



Астрофизика

РАТАН-600 и радиогалактики

О.В. ВЕРХОДАНОВ,
доктор физико-математических наук
Ю.Н. ПАРИЙСКИЙ,
академик САО РАН

В 1974 г. учеными Специальной астрофизической обсерватории были выполнены первые наблюдения участков неба с помощью 600-м радиоастрономического телескопа РАТАН-600 Академии наук СССР (Земля и Вселенная, 1976, № 4, 1977, № 6; 1981, № 3). Это произошло еще до официального завершения работ по строительству РАТАН-600 в 1977 г. Одна из основных задач этого инструмента, сформулированных



на момент подготовки проекта радиотелескопа, – проведение глубоких обзоров неба на не-



скольких длинах волн и, в частности, поиска и исследования радиогалактик.

К ИСТОРИИ ОБЗОРОВ НЕБА НА РАТАН-600

Глубокие обзоры неба проводятся с хорошим разрешением и чувствительностью, чтобы шум слабых радиоисточников не мешал поиску и выделению небесных объектов. Такие обзоры часто имеют не-

сколько целей: поиск и исследование радиоисточников, а также изучение фонового радиоизлучения неба, которое может быть связано с излучением Солнечной системы и нашей Галактики и космологическим фоном. Среди наиболее важных программ наблюдений на радио-

телескопе РАТАН-600 – эксперимент “Холод”, проведенный в 1980-х гг. с целью исследования предельных возможностей РАТАН-600 при минимальных шумах системы радиотелескоп – радиометр. В эксперименте был использован радиометр с параметрическим уси-

лителем, лучший в Советском Союзе в начале 1980-х гг. по флуктуационной чувствительности для поиска слабых объектов. За несколько месяцев наблюдений в 1980 г. был достигнут уровень чувствительности ниже 1 мЯн плотности потока, который определяется слабыми фоновыми радиоисточниками, видимыми на длине волны 7,6 см. При наблюдениях по программе “Холод” использовался Северный сектор радиотелескопа. Наблюдения проводились в меридиане на склонении $+4^{\circ}54'$ с шириной полосы 10'. Склонение было выбрано по координатам объекта SS 433 – самого известного микроквара в нашей Галактике (Земля и Вселенная, 1980, № 4). В эксперименте использовались дополнительные длины волн, данные по которым позволили решать разнообразные астрофизические задачи:

- радиометр на длине волны 8,2 см помогал отождествлять (обнаруживать и опознавать) локальные помехи;

- наблюдения на волнах 2,08 и 3,9 см использовались для определения флуктуаций излучения атмосферы;

- волна в 31 см применялась для распознавания локальных (в частности, автомобильных) помех, а также для выделения излучения Галактики.

Одним из основных результатов программы обзоров “Холод” стал каталог радиоисточников, который лег в основу программы исследования далеких радиогалактик “Большое Трио”, названной так по числу трех основных телескопов – РАТАН-600, VLA Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) и БТА САО РАН, которые в нем “участвовали”.

К моменту получения первых данных в сантиметровом диапазоне длин волн в результате глубокого обзора неба в эксперименте “Холод” для исследования анизотропии космического трехградусного фонового радиоизлучения не существовало каталогов неба со слабыми объектами в изучаемой на РАТАН-600 области. Самый достоверный каталог 3CR (Кембриджский каталог 1959 г.) на частоте 178 МГц имел “порог” чувствительности около 10 Ян; основная популяция радиоисточников со стандартными спектрами обрывалась на уровне плотности потока около 0,5 Ян на волне 7,6 см. Это – на два порядка выше флуктуационной чувствительности даже одного суточного обзора неба. Только объекты с очень “крутыми спектрами” (поток радиоизлучения на длинных волнах в разы больше потока на коротких, как у пуль-

саров) могли случайно совпасть с источниками каталогов обзоров в метровом диапазоне длин волн и обзоров на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне. Учитывая относительно низкую координатную точность данных, полученных на РАТАН-600 (10–30 секунд дуги), проводить глубокое оптическое отождествление (поиск для радиоисточника кандидата на родительскую галактику на оптической снимке) слишком сложно. Положение кардинально изменилось в 1984 г. после обнаружения до публикации американским радиоастрономом Дж. Дугласом самого глубокого каталога тех лет. В этот каталог занесены данные по объектам на волне 82 см с координатной точностью 1–3" и с пороговой чувствительностью в 20 раз выше, чем в каталоге 3CR. Этого было недостаточно для распознавания всех объектов с помощью РАТАН-600, но зато практически все радиоисточники с “крутыми спектрами” оказались общими для двух этих каталогов. Источники с плоскими спектрами, обнаруженные с помощью РАТАН-600, были недоступны для каталога Дугласа. Дальнейшее исследование объектов по RC-каталогу, составленному в 1980 г. на основе обзора неба с помощью РАТАН-600, было связа-



но с поиском кандидатов в самые удаленные объекты во Вселенной с помощью данных об их радиоспектрах.

РС-каталог содержит 1140 радиоисточников в узкой полосе неба шириной около $40'$ вокруг склонения SS433. Около 10% объектов имели достаточно крутые двухчастотные спектры, которые стали основой международной программы “Большое Трио” с участием радиоинтерферометра VLA (NRAO, США) и 6-м оптического теле-

скопа САО РАН. При относительно небольшой области обзора (200 квадратных градусов) и значительно большей глубине эта выборка оказалась более, чем в сотни раз, “плотной” по числу объектов с очень “крутыми спектрами” на квадратный градус, а также первой, использующей сантиметровый диапазон при селекции таких спектров.

Перед тем, как перейти к описанию программы “Большое Трио”, кратко рассмотрим важные свойства радиогалактик.

Северный сектор и плоский отражатель радиотелескопа РАТАН-600 (а). На заднем фоне видна гора Джисса за станцией Зеленчукская, Карачаево-Черкесия. Рупоры радиометров (б), расположенные в фокальной плоскости радиотелескопа на подвижной части приемной кабины № 1, включающие матричную радиометрическую систему “МАРС-2” ($\lambda = 1$ см), приемники ($\lambda = 6,25, 3,9, 2,7$ и $1,4$ см), а также первичный облучатель с совмещенными фазовыми центрами ($\lambda = 13, 31$ и 49 см). Фото Лаборатории радиометров континуума САО РАН.

РАДИОГАЛАКТИКИ

Среди небесных объектов радиогалактики выделяются особо (Земля и Вселенная, 1978, № 1; 1980, №№ 2 и 5) не только своей светимостью и размером, но и уникальной ролью в эволюции вещества во Вселенной. Их физические свойства астрономы используют при определении динамических и физических параметров Вселенной.

Что представляет собой радиогалактика? В радиодиапазоне излучают все галактики, но причины и мощность этого излучения различны. Исторически радиогалактиками называли объекты предельно высокой радиосветимости, достигающей 10^{14} светимости Солнца (до 10^{48} эрг/с). В видимом свете такие объекты, как правило, отождествлялись с галактиками. Если же радиоисточник выглядел точечным объектом, то его классифицировали как квазар. Позднее, после проведения более чувствительных обзоров неба на различных радиотелескопах и массовом оптическом отождествлении радиоисточников, появилась необходимость уточнить смысл термина «радиогалактика».

Так, радиоизлучение обычной галактики может быть связано с процессами, происходящими в ее ядре, – с вылетающими струями плазмы из

центрального объекта, с остатками сверхновых или с облаками нейтрального водорода и других молекул. Но, с другой стороны, разные классы объектов имеют схожие причины возникновения радиоизлучения и вообще оказываются связанными между собой эволюционно и/или представляют собой различные виды проекции на небе близких по свойствам источников. Когда Космический телескоп Хаббла обнаружил звездное «окружение» у всех квазаров, то строгое разделение на радиогалактику или квазар стало «размытым».

Итак, будем называть радиогалактиками такие галактики, у которых, во-первых, радиосветимость сравнима с оптической (причем последняя определяется суммарной светимостью звезд) и, во-вторых, радиоизлучение которых связано с активностью ядра галактики. Такие объекты, как правило – самые мощные (кроме вспышечных) источники излучения из известных, за исключением самой Вселенной. Этот факт позволяет проводить их изучение на больших красных смещениях: $b > z > 1$, то есть когда возраст Вселенной был от 1 до 6 млрд лет.

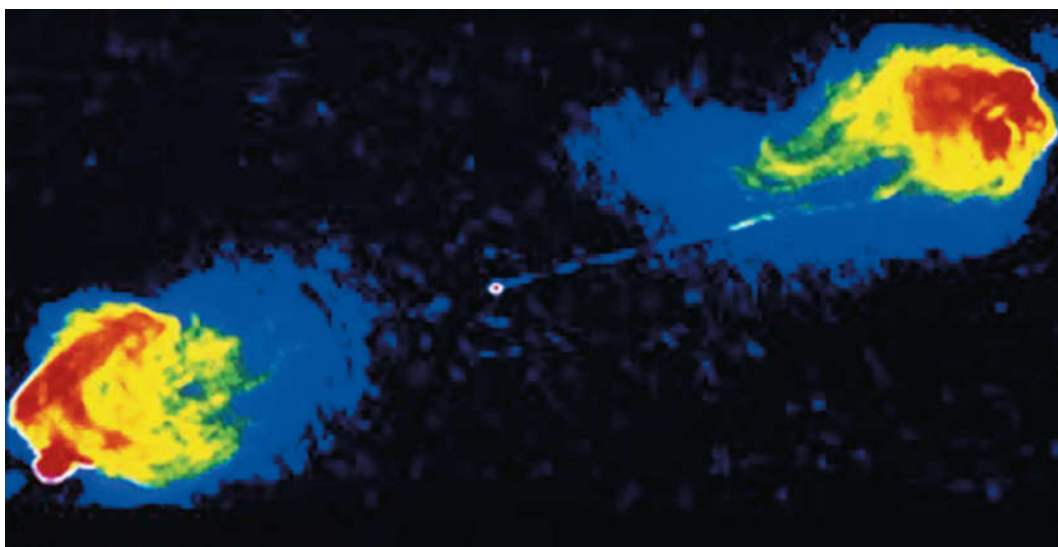
ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

Первые обнаруженные радиогалактики. Стандартное представление о радиогалактиках как о

протяженных радиоисточниках сформировалось еще в начале 1950-х гг.; оно помогает и сегодня при описании объектов данного класса. Имена первых исследованных радиогалактик в то время присваивались очень простым способом: к названию созвездия добавлялось символическое обозначение А, В, С, указывающее на уменьшение радиояркости объекта в данном созвездии. Четыре из первых открытых радиогалактик – Лебедь А, Центавр А, Дева А и Печь А (Земля и Вселенная, 1983, № 1).

Лебедь А – самый мощный из известных в то время внегалактический дискретный источник радиоизлучения, отождествленный в 1951 г. с эллиптической галактикой 16^m , входящей в состав богатого скопления. Галактика вращается вокруг оси, лежащей в картинной плоскости и направленной вдоль прямой, соединяющей два ярких компактных компонента радиоизлучения. Угловое расстояние между яркими областями компонент двойной структуры – около $2'$ (120 кпк); компоненты «выстреливаемых» струй вылетают их ядра со скоростью $0,02$ скорости света; в ядре галактики обнаружен компактный радиоисточник.

Центавр А (NGC 5128) – радиоисточник в созвездии Центавра, ближайшая к нам радиогалактика



(расстояние до нее – примерно 4 Мпк). Она имеет сфероидальную форму, разделенную газовой пылевидной дисковой (поглощающей свет звезд), она наблюдается практически «с ребра». Центавр А содержит протяженный радиоисточник, который представляет собой старую, сильно расширившуюся структуру общей протяженностью около 500 кпк.

Дева А (M87, NGC 4486) – радиоисточник сравнительно небольшой радиосветимости (10^{42} эрг/с), принадлежащий массивной эллиптической галактике типа cD в центре скопления галактик в созвездии Девы на расстоянии около 18 Мпк. У центра галактики наблюдается односторонний выброс вещества – джет длиной около 20'' (порядка 1,5 кпк). Он разбивается на отдельные сгустки (узлы) и из-

лучает не только в радио-, но и в оптическом диапазоне.

Радиоисточник Печь А (NGC 1316) находится на периферии скопления галактик и состоит из двух больших компонент, имеющих сложную структуру размером примерно 200 кпк каждая, которые подпитываются струями плазмы из центра галактики. Причина выделения энергии в центре NGC 1316 – слияние (мерджинг), а, точнее, – поглощение (малый мерджинг) небольших соседних галактик. Спиральная галактика на севере может быть следующей жертвой такого галактического «каннибализма».

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОГАЛАКТИК

Можно выделить два подхода в радиоастрономической классификации внегалактических радио-

Радиогалактика Лебедь А. Из центрального источника – квазара, находящегося внутри эллиптической галактики, «выстреливаются» две струи плазмы (джеты). При столкновении со средой джеты формируют протяженные компоненты с горячими пятнами. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

источников: первый – по виду непрерывного радиоспектра (зависимость выделяемой энергии от частоты) и второй – по структуре радиоизображения (случай морфологической классификации). Оба типа классификации важны при поиске самых далеких радиогалактик.

Радиоспектры. Радиоспектр источника связан с механизмом радиоизлучения и, соответственно, с природой самого

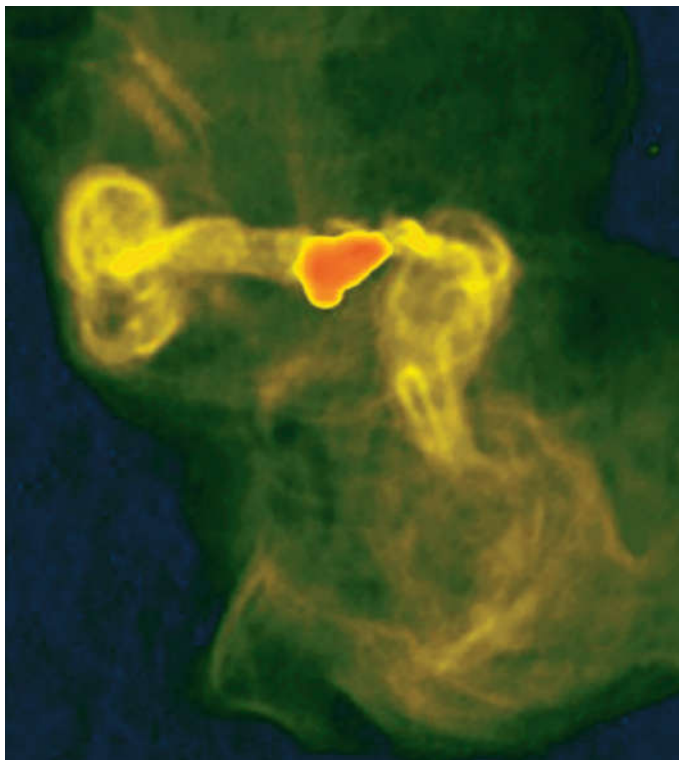
Радиогалактика Центавр А (NGC 5128). На оптическое изображение галактики наложено радиоизображение с помощью радиоизофот – линий одинаковой радиояркости. Центр галактики, где находится квазар со сверхмассивной черной дырой, обрамляет пылевой тор, видимый в инфракрасном свете. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

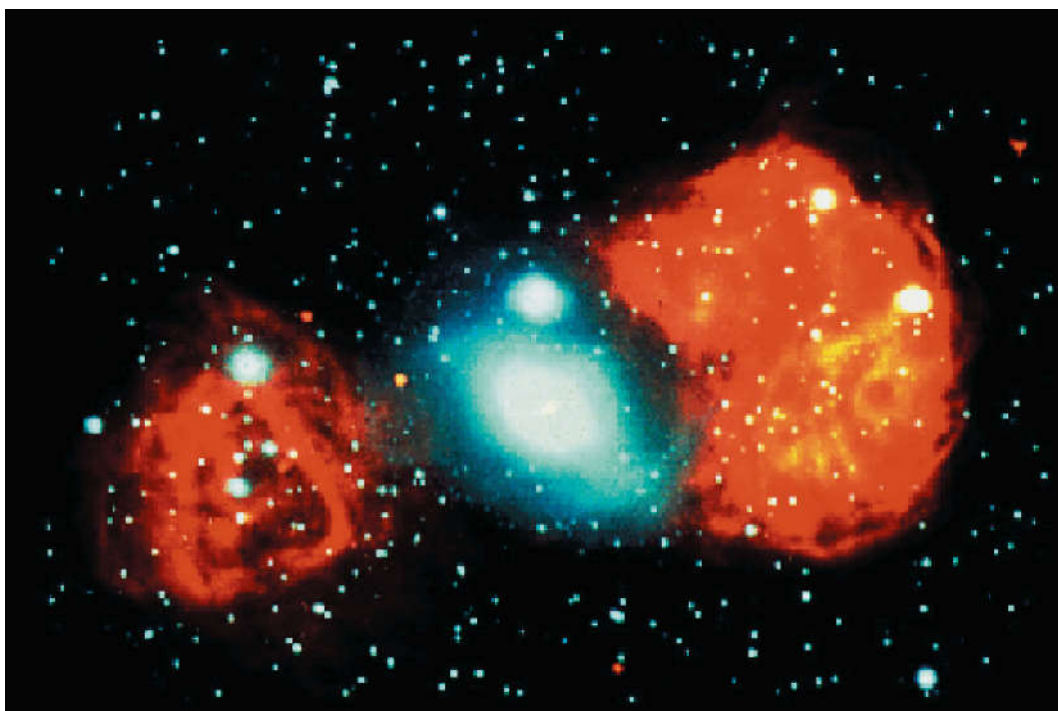


объекта. Остановимся на внегалактических радиоисточниках. Их непрерывный спектр формируется нетепловым (синхротронным) излучением. Оно возникает, когда электрон движется с околосветовой скоростью в магнитном поле по спиральной траектории, “наматывающейся” на силовую линию поля. В этом случае плотность потока излучения падает с ростом частоты.

Морфологическая классификация радиогалактик. При изучении формы источника в радиодиапазоне (то есть при распре-

Радиогалактика Дева А (M87, NGC 4486) в центре скопления галактик. Гигантская эллиптическая галактика типа cD – гигантский радиоисточник, формирующий структуру – радиокон. Из центрального квазара вылетают две струи плазмы (джеты). Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.





делении яркости галактик в радиодиапазоне) выделяют их различные морфологические особенности:

- ядро – компактная структура размером менее 0,1", не делимая на детали; совпадает с ядром в оптике, имеет плоский или сложный радиоспектр;

- протяженные структуры – большие по длине области радиоизлучения;

- джеты (струи) – тонкие и конусообразные структуры, связывающие ядро с внешними областями;

- горячие пятна – максимумы интенсивности, расположенные во внешних пределах протяженных структур радиоисточников;

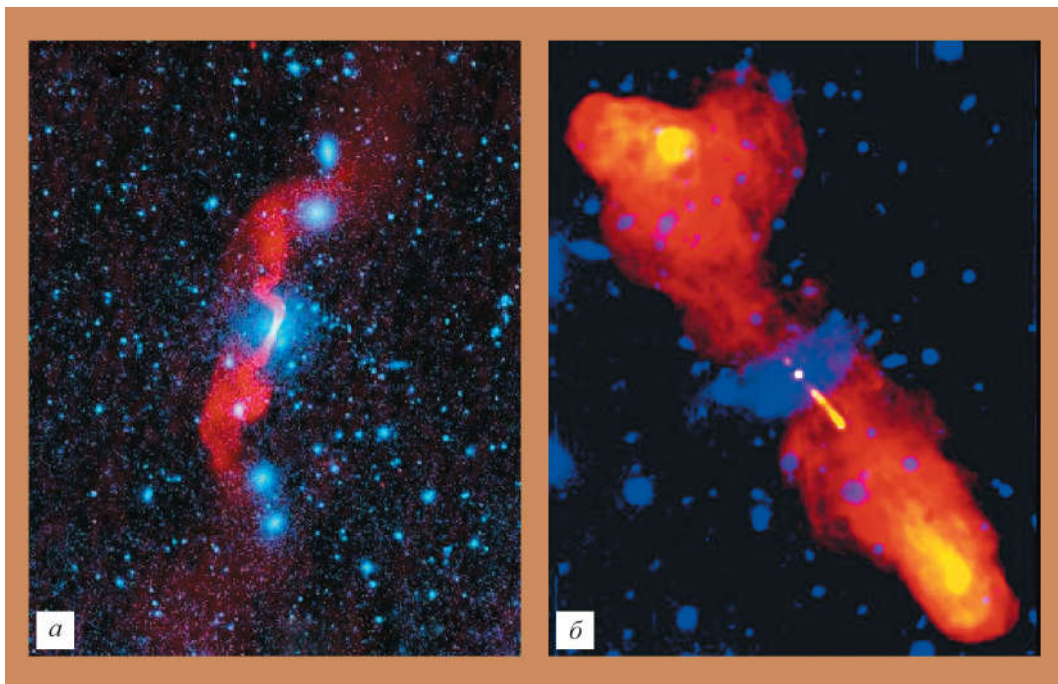
- узлы – области усиления яркости свечения в джетах;

- гало – протяженная область радиоизлучения (радиококкон), окружающая радиогалактику (например, как у радиогалактики Дева А).

Используя особенности структуры и распределения радиояркости для объектов каталога 3CR, в 1974 г. астрофизики Б. Фонарёв и Дж. Райли ввели классификацию протяженных радиоисточников, разбив их на два класса. Первый тип радиогалактик (FR I) имеет спадающее к краям источника распределение радиояркости, второй (FR II) – концентрирующееся преимущественно в боковых

Радиогалактика Печь А (NGC 1316). В центре – оптическое изображение гигантской эллиптической галактики, расположенной в середине скопления галактик в созвездии Печь, рядом с которой находятся два протяженных радиокомпонента, связанных с активностью центральной черной дыры. Вокруг центрального объекта другим оттенком отмечено рентгеновское гало. Над NGC 1316 расположена карликовая галактика, которая будет "съедена" через 100 млн лет. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

компонентах, с горячими пятнами. Граница светимости между обоими классами не всегда строгая и существуют "перекрытия" в светимости объектов, отобранных



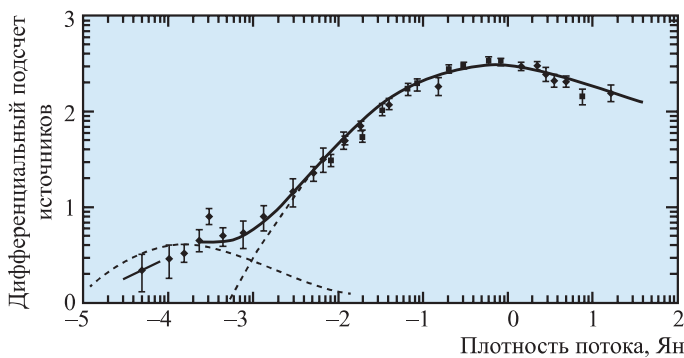
Радиогалактики: а – 3С31 (класс FR I) в созвездии Рыбы, б – 3С219 (класс FR II) в созвездии Большой Медведицы. Радиоизображения наложены на оптические. NRAO, США.

как FR I и FR II на основании их структуры.

Источники типа FR I часто (но не всегда) отождествляются с яркими большими галактиками (классы E, D или cD) – с более плоскими профилями в радиальном распределении яркости, чем средняя эллиптическая галактика. Эти объекты часто располагают-

ся в богатых скоплениях с горячим газом. Источники типа FR II, в основном, принадлежат к гигантским эллиптическим галактикам – как правило, более мощным, чем FR I. Одна из популярных эволюционных моделей основана на оптических данных, она исследует родительские галактики и их окруже-

График зависимости числа радиоисточников от их плотности потока (1 Ян = 10^{-26} Вт/м² Гц), обнаруженных на частоте 1,4 ГГц. Штриховыми линиями показан “вклад” спиральных и эллиптических галактик. Избыток числа источников объясняется эволюцией и более высоким темпом их образования в ранние эпохи. По данным американского радиоастронома Дж. Кондона, 1984 г.



ние. Оба класса источников могут быть связаны – принадлежать к одной эволюционной последовательности. По этой гипотезе радиоисточники типа FR II – более молодые и с особенно мощным выделением энергии; когда подпитывающий ядро газ заканчивается, источник за сотни миллионов лет угасает и переходит в тип FR I.

КОСМОЛОГИЯ

Чем же полезны радиогалактики для космологии? В поисках ответа на вопрос о том, как устроена Вселенная (каковы ее физические параметры, динамика расширения, геометрия и форма) наблюдательная космология использует астрономические тесты и физику элементарных частиц. Стандартные космологические тесты – наблюдения с целью определения параметров Вселенной, применяемые в области радиоастрономии, можно условно разбить на три группы по типу изучаемых объектов: реликтовое излучение, радиогалактики и пульсары.

К первой группе тестов относятся:

- построение спектра мощности реликтового излучения, по которому определяются основные космологические параметры: все типы плотности, постоянная расширения Хаббла и другие;

- статистика реликтового сигнала и определение топологии Вселенной;

- уровень сглаживания фонового излучения при гравитационном линзировании скоплений галактик (тест на плотность барионной и темной материи и на постоянную Хаббла);

- корреляционные спектры поляризации (тест на время образования первых звезд и “зажигания” первых активных ядер галактик (E-мода поляризации); на уровень первичных гравитационных волн (B-мода поляризации).

Тесты второй группы (для радиогалактик):

- зависимость « $\log N - \log S$ » (число источников – плотность потока) – тест на плотность активных галактических ядер, эволюцию радиоисточников и евклидову космологическую модель;

- зависимость “размер – красное смещение” (тест “стандартная линейка”);

- зависимость “плотность потока – красное смещение” (тест “стандартная свеча”);

- возраст звездных систем (тест “стандартные часы”) для исследования параметров плотности и динамики Вселенной;

- гравитационное линзирование (тест на плотность видимой и темной материи, темной энергии) также применяется при поиске и исследова-

нии очень далеких объектов;

- поиск далеких скоплений и протоскоплений галактик, отражающих формирование крупномасштабной структуры (измерение параметров плотности разных типов энергетических компонентов Вселенной);

- скорости вращения галактик и поиск темной материи по наблюдениям водорода;

- поиск сверхмассивных черных дыр (исследование проблемы их возникновения и роста в рамках проверяемых космологических моделей);

- исследование радиогало скоплений и галактик для поиска частиц – кандидатов в темную материю.

Тесты третьей группы (для пульсаров):

- двойные пульсары (исследование излучения гравитационных волн);

- пространственная сетка пульсаров (регистрация и изучение гравитационных волн).

Кроме того, есть различные комбинированные тесты: например, одновременно для реликтового излучения и радиогалактик; их результатом может стать определение согласованной со всеми экспериментами космологической модели.

Перед тем, как перейти к рассмотрению основных космологических тестов для радиогалактик, отметим несколько важ-

ных фактов об их физических и эволюционных свойствах. Активность радиогалактик связана с активностью их ядер (или “центральных машин”). Среди применяемых гипотез простейший вариант “центральной машины” – квазар, содержащий сверхмассивную черную дыру массой 10^9 – $10^{10} M_{\odot}$ и аккреционный диск из обращющегося и падающего на нее разогретого газа. Из ядра галактики истекают коллимированные струи (джеты) ионизованного вещества со скоростью до $1/3$ от световой и перпендикулярные плоскости аккреционного диска. Джеты сталкиваются с окружающей средой, образуя протяженные радиоизлучающие компоненты, в которых наблюдаются горячие пятна с «крутым» радиоспектром. Вследствие этого формируется радиисточник типа FR II (гантелевидной формы и с высокой светимостью). Если вещество в аккреционном диске иссякает, то “затухает” и активность радиисточника; тогда образуется радиогалактика типа FR I (с выделяющимся центром и двумя симметрично расположенными широкими радиокон компонентами). Квазар в эллиптической галактике может быть экранирован от наблюдателя пылевым тором; тогда звезды галактики не “засвечиваются”

ядром. Отсюда следует: для того, чтобы радиисточник “загорелся”, необходимо наличие и газа, и сверхмассивной черной дыры. Источником газа в «спокойной» эллиптической галактике может стать другая галактика, ранее “съеденная” (или испытывавшая слияние – мерджинг) родительской галактикой. Процесс мерджинга галактик чаще происходит там, где их плотность повышена, а именно – в скоплениях галактик. Самые массивные галактики скоплений – гигантские эллиптические галактики (gE) – чаще других испытывали слияния и чаще других являются мощными радиисточниками, особенно в ранние эпохи. В стандартных схемах эволюции галактик мерджинг обеспечивает как быстрый рост самой галактики, так и рост ее центральной черной дыры. Отметим, что именно существование радиогалактик высокой светимости привело к необходимости привлечения гипотезы о существовании сверхмассивных черных дыр. Гигантские эллиптические галактики вырастают и набирают массу до $10^{12} M_{\odot}$ довольно быстро – за первый миллиард лет существования Вселенной. С учетом того, что мощность радиоизлучения связана с массой центральной черной дыры галактики, выполнены оценки

потока излучения от таких объектов. Эти оценки показали, что в эпоху “зажигания” первых радиисточников они настолько мощные, что их можно увидеть с Земли на современных радиотелескопах на уровне 1–10 мЯн.

Итак, внутри горизонта нашей видимой Вселенной мы можем зарегистрировать сигнал практически от всех образовавшихся радиогалактик. Столь огромная мощность излучения позволяет исследовать их на любых расстояниях в Метагалактике и использовать как “пробные частицы” для изучения физических условий и динамики Вселенной в разные космологические эпохи. Еще одним важным моментом является то, что радиогалактики – это, в основном, галактики типа gE, содержащие пассивно эволюционирующее звездное “население”; для них созданы удовлетворительные модели эволюции: по светимости gE на разных длинах волн можно оценить возраст звездного “населения”, а, значит, и время образования галактики.

РАДИОГАЛАКТИКИ КАК КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ РЕПЕРЫ

Для того, чтобы воспользоваться радиогалактиками как “пробными частицами” (или реперными точками), необходимо ориентироваться на

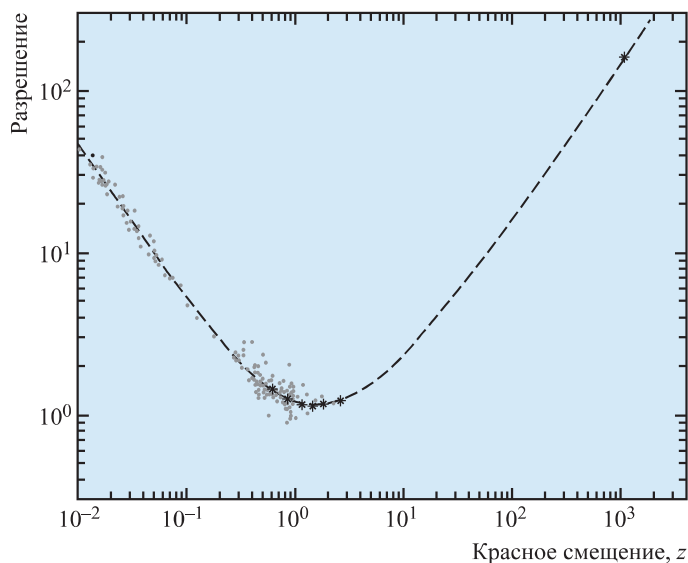


Диаграмма “угловой размер – красное смещение”. Каждая светлая звездочка – бин (шаг осреднения), содержащий 77 радиоисточников с миллисекундным размером. Темные звездочки соответствуют пятнам на карте реликтового излучения. Верхняя звезда справа соответствует размеру акустического горизонта Вселенной.

известные стандартные параметры галактик: например, на такие, как размер, светимость, масса, возраст и их соотношения, которые либо почти не изменяются в ходе эволюции, либо меняются по известному закону. Тогда, сопоставив их наблюдаемые величины в различные космологические эпохи с ожидаемыми в космологических теориях, можно сделать несколько выводов: об удаленности объектов и возрасте Вселенной на разных красных смещениях; о плотности и свойствах окружающей материи и пространства; оценить динамические параметры Вселенной. Кроме того, наблюдаемая связь между различными физическими параметрами радиогалактик: массой галактики, массой центральной черной дыры, оптической и радио-

светимостью и другими позволяет говорить о существовании так называемой фундаментальной плоскости радиогалактик. Эта связь упрощает применение некоторых космологических тестов.

Определить космологические параметры сложно – нужна достаточно большая выборка объектов на различных красных смещениях (z), передавших нам информацию из нескольких космологических эпох. Здесь особенно важен поиск объектов на больших красных смещениях ($z > 2$), где радиоисточников известно не так много. Измерение красных смещений для наиболее далеких объектов – занятие трудоемкое, так как требует большого времени накопления сигнала. Для ускорения процесса применяют различные методы отбора кандида-

тов в далекие объекты, позволяющие увеличить вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. В мире работает по этому направлению несколько групп ученых: в Голландии, Великобритании, Германии, Индии, США и в России.

Остановимся на описании некоторых космологических тестов, базирующихся на физических свойствах радиогалактик.

СТАНДАРТНАЯ ЛИНЕЙКА

Зависимость размера источника от значения красного смещения является одним из наиболее часто используемых тестов для определения параметров Вселенной в области наблюдательной космологии. К примеру, если мы знаем физический размер объектов на различных красных смещениях, то их угловой размер характеризует динамику расширения Вселенной. У радиогалактик, являющихся эволюционирующими

радиоисточниками, в качестве “стандартной линейки” можно использовать две предельные величины: минимальную – размер ядра радиогалактики, определяемый размером (или массой) сверхмассивной черной дыры – и максимальный размер, определяемый скоростью и временем разлета струй из ядра галактики. Комбинируя данные различных экспериментов по угловому размеру, можно довольно точно определить космологическую модель. По такому пути пошли британские астрономы Дж. Джексон и А. Джанентта в 2006 г., объединив данные об угловых масштабах миллисекундных радиоисточников, теоретически характеризующих размер ядра, и о пятнах флуктуаций реликтового излучения (вплоть до горизонта Вселенной на $z = 1100$ для пятен размером $\sim 25'$). Это можно сделать, используя параметр расширения Хаббла – зависимость $H(z)$, представляющую собой функцию, содержащую значения плотности разных компонентов Вселенной.

Полученная диаграмма позволяет проводить совместные оценки космологических параметров, получаемых при анализе данных от принципиально “независимых” экспериментов. В результате авторы получают следующие оценки значений параметров: плотность

материи $\Omega_m = 0,302$, темная энергия $\Omega_\Lambda = 0,694$, а также параметр кривизны $K = 0,013$. Отметим интересный момент – плавную стыковку масштабов, придающую символический смысл объединению разных подходов в космологии в одной диаграмме.

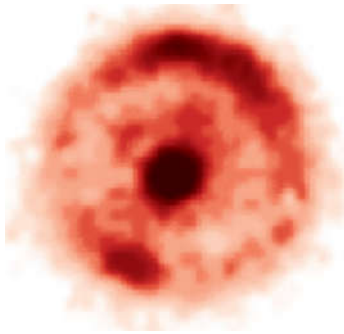
Вторая возможность использовать “стандартную линейку” – определить космологические параметры по физическому разнесу струй (максимальному размеру радиоисточников) – расстоянию между горячими пятнами в протяженных компонентах. Для этого нужно знать общие эволюционные свойства радиогалактики: скорость движения струй, типичные время активности и размер радиоисточника в выбранную эпоху, ряд других свойств. Тогда можно найти и применить “стандартную линейку”, изменяющуюся с космологическим временем по известному закону. В 2000 г. эту работу проделала группа астрофизиков под руководством Р. Дэйли (США), подтвердив присутствие темной энергии как одного из компонентов плотности.

Отметим, что большое разнообразие форм радиоисточников размером порядка килопарсека затрудняет точное измерение параметров. Для определения размера парсека необходимо иметь представление о механизме радиоизлу-

чения, дающем представление о действительном размере активного ядра. Тем не менее стандартные параметры, описывающие “центральную машину” – такие, как масса центральной черной дыры, скорость аккреции, угловой момент и величина магнитного поля – поддаются измерению. Это позволяет надеяться, что предлагаемые подходы для оценки космологической модели работают удовлетворительно.

СТАНДАРТНАЯ СВЕЧА

“Стандартная свеча” – один из часто применяемых тестов в космологии; именно с его помощью была открыта темная энергия, когда в качестве стандарта использовалась светимость вспышки сверхновой типа Ia. Применение теста “стандартной свечи” в изучении радиогалактик имеет проблемы, близкие для теста “стандартная линейка”. Радиоисточники эволюционируют, и довольно сложно установить, на каком этапе находится исследуемая радиогалактика. Радиосветимость объекта зависит от массы центральной черной дыры, темпа аккреции, типа мерджинга и от времени жизни радиоисточника. Зная функцию светимости радиогалактик (с учетом предела Эддингтона, определяемого равновесием между давлением



Гравитационная линза типа “эйнштейновское кольцо” – радиисточник JVAS B1938 + 666 в созвездии Дракона. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

излучения и гравитацией звезды), можно оценить число объектов с максимальной возможной мощностью на заданном красном смещении. Отобрав в заданных интервалах красного смещения объекты с максимальной радиосветимостью, можно построить шкалу расстояний. Желательно иметь полную выборку радиогалактик на небе и знать функцию их светимости. В этой категории тестов радиогалактики сильно проигрывают сверхновым Ia.

Рассмотрим оптическую светимость радиогалактик. Как мы уже говорили выше, мощные радиогалактики, как правило, идентифицируются с гигантскими эллиптическими галактиками. Такие объекты имеют сравнительно однородное, пассивно эволюциониру-

ющее звездное “население”, эволюция которых легко описывается. Кроме того, если гигантские эллиптические (gE) галактики, являясь центральными галактиками скоплений, возникали приблизительно в одну космологическую эпоху, то они должны иметь схожую историю звездообразования и, таким образом, являться стандартом в послереионизационный период эволюции Вселенной. В качестве основного зонда в ранние эпохи ($z > 1$) для поиска gE-галактик как раз и используются радиогалактики. Основным здесь является тест “инфракрасная звездная величина – красное смещение” (диаграмма Хаббла для K-величины “K-z”). В применении к радиогалактикам тест “чувствителен” как к эволюции их звездного “населения”, так и к выбору космологической модели.

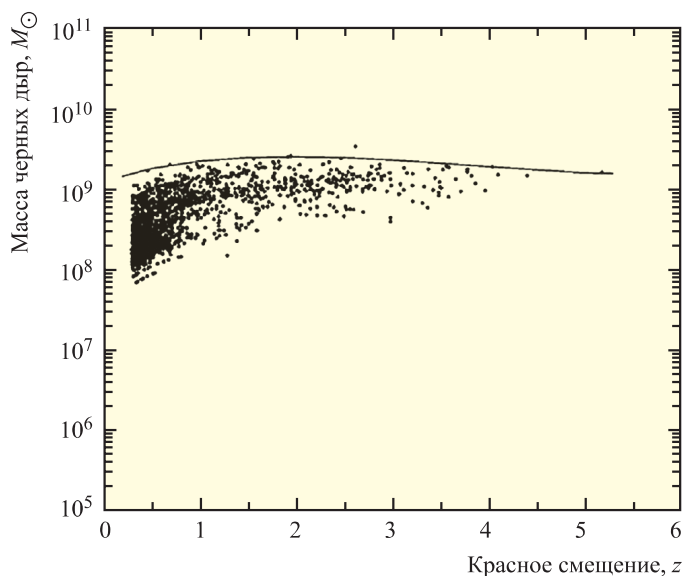
“СТАНДАРТНЫЕ ЧАСЫ” – ВОЗРАСТ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Возраст галактики также позволяет создать независимый от космологии тест, основанный лишь на скорости термоядерных реакций внутри звезд, – для оценки динамики расширения Вселенной. Если мы знаем эпоху возникновения галактик и можем измерить их возраст по составу звездного “населения”, то можем и оценить возраст Вселенной (t) на за-

данном красном смещении (z). Возраст галактик характеризует и эволюцию вещества во Вселенной в целом, и эволюцию активности ядер галактик, и связанные с ними сверхмассивные черные дыры. Так, например, обнаруженная радиогалактика TNJ0924–2201 в созвездии Гидры с $z = 5,19$ показала, что для массивной черной дыры, “ответчающей” за активность галактики (при возрасте Вселенной около 1 млрд лет), важен очень быстрый и эффективный процесс ее образования, который на тот момент необходимо было объяснить. Другая интересная проблема связана с существованием очень старого звездного “населения” на больших красных смещениях. Загадка, связанная с быстрым формированием гигантских эллиптических галактик, решается в иерархической схеме в рамках современной стандартной модели Λ CDM (с доминирующей темной энергией и холодной темной материей), когда галактики типа gE быстро “вырастают” за счет слияний сотен мелких (при $z = 10–13$). Это было продемонстрировано в модельном эксперименте построения крупномасштабной структуры Вселенной – “Миллениуме”.

Для оценки возраста звездной системы требуются фотометрические измерения и знание распределения энергии

График распределения значений масс черных дыр, рассчитанных по светимости на длине волны 6 см для 2400 радиогалактик. По данным М. Хабибуллиной и О. Верходанова, 2011 г.



в спектре эллиптических галактик; оно определяется составом звездного "населения" и зависит от возраста звезд галактики. Это зависит от выбора оптимальной модели спектра, соответствующей фотометрическим данным. Тогда, используя максимальный возраст галактик из имеющихся в выборке на заданных z , можно построить огибающую кривую $t(z)$, характеризующую возраст Вселенной, и, как следствие, — определить динамику ее расширения. Последняя описывается параметрами плотности разных компонентов Вселенной, от которых зависит скорость ее расширения — параметр Хаббла $H(z)$.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ

Открытие предсказанных Эйнштейном гравитационных линз дало мощный толчок в развитии методики измерения космологических параметров и поиске далеких объектов. Радиогалактики на этом пути были практически первыми объектами, которые применялись в качестве зондов при поиске гравитационных линз. Это связано и с тем,

что родительские галактики являются, в основном, самыми массивными галактиками скоплений, наиболее сильно искривляющими пространство.

Поисковые обзоры гравитационных линз важны для космологии. При внушительном числе зарегистрированных гравитационных линз оценку космологических параметров можно сделать большому их количеству на различных красных смещениях. Например, оценки, полученные в 2002 г. в обзоре неба CLASS на радиотелескопе VLA (США), показали, что доля материи во Вселенной составляет $\Omega_m = 0,31$. Гравитационные линзы в настоящий момент являются одним из наиболее важных независимых тестов при исследовании космологических параметров плотности материи. Кро-

ме того, фокусируя и усиливая проходящее около них излучение, они позволяют обнаружить далекие объекты, недоступные для наблюдения с помощью существующих инструментов. Таким образом (наряду с предоставлением возможности измерения параметров) линзы являются "гигантскими космическими телескопами" для исследования очень далекой Вселенной. Отметим, что самая первая гравитационная линза типа "эйнштейновское кольцо" наблюдалась в обзоре "Холод" на РАТАН-600 и выглядела как двойной радиоисточник RC1131 + 0456 в созвездии Льва, и в 1988 г. в обзоре Массачусетского технологического института была распознана как гравитационная линза.



**СВЕРХМАССИВНЫЕ
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ**

Одной из главных проблем в исследовании далеких радиогалактик ($z > 3$) является проблема

20

Крупные инструменты, использовавшиеся в наблюдениях по программе "Большое Трио": а – радиотелескопы РАТАН-600 САО РАН, б – VLA (NRAO, США); в – оптический 6-м телескоп БТА САО РАН. Фото САО РАН и NRAO, США.



определения происхождения и скорости роста сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в их ядрах. Открытие радиогалактик на больших красных смещениях ($z = 5,19$ и $4,515$), когда возраст Вселенной составлял $1,1-1,3 \times 10^9$ лет, а квазаров 800–900 млн лет ($z = 6,43$ и $7,085$) после Большого взрыва – показало, что существует загадка быстрого образования СМЧД массами $10^9 M_{\odot}$ в самую раннюю эпоху. Быстрое (в течение 800 млн лет) образование черных дыр в рамках модели Λ CDM требует применения особых моделей, объясняющих такую скорость роста. Если формирование массивных черных дыр описывается

иерархической схемой (как и формирование их родительских галактик), то этот процесс должен быть быстрым и эффективным. Для объяснения существования СМЧД привлекаются и модели с первичными массивными черными дырами, сформировавшимися после Большого Взрыва (но до образования галактик).

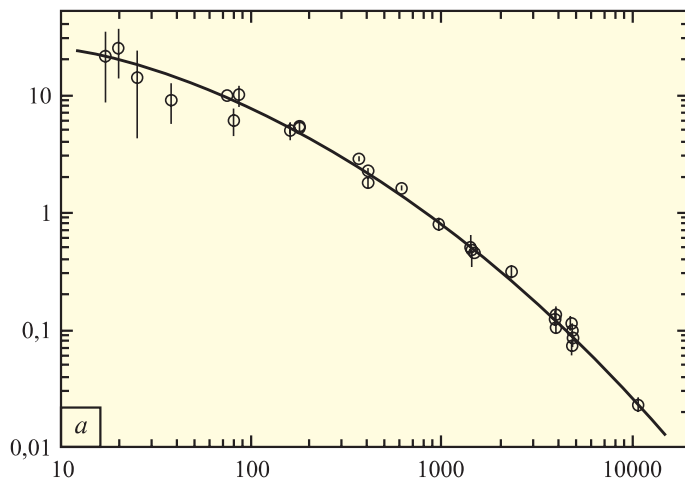
В рамках иерархической модели, соответствующей космологической модели Λ CDM, удастся объяснить рост СМЧД слиянием меньших черных дыр. Тогда максимум активности ядер галактик будет приходиться на $z = 2$. Наши оценки масс черных дыр для 2400 далеких радио-

галактик тоже помогают выделить эту эпоху массового слияния галактик, соответствующую иерархической модели.

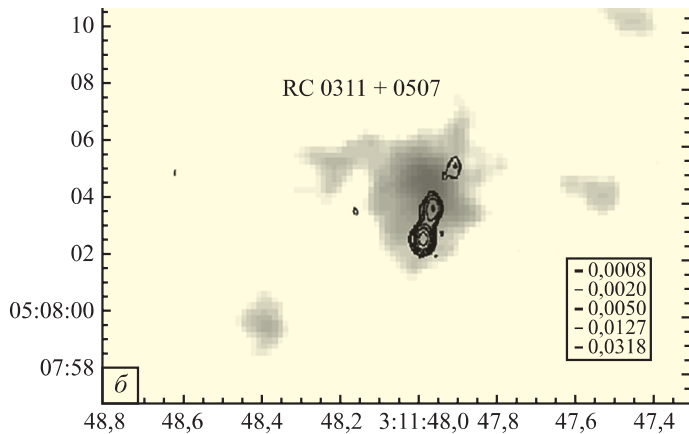
ПРОГРАММА “БОЛЬШОЕ ТРИО”

Российский проект “Большое Трио”, проводимый в CAO РАН, также направлен на поиск и исследование далеких радиогалактик. Обзор исследований радиогалактик и результатов проекта “Большое Трио” приведен в монографии авторов “Радиогалактики и космология” («Физматлит», 2009). Отбор кандидатов в далекие радиогалактики проходил в несколько этапов:

– селекция обнаруженных в обзоре “Холод” на



Графики радиоспектра источника RC J0311 + 0507 в созвездии Кита: а – спектральный индекс равен 1,31 в диапазоне частот 365–4850 МГц; б – наложение линий равной радиояркости (радиоизофот) объекта RC J0311 + 0507 на изображение родительской галактики в фильтре R по данным БТА. По данным А. Копылова и других, 2006 г.



РАТАН-600 объектов по спектральным индексам с использованием низкочастотного (365 МГц) каталога Техасского обзора;

– картографирование этих объектов с помощью VLA с целью морфологической классификации и для уточнения их координат;

– оптическое отождествление по Паломарским картам (позднее и по другим обзорам: DSS2, SDSS);

– желательная вторичная селекция объектов с признаками двойственности, характерными для FR II;

– глубокая многоцветная фотометрия (оценка фотометрических и цветовых красных смещений и цветового возраста звездного “населения”);

– спектроскопия наиболее интересных объектов;

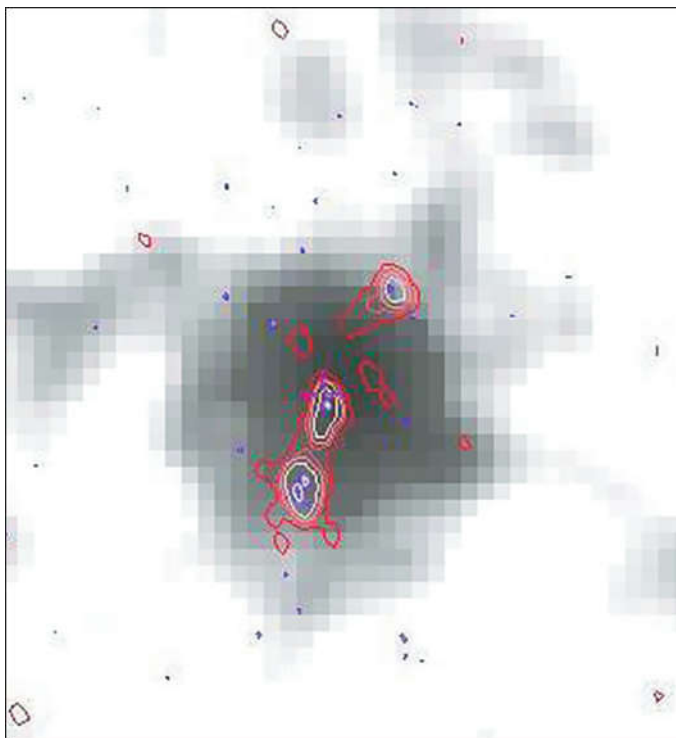
– определение физических характеристик: состояние, размеры, энер-

гия релятивистских частиц и магнитного поля, ожидаемый поток рентгеновского излучения с учетом комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на космических лучах в радиокомпонентах; распределение по красному смещению и по цветовому возрасту звездного “населения”; оценка момента формирования родительской галактики, массы сверхмассивной черной дыры в их центре, темпов роста черных дыр);

– оценка космологических параметров по тесту “стандартные часы”.

В программе “Большое Трио” далекие объекты выбирались из источников с наиболее “крутым” радиоспектром. Это увеличивало вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. Далее на радиоинтерферометре VLA строились карты радиоисточников и из них отбирались объекты типа FR II как более молодые и мощные.

Радиогалактика RC J0311 + 0507, удаленная от нас на 12,5 млрд св. лет. На оптическое изображение, полученное на телескопе БТА, наложены линии равной радиояркости (радиоизофоты), демонстрирующие форму радиоисточника. Радиоизмерения сделаны на телескопе MERLIN (Великобритания). По данным Ю. Парийского и других, 2014 г.



Подготовленные списки источников использовались в фотометрических и спектральных наблюдениях на БТА.

Одним из выдающихся результатов программы “Большое Трио” стало обнаружение радиогалактики RC J0311 + 0507 (созвездие Кита) на красном смещении $z = 4,514$, когда возраст Вселенной составлял 1,3 млрд лет. Эта радиогалактика стала второй по дальности и первой из наиболее удаленных (дальше 12,5 млрд св. лет, или $z > 4$) по радиомощности. Оценка массы центральной сверхмассивной черной дыры по радиосветимости составила приблизительно $10^{10} M_{\odot}$, что говорит о ее быстром росте в ранние эпохи эволюции Вселенной.

Используя результаты программы “Большое Трио”, мы также провели космологический тест, связанный с возрастом звездного “населения” (по фотометрическим данным наблюдений БТА

и других телескопов). Применяв этот подход для выборки далеких радиогалактик и гигантских эллиптических галактик скоплений, мы определили с точностью до 10% плотность материи ($\Omega_m = 0,2$) и темной энергии ($\Omega_\lambda = 0,8$), а также постоянную Хаббла ($H_0 = 71,5$ км/с/Мпк). Несмотря на различие параметров от измеренных позднее с помощью европейской космической обсерватории “Планк” (Земля и Вселенная, 2014, № 1), они не противоречили стандартной космологической модели Λ CDM. Важно отметить, что методы (с использованием цветных и спектральных возрастов галактик)

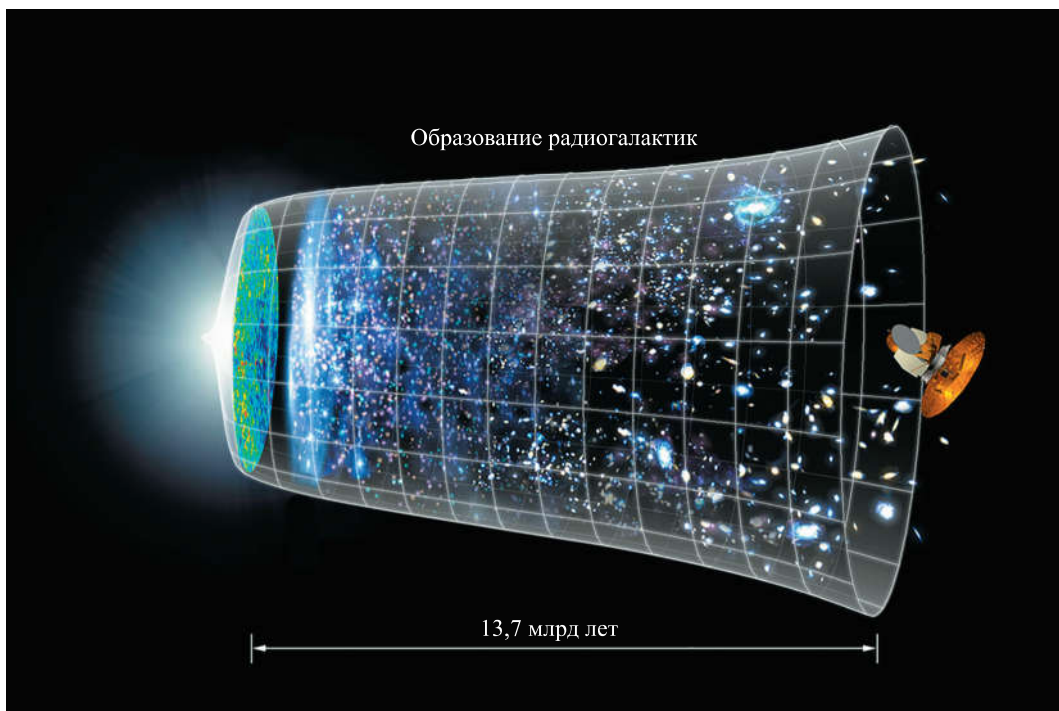
основаны на измерении скорости расширения Вселенной с помощью физических процессов, связанных не с космологией, а с темпами термоядерных реакций в звездах.

Приведем важные результаты программы “Большое Трио”:

- построены радиоспектры объектов; 10% (104 источника) из них оказались “крутыми” (по данным PATAH-600);

- построены радиоизображения радиоисточников с секундным или с субсекундным разрешением (по данным радиоинтерферометра VLA);

- проведено сравнение в видимом свете радиоисточников с “крутыми



спектрами” с объектами Паломарского атласа неба и снимками 6-м телескопа САО РАН в глубоком обзоре;

- для 50 объектов (в основном, ярче 22^m) измерены красные смещения;

- подготовлен атлас оптических изображений радиогалактик и квазаров для RC-каталога;

- обнаружена радиогалактика с красным смещением $z = 4,514$ – вторая по дальности и первая среди очень далеких ($z > 4$) по радиомощности;

- оценены возрасты звездных систем и z их образования по фотометрическим данным и синтетическим моделям спектров;

- построена зависимость $t(z)$, по которой оценены космологические параметры Хаббла (H_0) и плотности темной энергии (Ω_λ).

СОВРЕМЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторы рассмотрели основные этапы исследования радиогалактик, открытых на радиотелескопе РАТАН-600 в ходе выполнения программы “Большое Трио”. Удивительным фактом стало открытие среди относительно небольшого первичного списка радиисточников RC-каталога новой, второй по дальности среди известных, радиогалактики. Для небесных объектов программы

Современная модель этапов эволюции Вселенной. Эпоха возникновения первых радиогалактик соответствует возрасту Вселенной – 0,7–1,2 млрд лет. Рисунок NASA.

“Большого Трио” измерено множество физических параметров, характеризующих эволюцию звездного населения и сверхмассивных черных дыр в далеких радиогалактиках. Отметим, что изучение радиогалактик не ограничивается анализом их физических свойств, но позволяет понять эволюцию Вселенной. К настоящему времени мы, скорее всего, уже знаем стандартную космологическую модель,

соответствующую фундаментальным параметрам:

– известен химический состав Вселенной: ~75% H, ~25% He; малая часть (0,01%) включает остальные химические элементы;

– подтверждено существование реликтового излучения и его флуктуации (позволившие по данным космических обсерваторий “WMAP” и “Планк” определить все основные космологические параметры);

– определена крупномасштабная структура Вселенной;

– темная материя доминирует над видимой в галактиках и скоплениях галактик (по данным обсерватории “Планк”, плотность темной материи составляет $\Omega_{\Lambda\text{CDM}} = 0,259$, плотность видимой материи – $\Omega_b = 0,049$);

– Вселенная расширяется, ускоряясь (по данным обсерватории “Планк”; плотность темной энергии $\Omega_\lambda = 0,691$, постоянная Хаббла $H_0 = 67,74$ км/с/Мпк).

Однако может оказаться, что существуют и “пропущенные” параметры в космологической модели ΛCDM , они измеряются независимо (как это случилось с плотностью темной энергии в конце прошлого века). Независимые космологические тесты, основанные на разнообразных данных (в том числе и по радиогалактикам), могут помочь в подобных исследованиях.

На радиотелескопе РАТАН-600 исследования радиогалактик продолжаются. Строятся новые радиотелескопы –

SKA, ALMA, LOFAR, которые открывают новые возможности в исследовании радиогалактик, в понимании физики происходящих в них процессов; они позволяют заглянуть в эпоху формирования первых звезд и галактик, “увидеть” слияние сверхмассивных черных дыр. Можно ожидать, что дальнейшие исследования радиогалактик подарят нам еще много интересного.

Авторы выражают признательность своим коллегам, принимавшим участие в программе “Большое Трио” на разных этапах ее выполнения: Н.С. Соболевой (СПбФ СО РАН), О.П. Желенковой (САО), Уи. М. Госсу (НРАО, США), А.И. Копылову (САО) и А.В. Тимирову (СПбФ САО).

Информация

Эмиссионная туманность в Малом Магеллановом Облаке

В апреле 2016 г. с помощью 8,2-м телескопа VLT Европейской Южной Обсерватории (Параналь, Чили) астрономы получили снимок пылающего газового облака – эмиссионной туманности LHA 120-N55, или N55 (см. стр. 4 обложки). Она расположена на расстоянии 163 тыс. св. лет

в Большом Магеллановом Облаке, спутнике нашей галактики, в газопылевом сверхпузыре малой спутниковой галактики LKM 4. Туманность сформировалась в результате выдувания газа мощным звездным ветром и действия нескольких взрывных волн после вспышек сверхновых, но осталась нетронутой внутри сверхпузыря (такие образования диаметром сотни световых лет обнаружены в эмиссионных туманностях; Земля и Вселенная, 2013, № 1, с. 54). Это привело к тому, что внутри равномерно распределенных газовых слоев и космиче-

ской пыли, оставшихся после эволюции звезд, возникли пустоты. В ближайшие несколько миллиардов лет она будет менять свой облик и станет питать сверхновые. Яркие голубые звезды в туманности родились сотни миллионов лет назад, но уже после того, как образовалась туманность. Сейчас наблюдается процесс переноса атомов водорода ветром молодых звезд к окружающим газовым облакам.

Наблюдение туманности N55 позволит понять этапы возникновения новых поколений звезд.

Пресс-релиз ESO,
18 мая 2016 г.