. Но в целом вся зависимость согласуется с принятой космологической моделью и уточняет её параметры. Внегалактические источники на графике занимают особенно важную часть зависимости, которая описывает положение и форму его минимума. Уже проведённые наблюдения дают определённые значения параметров современной космологической модели. Наблюдения с высоким разрешением, возможно, позволят уточнить эту зависимость и дать более точные значения параметров, описывающих, в частности, тёмную энергию и тёмную материю, а также их возможную эволюцию.

Как уже отмечалось, из наблюдений было выяснено, что многие внегалактические радиоисточники меняют свою форму, размеры и имеют большие угловые скорости движения, которые при простом учёте расстояний соответствуют скоростям, превышающим скорость света. Этот эффект объясняется релятивистским движением источника. Представляется очень важным, что

Таблица 3. Некоторые квазипериодические и двойные внегалактические радиоисточники

| МАС-название | Другие названия | z | Тип | Наблюдаемый период, годы | S , Ян | Θ_{\max} , мс дуги | Θ_{\min} , мс дуги | T_b , 10^{13} К | N_0 | N_c |
|--------------|-----------------|-------|-----|--------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------|-------|-------|
| 0059+581 | | 0,644 | Q | 4,5 | 2,72 | 0,13 | 0,11 | $> 0,12$ | 1 | 0 |
| 0133+476 | DA455 | 0,859 | Q | 2,2 | 4,21 | 0,22 | $< 0,03$ | $> 2,06$ | 6 | 3 |
| 0235+164 | | 0,940 | B | 5,45 | 1,36 | 0,16 | 0,11 | 0,09 | 5 | 0 |
| 0605-085 | ОН-010 | 0,055 | Q | 7,9 | 0,83 | 0,69 | $< 0,11$ | $> 0,02$ | 5 | 5 |
| 0716+714 | | (0,3) | B | | 2,51 | 0,08 | $< 0,01$ | $> 1,85$ | 6 | 5 |
| 0851+202 | OJ 287 | 0,306 | B | 11,64 | 3,32 | 0,12 | $< 0,05$ | $> 0,39$ | 10 | 7 |
| 1219+044 | ON231 | 0,965 | Q | 6,80 | 0,92 | 0,19 | 0,12 | 0,009 | 7 | 4 |
| 1226+023 | 3C273 | 0,158 | Q | | 7,36 | 0,13 | $< 0,06$ | $> 0,17$ | 15 | 11 |
| 1253-055 | 3C279 | 0,538 | Q | 7,14 | 11,21 | 0,30 | $< 0,05$ | $> 0,88$ | 14 | 8 |
| 1641+399 | 3C345 | 0,594 | Q | 10,0 | 4,38 | 0,20 | 0,04 | 0,54 | 12 | 6 |
| 1803+784 | | 0,680 | B | | 1,62 | 0,15 | 0,08 | 0,125 | 8 | 0 |
| 2200+420 | BL Lac | 0,069 | B | 8 | 2,78 | 0,37 | $< 0,03$ | $> 0,15$ | 14 | 10 |
| 2223-052 | 3C446 | 1,404 | Q | 4,2 | 2,72 | 0,22 | $< 0,04$ | $> 0,65$ | 9 | 7 |
| 2230+114 | СТА 102 | 1,037 | Q | | 3,11 | 0,12 | $< 0,03$ | $> 1,27$ | 9 | 5 |
| 2251+158 | 3C454.3 | 0,859 | Q | 12,8 | 3,77 | 0,26 | 0,11 | 0,105 | 11 | 4 |

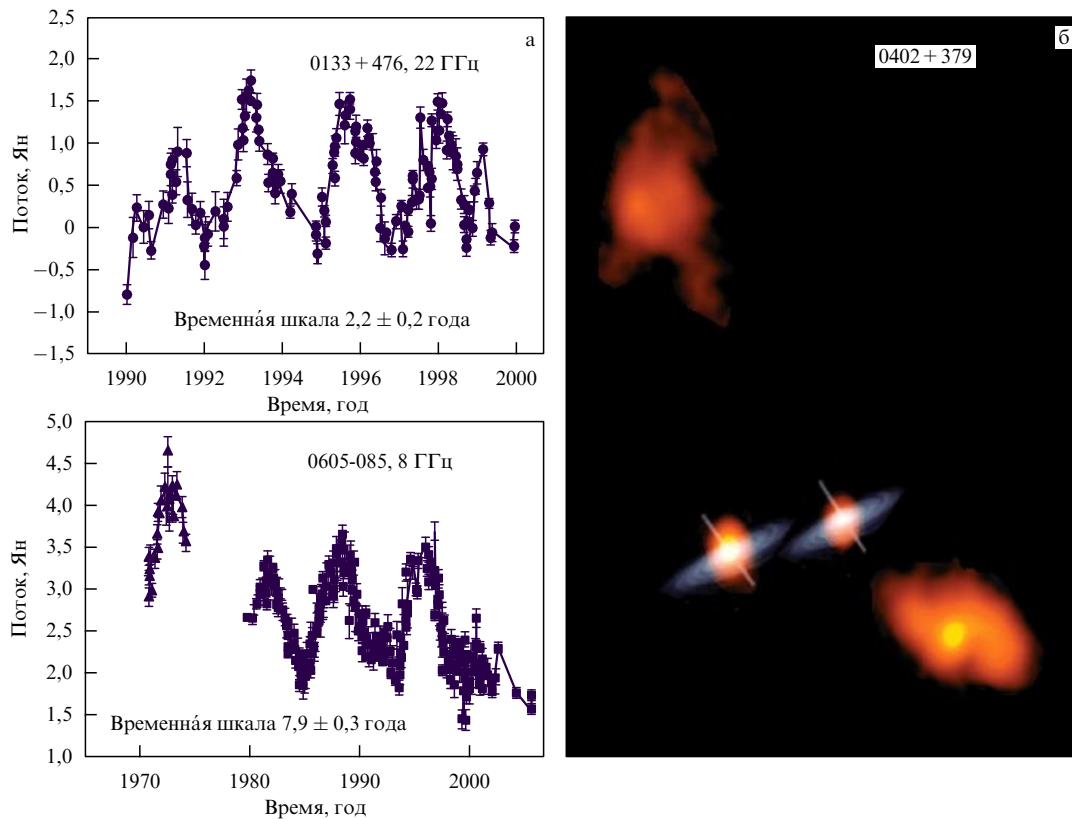


Рис. 10. (а) Периодические изменения потока у объектов 0133+476 и 0605-085. (б) Радиогалактика 0402+379, $z = 0,055$, расстояние между компонентами 7 мс дуги, наблюдения на частоте 15 ГГц с VLBA [24, 25].

максимальная величина таких собственных движений при больших красных смещениях остаётся вполне измеримой (рис. 12) [28]. Это означает, что можно исследовать и очень далёкие, и очень близкие объекты, и даёт ещё один метод определения космологических параметров и изучения эволюции внегалактических объектов.

Имеется ещё один метод — использовать хорошо известную величину и направление скорости движения Солнечной системы $V = 369,0 \pm 0,9$ км с $^{-1}$, $l = 263,99^\circ \pm 0,14^\circ$, $b = 48,26^\circ \pm 0,03^\circ$ [29], относительно реликтового фона и измерения собственных движений внегалактических источников для определения расстояний и космо-

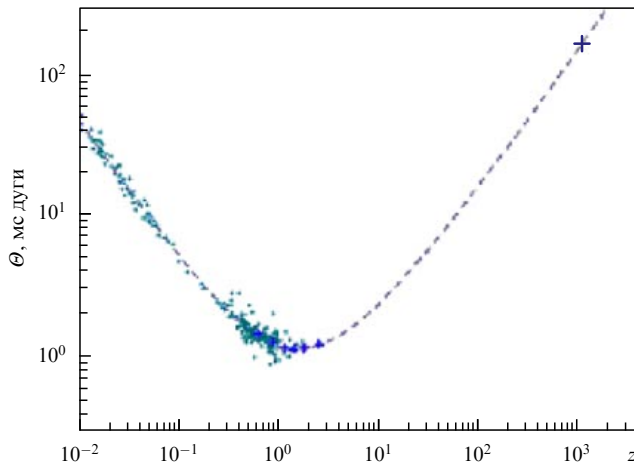


Рис. 11. Зависимость углового размера радиоисточника Θ от красного смещения z для активных галактических ядер позволяет получить параметры и данные об эволюции тёмной энергии, скрытой материи и самих источников. Проведены наблюдения 917 компактных источников с потоком более 0,5 Ян на частоте 2,29 ГГц. Каждый крест соответствует усреднению по 77 источникам. Точки в левой части рисунка (см. электронную версию рисунка на <http://www.ufn.ru>) — наблюдения сверхновых звёзд с пересчётом на размеры радиоисточников. Верхний правый крест соответствует размеру акустического пика реликтового фона [26, 27].

логических параметров [30]. Такие измерения для "Радиоастрона" возможны при красных смещениях величиной примерно до 0,05.

Представленные выше части программы исследований "Радиоастрон" связаны с изучением источников синхротронного излучения, охватывающего многие диапазоны частот. Качественно другой тип источников — это объекты с узкополосным мазерным излучением. Мощное узкополосное излучение наблюдается в линиях некоторых молекул для областей образования молодых звёзд и планетных систем. На рисунке 13 показана модель формирования такого излучения для области звездообразования и результаты наблюдений линии водяного пара в диапазоне 22 ГГц на интерферометрической решётке VLBA источника W3(OH) [31]. По горизонтальной оси отложена база интерферометра, по вертикальной — коррелированный поток. Видно, что источник является исключительно компактным, неразрешённым даже для самых больших баз.

На рисунке 13 показаны также источники мазерного излучения в той же линии вокруг ядра другой галактики, NGC4258 [32]. Вокруг центрального объекта (возможно, чёрной дыры) наблюдаются компактные области, излучающие в линии водяного пара. Они показаны точками; красные и синие точки (см. электронную версию рис. 13 на <http://www. ufn.ru>) означают движение от нас и к нам соответственно. Наблюдается целый класс подобных объектов (мегамазеры), отдельные детали которых до сих пор являются неразрешёнными и представляют собой объекты для исследования. Ожидаемые предельные яркостные температуры — до 10^{16} К [28].

Кроме определения структуры комплексов звездообразования и размеров отдельных областей, очень важным направлением исследований с космическим интерферометром представляется определение параллакса и собственных движений мазерных источников

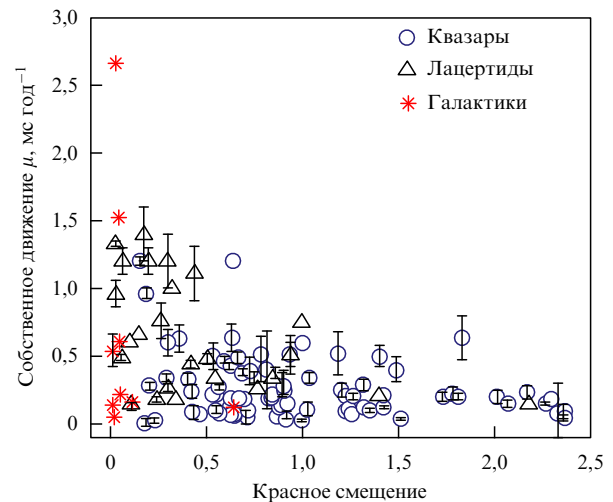


Рис. 12. Собственное движение "сверхсветовых" выбросов активных галактических ядер в зависимости от красного смещения [29].

для построения модели нашей и других галактик, а также космологии.

Когерентный механизм излучения обеспечивает и более высокие яркостные температуры. Этот механизм, вероятно, ответствен за радиоизлучение пульсаров — нейтронных звёзд. Однако их размеры настолько малы, что и космический интерферометр не сможет разрешить даже ближайшие объекты. На рисунке 14 показан метод, который фактически ещё 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 среду по разным траекториям. То есть интерферометр со много большими базами естественным образом возникает при прохождении лучей через облака межзвёздной плазмы. На рисунке 14 приведены также результаты наблюдений динамического спектра мерцаний пульсара PSR1237+25 с помощью радиотелескопа "Аресибо" на частоте 430 МГц [33,34]. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной отложена 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 [33, 34]. С помощью "Радиоастрона" этот метод, вероятно, позволит получить разрешение ещё в несколько сотен или даже тысяч раз более высокое, чем с помощью интерферометра Земля — космос.

Недавно был открыт новый класс пульсаров-магнетаров (PSR J1550-5418 — период 2,069 с и XTE J1810-5408 — период 5,54 с), обладающих аномальным спектром — плоским или даже растущим в сторону более

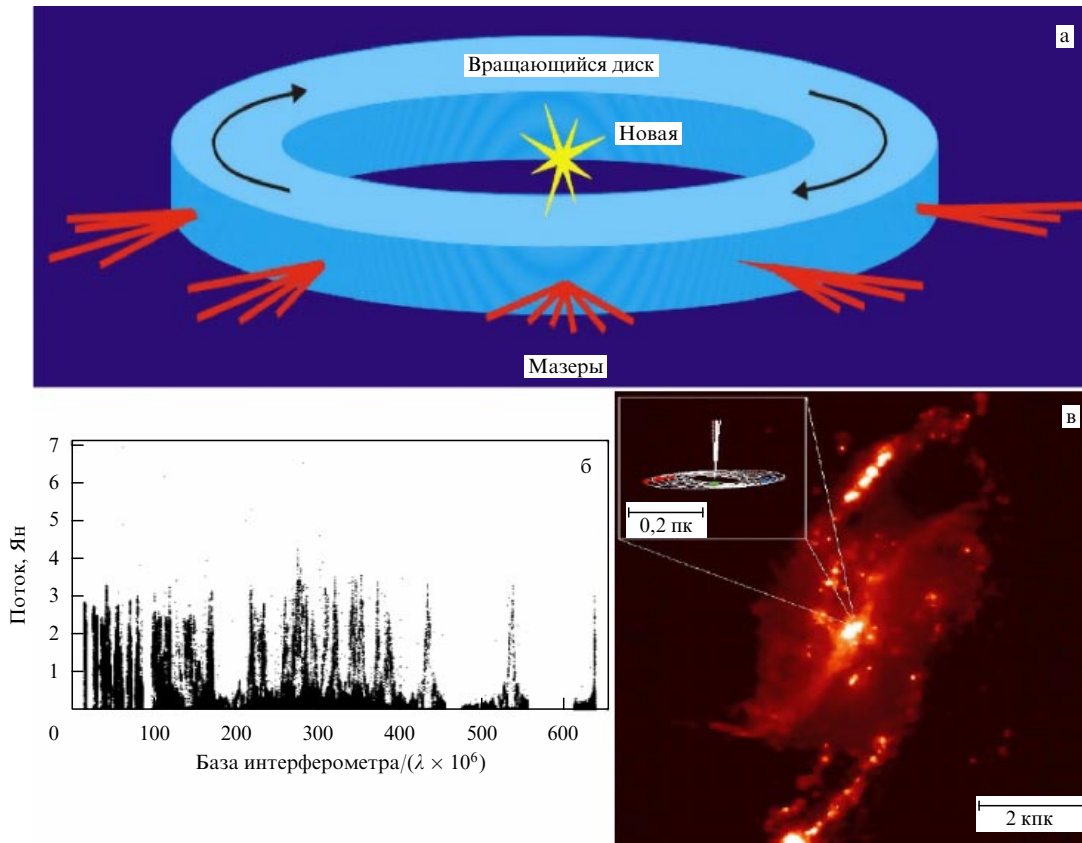


Рис. 13. (а) Модель области звездообразования с мазерами. (б) Зависимость наблюдаемого VLA коррелированного потока H_2O -мазера (≈ 22 МГц) для области W3(OH) от базы интерферометра (на горизонтальной оси значения в миллионах длин волн) [31]. (в) H_2O -мегамазер и изображение в линии $H\alpha$ галактики NGC4258, расстояние 6,4 Мпк [32].

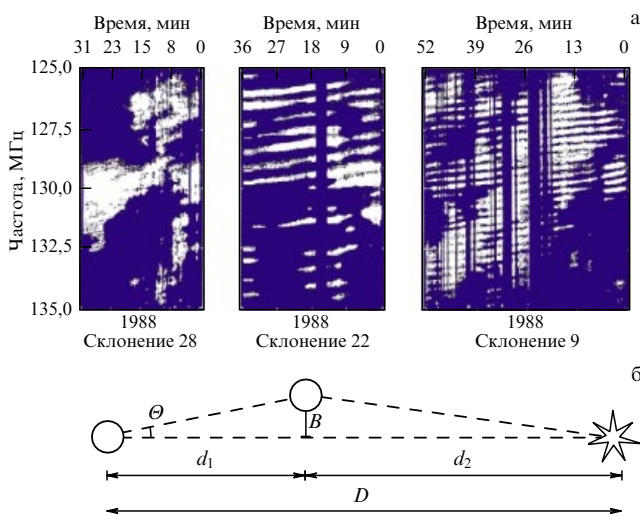


Рис. 14. (а) Динамические спектры пульсара PSR 1237+25, период 1,4 с, расстояние 560 пк, наблюдения на телескопе "Аресибо", диапазон 430 МГц [33, 34]. (б) Схема двулучевого "межзвёздного" интерферометра. B — база интерферометра, d_1 , d_2 и D — расстояния соответственно между наблюдателем и интерферометром, между интерферометром и источником и между наблюдателем и источником.

высоких частот в сантиметровом и миллиметровом диапазонах [35, 36]. То, каким образом возникает когерентное излучение на столь высоких частотах, т.е. как образуются столь малые неоднородности заряда, пред-

ставляется исключительно интересной проблемой. Эти объекты одновременно являются транзитными рентгеновскими источниками. Их пульсирующее радиоизлучение тоже возникает спорадически. На рисунке 15г 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 (см. рис. 15). Для таких импульсов зарегистрирован абсолютный рекорд яркостной температуры — 10^{40} К [37, 38]. Помимо исключительно интересного направления исследований того, где и как возникают такие явления в магнитосфере нейтронной звезды, возможно очень важное прикладное применение наблюдений гигантских импульсов — синхронизация времени на всей Земле с помощью наблюдений во многих точках и на "Радиоастроне".

В миссии "Радиоастрон" предполагается также изучить гравитационное поле Земли на основе анализа данных, получаемых из интерферометрических наблюдений и высокоточных наблюдений орбиты и её эволюции, которые включают в себя:

- измерение аномальных ускорений с точностью 10^{-10} м с $^{-2}$ и построение гравитационного потенциала Земли на больших расстояниях;
- проверка эффектов общей теории относительности (поперечный эффект Доплера, ход часов, уточнение величины красного смещения на два порядка, проверка закона гравитационного взаимодействия тел $1/R^2$).

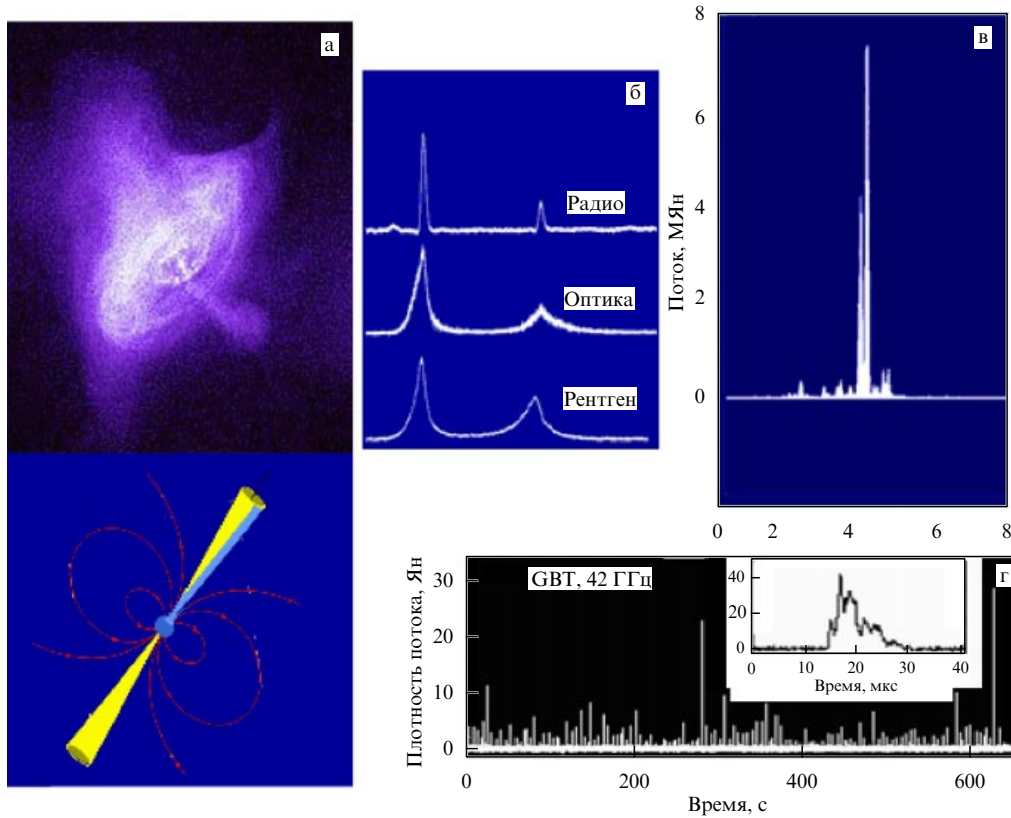


Рис. 15. (а) Изображение Крабовидной Туманности в рентгеновском диапазоне (обсерватория Чандра) и модель вращающейся нейтронной звезды с магнитным полем. (б) Запись в течение периода вращения нейтронной звезды (33 мс) нормальных импульсов в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах. (в) Сверхгигантский радиоимпульс пульсара в Крабовидной Туманности: поток около Земли 7×10^6 Ян в диапазоне 2,2 ГГц, яркостная температура $T > 10^{40}$ К, электромагнитное поле $H > 10^{12}$ Гс, наблюдения на РТ-64 в Калезине [37, 38]. (г) Запись источника ХТЕ J1810-540, который иногда является радиоизлучающим магнетаром, период 5,54 с, магнитное поле $2,6 \times 10^{14}$ Гс, наблюдения с телескопом GBT (Green Band Telescope) на частоте 42 ГГц [35, 36].

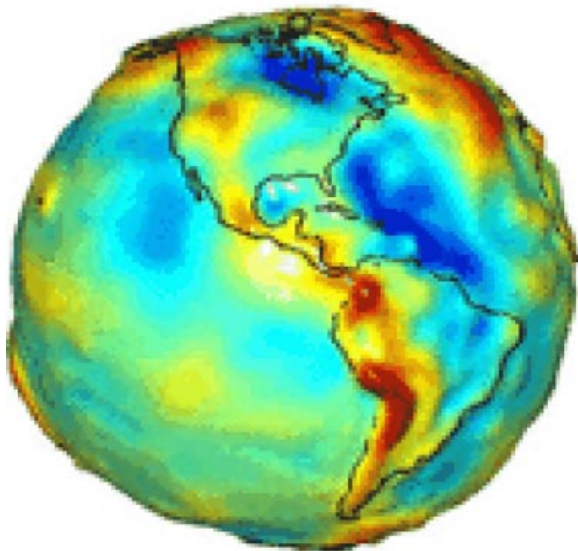


Рис. 16. Карта гравитационных аномалий по данным спутника GRACE [39].

На рисунке 16 показана карта гравитационных аномалий, построенная по наблюдениям с низколетящего спутника GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) [39], а "Радиоастрон" сможет построить гравитационное поле на гораздо больших расстояниях.



Рис. 17. Космическая обсерватория "Миллиметр" инфракрасного и миллиметрового диапазонов [40, 41], радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа в Узбекистане [42] и радиобсерватория ALMA в Чили [43].

Рисунок 17 иллюстрирует следующий за "Радиоастроном" космический проект "Миллиметр" [40, 41], отражающий дальнейшее развитие этого направления исследований в коротковолновые диапазоны (миллиметровый и инфракрасный — от 20 мм до 20 мкм) с помощью 12-метрового рефлекторного криогенного телескопа на орбите около точки Лагранжа L_2 (удаление от Земли около 1,5 млн км). Как наземное плечо

космического интерферометра предполагается использовать в Северном полушарии радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа в Узбекистане [42], а в Южном полушарии — радиотелескоп ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) [43] на плато Чайнатор в Чили (большая антенная решётка из 68 рефлекторов диаметром 12 м, работающих на частоте до 1 ТГц, т.е. на длине волны 300 мкм). В целом, "Миллиметр" позволит получать изображение источников с разрешением до нескольких наносекунд дуги (т.е. в несколько миллиардов раз лучшим разрешением, которое даёт человеческий глаз), а в автономном режиме будет обладать очень высокой чувствительностью (до нескольких нЯн потока) благодаря глубокому охлаждению всего телескопа до температуры 4–5 К и ещё более глубокому охлаждению приёмников.

Запуск обсерватории "Радиоастрон" планируется за ближайший год, продолжительность исследований — более пяти лет. Запуск обсерватории "Миллиметр" предполагается осуществить до 2020 г., продолжительность исследований — более 10 лет.

Список литературы

1. Саломонович А Е (Отв. ред.) *Развитие радиоастрономии в СССР* (М.: Наука, 1988)
2. Алексеев В А и др. *Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца* (Отв. ред. А Е Саломонович, Г Я Смольков) (М.: Наука, 1990)
3. Шкловский И С *Из истории развития радиоастрономии в СССР* (Новое в жизни, науке, технике. Космонавтика, астрономия, Вып. 11) (М.: Знание, 1982)
4. Гинзбург В Л *О науке, о себе и о других* 3-е изд. (М.: Физматлит, 2003) с. 126 [Ginzburg V L *About Science, Myself, and Others* (Bristol: IOP Publ., 2005)]
5. RadioAstron, <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>
6. Матвеев Л И, Кардашев Н С, Шоломицкий Г Б *Изв. вузов. Радиофиз.* **8** 651 (1965) [Matveenko L I, Kardashev N S, Sholomitskii G B *Radiophys. Quantum Electron.* **8** 461 (1965)]
7. Kardashev N S, Kreisman B B, Ponomarev Yu N, in *Radioastronomical Tools and Techniques* (Eds N S Kardashev, R D Dagkesamanskii) (Cambridge: Cambridge Sci. Publ., 2007) p. 3
8. Andreyanov V V et al., in *Radioastronomical Tools and Techniques* (Eds N S Kardashev, R D Dagkesamanskii) (Cambridge: Cambridge Sci. Publ., 2007) p. 17
9. Вольвач А Е, Вольвач Л Н, Кардашев Н С, Ларионов М Г *Астрон. журн.* **85** 483 (2008) [Vol'vach A E, Vol'vach L N, Kardashev N S, Larionov M G *Astron. Rep.* **52** 429 (2008)]
10. Мингалиев М Г, Сотникова Ю В, Бурсов Н Н, Кардашев Н С, Ларионов М Г *Астрон. журн.* **84** 387 (2007) [Mingaliev M G, Sotnikova Yu V, Bursov N N, Kardashev N S, Larionov M G *Astron. Rep.* **51** 343 (2007)]
11. Kovalev Y Y et al. *Astron. J.* **130** 2473 (2005)
12. Kellermann K I et al. *Astrophys. J.* **609** 539 (2004)
13. Broderick A E, Loeb A, arXiv:0812.0366
14. Zavala R T, Taylor G B *Astrophys. J.* **550** L147 (2001)
15. Кардашев Н С, Новиков И Д, Шацкий А А *Астрон. журн.* **83** 675 (2006) [Kardashev N S, Novikov I D, Shatskii A A *Astron. Rep.* **50** 601 (2006)]
16. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008) [Shatskii A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)]
17. Новиков И Д, Кардашев Н С, Шацкий А А *УФН* **177** 1017 (2007) [Novikov I D, Kardashev N S, Shatskii A A *Phys. Usp.* **50** 965 (2007)]
18. Кардашев Н С *УФН* **177** 553 (2007) [Kardashev N S *Phys. Usp.* **50** 529 (2007)]
19. Bluemer J for the Pierre Auger Collab., arXiv:0807.4871
20. Кардашев Н С *Астрон. журн.* **77** 813 (2000) [Kardashev N S *Astron. Rep.* **44** 719 (2000)]
21. Dodson R, Fomalont E, Wiik K, arXiv:0901.1493
22. Bach U et al., arXiv:0802.3823
23. Fuhrmann L et al., arXiv:0809.2227
24. Krichbaum T, <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/vsop2bonn/pdf/krichbaum.pdf>
25. Rodriguez C et al. *Astrophys. J.* **646** 49 (2006)
26. Jackson J C, Jannetta A L *JCAP* **0611** 002 (2006); astro-ph/0605065
27. Jackson J C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **390** L1 (2008); arXiv:0810.3930
28. Zhang Y-W, Fan J-H *Chin. J. Astron. Astrophys.* **8** 385 (2008)
29. Hinshaw G et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 225 (2009)
30. Кардашев Н С *Астрон. журн.* **63** 845 (1986) [Kardashev N S *Sov. Astron. Rep.* **30** 501 (1986)]
31. Slysh V I *ASP Conf. Proc.* **300** 239 (2003)
32. Miyoshi M et al. *Nature* **373** 127 (1995)
33. Wolszczan A, Cordes J M *Astrophys. J.* **320** L35 (1987)
34. Шишов В И *Астрон. журн.* **78** 229 (2001) [Shishov V I *Astron. Rep.* **45** 195 (2001)]
35. Camilo F et al. *Nature* **442** 892 (2006); astro-ph/0605429
36. Camilo F et al. *Astrophys. J.* **669** 561 (2007)
37. Popov M V et al., arXiv:0903.2652
38. Soglasnov V, astro-ph/0701190
39. Gravity Recovery and Climate Experiment, <http://nasascience.nasa.gov/missions/grace/>
40. Millimetron Project, http://www.asc.rssi.ru/millimetron/eng/millim_eng.htm
41. Wild W, Kardashev N (On behalf of the Millimetron consortium) *Exp. Astron.* **23** 221 (2009); <http://www.springerlink.com/content/621161q85n614328/fulltext.pdf>
42. Радиотелескоп РТ-70 Международной радиоастрономической обсерватории "Суффа", <http://www.asc.rssi.ru/suffa>
43. Wootten A, Thompson A R *Proc. IEEE* **97** 1463 (2009); arXiv:0904.3739

RadioAstron: a radio telescope many times the size of the Earth. Research program

N.V. Kardashev

Astro Space Center of P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
 Tel. (7-495) 333-2189, (7-495) 334-8506. Fax (7-495) 333-2378
 E-mail: ncardash@asc.rssi.ru

A number of earthbound radio telescopes and one in a terrestrial orbit with the apogee at about the Earth–Moon distance have been combined to make an interferometer that provides an angular resolution of up to a few microarcseconds for exploring astronomical objects such as pulsars, star formation regions and black holes. Black hole horizon physics, cosmic ray acceleration regions and assumed wormhole entrances are becoming accessible to study for the first time.

PACS numbers: 01.30.Bb, 95.55.Jz, 95.85.Bh, 95.85.Fm, 97.60.Gb

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911e.1191

Bibliography — 43 references

Received 15 June 2009

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (11) 1191–1202 (2009)

Physics–Uspekhi **52** (11) (2009)