

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.164(023)

МЕЖКОНТИНЕНТАЛЬНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ *)**К. Келлерман**

С помощью интерферометров, состоящих из двух радиотелескопов, которые удалены друг от друга на расстояния, достигающие земного диаметра, ученые исследуют строение квазаров и других источников радиоизлучения.

До недавнего времени изображения астрономических объектов, получаемые с помощью радиотелескопов, были значительно беднее деталями по сравнению с теми, что формировались в оптических телескопах. Дело в том, что разрешающая способность телескопа растет по мере того, как увеличивается отношение его апертуры к длине волны принимаемого им излучения. Поскольку длины радиоволн, грубо говоря, в миллионы раз превышают длины световых волн, можно было бы думать, что радиотелескопы принципиально должны иметь худшую угловую разрешающую способность, чем оптические телескопы.

На самом деле такое заключение будет ошибочным, и вот по каким двум причинам. Во-первых, разрешающая способность больших оптических телескопов ограничивается не столько размерами их апертуры, сколько неоднородностями земной атмосферы. Соответствующий предел составляет примерно $1''$, т. е. почти в 100 раз превышает возможности невооруженного глаза. В случае радиоволн флуктуации длины пути приходящих сигналов в атмосфере малы по сравнению с длиной радиоволн, так что в этом случае влияние неоднородностей атмосферы значительно менее существенно. Во-вторых, радиосигнал или оптический сигнал должен быть когерентным, т. е. однофазным, в пределах всей апертуры телескопа. Обработать когерентные радиоволны намного легче, чем когерентные световые сигналы, и по этой причине радиотелескопы работают с разрешающей способностью, значительно более близкой к теоретическому пределу, чем оптические телескопы.

Чаще всего радиотелескопы имеют форму параболоидов, установленных на подвижных опорах. Апертуры их имеют обычно диаметр от 10 до 100 м. Разрешающая способность при данной апертуре должна возрастать с уменьшением длины волны, однако работа телескопа начинает существенно ухудшаться, когда длины волн достигают того же порядка величины, что и размеры неоднородностей строения самих антенн. Поскольку

*) K. I. K e l l e r m a n, Intercontinental Radio Astronomy, Sci. American 226 (2), 72 (1972). Перевод В. И. Рыдника.

К. И. Келлерман — один из руководителей Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк (США).

по очевидным причинам самые большие антенны имеют наименее «заглаженные» поверхности, наивысшая разрешающая способность, которую можно достичь на параболических антеннах, довольно слабо зависит от длины волны принимаемого излучения и составляет около $1'$. Можно, конечно, строить большие антенны более точно выдержанной формы, но таким путем трудно достичь разрешающей способности выше $0,1'$. По этой причине радиоастрономы и обратились к интерферометрам, в которых две сравнительно небольшие антенны эквивалентны по своему действию противоположным «концам» апертуры гигантского радиотелескопа.

Интерферометры, работающие со световыми волнами, начали использоваться в оптической астрономии уже с начала 20-х годов нашего столетия. Первым из них был инструмент с двумя зеркалами, разнесенными

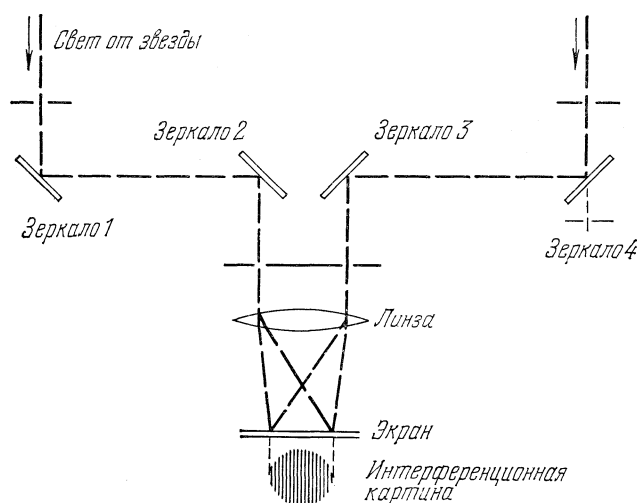


Рис. 1. Оптический интерферометр иллюстрирует принцип действия радиоинтерферометра.

Свет от удаленного источника отражается внешними зеркалами (1 и 4) на внутренние (2 и 3), а затем оба пучка света сводятся на проекционном экране. Перемещая одно из зеркал (4), можно делать один из двух световых путей чуть длиннее другого, а это несколько расфазировывает волны в обоих пучках света. После сведения на экране оба световых пучка интерферируют, и возникает картина интерференционных полос (внизу).

на предельное расстояние 6 м. Он был построен Майкельсоном и Пизом для измерения угловых диаметров нескольких ярких звезд. В интерферометре Майкельсона световая волна падает на два зеркала, отражающие ее в виде двух световых пучков в одну точку, в которой оба пучка накладываются друг на друга (рис. 1). Если путь, пройденный одним пучком, чуть больше, чем путь, пройденный другим пучком, то световые волны в обоих пучках оказываются расфазированными. При наложении обоих пучков пути волн в них интерферируют, испытывая взаимное усиление и ослабление. Разглядывая созданное изображение, можно заметить на нем ряд чередующихся светлых и темных интерференционных полос. В радиоинтерферометре приходящая от космического объекта единая радиоволна просто падает на два удаленных друг от друга радиотелескопа, и воспринимаемые ими сигналы передаются в одно место, где электрическая схема производит их взаимное наложение.

Попытки построить оптические интерферометры с большими расстояниями между зеркалами (большими базами) ради достижения более высокой разрешающей способности не принесли успеха, прежде всего

потому, что в больших приемниках трудно обеспечить когерентность световых волн и отъюстировать зеркала с точностью до нескольких долей длины световой волны. В случае радиотелескопов задача передачи принятых сигналов от каждого компонента радиоинтерферометра в общую точку решается значительно легче. Для достижения высокой разрешающей способности таким образом можно собрать систему из двух и более

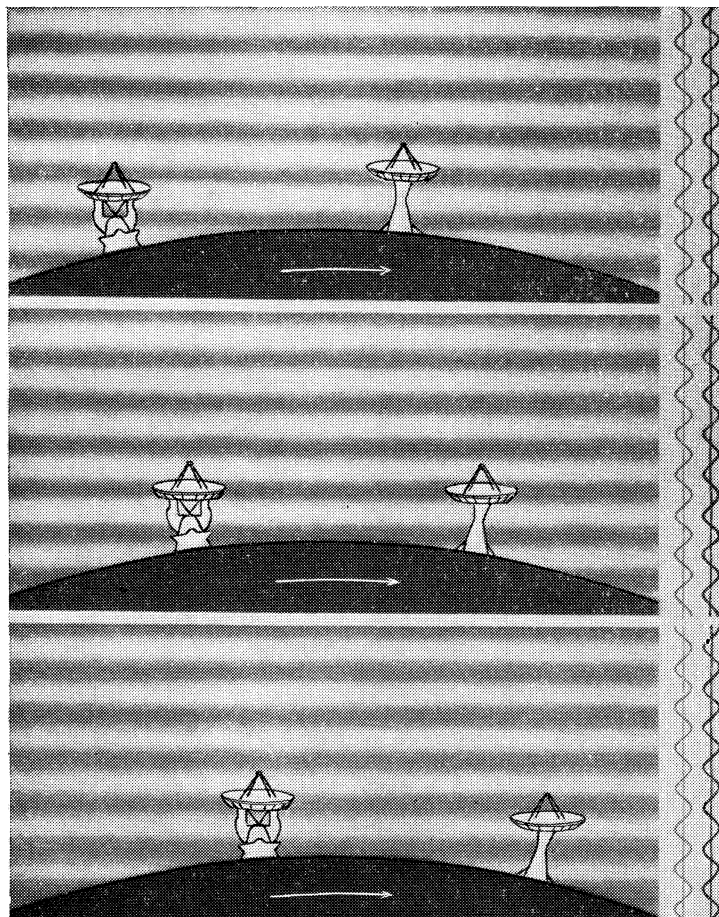


Рис. 2. Для измерения расстояния, которое должно пройти радиоизлучение космического источника, чтобы попасть в радиоинтерферометр, используется вращение Земли.

В какой-то момент антенна одного радиотелескопа может попасть в пучность, а другого — в узел радиоволны (наверху). В результате сигналы с обоих приемников окажутся не в фазе друг с другом, и интерференция приведет к их взаимному ослаблению. В следующий момент благодаря вращению Земли телескопы переместятся в такое положение, что будут одновременно принимать пучности и узлы радиоволн (в середине). Затем волны в обоих приемниках снова разойдутся по фазе (внизу). На рисунке угол поворота, при котором появляются заметные различия в фазе волн, сильно преувеличен.

радиоантенн, которая в сумме будет давать большую апертуру (рис. 2). С помощью такого инструмента можно определять не только размеры и форму дискретных источников радиоизлучения, но также и точное их положение на небосводе.

По мере того как росли базы радиоинтерферометров и совершенствовалась технология их изготовления, позволившая работать на более

коротких волнах, разрешающая способность этих инструментов все время повышалась. Многие радиоисточники отлично разрешаются на интерферометре с базой примерно 1 км и при разрешающей способности около $1''$. Однако в конце 50-х годов стало ясно, что для изучения строения этих источников и для разрешения меньших по своим размерам радиоисточников нужно дальнейшее повышение разрешающей способности.

Сейчас принято считать, что радиоизлучение таких дискретных источников, как радиогалактики и квазары, представляет собой синхротронное

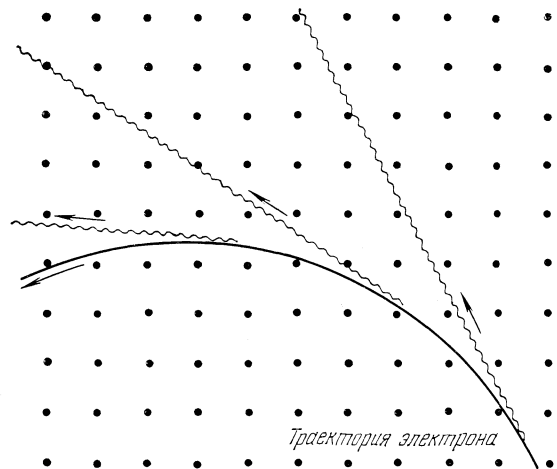


Рис. 3. Синхротронное излучение, которое, по мнению ученых, излучается в виде радиоволн радиогалактиками и квазарами.

Оно генерируется электронами, движущимися с релятивистскими (т. е. близкими к скорости света) скоростями в магнитном поле. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны к плоскости чертежа и показаны точками. Электрон движется в плоскости чертежа против часовой стрелки и испускает излучение, показанное волнистыми линиями. Длина волны, на которую приходится максимум интенсивности синхротронного излучения, зависит от энергии и напряженности магнитного поля.

излучение электронов, движущихся в слабых космических магнитных полях с релятивистскими, т. е. околосветовыми, скоростями (рис. 3). Энергия таких движений, которая соответствует наблюдаемой мощности излучения названных объектов, чрезвычайно велика, и проблема происхождения этой энергии и передачи ее релятивистским частицам является одной из самых интригующих в современной астрофизике.

Вскоре после обнаружения синхротронного излучения галактического и внегалактического происхождения была высказана мысль, что релятивистские частицы могут ускоряться так называемым механизмом Ферми, в котором частицы многократно отражаются от намагниченных облаков межзвездного газа, играющих роль магнитных зеркал. Поскольку более часты столкновения «в лоб», а не «в хвост» (в этом очень легко убедиться, заехав на левую полосу автодороги с правосторонним движением), то электроны смогут ускоряться до околосветовых скоростей.

Оценки характерного времени, необходимого для набора электронами достаточной энергии таким механизмом, чтобы они могли излучать в диапазоне радиоволн, дают величину от 10^6 до 10^8 лет. Недавно обнаруженные быстрые вариации интенсивности излучения от некоторых радиогалактик и квазаров, однако, говорят о том, что характерный период ускорения частиц составляет скорее не миллионы лет, а считанные месяцы. Это показывает, что истинный механизм ускорения частиц никак не может быть фермиевским.

Вначале наблюдения радиогалактик и квазаров в основном велись на сравнительно больших длинах волн (около 1 м). По мере развития техники более коротких радиоволн все большее внимание стало уделяться измерениям космического радиоизлучения на сантиметровых и миллиметровых волнах. Эти измерения особенно широко ведутся в США и СССР. К сегодняшнему дню наметилось четкое разграничение между двумя основными типами источников радиоизлучения. Источники одного типа имеют большие угловые размеры и наиболее сильно излучают на больших длинах волн. Источники другого типа компактны, и максимум их излучения приходится на более короткие волны. Некоторое удивление вызвало отсутствие простого соотношения между угловыми размерами областей, излучающих соответственно радиоволны и видимый свет в галактиках и квазарах. Компактные радиоисточники связываются не только с квазарами, многие из таких источников отождествляются с галактическими ядрами. Более того, многие квазары оказываются весьма протяженными источниками радиоизлучения.

Для протяженных радиоисточников характерно сложное распределение интенсивности радиоизлучения в области, охватывающей несколько сотен тысяч световых лет, которая имеет угловые размеры от нескольких угловых секунд до нескольких минут. Многие из таких «протяженных источников» состоят из двух и более пространственно разделенных компонентов, размеры которых порядка половины расстояния между ними. Там, где радиоисточник удается отождествить с видимым объектом, если этот объект галактика или квазар, они могут располагаться вблизи центра радиоизлучающей области либо совпадать с одним из компонентов радиоисточника. Во многих случаях либо в центре источника, либо в пределах одного или обоих его компонентов располагаются яркие «узелки» радиоизлучения. Известен по крайней мере один случай — двойная радиогалактика Лебедь А, в каждом из двух главных компонентов которой в свою очередь, видимо, находится маленький двойной радиоисточник (рис. 4).

Принято считать, что релятивистские частицы в таких источниках выбрасываются при взрыве из некоторой общей начальной точки. Однако при этом трудно понять, как меньшие по размерам компоненты источника могут оставаться «неповрежденными», будучи выброшены на столь большие расстояния из точки взрыва. Некоторые астрофизики высказывают мнение, что разбросанные взрывом компоненты суть массивные объекты. Высокоэнергетичные частицы создаются тогда не в момент взрыва, а, так сказать, «на месте», в результате однократных или многократных взрывов этих массивных объектов или же путем непрерывного процесса ускорения.

Компактные радиоисточники столь малы и плотность частиц в них столь велика, что из-за способности релятивистских частиц столь же эффективно поглощать излучение, как и испускать его, источники оказываются непрозрачными для своего собственного радиоизлучения на больших длинах волн, и в результате из них ускользает мало энергии. Частота, на которой начинается такое самопоглощение излучения, зависит только от плотности потока излучения, угловых размеров источника и (слабо) от напряженности магнитного поля в нем. Чем меньше радиоисточник, тем меньше длина волны, при которой он становится непрозрачным для излучения.

Поскольку компактные радиоисточники сравнительно слабо излучают на больших длинах волн, на которых было проведено большинство первых наблюдений внегалактических источников радиоизлучения, в течение многих лет оставалось не обнаруженным множество таких источников, пока не появились чувствительные приемники коротковолнового

излучения. В наше время благодаря обнаружению радиоисточников, непрозрачных на дециметровых и даже сантиметровых волнах, стало ясным, что при «разумных» значениях напряженности магнитного поля (около 10^{-4} гс) угловой размер непрозрачных источников и в самом деле должен быть очень малым, возможно составляя сотые или тысячные доли угловой секунды. Такие размеры лежат далеко за пределами разрешающей способности всех современных радиотелескопов.

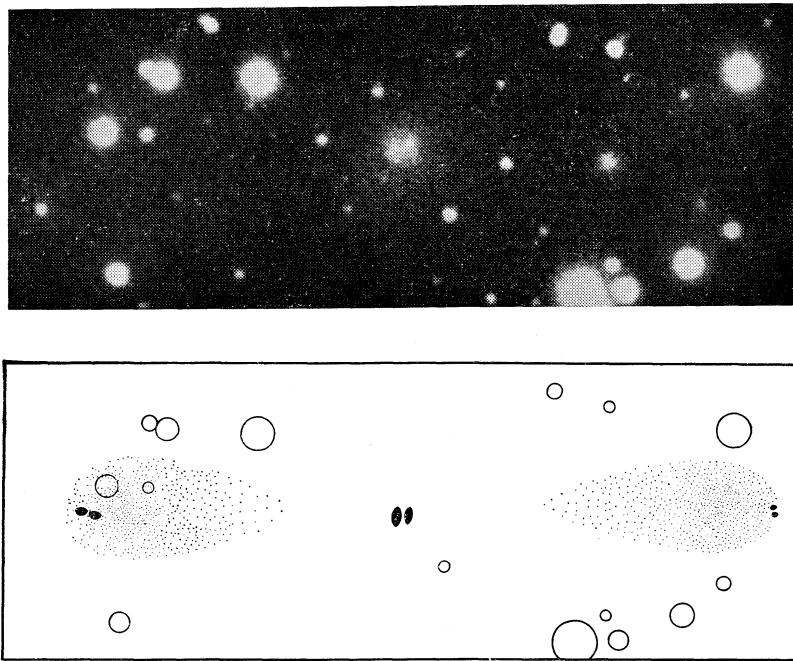


Рис. 4. Радиогалактика Лебедь А — самый сильный источник космического радиоизлучения.

Она выглядит размытым пятнышком в центре фотографии (*наверху*), снятой с помощью 5-метрового телескопа в обсерватории Маунт Паломар. Интерферометрические исследования радиоизлучения этого источника показывают, что оно исходит из двух областей по обе стороны светящегося пятна. Наблюдаемая структура этих областей (*снизу*) приведена в том же масштабе, что и фотография. Каждый из двух главных компонентов сам состоит из двух маленьких источников излучения. Это изображение в радиолучах построено по данным наблюдения, выполненного на 1,6-км интерферометре Кембриджского университета, 2,7-км интерферометре Национальной радиоастрономической обсерватории США и 35-км интерферометре с радиорелейной связью, также Национальной радиоастрономической обсерватории.

Еще одно косвенное свидетельство в пользу столь малых размеров компактных радиоисточников принесло поразительное открытие У. Дента в 1965 г. Он обнаружил, что радиоизлучение от квазара 3С 273 имеет переменную интенсивность. До тех пор считалось, что излучение от любого объекта не должно сколько-нибудь заметно меняться за времена существенно меньшие, чем время, потребное свету для распространения поперек источника излучения. Иными словами, вариации интенсивности должны были сглаживаться вследствие различий во временах, которые необходимы, чтобы волнам, исходящим из различных участков источника излучения, дойти к приемнику. Поскольку источник 3С 273 обнаруживал существенные вариации интенсивности за время порядка года, размеры переменного излучающего компонента были также оценены величиной порядка светового года или менее. Измеренное красное смещение на излучении 3С 273 соответствует скорости его удаления примерно в $1/6$ скорости све-

та. Закон разбегания галактик Хаббла, который связывает красное смещение с расстоянием до излучающих объектов, дает для этого источника расстояние около 1,5 млрд. световых лет, так что соответствующие его угловые размеры должны быть менее 0,001".

Последующее изучение источников переменного радиоизлучения позволило выяснить, что вариации излучения присущи не только квазарам, но также и ядрам галактик. Наблюдаемые вариации не обнаруживают какой-либо периодичности, которая характерна для многих обычных переменных звезд. Вариации интенсивности радиоисточников имеют скорее характер сильных всплесков, которые могут появляться сначала на коротких волнах, а затем распространяться со все меньшей амплитудой в длинноволновую область. Характерное время для такого отдельного всплеска колеблется от нескольких недель до нескольких лет, а для некоторых радиоисточников интервал между всплесками оказался короче длительности самих всплесков. Наблюдения этих вариаций привели к заключению, что своим происхождением они обязаны взрывам в галактических ядрах и квазарах, которые создают расширяющиеся облака релятивистских частиц, излучающих синхротронным механизмом. Каждое такое облако как будто образуется всего лишь за несколько месяцев, и тем самым его пространственные размеры меньше немногих световых месяцев. Вначале облако непрозрачно для длинных радиоволн. По мере расширения облака количество уходящей из него энергии возрастает пропорционально площади излучающей поверхности. В то же время напряженность магнитного поля падает, а электроны теряют энергию в результате расширения. Когда плотность облака падает настолько, что оно становится прозрачным, интенсивность его излучения начинает спадать, сначала на более коротких, а затем и на более длинных волнах. В момент каждой вспышки напряженность магнитного поля в облаке достигает порядка 1 гс, что примерно соответствует полю на поверхности Земли. При расширении облака эта напряженность быстро падает, пока не достигнет примерно 10^{-4} гс, после чего релятивистские частицы, видимо, диффундируют уже в постоянном магнитном поле. Вслед за тем непрерывные порождение и диффузия релятивистских частиц из компактных активных центров приводят к условиям, типичным для известных протяженных источников радиоизлучения.

Основной вопрос, однако, состоит в том, каков источник энергии и как эта энергия передается релятивистским частицам. Пока что этот вопрос еще остается без ответа. Некоторые ученые полагают, что здесь мы подошли к пределу «земной» физики и для объяснения фантастически огромного выделения энергии в галактических ядрах и квазарах нужны принципиально новые физические представления. Ясно, однако, что решение этой проблемы должно пройти через стадию достаточно подробного изучения этих невероятно маленьких небесных объектов, чтобы раскрыть те сложные явления, которые ответственны за интенсивное их радиоизлучение. Однако вплоть до недавнего времени достижение необходимой для этой цели угловой разрешающей способности было за пределами самых оптимистических мечтаний радиоастрономов, будучи сопряжено с чудовищно большими базами радиоинтерферометров.

Увеличение базы обычных радиоинтерферометров является не столь простым делом, в частности, из-за возрастания стоимости кабеля, соединяющего компоненты интерферометра (рис. 5), а также трудностей прокладки кабеля напрямую поперек дорог, через частные владения, не говоря уже о его переброске через естественные препятствия, такие, как реки, горы и, наконец, океаны. Значительное повышение разрешающей способности было достигнуто при замене соединительных кабелей микроволно-

выми радиорелейными линиями (рис. 6). Впервые этот метод был применен австралийскими и английскими радиоастрономами. Он позволил получить базы длиной более 100 км и разрешающую способность выше $1''$. Для разрешения компактных переменных радиоисточников с предполагаемыми угловыми размерами около $0,001''$ нужны, однако, длины баз,

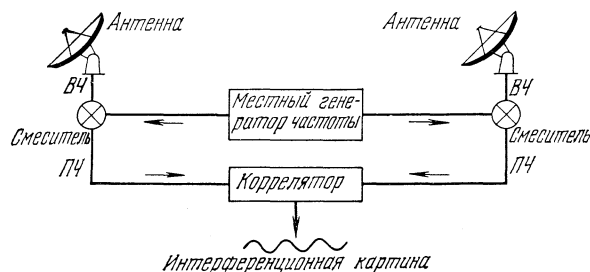


Рис. 5. В обычном радиоинтерферометре для связи между двумя телескопами, удаленными друг от друга на расстояние до нескольких км, используется кабель.

Для анализа высокочастотный радиосигнал (ВЧ) от космического источника радиоизлучения должен быть преобразован в более низкочастотный сигнал. Это производится путем сложения его с сигналом от местного генератора частоты в смесителе (гетеродине), после чего сигнал приобретает промежуточную частоту (ПЧ).

сравнимые с размерами Земли. Дальнейшее существенное повышение разрешающей способности радиоинтерферометров на радиорелейной связи практически не реально. Микроволновые радиорелейные станции работают в пределах прямой видимости, а установка большого числа усилительных станций дорого стоит и технически сложна.

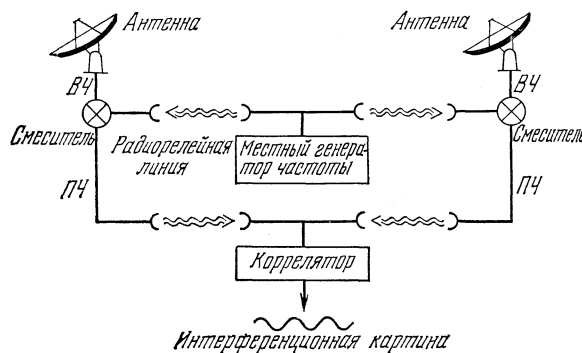


Рис. 6. В радиоинтерферометре с радиорелейной связью два радиотелескопа связаны посредством радиорелейной линии, подобной той, что используется для дальней телефонной связи.

Сигнал от местного генератора частоты передается к смесителям (гетеродинам), и в коррелятор поступают сигналы промежуточной частоты (ПЧ). Для того чтобы ПЧ-сигналы от каждой из антенн были взаимно когерентными (т. е. находились в одной фазе), сигналы от местного генератора частоты на каждом из концов линии тоже должны быть когерентными, а поэтому должны передаваться в оба смесителя из одного источника колебаний.

Уже давно радиоастрономы обсуждали возможность полностью устранить прямую электрическую связь между компонентами радиоинтерферометров, регистрируя сигналы на каждом «конце» интерферометра порознь с помощью магнитной ленты, а затем сопоставляя обе записи на лентах. Чтобы сделать такой метод успешным, надо выполнить два требования. Прежде всего записи на обеих лентах должны быть синхронизированы так, чтобы были точно известны времена прихода данного волнового

фронта к обеим приемным станциям. Требуемая точность такой синхронизации приблизительно равна обратной величине ширины полосы частот регистрируемого сигнала, т. е. примерно 1 мксек для характерной полосы 1 Мгц . Другое требование вытекает из того, что воспринимаемые радиотелескопами сигналы имеют слишком высокую частоту, чтобы их можно было непосредственно регистрировать на магнитной ленте. По этой причине необходимо «гетеродинировать» радиочастотный сигнал с сигналами местных генераторов постоянной частоты, которая обычно составляет несколько Ггц , до значительно более низкой промежуточной частоты (около 1 Мгц), а эту частоту уже можно записывать на ленту (рис. 7).

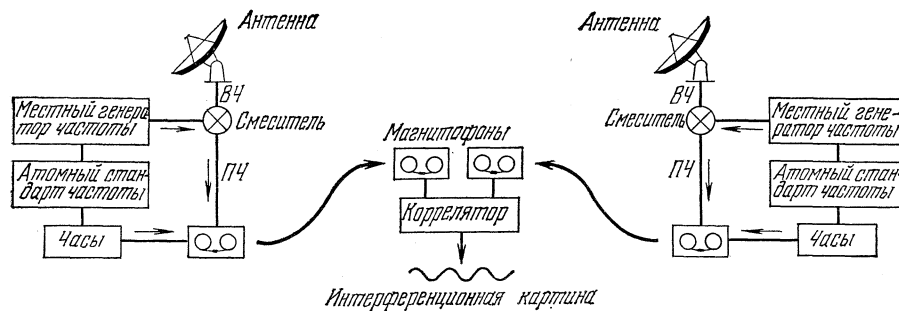


Рис. 7. Радиointерферометр с записью на ленту делает возможной интерферометрию с помощью радиотелескопов, удаленных на противоположные стороны земного шара. (Радиорелейная связь практически осуществляется с помощью антенн, находящихся друг от друга на расстояниях прямой видимости.) Сигналы промежуточной частоты (ПЧ) от каждой из антенн разделяются и регистрируются на каждом из «концов» интерферометрической системы, а затем магнитные ленты с записью переносятся в общее место, где записи сопоставляются с помощью либо большой электронно-вычислительной машины, либо специального коррелятора.

Если сигналы на промежуточной частоте необходимо сопоставлять друг с другом, то генераторы постоянной частоты должны в течение времени наблюдения быть взаимно когерентными. Это означает, что за указанный период относительные изменения фазы колебаний, вырабатываемых обоими генераторами частоты, должны быть малыми, чтобы само изменение частоты было меньше, чем обратная величина времени записи сигналов. Так, например, сигнал частотой 1 Ггц при записи его в течение 100 сек требует стабильности частоты генератора выше, чем 10^{-11} .

Возможность создания интерферометров с записью на магнитной ленте и независимыми местными генераторами частоты рассматривалась в СССР еще в 1961 г. Однако в то время, по существу, еще не было необходимых для реализации высокой чувствительности таких интерферометров стандартов частоты и широкополосных устройств для записи на магнитную ленту. Интерферометр с записью на ленту был впервые построен для целей радиоастрономии группой ученых во Флоридском университете. Эта группа определяла размеры областей радиобурь на Юпитере на частоте 18 Мгц . Всплески этого радиоизлучения были столь интенсивными, что достаточная чувствительность достигалась уже за времена наблюдения, существенно меньшие 1 сек , при ширине полосы сигнала около 1 кгц . Это требовало стабильности частоты примерно 10^{-8} и соответственно точности синхронизации примерно 1 мсек для обеспечения когерентности на двух «концах» интерферометра. Необходимые стабильность частоты и точность синхронизации легко обеспечивались сигналами времени, передаваемыми радиостанцией WWV Национального бюро стандартов США. Таким путем удалось определить, что радиоизлучающие области на поверхности Юпитера имеют угловые размеры менее $0,1'$, т. е.

линейные размеры менее 300 км. Такая разрешающая способность оказывается намного выше, чем характерная для фотоснимков Юпитера, сделанных в видимом свете.

Использование интерферометров с записью на ленту для исследования значительно более слабого излучения радиогалактик и квазаров стало возможным лишь после разработки в промышленных масштабах атомных стандартов частоты и малоинерционных магнитофонов. В этот период независимо в США и Канаде были разработаны две интерферометрические системы с записью на ленту. Система, разработанная группой ученых из Национального исследовательского центра Канады и Торонтского университета, использовала для записи сигналов в полосе частот 4 Мгц видеоманитофоны. В системе, разработанной в США исследователями из Национальной радиоастрономической обсерватории и Корнелльского университета, использовалось магнитофонное устройство стандартной электронно-вычислительной машины для регистрации цифровой информации в диапазоне 300 кГц. Канадская система имела преимущества более широкой полосы частот и тем самым более высокой чувствительности, однако она требовала значительно более сложного специального устройства для синхронизации лент при воспроизведении записей. В американской системе цифровые данные просто вводились в вычислительную машину, которая хранила и сравнивала два числовых потока. Недавно в Национальной радиоастрономической обсерватории Б. Дж. Кларк и другие разработали новую систему, в которой использованы видеоманитофоны для регистрации цифровых данных и специальное цифровое устройство для сопоставления записей на обеих лентах. Этот способ совмещает преимущество широкой полосы регистрируемых частот с удобством современной техники обработки цифровой информации.

Во всех этих системах для точной синхронизации записей в течение всего времени регистрации сигналов и для поддержания постоянной частоты местных генераторов колебаний используются атомные стандарты частоты. Атомные часы идут очень равномерно и имеют достаточную точность для управления записью на каждом из «концов» интерферометра, но для сопоставления записей необходимо синхронизировать сами часы, находящиеся в разных местах. Это можно было бы осуществить, непосредственно сопоставив ход часов, помещенных в одно место, а затем перевезти одни из часов в другое место, но такой способ часто неудобен. Можно также сопоставить эти часы с одними из непрерывно действующих атомных часов в Службах времени, имеющихся во многих странах, или же с сигналами навигационной системы «Лоран-С», принимаемыми во многих областях земного шара.

Синхронизацию требуется производить с точностью примерно до 1 мксек, однако вначале от нее не требуется такой точности, поскольку, прежде чем удастся зарегистрировать интерференционную картину между отдельными записями, их придется неоднократно «проигрывать», каждый раз меняя сдвиг во времени между их началами. Можно без труда при сопоставлении записей осуществлять сдвиги во времени до 100 мксек. Но вот когда интерференционная картина обнаружена, теперь уже часы надо синхронизировать точнее 1 мксек. В случае более широкой полосы сигнала или при наблюдениях, выполненных на разных частотах с тем, чтобы затем синтезировать их в одну широкую эффективную полосу частот, в принципе можно синхронизировать удаленные друг от друга часы с точностью до нескольких нсек.

В первых экспериментах использовались атомные стандарты частоты на парах рубидия, в которых частота поддерживалась со стабильностью

10^{-11} . Мазеры на водороде имеют стабильность частоты, еще в 100—1000 раз более высокую, что отвечает погрешности хода часов менее 1 мксек за год. Эти мазеры, однако, дорого стоят, они сложны в работе и их трудно перевозить с места на место. Хотя рубидиевые стандарты достаточно стабильны для получения интерференционной картины и измерения распределения амплитуд на ней, этой стабильности в общем все же недостаточно для измерения фаз на картине. Уже проведено несколько экспериментов с использованием в качестве стандартов частоты водородных мазеров для повышения стабильности фаз. Можно думать, что когда мазеры станут более доступными, их можно будет систематически применять для управления синхронизацией и генераторами частоты в интерферометрах с записью на ленту.

Первые измерения на интерферометре с записью на ленту при большой базе, перекрывающей Канаду и США, были проведены в 1967 г. на радиоволнах длиной 75; 50 и 18 см. Эти измерения быстро подтвердили ожидавшиеся малые размеры многих радиогалактик и квазаров. Многие из этих объектов удалось разрешить, и их угловые размеры оказались порядка $0,01''$, но еще больше объектов оставалось не разрешенным. Из этого явно следовала необходимость в дальнейшем повышении разрешающей способности.

Базы интерферометров быстро возрастали в 1968 и 1969 гг. в ряде межконтинентальных экспериментов, предпринятых совместными усилиями американских, шведских и австралийских радиоастрономов. При длине волны 6 см и при наибольших базах была достигнута разрешающая способность около $0,001''$. Но даже и при такой исключительно высокой разрешающей способности не удалось разрешить, по-видимому, отдельные компоненты многих радиоисточников. База интерферометра, один «конец» которого находится в Калифорнии, а другой в Австралии, составляет 10 500 км, т. е. более чем 0,8 земного диаметра (рис. 8). Дальнейшее увеличение физической базы интерферометров нелегко и требует больших затрат, будучи связано с вынесением приемных станций в космос или их установкой на Луне.

Альтернативой этому, причем более простой и дешевой, является переход к наблюдению волн все меньшей длины. Однако за пределами Северной Америки только два радиотелескопа пригодны для работы на коротких волнах и вместе с тем имеют достаточно большие приемники, чтобы обеспечить достаточную чувствительность для интерферометрии с длинной базой. Оба эти инструмента находятся в СССР.

Первый совместный интерферометрический эксперимент между США и СССР был проведен в конце 1969 г. Один «конец» интерферометра образовывала 42-м антенна Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк (Западная Виргиния), второй «конец» — новый 22-м радиотелескоп в Симеизе, в Крыму. В конце весны 1971 г. был проведен второй эксперимент, в котором дополнительно участвовали сверхчувствительный 64-м радиотелескоп НАСА в Голдстоуне (Калифорния) и телескоп «Хэйстек» *) Массачусетского технологического института. В этом эксперименте участвовало более 20 исследователей из 8 научных учреждений обеих стран. Целью эксперимента были наблюдения межзвездных облаков водяного пара, а также радиогалактик и квазаров.

В эксперименте на базе Голдстоун — Симеиз при длине волны 3 см была достигнута наивысшая разрешающая способность, с которой только исследовались радиогалактики и квазары, — приблизительно $0,0003''$.

*) Буквально — «Сток сена» (Прим. перев.)

Это исключительно малый угол: под таким углом видны буквы шрифта этой статьи, если журнальную страницу удалить от нас на расстояние около 3000 км! Оптический телескоп, работающий и в идеальных условиях, способен куда на меньшее: на таком расстоянии он мог бы разрешить объект величиною не менее, чем в рост человека. При измерениях облаков водяного пара, которые велись на еще более коротких волнах, была достигнута даже еще более высокая разрешающая способность.

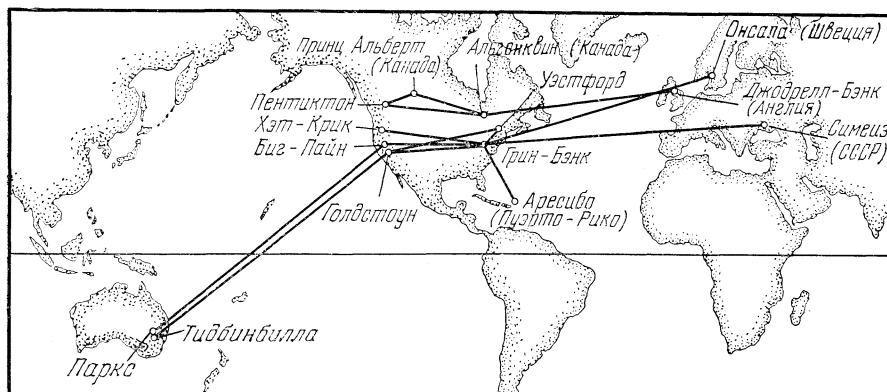


Рис. 8. Месторасположение радиотелескопов, объединяемых в радиоинтерферометры с длинными базами, для изучения радиогалактик и квазаров с высокой разрешающей способностью.

Самая длинная база из использовавшихся до сих пор составляет 10 500 км и связывает Голдстоун в Калифорнии с Тидбинбиллой в Австралии.

Наименьшее физическое расстояние, которое удалось непосредственно промерить в радиоисточнике за пределами нашей Галактики, — это размеры ядра ближайшей к нам радиогалактики за номером 87 в каталоге Мессье; она имеет угловые размеры около $0,001''$, что соответствует ее протяженности всего лишь в четверть светового года. Релятивистские частицы, которые в нашу эпоху заполняют интенсивно излучающее «радиогало» диаметром более 10^5 световых лет, скорее всего, создаются и ускоряются в этом компактном ядре непрерывно или периодически в течение миллионов лет и может быть даже дольше. Аналогичные радиоизлучающие ядра обнаружены не только в сильных радиогалактиках, но и в других спиральных и эллиптических галактиках.

Сопоставляя данные различных экспериментов на интерферометрах с длинной базой, мы начали получать приблизительное представление о строении радиоизлучающих ядер галактик и компактных квазарах с угловыми размерами менее $0,001''$. Такая разрешающая способность почти на три порядка лучше, чем в оптической области, в которой квазары и ядра галактик выглядят как бесформенные светлые точки. Радиоастрономия получила беспрецедентные возможности исследовать в существенных деталях те фантастически мощные процессы, которые разыгрываются в этих объектах.

В обычной радиоинтерферометрии для получения ряда интерференционных полос, необходимых для восстановления изображения источника излучения, одна или несколько антенн перемещаются на расстояние до нескольких километров (рис. 9). В радиоинтерферометре сверхвысокого разрешения, где между «концами» инструмента пролегают океаны и материки, перемещать большие антенны, конечно, непрактично. Поэтому

наблюдения проводились уже с существующими радиотелескопами, расположенными в определенных местах земного шара, и это, разумеется, ограничивает область достижимых баз. Именно по этой причине возникают существенные неопределенности при интерпретации получаемых данных, так что можно говорить лишь о довольно грубых представлениях, которые получаются на основе измерений.

Структура тех источников излучения, которые удалось исследовать с известными подробностями, оказалась сложной и в общем не имеющей

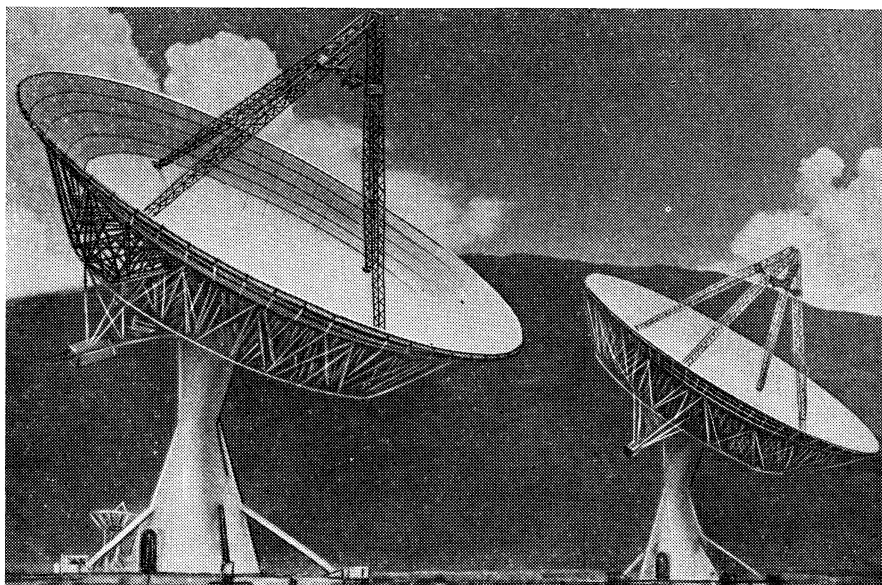


Рис. 9. Два сопряженных друг с другом радиотелескопа Радиоастрономической обсерватории Калифорнийского технологического института в Оуэнс-Вэлли используются в качестве интерферометра для исследования излучения космических радиоисточников. 27-м чаши установлены на подвижных опорах и могут быть разведены друг от друга до 500 м. Эта пара антенн использовалась совместно с другой парой в Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк для одновременного наблюдения двух радиоисточников.

круговой симметрии. Часто в одной радиогалактике или в квазаре размеры компонентов составляют иерархию от менее чем $0,001''$ до более чем $0,1''$. В общем, чем меньше компонентов, тем сильнее он излучает на более коротких волнах, что и предсказывает теория синхротронного излучения космических электронов. В тех случаях, когда удавалось определить угловой размер источника, частоту начала самопоглощения излучения и максимальную плотность потока излучения, определяли напряженность магнитного поля в источниках. Обычно она была порядка 10^{-4} гс.

Многие из компактных источников выглядят так, словно они рассеяны пополам областью сравнительно малой радиояркости. В общем нельзя однозначно сделать выбор между эллиптической кольцевой и двойной структурами источника излучения, но в большинстве случаев данные как будто свидетельствуют в пользу последней. Замечательно, что угловые размеры характерной «двойниковой» структуры радиогалактик и квазаров заключены, по-видимому, в чрезвычайно широких пределах от тысячных долей угловых секунд до нескольких минут. Этот диапазон составляет пять порядков величины и соответствует линейным размерам от менее чем одного светового года до нескольких сотен тысяч световых лет.

Измеренные угловые размеры отдельных компонентов радиоисточников и рассчитанные, исходя из известной частоты начала самопоглощения их излучения, находятся в хорошем согласии с предсказаниями синхротронной модели излучения этих источников. Однако быстрые вариации интенсивности и происхождение больших энергий, требуемых для наблюдаемого от ряда квазаров мощного радиоизлучения, трудно объяснить. Какое-то время существовала надежда провести более определенную проверку синхротронной теории на основе определения размеров переменных источников, поскольку упомянутая теория предсказывает существование тесного соотношения между скоростями изменения размеров и интенсивностью источника излучения. К настоящему времени такие данные получены, но мы взираем на них с недоумением: они ставят сами больше новых вопросов, чем отвечают на старые.

Предполагалось, что отдельные наблюдаемые всплески излучения можно истолковать как результаты гигантского взрыва, при котором образуется плотное облако релятивистских электронов, излучающих синхротронным механизмом. Наблюдаемые быстрые вариации интенсивности в ряде радиоисточников требуют ускорения частиц до релятивистских энергий за времена от нескольких месяцев до нескольких лет. Если полагать, что размеры переменного радиоисточника не могут превышать расстояние, проходимое светом за время, характерное для вариаций, то отсюда можно установить верхний предел для указанных размеров. Обычно этот размер имеет порядок светового года. Если он известен, то можно рассчитать угловой диаметр источника, напряженность магнитного поля в нем и нижний предел энергии электронов.

Для сравнительно близких радиогалактик эта минимальная необходимая энергия имеет порядок 10^{52} эрг для релятивистских частиц в каждом всплеске излучения. Эта энергия — того же порядка, что высвобождающаяся при мощном взрыве сверхновой звезды. В случае квазаров (полагая, что их красные смещения связаны с расширением Вселенной и что они находятся от нас на огромных расстояниях) энергия, требуемая на каждый всплеск излучения, по-видимому, еще примерно в миллион раз больше, и очень трудно понять, каким образом столь чудовищная энергия может выделиться в столь малой области пространства за столь короткие времена. Более того, было установлено, что мощные поля электромагнитного синхротронного излучения от плотных облаков релятивистских электронов должны в свою очередь заставлять электроны терять свою энергию, причем скорее не в процессе синхротронного излучения, а механизмом обратного комптоновского рассеяния. Такое рассеяние происходит, когда энергичный электрон сталкивается с менее энергичным фотоном. При этом фотон повышает свою энергию, а электрон теряет ее; в итоге энергия электрона излучается на более коротких волнах, скажем, в инфракрасных или рентгеновских лучах, а не синхротронным механизмом в диапазоне радиоволн.

Такая парадоксальная ситуация некоторыми исследователями истолковывается как свидетельство того, что квазары должны находиться к нам значительно ближе, чем это явствует из их красного смещения, и тогда либо их поле излучения должно быть значительно более слабым, либо же это излучение создается механизмом более эффективным, чем синхротронный. М. Дж. Рис из Кембриджского университета предложил в качестве возможной альтернативы теорию «сверхсветовых» движений. Если радиоисточник расширяется со скоростью, близкой к скорости света, то, поскольку радиосигналам требуется конечное время, чтобы достигнуть наблюдателя, сигнал, приходящий от удаляющейся части источника, должен был быть испущен в более ранний момент, т. е. ближе к точке

начала расширения, чем сигнал от приближающейся части источника. При таких условиях кажущаяся скорость расширения действительно может превышать скорость света. В результате истинные размеры источника могут оказаться больше тех, что следуют из ограничения видимого расширения скоростями, меньшими, чем скорость света. А тогда «потребности» в энергии, которые обратно пропорциональны 10-й степени размеров, существенно уменьшатся.

Свидетельство в пользу того, что этот эффект может иметь значение для квазара 3С 279, было впервые получено в серии наблюдений 1968—1970 гг. на интерферометре, «концы» которого располагались по обе стороны Тихого океана — в Австралии и Калифорнии. Группой американских и австралийских ученых, работавших на антеннах слежения за спутниками НАСА в Голдстоуне и Тидбинбилле в качестве двух компонентов радиоинтерферометра с длинной базой, было обнаружено, что компонент этого радиисточника, впервые зарегистрированный в 1966 г., достиг в конце 1969 г. угловых размеров около $0,001''$. Соответствующий линейный размер, если считать, что красное смещение 0,54 обусловлено расширением Вселенной, составляет около 12 световых лет.

Таким образом, как предсказал Рис, кажущаяся скорость расширения этого небесного объекта должна почти вдвое превышать скорость света. Более детальные измерения на 3С 279 были проведены в октябре 1970 г. группой ученых из НАСА, Массачусетского технологического института и Мэрилендского университета на трансконтинентальном интерферометре. Эти наблюдения первоначально предназначались для измерения гравитационного искривления радиолучей от 3С 279 при их прохождении вблизи солнечного диска 8 октября 1970 г., однако наблюдения ясно показали, что компактный источник в 3С 279 двойной и имеет вид по меньшей мере двух компонентов, разделенных угловым расстоянием $0,00155''$, или около 200 световых лет. Наблюдения этого радиисточника были повторены той же группой исследователей в феврале 1971 г., а также на том же интерферометре и тем же методом группой ученых из Национальной радиоастрономической обсерватории, Калифорнийского технологического института и Корнелльского университета. Всего лишь за несколько месяцев в этом источнике 3С 279 произошли заметные изменения. Он, как и раньше, выглядел двойным, но на этот раз расстояние между компонентами возросло на два световых года, т. е. на 10% против предыдущего. Таким образом, получается, что оба компонента источника удаляются от одной начальной точки с кажущейся скоростью, примерно втрое превышающей скорость света.

Хотя предсказания, сделанные Рисом, как будто оправдываются, все же остаются серьезные проблемы. Различие в доплеровских сдвигах обоих компонентов должно приводить к тому, что приближающийся к нам компонент должен казаться гораздо более ярким, чем удаляющийся от нас. Между тем наблюдаемые интенсивности излучения от обоих компонентов оказываются одинаковыми с точностью до нескольких процентов. Сказанное может означать, что эффект доплеровского сдвига должен полностью компенсироваться различием в собственных светимостях обоих компонентов. Это выглядит довольно-таки «чудесным» совпадением.

С другой стороны, кажущееся движение может быть и следствием эффекта «прожектора», который вызывается возбуждением неподвижного вещества фронтом набегающей ударной волны. Точка соприкосновения между ударной волной и веществом может совершать кажущееся движение с почти неограниченной скоростью, наподобие пучка света от вращающегося прожектора на большом удалении от него. Возможно также,

что кажущееся изменение размеров, наблюдаемое на источнике 3С 279, может вообще не быть результатом движения обоих компонентов, а отражает изменения интенсивности одного или более неподвижных компонентов. Так, например, кольцо, образованное точечным источником в центре тройного источника, будет выглядеть расширяющимся, если интенсивность внутреннего компонента уменьшается или интенсивность внешних компонентов увеличивается. Такое объяснение получаемых результатов наиболее непосредственное и естественное, однако все равно остается еще не решенной проблема требуемого гигантского выделения энергии, если только расстояние до 3С 279 не окажется намного меньше того, что следует из наблюдаемого красного смещения.

Имеющиеся результаты не позволяют сделать выбор между этими различными возможностями, но можно надеяться, что будущие детальные наблюдения покажут, происходит или нет действительное движение отдельных компонентов. Даже если подтвердится заключение о больших кажущихся скоростях, то все равно будет получен ответ только на малую часть существующих вопросов. Те из ученых, кто полагает, что красное смещение у квазаров имеет космологическое происхождение *), могут взять на вооружение теорию «сверхсветовых движений» с тем, чтобы несколько снизить энергетические «требования», гигантская величина которых является главным аргументом против космологической интерпретации красного смещения у квазаров. Те же, кто склонен считать, что это красное смещение имеет местное происхождение **), могут заявить, что наблюдаемые сверхсветовые скорости суть всего лишь иллюзии, вытекающие из заключения о том, что квазары находятся очень далеко. Эти ученые отметят, что кажущаяся скорость увеличения угловых размеров, наблюдаемые плотности потока излучения и скорости изменения его интенсивности весьма сходны как для близких к нам галактик, так и для предположительно очень далеких квазаров, и что видимые крупные различия в соответствующих свойствах, присущих этим источникам излучения, просто-напросто есть результат допущения, что красное смещение у квазаров имеет космологическое происхождение.

Хотя измерения видимых изменений структуры компактных источников радиоизлучения и не в состоянии помочь прояснить эту проблему, они позволяют ответить на вопрос, возникают ли наблюдаемые последовательные всплески излучения в одной и той же области пространства или же они пространственно разделены, они дадут возможность уяснить механику взрывов, а также позволят установить характер изменения магнитного поля и полной энергии частиц со временем. Располагая такими сведениями, можно надеяться достичь лучшего понимания тех процессов, в которых гигантские даже по космическим масштабам события приводят к возникновению интенсивных источников радиоизлучения, и, в частности, что это за источники энергии и как эта энергия трансформируется в движения частиц с релятивистскими скоростями.

Чувствительные интерферометрические системы с длинными базами первоначально предназначались для исследования компактных источников радиоизлучения за пределами нашей Галактики. Описанная методика вместе с тем использовалась для изучения испускания радиоволн межзвездными облаками радикалов гидроксила (ОН) и водяного пара. Эти облака, излучающие подобно гигантским межзвездным мазерам, дают столь мощные радиосигналы, что определения их размеров можно про-

*) То есть обусловлено расширением Вселенной. (Прим. перев.)

**) То есть обусловлено предсказываемым общей теорией относительности «покраснением» света в гравитационном поле. (Прим. перев.)

вести, записывая эти сигналы на обычных высококачественных магнитофонах. Однако все наблюдения межзвездных мазеров до сих пор осуществляются с использованием более сложной техники для широкополосного приема, и это позволяло проводить одновременные измерения нескольких облаков (которые вследствие высоких скоростей своего движения по разным направлениям выявляют доплеровский сдвиг и тем самым излучают в широком диапазоне частот). Обычно такие облака имеют поперечные размеры порядка нескольких световых лет, но отдельные их компоненты очень малы — порядка астрономической единицы (расстояния от Земли до Солнца).

Одним из основных ограничений интерферометрии с записью на магнитную ленту до сих пор является недостаточная стабильность генераторов частоты, не дающая возможности определять фазы на интерференционной картине. Мы уже отмечали, что эту проблему можно с успехом

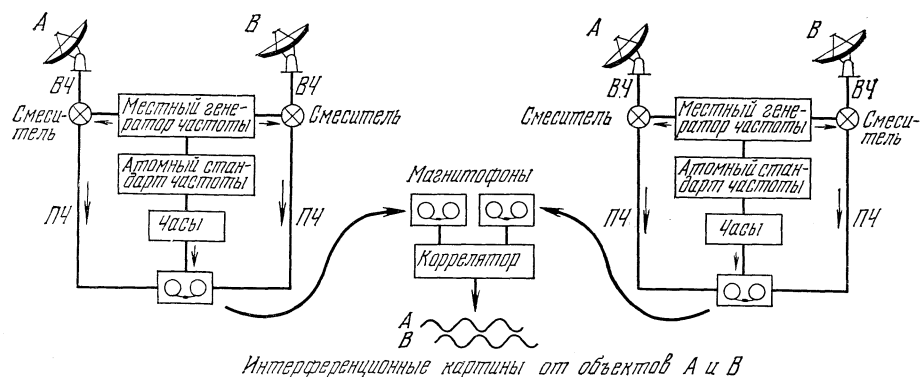


Рис. 10. Для одновременного наблюдения двух источников радиоизлучения используется более сложная система с записью на ленту.

На каждом «конце» интерферометра работают две антенны. Один из этих источников служит «реперной точкой» для определения фазы второго источника. В результате с помощью такой системы можно непосредственно измерять разность фаз обеих интерференционных картин, вне зависимости от любых изменений фазы, внесенных нестабильностью местных генераторов частоты или неоднородностями атмосферы на пути сигналов. Таким методом можно проводить точные измерения положений источников радиоизлучения и полностью определять распределение интенсивности излучения по источнику, комбинируя результаты наблюдений на интерферометрах с различными базами.

решать, используя в качестве стандартов частоты водородные мазеры. Однако даже при наличии абсолютно стабильного генератора частоты все же остаются проблемы, связанные с флуктуациями длины пути проходящего излучения в атмосфере для двух удаленных друг от друга точек его наблюдения. Для преодоления этого затруднения и для устранения влияния нестабильной работы местных генераторов частоты эксперименты сегодня проводятся на четырех антеннах (рис. 10). В таких «четыреантенных» наблюдениях участвуют две антенны в Грин-Бэнк (Национальная радиоастрономическая обсерватория) и две антенны в обсерватории Оуэнс-Вэлли Калифорнийского технологического института. В таких экспериментах можно одновременно наблюдать и устанавливать относительное расположение сразу двух источников радиоизлучения.

Если удастся осуществить интерферометрию со стабильными фазами при длинах баз, сравнимых с размерами Земли, то в принципе угловые положения можно будет определять с точностью, достигающей $0,0001''$. Такая точность позволит измерять действительное движение таких близко расположенных галактических объектов, как пульсары, межзвездные молекулярные мазеры и те из звезд, что обнаруживают сильное радиоизлуче-

ние. Может быть, эту технику удастся применить к определению малых отклонений от равномерного движения звезд, в частности вызываемых возмущениями из-за гравитационного притяжения звезд к собственным планетам; такой метод может оказаться единственно возможным для непосредственного обнаружения других планетных систем в нашей Галактике. Кроме того, обнаружение малых кажущихся движений в пульсарах или межзвездных молекулярных мазерах, обусловленных вращением Земли вокруг Солнца (параллакс), могло бы позволить провести первые непосредственные измерения расстояния до этих объектов.

Другим чрезвычайно интересным применением интерферометрии с записью на ленту является проверка предсказания общей теории относительности Эйнштейна о том, что электромагнитная волна, подобная радиоволне или световой волне, проходя возле массивного тела, должна отклоняться его гравитационным полем. Вычисленное отклонение лучей от удаленного небесного источника, проходящих возле края Солнца, составляет $1,76''$. Были проведены многочисленные оптические измерения кажущихся положений звезд вблизи солнечного диска в периоды солнечных затмений. Эти измерения показали, что действительно наблюдается отклонение лучей примерно той величины, что предсказывает теория относительности, однако точность таких измерений была в лучшем случае порядка 10 % величины отклонения. Такой точности недостаточно, чтобы сделать выбор между предсказаниями общей теории относительности и «конкурирующих» с ней других теорий всемирного тяготения.

Возможность определять относительные угловые положения объектов на небе при помощи радиоинтерферометров с точностью $0,001''$ означает, что эксперимент по проверке теории относительности может быть проведен с точностью значительно выше 1 %. Условия для его осуществления наступают каждый год в октябре, когда компактный квазар 3C 279 перекрывается солнечным диском. Другой яркий и компактный квазар 3C 273 расположен всего лишь в 10° от первого и представляет, таким образом, удобную «реперную точку» для измерения суточных отклонений видимого положения 3C 279 по мере того, как он проходит все ближе к солнечному диску.

Р. Шрамек провел подобный эксперимент на обычном интерферометре Национальной радиоастрономической обсерватории с базой 2,7 км. Полученные им результаты немного отличаются от тех, что предсказывает общая теория относительности, и лучше согласуются с тем, что говорит «конкурирующая» теория тяготения Брэнса — Дике. Точность этого эксперимента все же недостаточна для того, чтобы определенно отвергнуть общую теорию относительности. Однако эти результаты входят в группу немногочисленных пока экспериментальных данных по проверке общей теории относительности за более чем 50 лет ее существования, которые расходятся с этой теорией. Появившаяся в настоящее время возможность повысить точность измерений на один-два порядка открывает заманчивые перспективы перед наиболее глубокими физическими исследованиями.

В октябре прошлого года группа ученых из НАСА и Массачусетского технологического института провела обширные исследования затмения квазара 3C 279 (рис. 11), используя межконтинентальные интерферометры с записью на ленту, но пока что не получено определенных результатов. Сейчас разработана совместная программа исследований Национальной радиоастрономической обсерватории и Калифорнийского технологического института с помощью двух антенн в Грин-Бэнк и Оуэнс-Вэлли, ставящая своей целью одновременное измерение разницы в положениях на небосводе источников 3C 279 и 3C 273. Предполагается, что в этой работе удастся преодолеть многие экспериментальные трудности и что ее

результаты позволяют с большей точностью проверить общую теорию относительности.

Даже после того как будут решены проблемы стабильности местных генераторов частоты и исключения влияния атмосферных условий на результаты наблюдений, все равно измерение угловых положений небесных тел с угловой точностью выше $0,001''$ не будет простым делом. При таком уровне точности существенные ошибки будут вноситься уже некоторой неопределенностью в скорости вращения самой Земли, в направлении земной оси вращения в каждый момент времени и в относительных координатах антенн на земной поверхности. Ошибки в фазе,

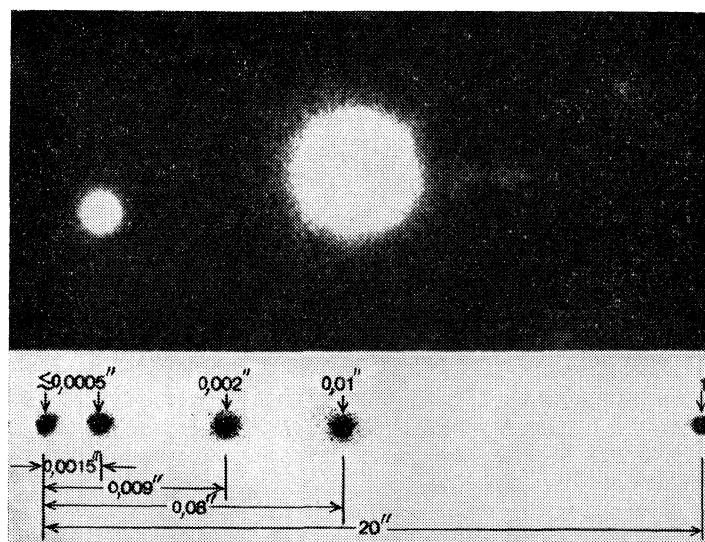


Рис. 11. Фотография квазара 3С 279, сделанная с помощью 5-м телескопа (в центре). Слабо светящаяся горизонтальная полоска вправо от квазара — характерный «выброс» вещества. Под фотографией, с нарушением масштаба (в логарифмическом масштабе вместо линейного), показано изображение этого объекта в радиолучах. Числа внизу дают расстояния от центра объекта, числа наверху — угловые размеры компонентов. Длина волны излучения постепенно возрастает по мере удаления от центра объекта.

вызванные упомянутыми неопределенностями, все взаимосвязаны. Чтобы устранить эти ошибки, потребуются неоднократные наблюдения специально подобранной совокупности источников радиоизлучения методами, обычно применяемыми в астрометрических измерениях в оптическом диапазоне. После того как это будет сделано, можно будет определить: а) положение источников излучения на небесном своде с точностью до $0,001''$, б) продолжительность суток с точностью до $0,0001$ сек, в) длины баз трансконтинентальных и межконтинентальных интерферометров с точностью до нескольких см; вместе с тем удастся осуществить глобальную синхронизацию часов с точностью до нескольких нсек. Получение столь точных данных откроет перед радиоастрономами возможность проведения целой группы геофизических экспериментов, в том числе измерения приливных волн в твердой оболочке Земли, дрейфа континентов, вариаций скорости вращения Земли и покачиваний ее оси вращения.

Существует ли предел разрешающей способности интерферометров с длинной базой или же базы можно «тянуть» в космическое пространство,

на Луну и даже ещё дальше? В той же мере, как турбулентность атмосферы влияет на оптическую астрономию, она будет влиять и на радиоастрономию в области коротких волн. При измерениях на длинных радиоволнах даже еще более важным окажется эффект рассеяния радиоволн электронами в составе солнечного ветра. Сегодня представляется, что базы, значительно превышающие диаметр Земли, удастся эффективно использовать лишь для радиоволн короче примерно 10 см. В результате из числа объектов исследования с помощью «космических» интерферометров выпадут скорее всего области гидроксильных радикалов, излучающие на длине волны 18 см, и пульсары, которые наиболее сильно излучают на метровых волнах.

Источники синхротронного излучения при их исследовании с помощью радиоинтерферометров ставят еще более принципиальный предел длине базы. Как уже отмечалось, если синхротронно излучающая система имеет размеры меньше критического, то релятивистские частицы будут быстро терять свою энергию в результате обратного комптоновского рассеяния, а значит, не успеют «высветиться» в радиодиапазоне. Этот критический угловой размер источника пропорционален длине волны, на которой плотность потока излучения оказывается наивысшей. Разрешающая способность интерферометра с фиксированной базой обратно пропорциональна длине волны, на которой ведется наблюдение. Вместе с тем обычно для достижения наивысшей чувствительности наблюдения ведут на длине волны, близкой к той, на которой имеет место максимум интенсивности излучения. В результате оба названных фактора будут компенсировать друг друга и максимальная длина базы, необходимая для разрешения источника синхротронного излучения, почти не будет зависеть от длины волны, на которой производится наблюдение. Эта длина базы для наиболее сильно излучающих радиогалактик и квазаров как раз оказывается сравнимой с диаметром Земли. Поэтому для измерений даже самых маленьких радиоизлучающих галактических ядер и квазаров радиоинтерферометры с базами, «вытянутыми» в ближний космос или на Луну, вероятно, не понадобятся.

Однако создание интерферометров с большими базами — это только часть обширной программы. Для получения полной картины сложного строения таких источников, как радиогалактики, квазары и межзвездные молекулярные мазеры, нужны также интерферометры с базами и средних размеров. Состоявший из двух компонентов простой радиоинтерферометр 50-х годов превратился сегодня в сложную многоантенную сеть. Радиоастрономы предвидят то время, когда многие радиотелескопы в различных точках земного шара будут связаны в единую сеть, обладающую сверхвысокой разрешающей способностью.

Для этой цели подходят и существующие уже радиотелескопы, однако расположены они не оптимальным образом. Более того, поскольку радиоастрономы во всем мире заняты и другими важными проблемами, да еще в различных обсерваториях используют разную технику, то, по-видимому, объединить большое число радиотелескопов для наблюдения одного и того же объекта на общей длине волны не удастся. Для получения достаточно широкого набора интерферометрических баз может потребоваться создание специальной глобальной сети интерферометров.

Собирать все записи сигналов с радиотелескопов в общем месте и коррелировать все возможные пары телескопов — это весьма трудоемкая задача. Приемлемым решением ее был бы полный отказ от записи сигналов на ленту с тем, чтобы данные с каждой антенны с помощью телеметриче-

ских систем и геостационарных искусственных спутников передавать в единый центр. Создание такой сети интерферометров со сверхдлинными базами потребует тесной международной кооперации. Вместе с тем оно откроет необычайно широкие перспективы как для астрономии, так и для геофизики.

ЛИТЕРАТУРА

- М. Н. С о h e n, D. L. J a u n c e y, K. I. K e l l e r m a n, B. G. C l a r k, *Science* **162** (3849), 88 (1968). — Bernard F. B u r k e, *Phys. Today* **22** (7), 54 (1969). — K. I. K e l l e r m a n, *Sky and Telescope* **42**, 132 (1971). — K. I. K e l l e r m a n, D. L. J a u n c e y, M. Н. С о h e n, B. B. S h a f f e r, B. G. C l a r k, J. B r o d e r i c k, B. R ö n n ä n g, O. E. H. R y d b e c k, L. M a t v e y e n k o, I. M o i s e y e v, V. V. V i t k e v i t c h, B. F. C. C o o p e r, R. B a t c h e l o r, *Astrophys. J.* **169** (1, pt. 1), 1 (1971).
-