

## СЕМЬ ЛЕТ “РАДИОАСТРОНА”



**Ю.Ю. КОВАЛЕВ,**

член-корреспондент РАН

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
Московский физико-технический институт

DOI: 10.7868/S0044394819050013

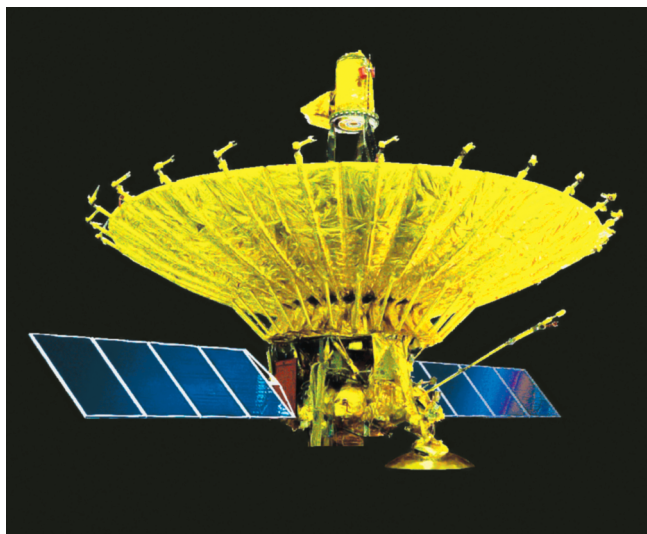
**В июле 2019 г. исполнилось восемь лет с момента запуска 10-метрового радиотелескопа проекта “РадиоАстрон”. Выведенный 18 июля 2011 г., “Спектр-Р” проработал в космосе семь с половиной лет вместо запланированных трех. Совместно с крупнейшими наземными радиообсерваториями многих стран мира наш радиотелескоп позволял изучать далекие и яркие объекты во Вселенной: квазары, пульсары, космические мазеры. В мае 2019 г. работа орбитального аппарата завершилась, но обработка собранных данных продолжается. Ниже мы расскажем о самых ярких результатах “РадиоАстрона”, полученных к настоящему времени, и немного – о перспективах космической радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами.**

### РАДИОАСТРОН: ПРЕДЫСТОРИЯ

В 1931 году американец Карл Янский, радиоинженер и сотрудник лаборатории телефонной компании “Белл”, определил, что космические объекты являются источниками радиоволн. Хотя работы Янского нашли признание в научной среде не сразу, но тем не менее начало нового направления

науки – радиоастрономии – сейчас отсчитывают именно от них. Открылось новое “окно” для изучения космоса, и свой взор в него устремили радиотелескопы.

Спустя еще тридцать четыре года с начала радиоастрономии советские ученые Леонид Матвеевко, Николай Кардашев и Геннадий Шоломицкий теоретически обосновали возможность значительно повысить разрешающую



Космическая обсерватория  
"Спектр-Р". Изображение  
А. Захаров, ИКИ-Дизайн

способность радиотелескопов, то есть возможность различать наименьшие детали во время наблюдения. Идея состояла в одновременном использовании нескольких параболических антенн, размещенных на большом расстоянии друг от друга. Технологию назвали радиоинтерферометрией со сверхдлинными базами (РСДБ). Суть изобретения состояла в том, чтобы одновременно принимать радиосигнал от одного источника на несколько очень далеко разнесенных антенн так, будто его принимала одна антенна с диаметром, равным расстоянию между принимающими антеннами.

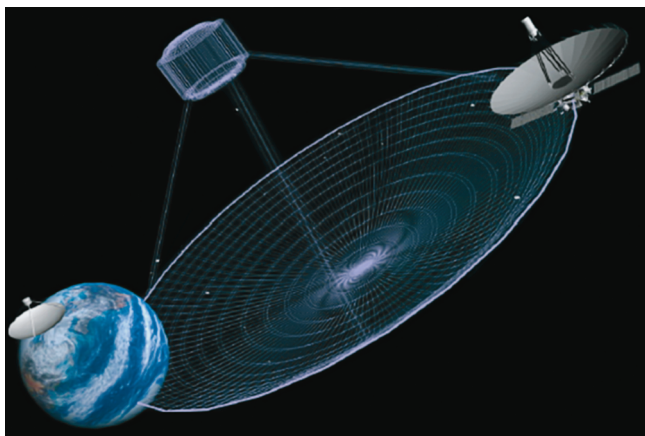
Такой метод позволяет изучать очень удаленные и очень компактные объекты космоса, если они являются яркими источниками

радиоволн. И чем больше расстояние между антеннами, тем больше разрешающая способность системы.

Осознав перспективы, которые открываются с такой технологией, ученые разных стран быстро договорились совместно использовать все большие радиотелескопы мира для наблюдения наиболее интересных астрономических объектов. Единственным ограничением оказались не государственные границы, а диаметр планеты Земля, на которой расположены антенны. Типичное угловое разрешение наземных РСДБ-сетей на сантиметровых длинах волн составляет величину порядка одной тысячной угловой секунды, в 50 раз лучше разрешения космического телескопа имени Хаббла.

Логичным решением этой проблемы и еще большего увеличения разрешающей способности телескопов оказалось вынесение хотя бы одной антенны в космос.

Схематичное представление  
интерферометра  
со сверхдлинной базой,  
который создает антенны  
в космосе и на Земле.  
Рисунок госкорпорации  
"Роскосмос"



Первый эксперимент с космическим радиотелескопом был проведен в Советском Союзе. На околоземной долговременной орбитальной станции “Салют-6” (1977–1982 гг.) космонавты Владимир Ляхов и Валерий Рюмин развернули 10-метровый радиотелескоп (КРТ-10).

После этого в Советском Союзе приступили к разработке проекта наземно-космического радиотелескопа “РадиоАстрон”, который работал бы уже на отдельном космическом аппарате. Но производству и запуску помешали события, связанные с распадом СССР.

Более десяти лет работы по нему были фактически законсервированы, но проект тем не менее жил. Уже в 2000-е годы XXI века ученые и инженеры Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН) значительно пересмотрели его, учитывая последние достижения науки и техники. И с 2004 г. началось возрождение “РадиоАстрона”: продолжилось создание космической обсерватории по заказу Федерального космического агентства “Роскосмос”.

Главной технической сложностью были разработка и запуск космического радиотелескопа (КРТ) с раскладной антенной диаметром 10 м. Зеркало такого размера не поместится под головной обтекатель – была создана складная конструкция, состоящая из 27 сегментов-“лепестков”, которая должна была развернуться уже на орбите. Качество поверхности собирающего зеркала должно было быть очень высоким – с отклонениями не более 1 мм. Систему автоматического раскрытия антенны и спутниковую платформу создавали в Научно-производственном объединении им. С.А. Лавочкина. Космический аппарат получил название “Спектр-Р” (“Р” – сокращение от “радио”).



Почтовая марка СССР в честь 175-суточного полета экипажа “Союз-32” В.А. Ляхова и В.В. Рюмина на орбитальную станцию “Салют-6”. 1979 г.

Вторая техническая сложность – нужно очень хорошо синхронизировать время на разных антеннах. Без этого радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами не дает значительного преимущества, поскольку только при совпадении по времени записей сигналов, полученных разными

Космическая обсерватория “Спектр-Р” в сборочном комплексе НПО им. С.А. Лавочкина, 2010 г. Фото НПО им. С.А. Лавочкина



антеннами, удастся их скоррелировать или “объединить” в один общий сигнал. Для этого на каждом радиотелескопе, участвующем в сети РСДБ, устанавливается так называемый “водородный стандарт частоты” – сверхточные атомные часы. Для наземных телескопов здесь нет больших проблем, но для радиотелескопа на орбите также нужны атомные часы, достаточно точные, малой массы и размера, готовые к суровым условиям космоса. В нижегородской компании “Время-Ч” для “РадиоАстрона” специально разработали компактный водородный стандарт частоты.

Наконец, необходимо знать с высочайшей точностью координаты каждого телескопа, участвующего в наблюдениях. Разработкой и высокоточным определением параметров орбиты “Спектра-Р” занимался Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Его сотрудники смогли вос-

становливать орбиту аппарата с точностью лучше 1 см/с. Этого достаточно для получения интерферометрического сигнала на самой короткой длине волны наблюдений 1,3 см.

Накопление и корреляционная обработка научной информации производится в АКЦ ФИАН в Москве. Позже в обработке информации проекта “РадиоАстрон” приняли участие Институт радиоастрономии общества Макса Планка (Германия) и Объединенный европейский институт РСДБ (Нидерланды).

---

## НАЧАЛО РАБОТЫ

---

Старт космического аппарата “Спектр-Р” с 10-метровым космическим радиотелескопом на борту состоялся в июле 2011 г. с космодрома Байконур. Ракета “Зенит-2” и разгонный блок “Фрегат” вывели спутник на штатную орбиту. Через несколько дней 27 “лепестков” радиотелескопа успешно раскрылись, подобно зонтику.

Орбита для космического радиотелескопа была выбрана сильно вытянутая – эллиптическая: 1000 км от поверхности Земли в самой близкой точке и 350 тыс. км – в самой дальней. Такой полет позволяет проводить наблюдения на разных расстояниях от наземных обсерваторий, т.е. менять длину базы, от которой зависит разрешающая способность составного телескопа. Максимальная длина базы интерферометра “РадиоАстрона” равнялась почти 27 диаметрам Земли.

Длительность одного витка “Спектр-Р” на околоземной орбите составляла



---

*Космическая обсерватория “Спектр-Р” со сложенными “лепестками” антенны радиотелескопа в сборочном комплексе НПО им. С.А. Лавочкина, 2010 г.  
Фото НПО им. С.А. Лавочкина*

*а**б*

*Радиотелескопы: а – 140-футовый, в Грин Бэнк, Национальной радиоастрономической обсерватории, США. Фото Ю.Ю. Ковалёва; б – РТ-22, в Пуцзинской радиоастрономической обсерватории. Фото АКЦ ФИАН*

9 суток. Для постоянной работы требовались две наземные станции приема научных данных в разных полушариях. С восточного полушария связь поддерживалась 22-метровым радиотелескопом Пуцзинской радиоастрофизической обсерватории в Московской области. С 2013 г. в западном полушарии связь и прием информации обеспечивался через 43-метровый радиотелескоп американской обсерватории Грин Бэнк.

Первые три месяца полета “Спектра-Р” инженеры и ученые анализировали работоспособность служебных и научных систем, проводили тестовые включения приборов, определяли фактические характеристики инструмента. В сентябре 2011 г. телескоп увидел “первый свет”, т.е. успешно провел первые наблюдения радиоизлучения сверхновой Кассиопея А. Подтвердив

работоспособность приемной аппаратуры на всех четырех длинах волн радиодиапазона: 92 см, 18 см, 6 см и 1,3 см, – обсерватория перешла к испытаниям в режиме интерферометра.

В ноябре 2011 г. серия наземно-космических экспериментов с радиотелескопами России, Украины, Европы и США подтвердила работоспособность телескопа в режиме интерферометра. Проект “РадиоАстрон” официально стартовал!

### **НАУЧНАЯ ПРОГРАММА: РАННЯЯ, КЛЮЧЕВАЯ, ИНИЦИАТИВНАЯ**

Первые два года работы “РадиоАстрона” проходили по ранней научной программе. Она включала в себя наблюдения ядер активных галактик, пульсаров, космических мазеров

совместно с крупнейшими радиообсерваториями мира. Для космического аппарата в это время проходили летные испытания; ученые и инженеры продолжали изучать возможности радиотелескопа в космическом пространстве, определяли научные перспективы, которые открывал “РадиоАстрон”. Важно заметить, что никто никогда в мире не наблюдал ранее космические объекты с реализованным экстремальным угловым разрешением. Ученым необходимо было оперативно получить первые результаты для оптимизации дальнейшей программы исследований.

Возможности радиотелескопа “РадиоАстрон” оценивались по нескольким направлениям:

- зависимость качества наблюдений от расстояния между Землей и космическим аппаратом, т.е. от длины базы интерферометра. Сначала наблюдения велись на небольших базах, потом расстояние увеличивали, повышая сложность;

- прием сигналов на различных диапазонах длин радиоволн – радиоволны разной длины по-разному взаимодействуют с космическим пространством

и так же влияют на разрешающую способность (чем короче длина волны, тем выше разрешение телескопа);

- время когерентности – максимальная длительность накопления сигнала от космического радиисточника без существенных потерь;

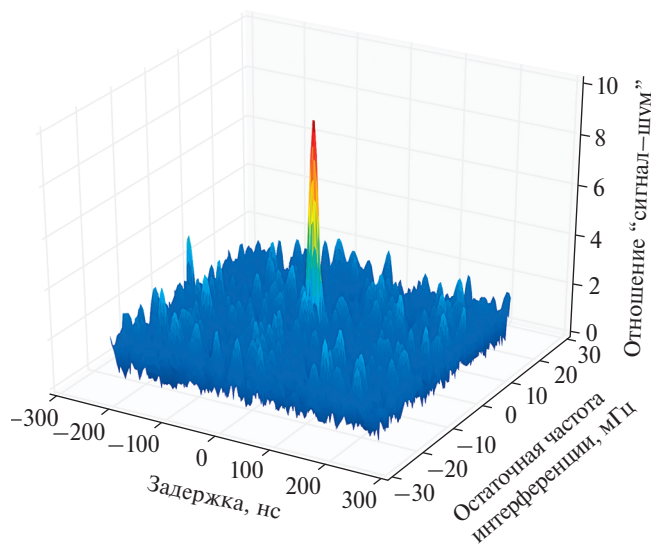
- взаимодействие с многочисленными научными институтами и наземными радиообсерваториями разных стран.

Результаты подтвердили новые возможности, которые открылись перед радиоастрономами всего мира. Так, разрешающая способность наземно-космического интерферометра оказалась в десять раз выше, чем могли получить радиотелескопы с Земли (а последующие наблюдения позволили еще увеличить этот показатель).

С 2013 г. в проекте “РадиоАстрон” был объявлен открытый конкурс заявок. Данное событие стало завершением ранней и ознаменовало начало Ключевой научной программы. С этого момента любой ученый мира мог предложить цель для исследования и обосновать ее научную значимость. Более 200 ученых из 19 стран подключились к работе в проекте.

Исходя из возможностей “РадиоАстрона” международный программный комитет, состоявший из ученых России, Австралии, Европы и США, рекомендовал следующие наиболее перспективные направления исследований:

- картографирование ядер активных галактик (квазаров);



*Зарегистрированный интерферометрический сигнал квазара 3С 273 в созвездии Девы. По данным Ю.Ю. Ковалева и др. (2016)*

Активная галактика с джетами, в представлении художника. Такие галактики были одними из основных объектов изучения в проекте "РадиоАстрон".  
Рисунок "Cosmvision"

---

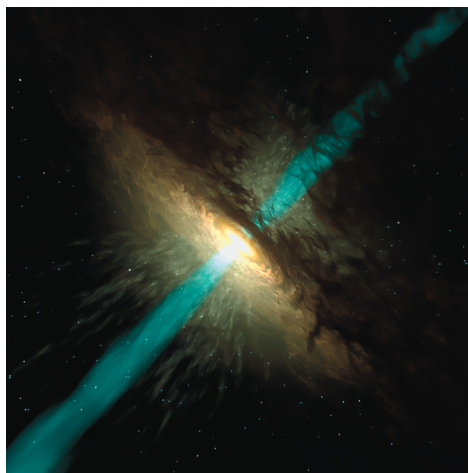
- картографирование релятивистских струй (джетов) из ядер активных галактик;
- измерение яркостной температуры ядер активных галактик;
- наблюдение пульсаров;
- изучения свойств межзвездной плазмы нашей Галактики при помощи излучения пульсаров и квазаров, а также в направлении центра Галактики;
- картографирование и изучение структуры космических мазеров в нашей галактике;
- поиск и наблюдение мегамазеров в дисках соседних галактик;
- проверка принципа эквивалентности Общей теории относительности через измерение гравитационного красного смещения.

Благодаря продленному сроку активного существования "Спектра-Р", научную программу удалось увеличить с трех до семи лет. В последние годы она включала как ключевые проекты, так и инициативные более компактные задачи. Наблюдения велись до начала 2019 г.

Сегодня можно констатировать, что "РадиоАстрон" позволил ученым лучше понять строение и свойства компактных радиоисточников как в нашей Галактике Млечный путь, так и в далеких активных галактиках и квазарах.

"РадиоАстрону" удалось достичь выдающихся научных результатов по следующим направлениям:

- наблюдать астрофизические объекты с рекордным разрешением;
- уточнить гипотезы о строении активных ядер галактик, формировании, магнитном поле, внутренней структуре



- и механизме излучения релятивистских струй и космических мазеров;
- обнаружить новые свойства космического пространства и астрофизических объектов, не наблюдавшиеся ранее;
- освоить новые методы наблюдений, исходя из новых знаний о распространении радиоволн в межзвездной среде.

---

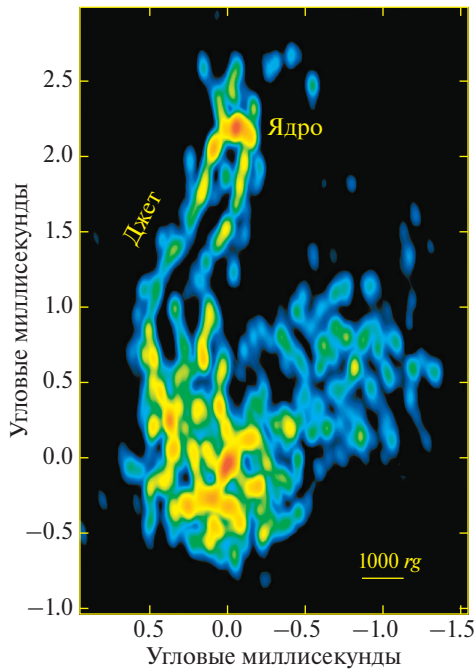
## ЧТО УВИДЕЛ "РАДИОАСТРОН"?

---

Какие же открытия сегодня можно назвать наиболее важными? Заметим, что ответ на этот вопрос зависит от учебного, с которым вы говорите...

### Открыта экстремальная яркость квазаров

Около полувека назад было показано, что яркость ядер квазаров не может превосходить определенный предел. Он измеряется в величине так называемой яркостной температуры и равен примерно  $10^{12}$  К. Причина предела связана со следующим. Если в ядрах квазаров излучают релятивистские электроны, то они начнут лавинообразно терять энергию за счет эффекта обратного комптоновского рассея-



Ядро галактики Персей А (NGC 1275)  
в радиодиапазоне. По данным  
Г. Гюваннини и др. (2018)

ния при превышении этой величины. Проще говоря, передадут свою энергию тем самым фотонам, которые излучили, в результате столкновений с ними. За типичное время на уровне нескольких часов сгусток плазмы вернется к уровню яркости ниже указанного предела. “Поймать” такой момент практически невозможно. Десятки лет ученые наблюдали квазары с Земли и подтверждали предсказание теории. Однако размер планеты Земля не позволяет зарегистрировать экстремальные величины яркости квазаров. Единственный вариант – выход в космос...

“РадиоАстрон” измерил яркость около 150 активных галактик, и яркостная температура, то есть интенсивность излучения, многих из них оказалась аномально высока: она

в несколько десятков раз превышает теоретически допустимую и ранее наблюдавшуюся. Современные гипотезы не позволяют однозначно объяснить причины поддержания обнаруженной яркости. Среди предложенных идей убедительно выглядит предположение об излучении релятивистских протонов. Однако пока не ясны механизмы их ускорения до околосветовой скорости.

### Аккреционные диски тоже могут закручивать джеты

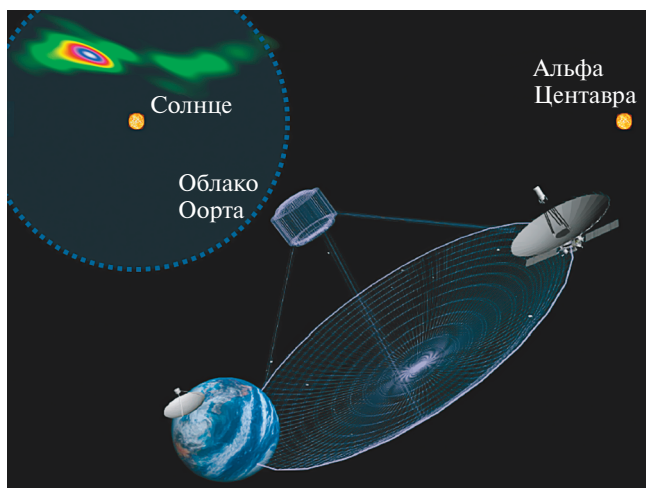
Десятки лет происходит борьба между двумя теориями, описывающими процесс формирования джетов – выбросов горячего вещества из центров галактик. Одна модель использует для закрутки джета центральную сверхмассивную черную дыру. Именно этот механизм считался основным у квазаров. Другая модель предполагала, что аккреционный диск галактик может выполнять эту функцию вместо черной дыры. Проверить это было практически невозможно из-за недостаточного углового разрешения интерферометров.

Наблюдение “РадиоАстроном” процесса формирования релятивистской струи (джета) из ядра близкой активной галактики Персей А с расстояния 230 млн световых лет показало связь между появлением джета и аккреционным диском вокруг центральной сверхмассивной черной дыры.

Изображение получено с беспрецедентным угловым разрешением, позволившим измерить ширину основания джета и исследовать детали структуры размером до 12 световых дней. Оказалось, что струя формируется сразу очень широкой – в сотни гравитационных радиусов. Черная дыра не в состоянии сформировать такую струю релятивистской плазмы. Получено пер-



Изображение выброса в активной галактике VL Lacertae в созвездии Ящерицы (900 млн св. лет от нас), полученное “РадиоАстроном” на длине волны 1,3 см. Для сравнения приведены размеры Солнца, облака Оорта и Альфа Центавра. Измерено фарадеевское вращение в основании выброса. По данным Х.-Л. Гомес и др. (2016)



вое подтверждение гипотезы “запуска” джета из аккреционного диска вокруг черной дыры, а не самой дырой.

### Определена структура магнитного поля в области ускорения джетов ядер активных галактик

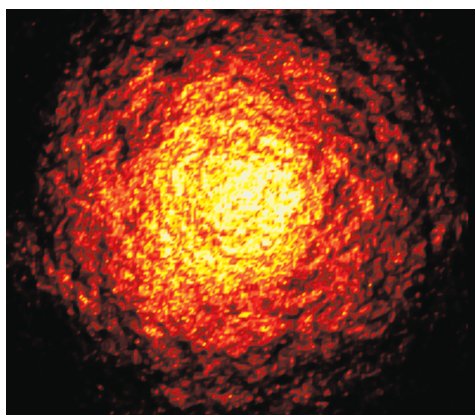
Магнитное поле играет ключевую роль в процессе формирования джетов в активных галактиках. Поэтому важно получить информацию о структуре магнитного поля в основании джетов. Это делается при помощи измерений направления электрического вектора линейной поляризации и фарадеевского вращения. “РадиоАстрон” дал возможность провести подобные измерения, требующие высочайшей чувствительности, так как поляризационный поток составляет не более нескольких процентов от полного принимаемого сигнала.

Поляризационное картографирование в проекте “РадиоАстрон” на длине волны 1,3 см с экстремальным угловым разрешением позволило выяснить, что магнитное поле имеет тороидальную форму. Оно работает как магнитная пружина, разгоняя и выталкивая плазму наружу.

### Обнаружен эффект экстремальной стратификации плазмы в галактических выбросах

Практически совершенно неизученными были свойства релятивистской плазмы в галактических выбросах из-за недостаточно высокого разрешения наземных интерферометров. Ученым удалось увидеть на “РадиоАстроне” эффект поярчения к краю в струях активных галактик. Это означает, что горячий газ течет быстрее по центру и медленнее на краях джетов из-за трения о межзвездную среду. Причем разница в скорости течения плазмы оказалась неожиданно крайне высока.

Описанное выше далеко не исчерпывает всех результатов, полученных в проекте. Можно вспомнить также, например, изящное открытие, полученное при изучении пульсаров, – был выявлен новый эффект рассеяния радиоволн в межзвездных облаках плазмы. Названный “субструктура рассеяния”, этот эффект вносит искажение в изображения высокого разрешения. Он, таким образом, “вредит” самим изображениям, но позволяет



*Компьютерная модель субструктуры рассеяния точечного радиоисточника демонстрирует новый эффект рассеяния, открытый "РадиоАстроном". По данным М. Джонсон и др. (2016)*

определять структуру и плотность межзвездного вещества в пространстве между Землей и пульсарами. Его необходимо учитывать и при исследовании центра Млечного пути, что стало важным вкладом в задачу поиска тени черной дыры в центре нашей галактики.

Еще одно открытие – в области звездообразования Цефей А, находящейся на расстоянии около 2 тыс. световых лет от Земли, впервые удалось разглядеть мельчайшие, сравнимые по размеру с Солнцем, источники мазерного излучения водяного пара. Ранее приборы были неспособны рассмотреть объекты такой величины на таком расстоянии, и новые данные позволяют лучше понять происхождение этих объектов. Предполагается, что наблюдаемые космические мазеры связаны с турбулентными вихрями в потоке газа от формирующейся массивной звезды.

Наконец, с помощью аппарата "Спектр-Р" были проверены эйнштейновский принцип эквивалентности и Общая теория относительности. Во-

дородный стандарт частоты на борту "Спектра-Р" в течение первых шести лет полета позволил провести десятки экспериментов по измерению эффекта гравитационного замедления времени. Анализ данных продолжается; по результатам их частичной обработки уже достигнута точность на уровне схожего эксперимента "Gravity Probe A" (0,01%), проведенного в США в 1976 г. По результатам дальнейшей обработки ожидается повышение точности примерно в 10 раз.

---

## "РАДИОАСТРОН": ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ

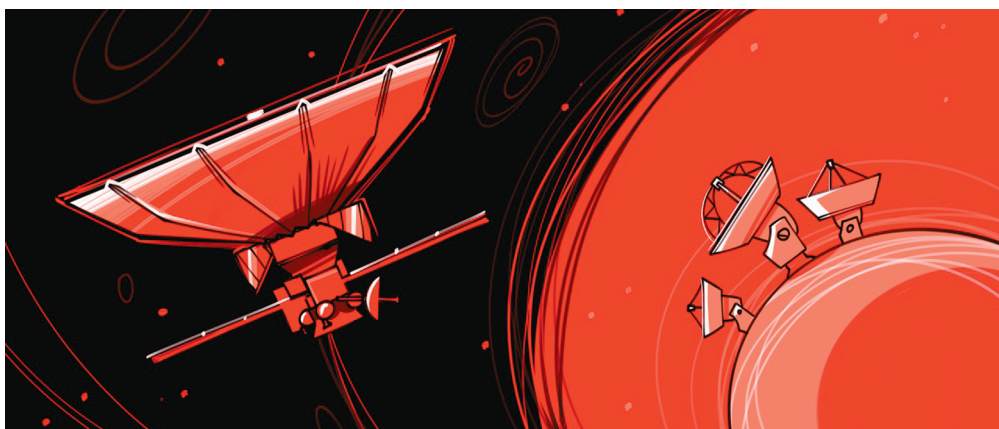
---

В январе 2019 г. произошел сбой командного радиокomплекса на космическом аппарате "Спектр-Р". В мае Государственная комиссия "Роскосмоса" приняла решение прекратить попытки восстановления связи.

Таким образом, проект "РадиоАстроН" был завершен, но работа с полученными данными продолжается. Обработка российскими и международными научными группами накопленной в проекте информации – а это более 4 петабайт данных, которые хранятся в АКЦ ФИАН, потребует нескольких лет, так что можно ожидать новые открытия.

Кроме этого, коллектив АКЦ ФИАН совместно с инженерами НПО им. С.А. Лавочкина и ИСС им. М.Ф. Решетнева занимается разработкой нового проекта "Миллиметрoн" по заказу ГК "Роскосмос".

В этом проекте предстоит развить идеи, воплощенные в проекте "РадиоАстроН". Космический аппарат "Спектр-М" с телескопом миллиметрового диапазона (отсюда буква "М" в названии) должен быть выведен на расстояние 1,5 млн км от Земли в точку Лагранжа  $L_2$  (сейчас в эту точку движется астрофизическая рентгеновская обсерватория "Спектр-РГ"). Это обеспечит базу беспрецедентного разме-



Проект космической обсерватории "Миллиметрон", в представлении художника К. Калуцкой

ра и даст астрофизикам мира уникальные возможности по исследованию объектов Вселенной на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. При таком разрешении можно будет, в частности, построить изображение черной дыры в центре нашей галактики и гораздо более детально разглядеть многие другие объекты (в том числе за ее пределами).

### Список рекомендуемой литературы

1. Фундаментальные космические исследования / В 2 кн. Под науч. ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. Кн. 1: Астрофизика.
2. Многоканальная астрономия. Ред.-сост. ак. А.М. Черепашук – Фрязино, Московская область: Век 2, 2019.

### "РадиоАстрон" в цифрах:

**7,5 лет** научной работы на орбите;

**26,7 диаметра Земли (350 тыс. км)** – максимальная база интерферометра;

**8 микросекунд дуги** – максимальное разрешение – при наблюдении мазеров водяного пара в аккреционном диске в галактике М106 (мегамазер);

**1 секунда за 3 млн лет ( $10^{-14}$  с/с)** стабильность водородного стандарта частоты производства "Время-Ч" (Нижний Новгород);

**10 м** – диаметр антенны КА "Спектр-Р" – абсолютный рекорд для космических радиотелескопов с заполненной апертурой;

**До 25 радиотелескопов** на Земле в одновременной работе;

**Всего 58 радиотелескопов** участвовало в наблюдениях "РадиоАстрона" (из России, Европы, США, Африки, Австралии, КНР, Южной Кореи, Японии);

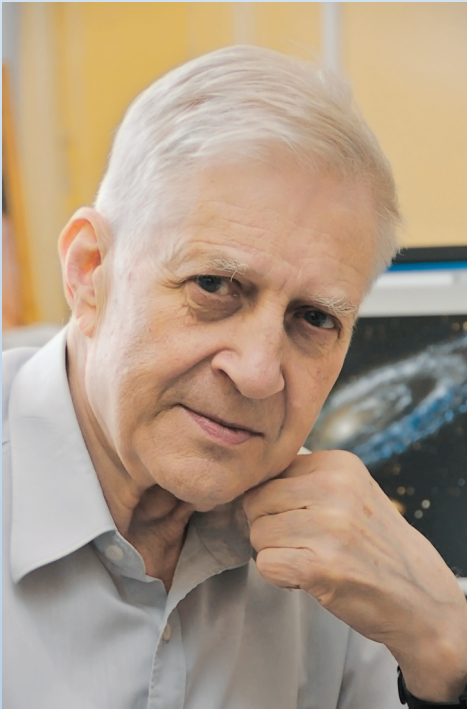
**3 коррелятора:** АКЦ ФИАН (Россия), Радиоастрономический институт Макса Планка (Германия), Объединенный институт РСДБ в Европе (Нидерланды);

**2 станции слежения** и сбора научной информации: 22-метровая антенна Пушинской радиоастрономической обсерватории (Россия) и 43-метровая антенна Green Bank Observatory (США);

**128 Мбит/с** – скорость передачи данных на Землю из любого положения космического аппарата на орбите;  
**4 петабайт** – объем накопленных данных;  
**92 см, 18 см, 6,2 см, 1,2–1,7 см** – длина волны проводимых наблюдений;  
**250 объектов** Вселенной изучено;  
**Более 4000** наблюдательных сеансов проведено;  
**240 ученых из 23 стран** мира приняли участие в наблюдениях;  
**Число публикаций на 2019 год:** около 100.

### *“РадиоАстрон” и Н.С. Кардашёв*

В августе 2019 г. от нас ушел **Николай Семёнович Кардашёв**, отец и бесменный руководитель проекта “РадиоАстрон”. Именно его оптимизм, безудержная энергия и вера в успех позволили проекту пережить тяжелые годы развала страны, возродиться и стать большим успехом отечественной космической науки.



Как отмечают многие, Николай Семёнович был настоящим визионером от науки. Он мог безошибочно предсказать и настоять на наиболее правильном пути развития проекта даже в ситуации, когда большинство признанных мировых лидеров не поддерживали его точку зрения. Например, никто не ожидал экстремальной яркости квазаров, поэтому высказывались серьезные аргументы против большой проекции базы интерферометра. Рассеяние на длинных радиоволнах должно было привести к значительному увеличению наблюдаемых размеров космических объектов. Соответственно, были аргументы против диапазонов 18 и 92 см на борту спутника. Никто даже не догадывался о субструктуре рассеяния, которую открыл “РадиоАстрон” как раз в этих диапазонах на больших на-

земно-космических базах. Теперь из-за этого открытия пришлось изменить даже результаты анализа данных, получаемых по центру нашей Галактики на коротких радиоволнах.