ФОРМИРОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И H_2O МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Л. И. Матвеенко

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32
e-mail: matveen@iki.rssi.ru

Рассмотрен метод радиоинтерферометрии со сверхбольшими базами и результаты исследований тонкой структуры ядер галактик и областей звездообразования. Характерная структура AGN-объектов – компактное яркое ядро и джет. Ядро окружено тепловой плазмой, наблюдаемой в эмиссионных линиях. Видимость ядра определяется прозрачностью плазмы, а сопло эжектора наблюдается лишь на волнах миллиметрового диапазона. Джет – скрученный поток релятивистской плазмы, M 87. Реактивное воздействие эжектируемого потока вызывает многомодовую прецессию оси эжектора, в результате чего формируется структура джета в виде расходящейся конической спирали с переменным шагом. В ядре объекта 1803+784 на волне 7 мм обнаружен эжектор и диск диаметром 1 пк. Определена тонкая структура джета. Аналогичная структура (диск – биполярный поток) наблюдается в активной области в газопылевом облаке Ориона КЛ в линиях мазерного излучения водяного пара. Благодаря мегамазерному уровню излучения достигнуто 10-мксд-разрешение, определена трехмерная структура объекта и распределение скоростей компонентов. Установлено твердотельное вращение диска, определены скорости эжекции вещества, параметры спиральной структуры джетов, верхний предел массы центрального тела не превышает $0.01\,M_{\odot}$. В ряде ядер галактик также наблюдается мазерное излучение в линиях водяного пара. В галактике NGC 4258 распределение скоростей мазерных источников в диске соответствует его твердотельному вращению. Вышеуказанные структуры аналогичны вихрям – торнадо. Окружающее вещество аккрецирует на диск и эжектируется по оси вращения. Повышенное давление в центре способствует формированию массивного тела, гравитационное поле которого стабилизирует структуру.

ВВЕДЕНИЕ

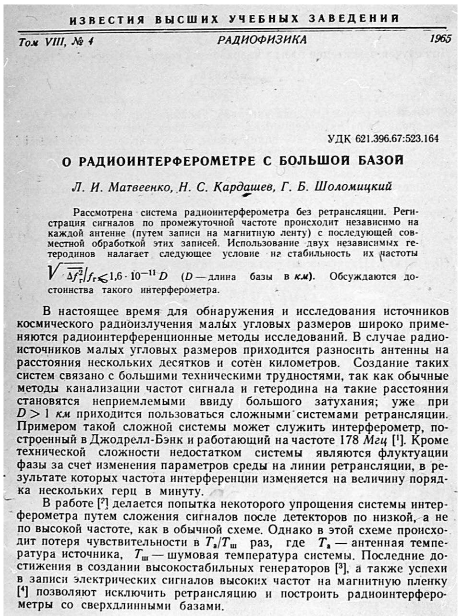
2009 г. – год астрономии. 400 лет назад Галилей создал телескоп и обнаружил на Луне горы, а у Юпитера – четыре спутника. Не случайно говорят – лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Изображение объекта наиболее информативно и тем выше, чем лучше разрешающая сила. Угловое разрешение определяется размерами апертуры, выраженной в долях длины волны принимаемого сигнала. В послевоенные годы радиоастрономы активно осваивают диапазоны радиоволн. Но стоит непреодолимая проблема – длины радиоволн в десятки тысяч раз превышают оптические. Чтобы достичь углового разрешения хотя бы невооруженного глаза, нужны радиотелескопы чудовищно больших размеров. Радиоастрономы применяют радиоинтерферометрический метод, метод мерцаний, но все это лишь частное решение стоявшей проблемы.

Радиоастрономия – симбиоз радио и астрономии. Астрономы знали, что нужно исследовать, но не представляли, как это сделать. Радиоинженеры знали, как исследовать, но не понимали, для чего это нужно. Практически, это направление исследований – пассивная локация. В этом плане примечательны и работы Кирхгофа. На первый взгляд, они не имели ничего общего с астрономическими исследованиями. Закон Кирхгофа – сумма токов в данной точке равна нулю, взаимосвязь теплового излучения и поглощения, спектральные линии. Но сегодня – это основа астрофизических исследований. Спектральные исследования в сочетании с высоким угловым разрешением РСДБ открыли детальную трехмерную структуру областей звездообразования и галактик. Зависимость теплового излучения и поглощения лежит в основе исследований областей H II. Поток релятивистских электронов, входящих в данный объем джета, равен уходящему.

Разработка прецизионных антенн, создание малошумящих приемных устройств и атомных стандартов частоты, прогресс вычислительной техники позволили преодолеть технические ограничения углового разрешения – создать радиоинтерферометры со сверхбольшими базами. Метод РСДБ открыл окно во Вселенную [8]. Стали доступны для исследований не только объекты нашей Галактики, но и самые удаленные из них.

ЭПОХА ОСВОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В конце 50-х годов начинается освоение космического пространства. Остро стоит вопрос об управлении полетом космических аппаратов. Уже в первых запусках космических ракет-лунников радиоастрономы внедряют радиоинтерферометрические методы измерения координат аппаратурных контейнеров, летящих к Луне [3]. Вблизи Евпатории строится Центр дальней космической связи (ЦДКС).



ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том VIII, № 4 — РАДИОФИЗИКА — 1965

УДК 621.396.67:523.164

О РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ

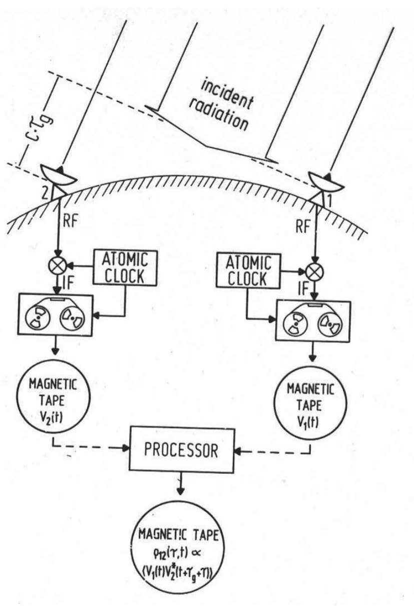
Л. И. Матвеенко, Н. С. Кардашев, Г. Б. Шоломицкий

Рассмотрена система радиоинтерферометра без ретрансляции. Регистрация сигналов по промежуточной частоте происходит независимо на каждой антенне (путем записи на магнитную ленту) с последующей совместной обработкой этих записей. Использование двух независимых гетеродинов налагает следующее условие нг стабильность их частоты $\sqrt{\overline{\Delta f_{г}^2}}/f_{г} \leqslant 1{,}6 \cdot 10^{-11} D$ (D — длина базы в *км*). Обсуждаются достоинства такого интерферометра.

В настоящее время для обнаружения и исследования источников космического радиоизлучения малых угловых размеров широко применяются радиоинтерференционные методы исследований. В случае радиоисточников малых угловых размеров приходится разносить антенны на расстояния нескольких десятков и сотен километров. Создание таких систем связано с большими техническими трудностями, так как обычные методы канализации частот сигнала и гетеродина на такие расстояния становятся неприемлемыми ввиду большого затухания; уже при $D > 1$ *км* приходится пользоваться сложными системами ретрансляции. Примером такой сложной системы может служить интерферометр, построенный в Джодрелл-Бэнк и работающий на частоте 178 *Мгц* [1]. Кроме технической сложности недостатком системы являются флуктуации фазы за счет изменения параметров среды на линии ретрансляции, в результате которых частота интерференции изменяется на величину порядка нескольких герц в минуту.

В работе [2] делается попытка некоторого упрощения системы интерферометра путем сложения сигналов после детекторов по низкой, а не по высокой частоте, как в обычной схеме. Однако в этой схеме происходит потеря чувствительности в $T_а/T_ш$ раз, где $T_а$ — антенная температура источника, $T_ш$ — шумовая температура системы. Последние достижения в создании высокостабильных генераторов [3], а также успехи в записи электрических сигналов высоких частот на магнитную пленку [4] позволяют исключить ретрансляцию и построить радиоинтерферометры со сверхдлинными базами.

а



б

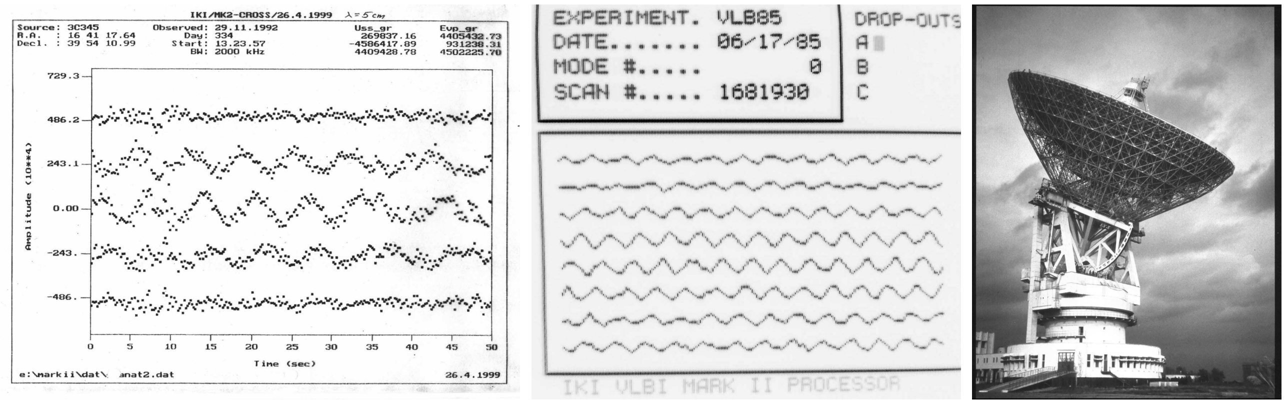
Рис. 1. Первая публикация о методе РСДБ (*а*). Схема радиоинтерферометра с независимой регистрацией сигналов (*б*)

Создается интерферометрический измерительный комплекс. Требуемые точности определения координат достигают 0.1 сд. Но для юстировки инструмента нужны были яркие опорные источники космического радиоизлучения с еще лучшей точностью координат. Крабовидная туманность, точнее одна из ее центральных звездочек (в будущем нейтронная звезда, пульсар), претендует на эту роль. Исследуются также источники с пекулярными спектрами – высокочастотными избытками. Крабовидная туманность исследуется методом покрытий в широком спектре радиоволн [9]. Этот метод эквивалентен наблюдениям вдоль базы на интерферометре Земля – Луна. На волне 32 см были обнаружены дифракционные лепестки, соответствующие компактному радиоисточнику – нейтронной звезде. Но не менее важно для астрофизики было обнаружение в Крабе компактной области переменного радиоизлучения [10]. Результат был настолько необычен, что астрофизики не могли в это поверить. При наблюдении покрытий источника 3С 273 был также обнаружен компактный квазизвездный объект – квазар и джет, определены их спектры. Квазар имеет спектр с высокочастотным избытком [24]. Продолжаются поиски компактных источников в объектах с пекулярными спектрами. Обращается внимание на возможную переменность высокочастотных избытков. Но все это не снимало проблем высокого углового разрешения. Метод покрытий имеет существенные ограничения – далеко не все источники покрываются Луной. Нужен метод оперативного управления полетом, определения траектории движения космического аппарата.

РСДБ – ИНТЕРФЕРОМЕТР С НЕЗАВИСИМОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ

Метод РСДБ, результат взаимодействия промышленности и науки, был впервые рассмотрен на ЦДКС ранней весной 1962 г. и получил одобрение руководителя центра Г. Я. Гуськова. Был разработан график проведения испытаний. Центр был оснащен необходимым оборудованием, которое использовалось для длиннобазовых доплеровских измерений. Но оказалось, что главные трудности определяются не техникой, а, как теперь говорят, человеческим фактором [19]. Первая публикация (рис. 1, *а*) появилась в печати в 1965 г. [8]. Реализован метод РСДБ был американской и независимо канадской группами в 1967 г. Метод РСДБ аналогичен интерферометру Майкельсона. Техническое отличие лишь в том, что сигналы исследуемого объекта принимаются на далеко разнесенных антеннах, преобразуются без потери когерентности с помощью атомных стандартов частоты и регистрируются на магнитных носителях. Одновременно записываются сигналы времени для совмещения записей при последующей корреляционной обработке в вычислительном центре (рис. 1, *б*).

Полученные коррелированные сигналы соответствуют радиоинтерференционным лепесткам. На рис. 2, *а* и 2, *б* показаны лепестки от квазара 3С 345 в континууме и W3 OH в линии гидроксила. Наблюдения проводились на радиоинтерферометре Уссурийск–Евпатория на волне 18 см. Одна из 70-м антенн ЦДКС в Евпатории показана на рис. 2, *в*.



а б в

Рис. 2. Радиоинтерферометр Уссурийск–Евпатория, длина волны 18 см; радиоинтерференционные лепестки от квазара 3C 345 (*а*) и от источника W3 OH, излучающего узкую линию гидроксила (*б*); 70-м антенна в Евпатории (*в*)

Особенность радиоинтерферометрических исследований заключается в том, что в отличие от обычного телескопа радиоинтерферометр получает не изображение объекта, а одну из пространственных гармоник изображения, определяемую длиной базы, выраженной в длинах волн. Чтобы получить изображение, мы должны измерить все пространственные частоты, то есть провести наблюдения на радиоинтрферометрах с базами разной длины и ориентации. Само изображение получается обратным преобразованием Фурье. Практически наблюдения проводятся одновременно на n антеннах, которые образуют $m = 0.5\,n(n-1)$ интерферометров. Для этого все крупные радиотелескопы мира объединены в единую глобальную сеть. В США создана специализированная система VLBA – очень большая антенная решетка. Исследования объектов проводятся в широком диапазоне радиоволн от миллиметровых до дециметровых включительно. Угловое разрешение интерферометра достигает долей интерференционного лепестка и определяется отношением сигнал/шум. В настоящее время достигнуто угловое разрешение 10 мксд в наблюдениях в линиях водяного пара [20]. Это разрешение соответствует углу, под которым видна с Земли монета, находящаяся на Луне. Рассмотрим отдельные источники.

КВАЗАРЫ

Дева A, M 87. Исследования тонкой структуры объектов с активными ядрами установили их характерную особенность: наличие компактного источника ядра – эжектора и потока релятивистской плазмы – джета. Ядро окружено ионизованной средой, наблюдаемой в эмиссионных линиях в оптике.

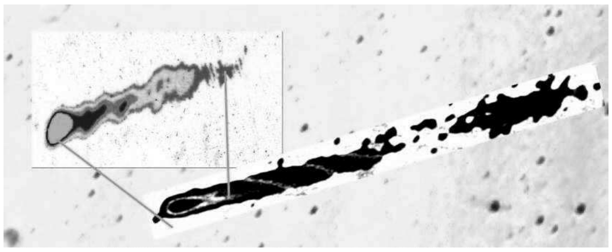
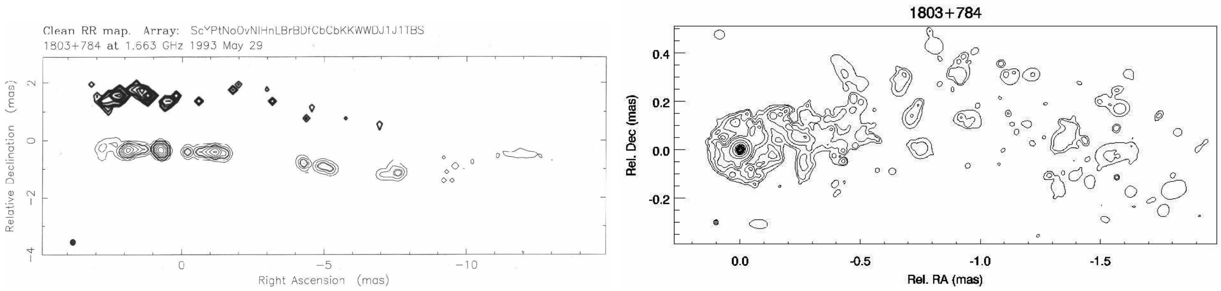


Рис. 3. Джет в источнике Дева A, длина волны 18 см (нижнее изображение), глобальная РСДБ-сеть. Вверху – область ядра на волне 6 см

Видимость эжектора – ядра определяется прозрачностью плазмы и доступна лишь на волнах мм-диапазона. В этой связи ядро на более длинных волнах – фрагмент джета, лежащий за пределами экрана с большой оптической толщей [13, 16]. Джет галактики Дева A представляет собой скрученный поток релятивистской плазмы (рис. 3). Размер радиоджета зависит от длины волны. С увеличением длины волны растет оптическая толща потока релятивистской плазмы и джет наблюдается на больших расстояниях. На волне 6 см (рис. 3, верхняя часть рисунка) джет меньше, чем на волне 18 см (рис. 3, нижняя часть рисунка). Видимый размер на волне 18 см достигает 25 пк.

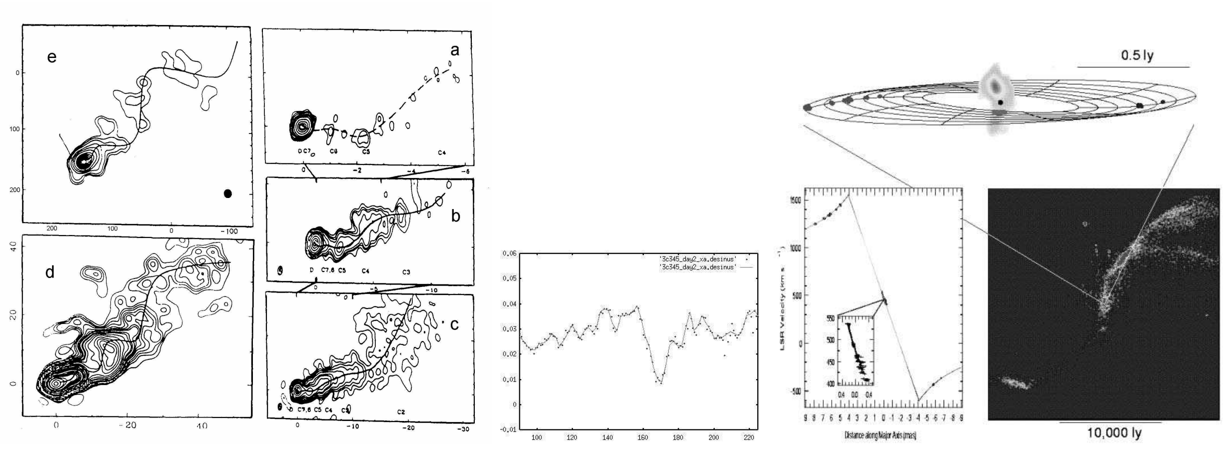
Объект 1803+784. Как и ранее, характерная структура объекта – ядро и джет. Но в этом случае джет имеет вид конической расходящейся спирали с переменным шагом и искривленной осью, угол прецессии достигает 10° [1, 2, 20]. Близлежащая часть джета показана в нижней части на рис. 4, *а*. Карта получена на глобальной сети на волне 18 см [21]. В наблюдениях участвовали два радиотелескопа РТ-22 в Симеизе и Пущино, РТ-64 – Медвежьи озера и РТ-70 в Евпатории. Прозрачность экрана в области эжектора очень мала – 30 дБ, а яркое ядро в действительности – фрагмент джета, наблюдаемый за пределами поглощающего экрана [7]. На волне 6 см видна близлежащая область джета спиральной формы, шаг спирали существенно меньше (рис. 4, *а*, верхняя часть). На волне 7 мм приведена усредненная карта области эжектора с разрешением 50 мксд (рис. 4, *б*). В центральной части кольца наблюдается сопло эжектора. Кольцо – аккреционный диск диаметром 1 пк, а размеры сопла не превышают 10 мксд. Яркостная температура сопла превышает 10^{13} K [22].



а б

Рис. 4. Джет AGN-объекта 1803+784, вверху волна 6 см, получен на VLBA; внизу – 18 см, получен на глобальной сети (*а*); усредненная карта области эжектора (*б*)

3C 345. Джет квазара достигает 3″ или 12 кпк. Его структура соответствует конической расходящейся спирали с переменным шагом и искривленной осью. Угол конической спирали больше, чем у источника 1803+784, и соответствует 15°.



а б в

Рис. 5. Радиокарты квазара 3C 345, волны от 1.13 до 92 см (*а*); рекомбинационная линия поглощения (*б*); галактика NGC 4258, излучение в мазерных линиях H_2O (*в*)

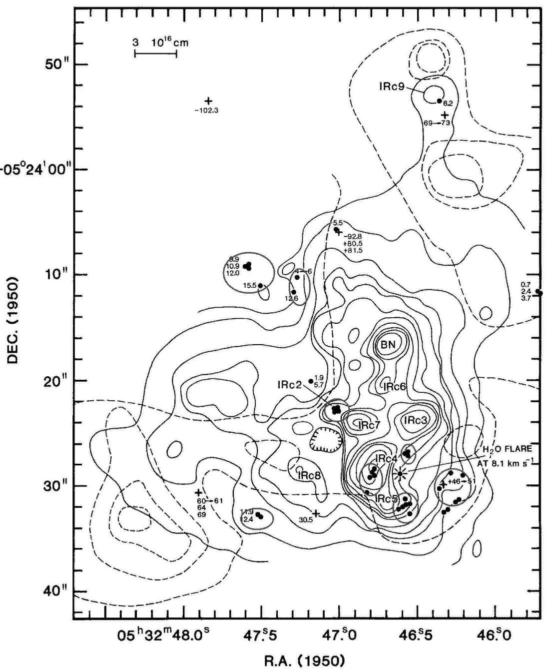
Джет на волнах от 1.35 см до 92 см приведен на рис. 5, *а*. Отношение угловых скоростей прецессий для источников 3C 345 и 1803+784 около 30 [22]. Если скорость и потеря массы у квазаров 3C 345 и Девы близки, то время эжекции и действия возмущающей силы у 3C 345 на несколько порядков превышает время активности у Девы. Это и определяет отличие размеров джета и параметров спирали. Синхротронное излучение ядра поглощается в окружающей ионизованной среде квазара более чем на –30 дБ на волне 49 см [15, 16]. Низкочастотная переменность квазара определяется изменением прозрачности экрана. Эта среда была исследована также в поглощении в рекомбинационных радиолиниях (рис. 5, *б*) [18].

NGC 4258. В ряде AGN-объектов было обнаружено мазерное излучение в линиях водяного пара. Спектральные исследования со сверхвысоким угловым разрешением позволили определить трехмерную структуру ядра галактики – аккреционного диска и определить его скорость вращения [4]. Диаметр диска достигает 0.7 пк, и в кеплеровском приближении масса центрального тела достигает 10^7 масс Солнца (рис. 5, *в*). Распределение скоростей источников в центральной части диска предполагает твердотельное вращение.

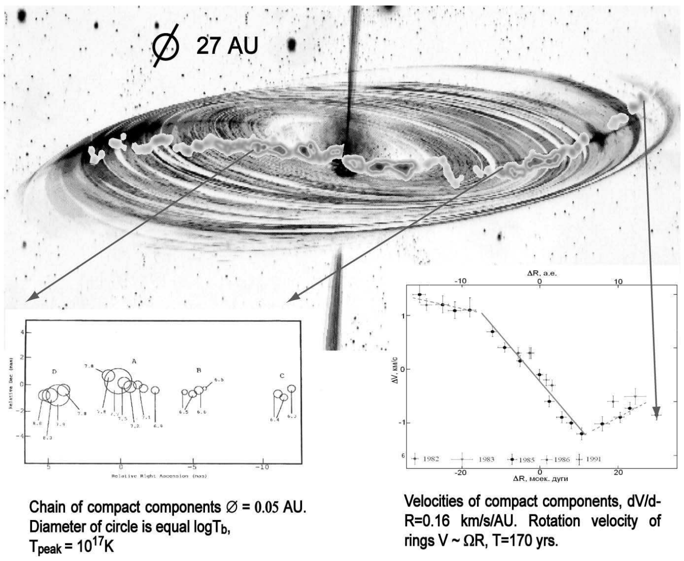
ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Открытие в газопылевых комплексах в 1969 г. группой Ч. Таунса, Беркли интенсивных линий радиоизлучения водяного пара ($\lambda = 1.35$ см) явилось мощным рычагом для изучения структуры и кинематики активных явлений, сопутствующих формированию звезд. Первые РСДБ-наблюдения установили мазерный механизм излучения. Рассмотрим один из комплексов в Туманности Ориона.

Орион КЛ. Туманность Ориона – космическая лаборатория в которой протекают физико-химические процессы формирования сложных молекул. Рассмотрим один из ее объектов – плотное молекулярное облако OMC-1. РСДБ-исследования выделили в ней восемь активных зон, в которых сосредоточены компактные яркие источники (рис. 6).



а

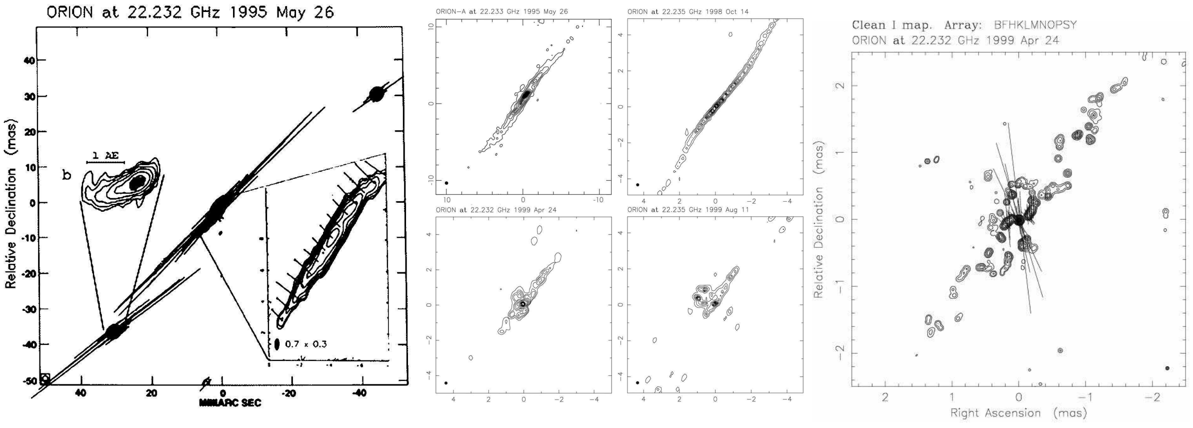


б

Рис. 6. Туманность Ориона включает восемь активных зон (*а*). Структура активной области мегамазерного излучения. В нижней части – цепочка компактных компонентов и распределение их скоростей (*б*)

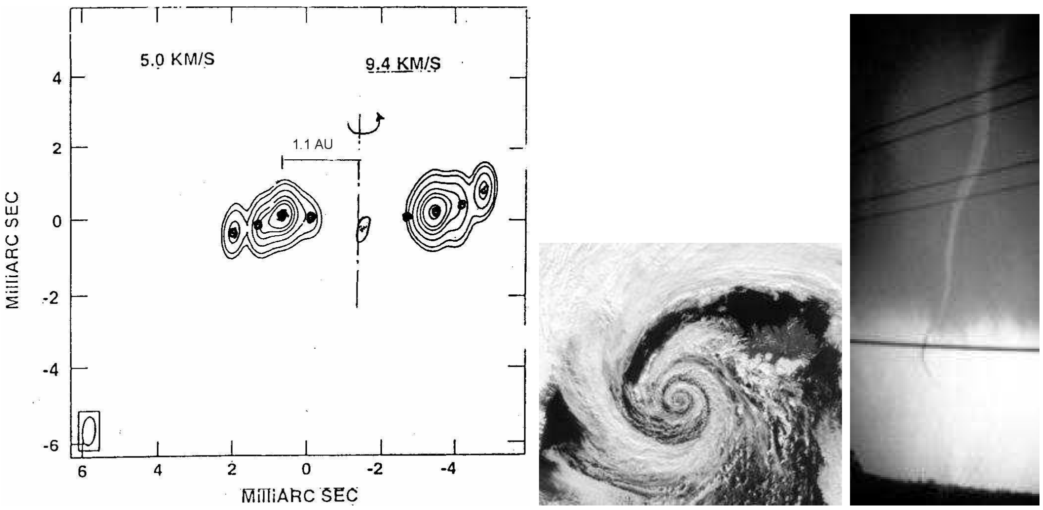
Наличие нескольких центров активности подтверждает гипотезу В. А. Амбарцумяна о коллективном процессе звездообразования в газопылевых комплексах. Этому процессу сопутствует мазерное излучение в линиях водяного пара. Размеры зон достигают размеров Солнечной системы [5]. В одной из зон эпизодически происходят вспышки мазерного излучения, достигающие нескольких МЯн. Ширина линии около 45 кГц. Излучение линейно поляризовано, уровень поляризации достигает 70%, при этом наблюдается экстраординарное вращение плоскости поляризации, достигающее 25°/(км/с) [11]. Было установлено, что повышенное излучение определяется цепочкой компактных компонентов, распределенных в вытянутой структуре S-образной формы, и биполярным потоком (рис. 6, *б*). Компактные источники – тангенциальные направления концентрических колец, а их скорости соответствуют твердотельному вращению, период которого равен 170 лет. Размер диска около 30 а. е. [6, 12, 14], скорость истечения биполярного потока достигает 10 км/с. Потоки имеют спиралевидную структуру с переменным шагом, что предполагает прецессию оси эжектора. Угловая скорость прецессии растет со временем в результате реактивного воздействия эжектируемых потоков. Окружающая среда–оболочка усиливает на два–три порядка излучение на скорости 8 км/с в полосе 0.5 км/с. Наблюдаемое излучение достигает мегамазерного уровня [11, 17]. Если принять движение внешних частей диска кеплеровским, то эквивалентная масса центрального тела не превышает $0.01\,M_{\odot}$.

Биполярный поток прослеживается на расстояниях до 50 а. е., при этом сохраняется его коллимация. При спаде мегамазерного излучения наблюдается тороидальная структура, внутри которой находится биполярный эжектор (рис. 7, *б*). Поляризованное излучение преобладает на выходе сопел эжектора (рис. 7, *в*). Потоки ориентированы друг относительно друга под углом 45°. Аналогично отличие ориентаций поляризации, что предполагает параллельную либо ортогональную ориентации поляризаций относительно потоков. Поляризация определяется ориентацией спинов воздействием направленной накачки – потоков [20]. Аналогичная структура (диск – биполярный поток) наблюдается в соседней области, удаленной от рассмотренной ранее на расстояние около 3 тыс. а. е.



а б в

Рис. 7. Структура области в период “молчания”, эпоха 1995, черточки соответствуют поляризации излучения (*а*). Эволюция биполярного потока во второй период активности (*б*). Область эжектора биполярного потока (*в*)



а б

Рис. 8. Структура второй области звездообразования в Орионе КЛ (*а*). Торнадо (*б*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокое угловое разрешение РСДБ открыло многообразие объектов Вселенной. Однако в ряде случаев, несмотря на отличие масштабов, принадлежность к разным типам, наблюдается определенное совпадение их структур. Структура галактик и областей звездообразования во многом идентична: диск – джет. Аналогичная структура наблюдается у нейтронной звезды в Крабовидной туманности и смерче – торнадо. В случае смерча и активной области в Орионе КЛ (рис. 8) отсутствует центральное массивное тело. Но возможно на начальном этапе формирования объекта структура определяется газовой динамикой, а не гравитацией [23]. В потоке вязкой среды неизбежно образование вихря – диска. Под действием кориолисовых сил окружающее вещество аккрецирует на диск и эжектируется по оси вращения. При этом вращение диска – твердотельное. Вращающийся биполярный самофокусируется. Направленное движение вещества к центру диска способствует формированию массивного тела, гравитационное поле которого ускоряет процесс и дополнительно придает устойчивость системе. В случае ионизованной среды возбуждается магнитное поле, фокусирующее джет.

Автор выражает свою признательность оргкомитету за организацию Конференции и гостеприимство. Он благодарит В. А. Демичева за помощь в оформлении статьи.

[1] *Бритцен С., Витцел А., Крихбаум Т., и др.* Исследования сверхтонкой структуры объекта 1803+784 // Письма в Астрон. журн. – 2001. – **27**, N 1. – С. 3–18.

[2] *Britzen S., Kricbaum T., Strom R. G., et al.* Large-scale motion, oscillation and a possible halo on the Counter-jet side in 1803+784 // Astron. and Astrophys.– 2005. – **444**. – P. 443.

[3] *Виткевич В. В., Кузьмин А. Д., Матвеенко Л. И. и др.* Радиоастрономические наблюдения советских космических ракет // Радиотехника и электроника. – 1961. – **9**. – С. 1421.

[4] *Greenhill L. J., Jiang D. R., Moran J. M., Reid M. J.* Detection of a subparsec diameter disk in the nucleus of NGC 4258 // Astrophys. J. – 1993. – **406**. – P. 482.

[5] *Genzel R., Downes D., et al.* New VLBI Map of H_2O Sources in Different Stages of Evolution // Astron. and Astrophys. – 1979. – **79**. – P. 233.

[6] *Демичев М. А., Матвеенко Л. И.* Область звездообразования в Орионе КЛ, эпоха 1985.8 // Астрон. журн. – 2004. – **48**. – С. 979.

[7] *Marscher A.* The core of Blazar Jet // Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma Ray. – ASP. Conf. Ser. – 2008. – **386**. – P. 437–443.

[8] *Матвеенко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. И.* О радиоинтерферометре с большой базой // Радиофизика. – 1965. – **4**. – С. 651.

[9] *Матвеенко Л. И.* Распределение радиояркости в Крабовидной туманности на волне 32.5 см // Астрон. журн. – 1969. – **2**.– С. 250.

[10] *Matveenko L. I., Kostenko V. B.* On the structure of the Crab Nebula // Austr. J. Phys. – 1979. – **32**. – P. 105.

[11] *Матвеенко Л. И.* Яркий мазерный источник H_2O в Орионе А // Письма в Астрон. журн.–1981.–**2**.–С. 100.

[12] *Матвеенко Л. И., Грэм Д., Даймонд Ф.* Область вспышки мазерного излучения в Орионе КЛ // Письма в Астрон. журн. – 1988. – **14**, № 12. – С. 1101.

[13] *Матвеенко Л. И.* Переменность низкочастотного радиоизлучения квазара 3С 345 // Письма в Астрон. журн. – 1993. – **19**, № 4. – С. 291–294.

[14] *Матвеенко Л. И., Даймонд Ф. Д., Грэм Д. А.* Открытие джета в области H_2O вспышки супермазерного излучения в Орионе КЛ // Письма в Астрон. журн. – 1988. – **24**, № 10. – С. 723.

[15] *Матвеенко Л. И., Витцел А.* Структура джетов квазаров 3С 345 и 1803+784 // Письма в Астрон. журн. – 1999. – **25**, № 9. – С. 643.

[16] *Матвеенко Л. И.* H II-области и видимость радиоизлучения ядер квазаров // Письма в Астрон. журн. – 2001. – **27**, № 11. – С. 807.

[17] *Матвеенко Л. И., Захарин К. М., Даймонд Ф. Д., Грэм Д. А.* Эволюция структуры области вспышки H_2O супермазерного излучения в Орионе КЛ // Письма в Астрон. журн. – 2004. –**30**, № 2. – С. 121–138.

[18] *Матвеенко Л. И., Грэм Д. А., Ценсус Д. А.* Исследование поглощения в рекомбинационных радиолиниях H(93–95) и H(78–79) области H II квазара 3С 345 // Астрон. журнал. – 2005. –**382**, № 4. – С. 291.

[19] *Matveenko L. I.* // Astron. Nachr. – 2007. – **328**, N 5. – P. 411. / DOI 10.1002/asna.200710763

[20] *Матвеенко Л. И., Сиваконь С. С.* Поляризованное излучение эжектора в Орионе КЛ // Письма в Астрон. журн. – 2008. – **34**, № 12. – С. 980.

[21] *Матвеенко Л. И., Бритцен С., Ценсус Д. А.* Тонкая структура BL Lac объекта 1803+784 // Письма в Астрон. журн. – 2008. – **34**, № 2. – Р. 83.

[22] *Матвеенко Л. И., Сиваконь С. С., Эрстад С., Маршер А. П.* Тонкая структура ядра объекта 1803+784 // 2009, в печати.

[23] *Горькавый Н. Н., Фридман А. М.* Физика планетных колец. – М.: Наука, 1994.

[24] *Шоломицкий Г. Б., Слепцова Н. Ф., Матвеенко Л. И.* Спектры компонент 3С 273 // Астрон. журн. – 1965. – **6**. – С. 1135.