



## Исследование активных ядер галактик

М.Г. МИНГАЛИЕВ,  
доктор физико-математических наук  
САО РАН, Казанский (Приволжский)  
федеральный университет

Ю.В. СОТНИКОВА,  
кандидат физико-математических наук  
САО РАН

---

**Активные ядра галактик – одни из самых мощных структур во Вселенной. Считается, что источником энергии в них являются сверхмассивные черные дыры, детально исследовать которые пока невозможно методами наземной и космической астрономии. В статье описывается феномен активных ядер галактик, анализируются результаты многоволновых наблюдений, формулируются проблемы исследования.**



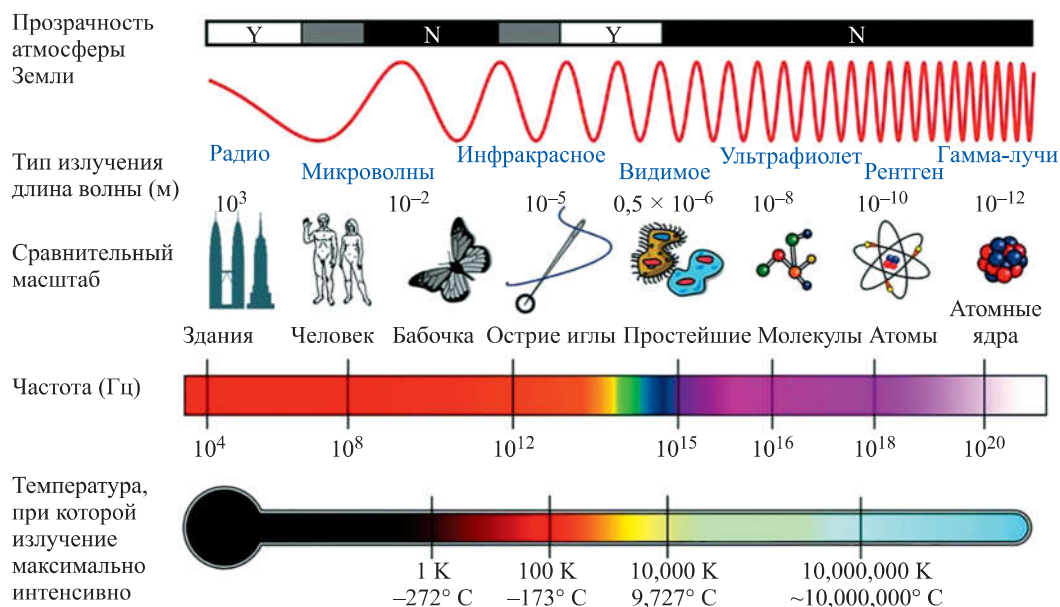
### ОСОБЕННОСТИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Среди множества разнообразия галактик выделяется особая группа – с активным ядром, скрывающая массивную черную дыру в центре. Она медленно поглощает

© Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В.

газ родительской галактики и при этом светит ярче всех звезд вместе взятых. Часто такие галактики “демонстрируют” массивные “оттоки”, исходящие симметрично относительно своего центра и простирающиеся далеко в межгалактическом

пространстве. В центральной области таких галактик находится массивный компактный объект. Скорее всего, – это черная дыра, которая и является причиной повышенной интенсивности излучения и называется активным ядром. В насто-



*Шкала электромагнитных волн. Некоторые представители активных ядер галактик детектируются во всем представленном спектре. NASA.*

ящее время таких объектов известно тысячи, обычно их называют активными ядрами галактик (АЯГ): сейфертовские, радиогалактики, лацертиды и квазары (Земля и Вселенная, 1973, № 3; 1978, № 1; 1980, №№ 2 и 5; 1994, №№ 3–5; 2009, № 2; 2010, № 6). Все они очень далекие – в сотнях миллионов световых лет от нас, а значит, изучая их, можно заглянуть в прошлое нашей Вселенной. Самые экстремальные представители АЯГ называются блазарами, они детектируются во всем диапазоне электромагнитного

спектра, на их примере хорошо описывается “переменное” поведение и исключительная мощность АЯГ.

Звездные системы – галактики размерами в тысячи или сотни тысяч световых лет – как правило, имеют в своих центральных частях компактные сгущения – ядра, в состав которых входят звезды разного класса и газопылевые комплексы в виде гало. Ядро галактики имеет массу порядка несколько миллионов масс Солнца. Наиболее четко они выделяются в спиральных их видах. Некоторые галактики (например, Магеллановы Облака) вообще не имеют ядер. Такая ситуация типична для иррегулярных галактик с относительно небольшой массой, в которых нет заметной концентрации ве-

щества к центру. У некоторых галактик в ядрах обнаружены мощные области ионизованного газа и горячие звезды. В этих областях, по-видимому, протекают процессы активного звездообразования. Для таких галактик характерны яркие эмиссионные линии в спектрах и мощное непрерывное ультрафиолетовое излучение. Но в отдельных случаях процессы, протекающие в ядрах, не зависят только от свойств звездообразования; таковы галактики с активными ядрами – это около 1% от нормальных галактик. Активные ядра галактик выделяют гигантскую энергию –  $10^{39}$ – $10^{40}$  Дж/с, генерируя различные виды мощного излучения: рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное и радиоизлучение, выбрасывая при

Галактика M87 (NGC 4486) с активным ядром в созвездии Дева. Снимок получен в 2007 г. с помощью Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

---

этом облака радиоизлучающей плазмы. Это не связано с находящимися в центральных областях АЯГ отдельными звездами и газопопылевыми комплексами. К основным признакам активности ядер галактик относятся следующие:

- из очень небольшой области размера с Солнечную систему “выплескивается” поток энергии, сравнимый с излучением ста миллионов или миллиардов звезд, подобных Солнцу;

- излучение переменное, почти всегда без четко определяемого периода (от часов до десятков лет); в результате меняется не вся галактика, а только меньшая ее часть;

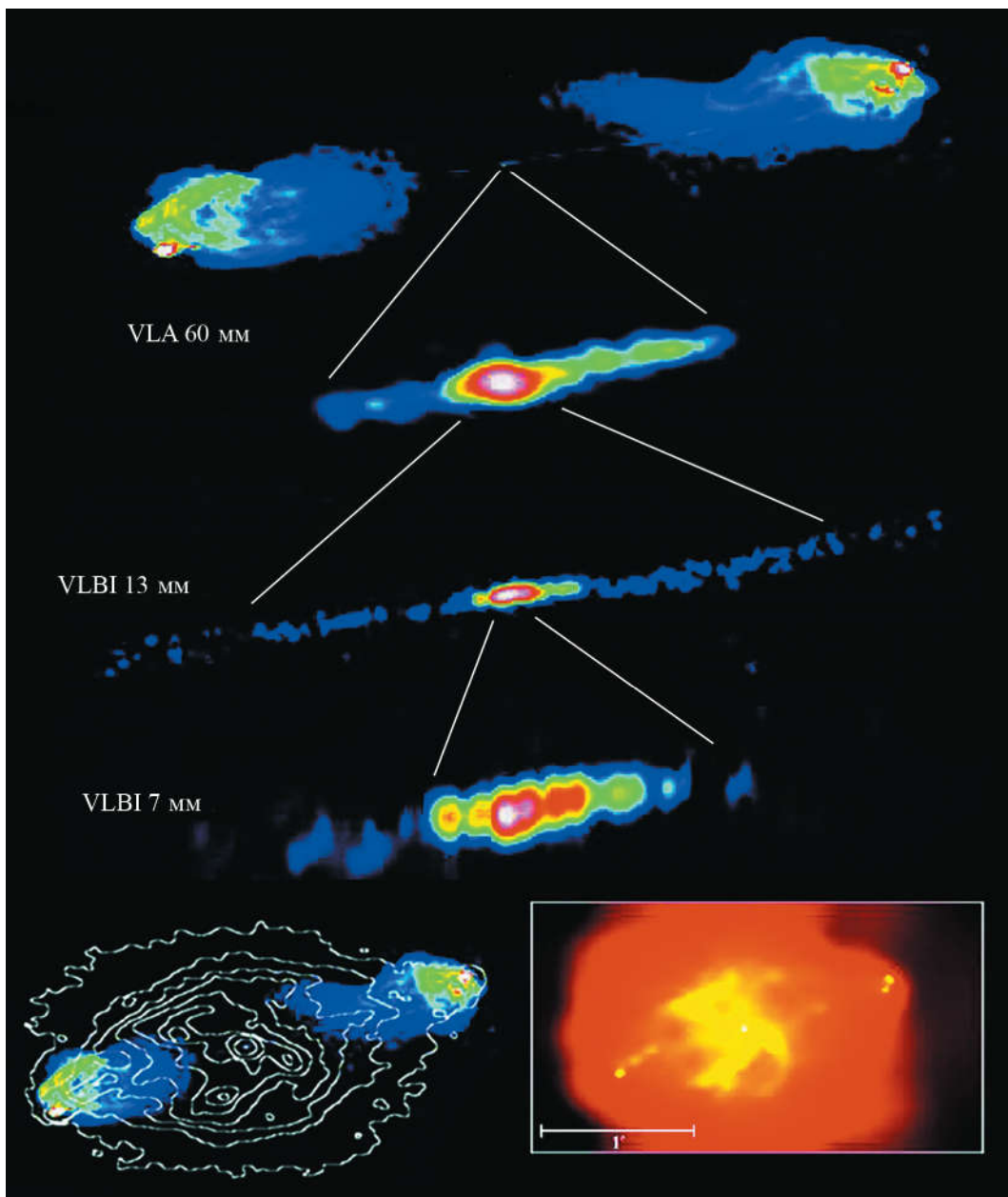
- необычно высокая мощность излучения в различных интервалах длин волн (от радио- до гамма-лучей). Оно локализовано в небольшой области, размером менее светового года; спектр его указывает на нетепловое излучение, порождаемое ускоренно движущимися заряженными частицами.



- наличие узких выбросов плазмы – ионизованного газа и ускоренных релятивистских электронов, исходящих из центра галактики – источников радиоизлучения; многие АЯГ являются радиоисточниками.

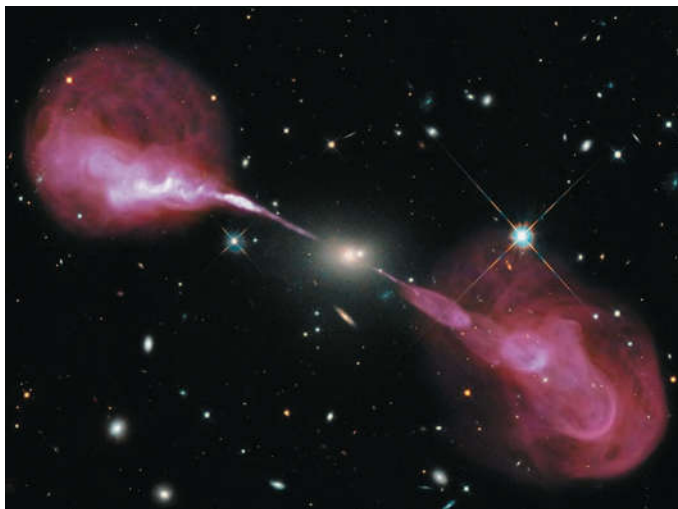
Протяженность выбросов в АЯГ может быть очень велика: например, в галактике M87 (NGC 4486), находящейся в созвездии Дева в 53,5 млн св. лет от нас, он составляет порядка 5 тыс. св. лет. Считается, что в центре M87 находится сверхмассивная черная дыра массой  $3,5 \times 10^9 M_{\odot}$ , которая и порождает активность ее ядра. Это один из самых тяжелых объектов во Вселенной, известных науке. Вокруг черной дыры вращает-

ся диск ионизованного газа, из которого со скоростью, близкой к скорости света, наблюдается выброс вещества (джет). Диск вокруг черной дыры вращается со скоростью около 1000 км/с. Наблюдения и теоретические исследования показали, что выброс вещества в M87 имеет синхротронную природу (его порождают ускоренно движущиеся электроны). Очевидно, что в ядре M87 происходят какие-то мощные физические процессы, сопровождающиеся выделением огромного количества энергии, в триллион раз превосходящего мощность фотонов видимого света; оно сопоставимо с излучением десятков и даже сотен миллионов звезд.



Радиогалактика Лебедь А (3C405). Вверху – четыре изображения галактики, полученные на радиотелескопах VLA ( $\lambda = 60$  мм), VLBI (13 мм) и VLBI (7 мм). От центра галактики тянется синяя нить – это движение ускоренных элементов почти со скоростью света, из ядра исходят узкие джеты и протяженные компоненты с горячими пятнами (горячие области показаны красным). Внизу справа – рентгеновское изображение Лебедь А в условном цвете (2000 г., космическая обсерватория “Чандра”, экспозиция – 9 ч); внизу слева – совмещенные радио- и рентгеновское изображения (1998 г., VLA и VLBI).

Струйный выброс (1,5 млн св. лет каждый) в галактике 3С 348 в созвездии Геркулеса. Изображения получены в 2012 г. в оптическом спектре с помощью Космического телескопа Хаббла и в радиодиапазоне (в условном цвете) с помощью интерферометра VLA (NRAO). Фото NASA.



#### РАДИОГАЛАКТИКИ

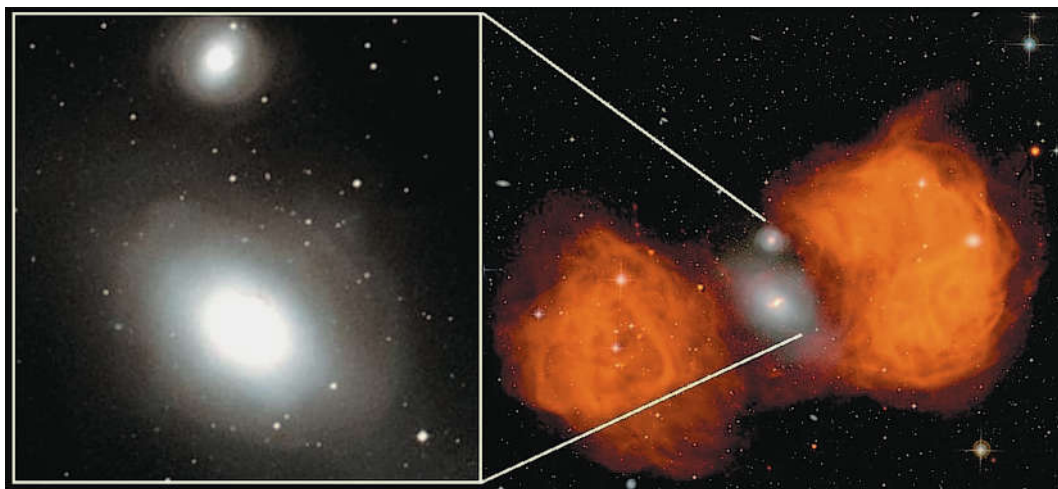
Одним из интересных типов АЯГ являются радиогалактики. В них активность ядра приводит к повышенному радиоизлучению (светимость  $\sim 10^{41}$ – $10^{43}$  Дж/с). Оно доминирует над другими видами излучения и в тысячи раз превосходит по мощности радиоизлучение нормальных галактик – таких как наша. Радиоизлучение радиогалактик связано с выбросом потоков релятивистских электронов из ядра, которое и регистрирует радиотелескоп.

Самая мощная радиогалактика, которая была впервые обнаружена, – Лебедь А; она удалена от нас на расстояние в 600 млн св. лет. Мощность ее радиоизлучения  $10^{38}$  Дж/с, обусловленная активностью ядра, превышает в шесть раз мощность оптического излучения, то есть излучения

всех звезд галактики. Электроны тормозятся межгалактической средой, образуя облака, светящиеся в радиодиапазоне; именно их наблюдают с помощью радиотелескопа на сантиметровых длинах волн. Радиоизлучение Лебедь А настолько сильное, что (несмотря на удаленность) – это самый яркий источник нетеплового излучения на небе. “Горячие пятна” – области, где вещество струй тормозится холодным и плотным окружающим газом. Оптическими методами обнаружено излучение сильноионизованной плазмы в области ядра галактики. Установлено, что галактика вращается вокруг оси, направленной вдоль прямой, соединяющей два ярких компактных компонента.

Еще пример – радиогалактика 3С348 в созвездии Геркулеса. Исходящий из нее струйный выброс – один из

самых ярких внегалактических радиоисточников. Компактный миллиардсекундных угловых размеров источник джета совпадает с галактическим ядром. Часть радиоизлучения происходит непосредственно из хорошо сфокусированных струй (они практически не заметны). Основная часть нетеплового излучения исходит от широких лепестков, так как в этом месте ускоренно движущиеся потоки вещества резко тормозятся межгалактической средой. Детальный анализ наблюдений показал, что черная дыра в центре 3С 348 в 1000 раз массивнее черной дыры в центре нашей Галактики ( $2,5 \times 10^9 M_{\odot}$ ). Внешняя часть выбросов “формирует” необычные кольцевые структуры, которые “намекают” на то, что в истории сверхмассивной черной дыры было всего несколько огромных вспышек,



которые могут быть как-то связаны с поглощением сверхмассивной черной дырой материи довольно массивных объектов.

Другой пример АЯГ – гигантская эллиптическая галактика NGC 1316 размером около 60 тыс. св. лет в созвездии Печи (около 62 млн св. лет от нас). Считается, что около 3 млрд лет назад она поглотила спиральную галактику и около 100 млн лет назад начала “съедать” соседнюю, меньшую по размерам спиральную галактику NGC 1317.

Исследование АЯГ интересно тем, что они “предлагают” нам уникальную лабораторию вне Земли для изучения сильных и крупномасштабных магнитных полей в окрестностях черной дыры. Радиоастрономические исследования структуры и переменности АЯГ невозможно пе-

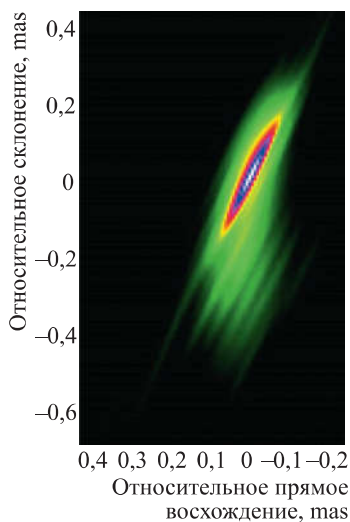
реоценить, так как именно методы, применяемые в работе на радиоинтерферометре со сверхдлинной базой (РСДБ) позволяют достичь углового разрешения в десятки микросекунд, а запуск космических обсерваторий с радиотелескопами – качественно улучшить угловое разрешение. Например, российская космическая обсерватория “Радиоастрон” получила изображение сильно переменного внегалактического АЯГ BL Lacertae в радиодиапазоне на частоте 22 ГГц с участием радиотелескопа КРТ-10 совместно с 15 наземными телескопами. BL Lacertae – типичный представитель блазаров, известных как лацертиды. Изображение столь предельно высокого разрешения (соответствует 21 миллиардсекунде) позволяет “заглянуть” в космический “очаг” с такой энергией, которую мож-

*Радиогалактика NGC 1316 в созвездии Печи (во врезке слева – снимок в оптике). Изображение синтезировано из снимков в видимом и радиодиапазоне, полученных системой апертурного синтеза VLA и Космической обсерваторией Хаббла. Фото NRAO/AUI, Дж.М. Усон.*

но достичь при нагревании материи на более, чем триллион градусов (такое угловое разрешение позволяет “заглянуть” в очень компактные области АЯГ, близко к центру ядра).

#### БЛАЗАРЫ И КВАЗАРЫ

Квазары – интенсивные источники космического радиоизлучения, расстояния до которых оцениваются в миллиарды световых лет, представляющие собой активные ядра далеких галактик; отличаются



Блазар *BL Lacertae* в созвездии Ящерицы. Изображение получено в 2013 г. космической обсерваторией “Радиоастрон” в радиодиапазоне на частоте 22 ГГц совместно с 15-ю наземными телескопами. По данным Х. Гомез и др., 2015 г.

малыми угловыми размерами, из-за чего долгое время считались галактическими звездными объектами. Сверхмассивные активные черные дыры внутри квазаров окруже-

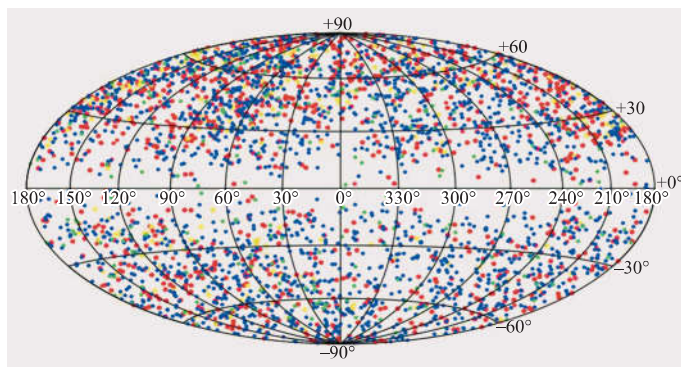
ны гигантскими кольцами газа и пыли, они в огромных количествах поглощают окружающую их материю.

Блазары – родственники квазаров. Это “экстремальные” представители АЯГ; они, в отличие от радиогалактик, непрерывно излучают во всем диапазоне спектра и характеризуются большими магнитными полями (от  $10^3$  Гс и выше). Из-за близости джета к лучу зрения наблюдателя излучение является релятивистски усиленным: возникает такой эффект усиления излучения из-за скоростей, близких к скорости света. В результате в общей доле светимости доминирует усиленное излучение джета. Если бы человеческий глаз мог видеть радиоволны, то блазары и квазары были бы одними из ярких объектов на небе (несмотря на их удаленность), и небо никогда бы не выглядело одинаково две ночи подряд из-за событий, происходящих в их центральных областях. Блазары и квазары невидимы для нас в силу своей удаленности (десятки и сотни миллионов световых лет); но в радио-, рентгеновских и в гамма-лучах это – “основной тип населения”. Прототип блазара (от него они получили свое название) – переменный объект *BL Lacertae* в созвездии Ящерицы (расстояние 900 млн св. лет), открытый в 1929 г. немецким астрономом К. Хофмейстером и 40 лет назад отнесенный к внегалактическим. Размер излучающей области –  $10^{12}$  км, масса объекта –  $10^8$ – $10^9 M_{\odot}$ . В 1990-х гг. были известны сотни блазаров, в 2009 г. на основе анализа был составлен их обширный каталог – *Roma-BZCAT* (Э. Массаро). В настоящее время в этот каталог входит 3561 блазар.

Блазары являются наиболее интересным подклассом АЯГ, поскольку джет в них направлен под малым углом к лучу зрения наблюдателя и его излучение доминирует во всем диапазоне: от радиоволн до гамма-

от радиоволн до гамма-

Карта расположения всех известных блазаров каталога *Roma-BZCAT* (Э. Массаро, 2009) на небесной сфере. Общее число блазаров в каталоге – 3561. Синие и красные точки соответствуют FSRQ-блазарам и лацертидам. Официальный сайт каталога *Roma-BZCAT*.



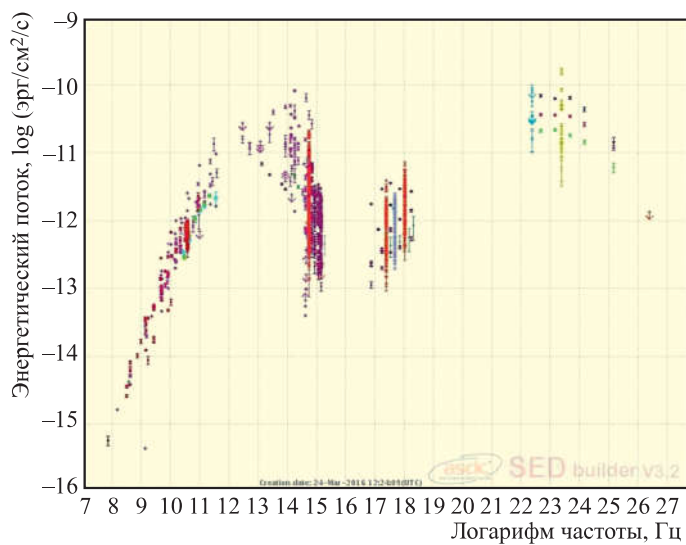


Диаграмма характерного спектрального распределения энергии блазара АО0238 + 16. На ней отчетливо видны два максимума излучения – значит в объекте генерируется высокоэнергетическое излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. Наличие второго максимума характерно для блазаров. Например, обычные галактики не детектируются на высоких частотах, так как не излучают на них; в их центральных областях не происходят активные процессы мощного энерговыделения. Получена с использованием сервера ASDC SED.

энергий. Они образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленный с источниками гамма-излучения. Например, более половины дискретных источников, вошедших в каталог, суммирующий наблюдательные данные космической гамма-обсерватории “Ферми” (Земля и Вселенная, 2015, № 3) – это блазары. В настоящее время их уже более 1700 (число блазаров в каталоге “Ферми”), здесь их меньше количества всех известных блазаров в каталоге Roma-BZCAT. Это связано с тем, что в гамма-диапазоне они не все детектируются. Переменность блеска блазаров наблюдается во всем диапазоне электромагнитного спектра и на различных временных масштабах. Кроме того, наблюдается высокая и переменная поляризация излучения.

Блазары обладают односторонними радиоджетами, в которых наблюдаются видимые сверхсветовые движения плазмы. Движение плазмы в джете с околосветовыми скоростями приводит к релятивистскому усилению его излучения в несколько раз, что делает блазары источниками с наиболее выраженной активностью среди всех типов АЯГ. В общей доле светимости блазаров доминирует усиленное излучение джета. В спектральном распределении энергии хорошо выделяются два пика: в микроволновом и гамма-диапазонах, что не всегда наблюдается для обычных радиогалактик. Считается, что за такое распределение ответственны два основных механизма: синхротронное излучение и обратное комптоновское рассеяние.

#### МОДЕЛЬ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

За основную модель активных ядер галактик принята унифицированная схема, которая объясняет все наблюдаемое разнообразие активных галактических ядер под тем углом, под каким наблюдатель видит джет. Согласно этой схеме, в центре АЯГ находится сверхмассивная черная дыра, окруженная аккреционным диском. Сами черные дыры не излучают света, но падающее на них вещество образует горячий замагниченный аккреционный газовый диск, вращающийся со скоростью, близкой к скорости света и являющийся основным источником энергии ядра. Аккреционный диск непрерывно пополняется за счет новых порций вещества; это порции межзвездного газа,



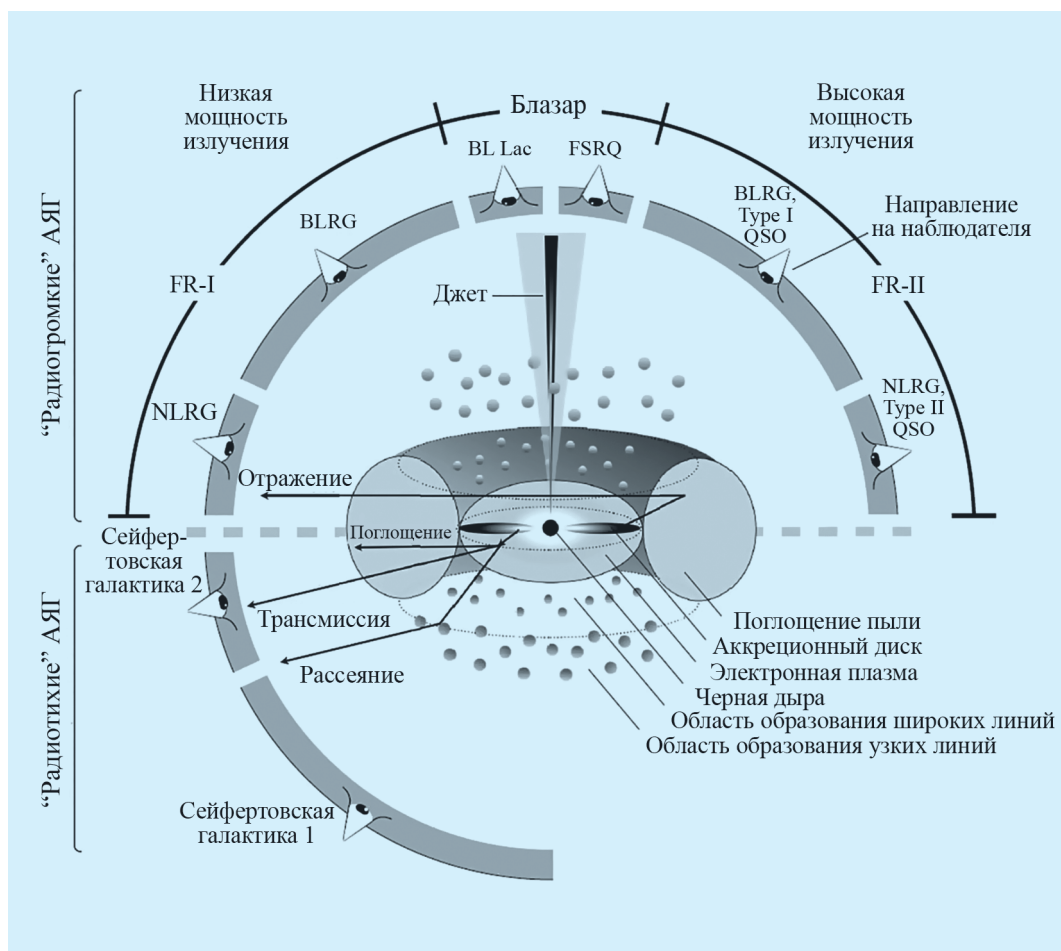
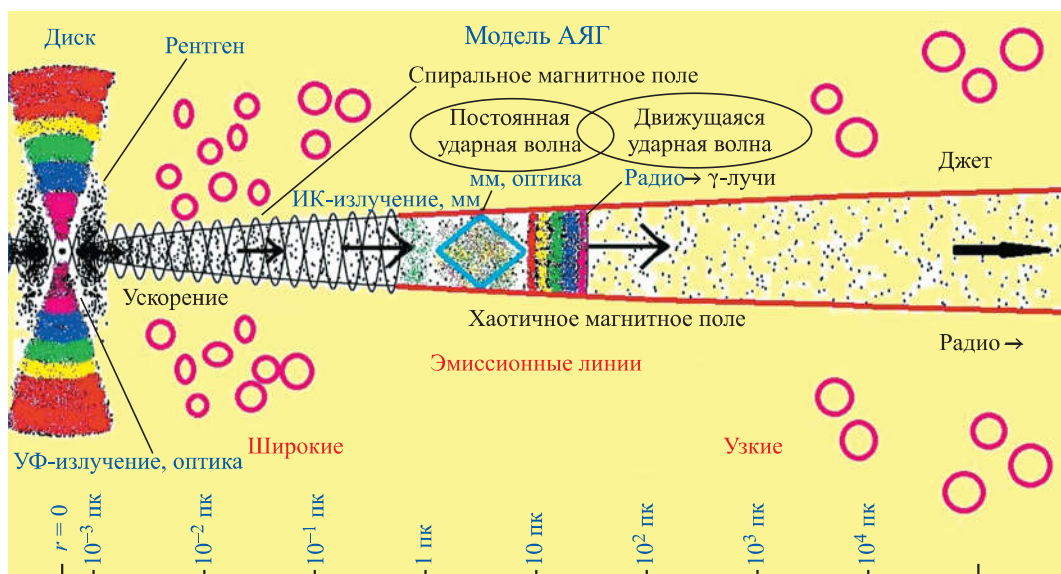


Схема строения центральной части активного ядра галактики и ее основных компонентов, согласно унифицированной модели М. Урри и П. Падовани (1995). Отмечены лацетиды, квазары с плоским спектром, область образования широких линий, область образования узких линий, сейфертовские галактики первого и второго типа, галактики Фанаров–Райли первого и второго типа; квазары с широкими и узкими линиями и квазары с узкими и слабыми узкими линиями. Серые кружки – области образования широких и узких эмиссионных линий. "Глаза" означают направление на наблюдателя. По данным У. Бекманна и К. Шрадера (2012).

попавшие в окрестности черной дыры, — газа, сброшенного звездами в ходе их эволюции или в результате столкновений. Кинетическая энергия падающего вещества, сообщенная ему гравитационным полем черной дыры, обладает вращательным

моментом и в десятки раз превосходит энергию термоядерных реакций. Джеты ультрарелятивистской плазмы выбрасываются из ядра перпендикулярно к плоскости диска. Они получили свое название из-за того, что могут перемещаться со скоро-

стью, близкой к скорости света, и это делает их самыми быстрыми астрономическими объектами. Два высокоскоростных джета из разогретой плазмы вылетают из черной дыры в противоположных направлениях и способны простираться



в космическое пространство на тысячи световых лет, а горячее вещество в них является источником радиоволн.

На субпарсековых расстояниях от центра располагаются плотные облака газа — зоны образования широких эмиссионных линий BLR (Broad line region — область образования широких линий). Узкие эмиссионные линии возникают в более разреженных зонах NLR (Narrow line region — область образования узких линий), находящихся на расстоянии сотен парсек от черной дыры. С внешней стороны аккреционного диска возникает молекулярный тор, содержащий пыль и вносящий значительный вклад в ИК-излучение многих АЯГ.

Некоторые наблюдательные характеристики могут быть объяснены

присутствием газопылевого тора, закрывающего собой центральную часть галактики. Внутренняя часть тора, взаимодействуя с непрерывным излучением АЯГ, частично ионизируется и образует BLR. Когда за джетом АЯГ ведется наблюдение под большим углом, как бы со стороны, то газопылевой тор скрывает центральную часть и область образования широких линий. В этом случае в спектре обнаруживаются только узкие линии (Сейфертовские галактики второго типа). Джеты АЯГ, расположенные под небольшим углом к наблюдателю, излучают широкие линии в спектре и обычно такие объекты классифицируются как радиотихие квазары (Сейфертовские галактики первого типа). Сейфертовские галактики были открыты в 1943 г.

Схематическое представление различных областей излучения в АЯГ (А. Маршер и др., 2009). Внизу — шкала расстояний (в парсеках) от центра объекта ( $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. года}$ ); вдоль линии рас пространения джета указаны области формирования разных видов излучения и виды магнитного поля. Красными кружками схематически представлена плотная газовая среда, зелеными — более разреженная (в этих местах формируются широкие и узкие эмиссионные линии соответственно).

американским астрономом К. Сейфертом, они подразделяются на два типа (в соответствии со скоростью движения газа), имеют яркие и широкие эмиссионные линии в излучении ядра, часто относятся к спиральным галактикам. Если джет виден под углом меньше

10°, то нетепловое и релятивистски усиленное излучение доминирует; такой объект относится к блазарам.

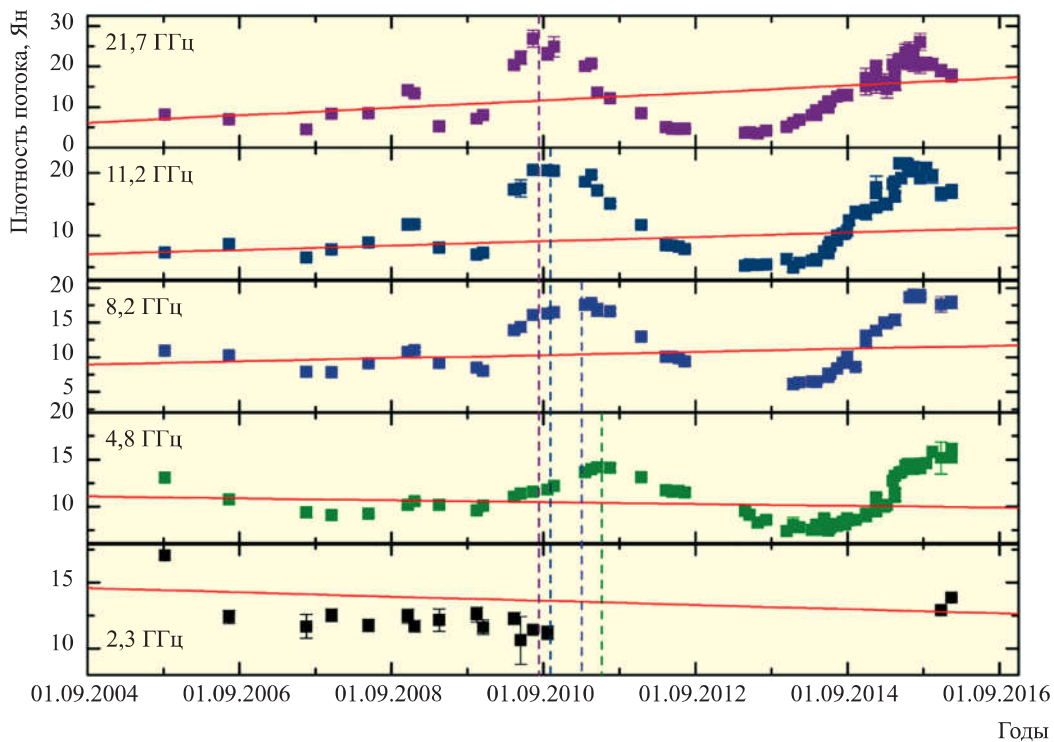
ИССЛЕДОВАНИЕ  
АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК  
НА РАТАН-600

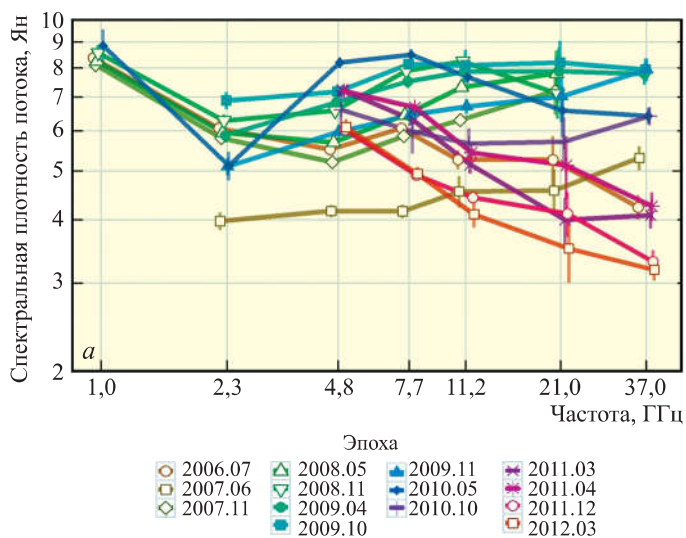
Радиотелескоп РАТАН-600 – крупнейший в мире радиотелескоп с антенной переменной профи-

ля и основной в России, работающий в “окне прозрачности” земной атмосферы. Благодаря большому геометрическому размеру РАТАН-600 имеет большое угловое разрешение, которое составляет 2' (при использовании всего кольца). Большая безабберационная зона телескопа позволяет измерять почти мгновенно радиоспектры космических источников в широком диапазоне частот (от 1 до 30 ГГц), что актуально при исследовании переменных радиоисточников. Высокую чувствительность по спектральной плотности потока (количество энергии в единичном интервале частот,

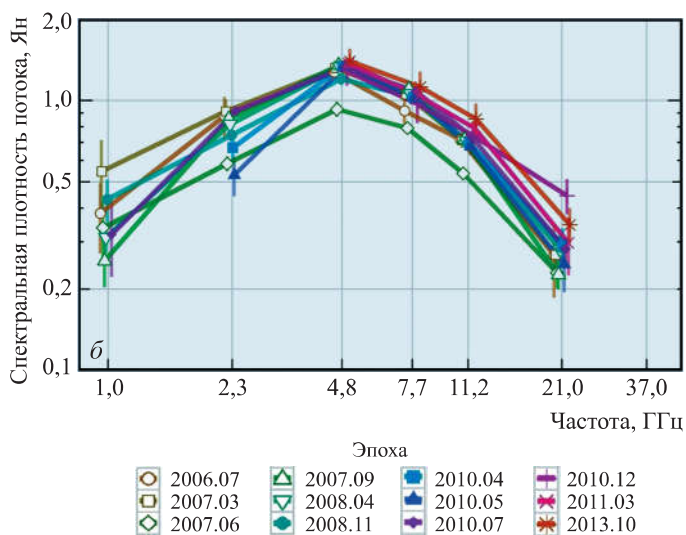
протекающей через единичную площадку в единицу времени; единица измерения – Янский) обеспечивает собирающая поверхность антенны площадью в тысячи квадратных метров. Многие годы радиотелескоп РАТАН-600 выполняет одну из своих проектных задач – мониторинг космических радиоисточников. Благодаря возможности массовых наблюдений исследуются до 200 объектов в сутки на 4–6 частотах одновременно, что невозможно выполнить на других радиотелескопах мира. Сюда входят как авторские программы наземного мониторинга АЯГ, так и совместные международные

*Графики кривых “блеска” для одного из самых переменных блазаров – 3C454.3, полученных в 2005–2016 гг. с помощью радиотелескопа РАТАН-600, САО РАН. Такие кривые позволяют анализировать активные процессы в объекте сразу на нескольких частотах.*





Графики эволюции за 6–7 лет наблюдений синхротронных радиоспектров блазаров: а – 2225–04 (3C446) и б – 0111 + 39 (S40108 + 388). На одном и том же масштабе времени один из блазаров (а) “демонстрирует” значительные вариации радиоизлучения – более, чем в два раза, – на высоких частотах; тогда как второй (б) остается в неизменном состоянии. Данные получены одновременно на РАТАН-600 и обсерваторией Метсахови (Финляндия; частота – 37 ГГц).



Например, авторы проводили мониторинг сильно переменного блазара 3C454.3 (2253 + 16) с использованием двух комплексов радиометров на РАТАН-600. Это самый далекий объект во Вселенной, который можно визуально изучать с помощью любительского телескопа (немного северо-западнее яркой звезды – альфа Пегаса). Плотность потока плавно растет, начиная с 2013 г., и в августе 2015 г. достигает значения почти 23 Ян на частоте 21,7 ГГц. Ранее, в 2010 г., зафиксировано увеличение плотности потока до 27 Ян на частоте 21,7 ГГц; через два месяца максимум (около 20 Ян) наблюдался на частоте 11,2 ГГц и только через полгода – на более низких частотах (7,7 и 4,8 ГГц, 18 и 14 Ян соответственно). В настоящее время зафиксирован спад радиоизлучения. Изменения

программы по поддержке космических обсерваторий (“Планк”, “Радиоастрон”), или совместные программы с зарубежными обсерваториями (Грин Бэнк и VLBA, США; Метсахови, Финляндия). Получаемые на нескольких инструментах данные ценны тем, что представляют одновременные измерения АЯГ в различных диапазонах электромаг-

нитного спектра, что (при переменности самих объектов) наиболее оптимально при исследовании механизмов генерации излучения в них. Главное преимущество измерений на РАТАН-600 – ежедневное получение мгновенного радиоспектра, а также возможность детально проследить его эволюцию.

на четырех длинах волн коррелируют: увеличение и уменьшение потока происходит на всех частотах с определенной задержкой и снижением амплитуды в сторону длинных волн. Такая картина переменности нетеплового излучения характерна для АЯГ.

Как показывают многолетние измерения, некоторые блазары могут находиться в одном состоянии (между вспышечной активностью) 10 лет и более. Другая часть блазаров “демонстрирует” переменность в течение более коротких промежутков времени (дни, недели, месяцы). Почему так происходит? Скорее всего, это зависит от условий окружающей черную дыру среды, ее массы, плотности и других индивидуальных особенностей.

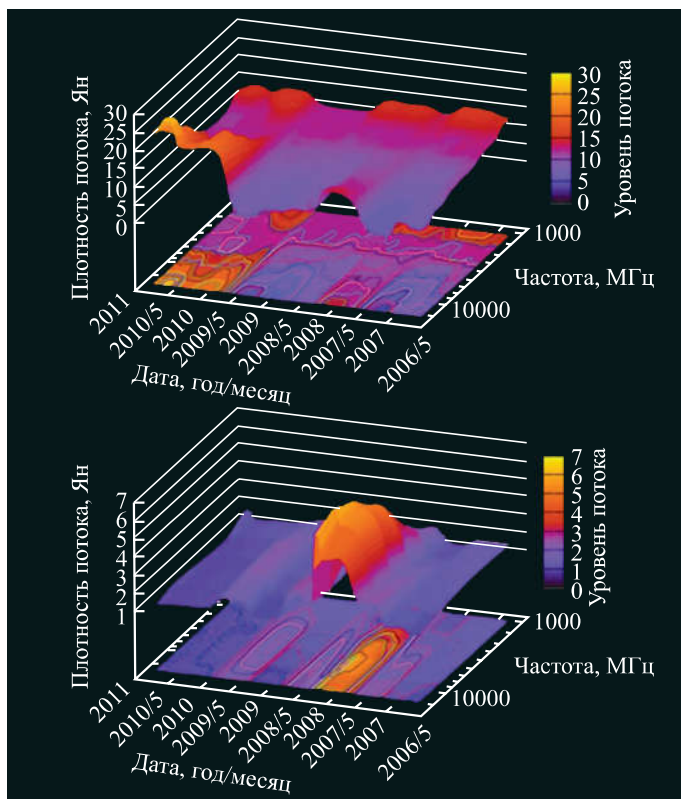
С 2006 г. группой сотрудников САО РАН под руководством М.Г. Мингалиева на радиотелескопе РАТАН-600 систематически проводится мониторинг более тысячи блазаров. Результаты в виде широкодиапазонных радиоспектров и измеренных плотностей потоков размещаются на домашней странице обсерватории в интерактивном каталоге BLcat ([www.sao.ru/blcat/](http://www.sao.ru/blcat/)). Каталог может использоваться как инструмент для оценки некоторых спектров и параметров переменности блазаров

на частотах РАТАН-600. Особенность этого каталога в том, что в него занесены не только яркие объекты, но и довольно слабые (их спектральная плотность потока меньше 50 мЯн на радиочастотах). Такие источники редко исследуются систематически. Измерения АЯГ на РАТАН-600 позволяют наблюдать частотно-временную эволюцию радиоизлучения блазаров. Изменение спектральной плотности потока на нескольких частотах в течение длительных промежутков времени позволяют отслеживать вспышечные события в АЯГ, оценивать их периоды.

Массовое исследование блазаров на радиочастотах позволило сделать ряд выводов о взаимосвязи излучения в разных областях АЯГ. По результатам одновременных наблюдательных данных на РАТАН-600 и на гамма-телескопе LAT космической обсерватории “Ферми” была подтверждена тесная взаимосвязь гамма- и радиоизлучений, взаимосвязь излучения в джете и в аккреционном диске, и история их образования из одной популяции фотонов: например, джет образуется вблизи центральной черной дыры, усиливаясь за счет ее вращения, или это происходит из аккреционного диска. В то же время часть энергии аккреци-

онного диска переизлучается в область образования широких линий. Связь между источниками этих излучений до конца не исследована. Однако в современных моделях подразумевается существование связи между светимостью в джете и темпом аккреции вещества на центральную черную дыру. Эффективным методом исследования этой связи является изучение соотношения светимостей в различных областях образования излучения. Изучение множества блазаров позволяет рассчитать статистические корреляции между светимостями разных порядков.

Кооперация с другими телескопами – одна из настоящих задач РАТАН-600. Это предполагает наблюдения одних и тех же космических источников на нескольких инструментах одновременно. Что это дает? Допустим, объект имеет короткую переменность излучения – дни или недели. Если необходимо узнать форму его спектра во всем диапазоне электромагнитной шкалы, то измерения должны быть сделаны как можно в более короткий промежуток времени. Такая тактика наблюдений используется во всем мире. Например, в 2009–2011 гг. в результате одновременных наблюдений на частоте 30–857 ГГц с помощью космических обсер-



Частотно-временная эволюция спектральной плотности потока блазаров 3C454.3 (вверху) и AO0235 + 16. Объемные изображения получены в 2006–2011 гг. с использованием радиотелескопа РАТАН-600. Изображение позволяет анализировать вспышечные процессы в объекте одновременно и по годам, и по частотам.

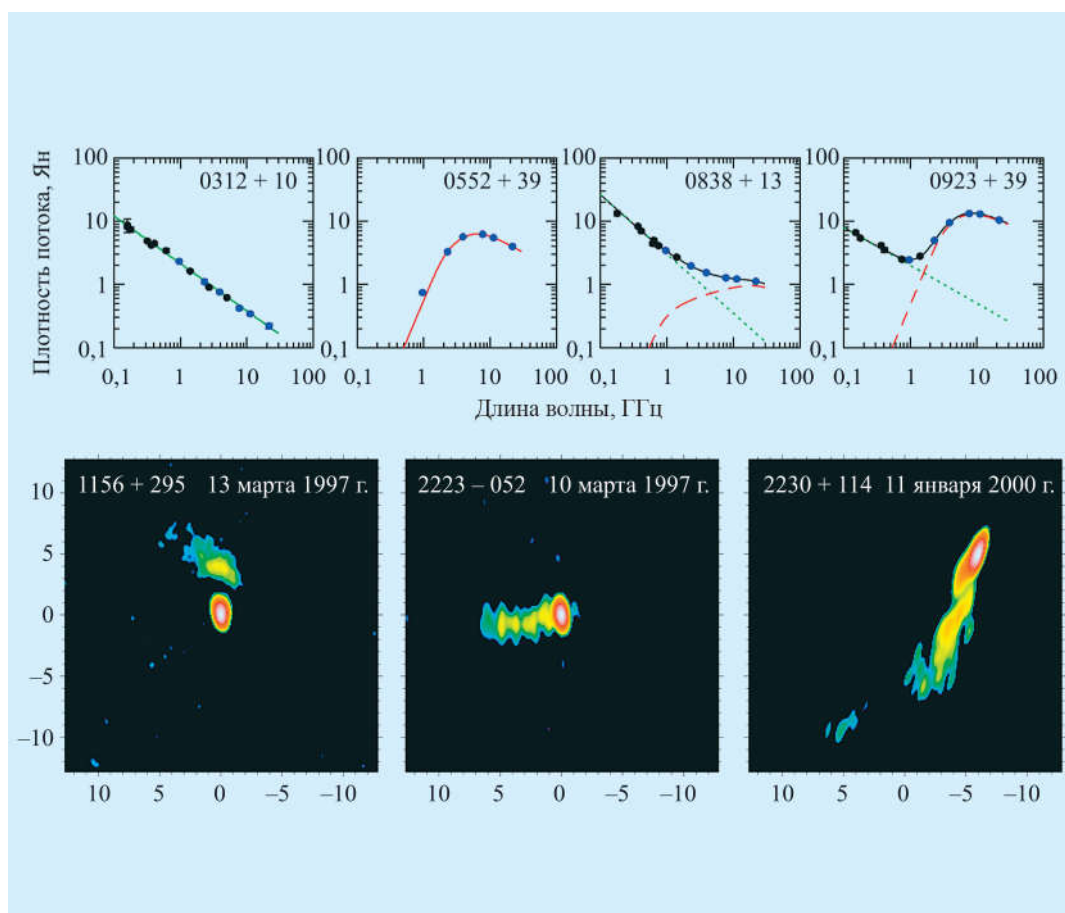
ваторий “Ферми”, “Планк” (Земля и Вселенная, 2014, № 1), “Свифт” (Земля и Вселенная, 2005, № 2, с. 68–69) и ряда наземных телескопов получены одновременные экспериментальные кривые распределения энергии в спектре для 105 блазаров. “Вклад” в низкочастотную часть (1–22 ГГц) таких кривых принадлежит РАТАН-600. В результате с высокой точностью определены оценки параметров различных компонент излучения для разных типов блазаров.

В результате многолетней программы по исследованию центральных

областей ядер активных галактик, проводимой научными сотрудниками Астрокосмического центра ФИАН (АКЦ ФИАН) под руководством доктора физико-математических наук Ю.А. Ковалёва, зарегистрировано несколько тысяч мгновенных радиоспектров АЯГ. Анализ их эволюции дал основания полагать, что источник нетеплового излучения АЯГ представляет собой непрерывную струю релятивистских частиц, движущихся от центрального ядра к периферии в продольном магнитном поле. Изменение потока таких частиц от ядра че-

рез основание струи и порождает наблюдаемую переменную излучения источника. Все полученные спектры переменных источников качественно и почти всегда количественно могут описываться в рамках двухкомпонентной схемы – переменного излучения релятивистской струи (на высоких частотах) и постоянного излучения периферийного компонента (“расширившейся” части струи). В зависимости от “вклада” каждого из них формируется радиоспектр: если он “плоский” – то плотность потока не меняется с ростом частоты, доминирует излучение компактного компонента (основание струи); если он падающий – доминирует излучение внешнего протяженного компонента; представлены и случаи равнозначного “вклада” двух компонентов (более сложная форма спектра).

В результате массовых кооперативных исследований мгновенных спектров и миллисекундной



Модельные радиоспектры и VLBA-изображения струйного выброса АЯГ, наблюдавшихся на РАТАН-600. Вверху – радиоспектры, полученные моделированием (АКЦ ФИАН и САО РАН, Ю. Ковалёв и др., 2002, 2004) излучения компактной релятивистской струи в одно- и двухкомпонентных спектрах: кривые красного цвета – модель; синие точки – спектры, полученные на РАТАН-600. Внизу – радиоизображения АЯГ в условном цвете, полученные на частоте 15 ГГц в VLBA (NRAO, США, К. Келлерман, 2004).

угловой структуры АЯГ сделаны некоторые выводы. Природа переменного компонента спектров (РАТАН-600) и изображения яркости миллисекундных компонентов (VLBA, США) внегалактических объектов – едина и отражает физику релятивистских струй из активного ядра. Амплитуда переменного компонента радиоспектров близка к суммарной (VLBA) яркости струи на соответствующей частоте и может использоваться для взаимных “привязок” инструментов.

#### БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Переменность АЯГ (квазары, лацертиды, радиогалактики) – от суток до нескольких лет – исследуется на телескопе РАТАН-600 совместно сотрудниками ГАИШ МГУ и САО РАН. Начиная с 1999 г. наблюдаются все источники с плотностями потоков выше принятого, находящиеся в определенной области неба. Параметры вспышечных процессов оцениваются общепринятыми в астрономии методами. В результате по-

лучены характеристики излучающих областей радиоисточников – такие, как временные задержки вспышек между частотами, периоды активности, “яркостные” температуры, спектры переменной компоненты. Используя найденные параметры для космических источников, находящихся на разных расстояниях от нас, можно исследовать их эволюцию. Объекты с большими красными смещениями образовались миллионы лет назад, поэтому наблюдатель одновременно видит источники, сформировавшиеся на разных стадиях эволюции. Не имея возможности проследить эволюцию космического объекта, но имея ряд однотипных источников, находящихся на разных этапах эволюции, можно установить свойства излучающей области (в зависимости от окружающей среды).

Для обнаружения и исследования переменной АЯГ в течение короткого времени наблюдения на РАТАН-600 проводятся ежедневно в течение 3–3,5 месяцев. Подобные работы нигде в мире не проводятся. Для анализа быстрой переменной космического объекта используются как стандартные алгоритмы, так и методики, самостоятельно разработанные сотрудниками САО РАН. В отличие от долговременной переменно-

сти (следствие процессов, происходящих внутри радиоисточников) короткая переменность может быть вызвана в самом источнике, в межзвездной и межгалактической среде (когда на пути излучения встречается неоднородная среда). Выделено несколько видов короткой переменной: периодический процесс; процесс, где в пределах сета есть только один процесс, в котором выделяется только одно активное событие; сумма двух или более циклических процессов с разными амплитудами и характерными временами; случайные процессы (например, отдельные вспышки).

В настоящее время не так много обсерваторий, в которых систематически проводятся мониторинги АЯГ: более 35 лет с помощью 13,5-м антенны Обсерватории Метсахови (Финляндия) на частоте 22 и 37 ГГц; с помощью 26-м антенны Радиоастрономической обсерватории Университета Мичигана (США) на частотах 4,8, 8 и 15 ГГц; с помощью 40-м антенны Обсерватории Оуэнс Валли (США) на частоте 15 ГГц. С 2008 г. дважды в неделю наблюдаются порядка 1700 АЯГ по программе наземной поддержки исследований в космической обсерватории “Ферми”. Возможность долговременного массового мониторинга на РАТАН-600 представ-

ляется значимым преимуществом этого инструмента при анализе квазисовременных кривых “блеска” плотности потока радиоизлучения на нескольких частотах. В этом случае мы можем видеть, как меняется радиоизлучение АЯГ в разных диапазонах.

Феномен АЯГ ставит перед исследователями еще больше вопросов. Наблюдения частично подтверждают существующую теорию, однако даже космические интерферометры не могут достичь углового разрешения, способного детально картографировать центральную часть АЯГ – ядро. Исследования в диапазонах (от радио- до гамма) могут дать косвенные оценки размеров и структуры излучающих областей. Физический механизм изменения потока окончательно не выяснен: недостаточно изучено строение источников выделения энергии в АЯГ, не полностью установлена взаимосвязь между механизмами излучения в разных диапазонах длин волн. Частично причина заключается в сложности проведения длительных экспериментов. Актуальным остается проведение эксперимента с привлечением большого числа инструментов для реализации наблюдений АЯГ во всем диапазоне электромагнитного спектра.