1975 г. Октябрь *Том 117, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1974 г.

523.164.43

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ С БОЛЬШОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИЛОЙ*)

М. Райл

Как я думаю, в 1952 г. произошло то событие, которое, более чем что-либо другое, заставило меня искать путей создания мощных радиотелескопов. Было установлено, что интенсивный радиоисточник в созвездии Лебедь — галактика, удаленная от нас на 1000 млн. световых лет. После этого открытия стало очевидно, что некоторые галактики способны давать радиоизлучение, в миллионы раз превышающее по интенсивности излучение нашей Галактики или туманности Андромеда, причем механизм соответствующего излучения был совершенно неизвестен. Вполне могло оказаться, что некоторые из более слабых источников, излучение которых уже детектировали имеющиеся тогда небольшие радиотелескопы, аналогичны галактике в Лебеде. Если это так, то они находятся на расстояниях, отвечающих пределу возможностей самых больших оптических телескопов. Тогда более мощный радиотелескоп мог бы предоставить наилучшую возможность различать разные космологические модели.

Только в 1958 г. [1]) удалось с некоторой определенностью показать, что большинство источников — действительно внегалактические объекты. Однако даже в 1952 г. перспективы казались столь волнующими, что я и мои коллеги начали работать над проблемой создания инструмента, способного расширить область наблюдений до самых слабых источников с целью исследовать их внутреннее строение.

Ранние наблюдения были очень сильно ограничены как слабым угловым разрешением, так и чувствительностью. Обычно получить какую-либо информацию о структуре источника было невозможно; зачастую трудно было разделить близко расположенные источники. Кроме того, отождествлению радиоисточников с видимыми в оптической области объектами часто мешала недостаточная точность определения положения. Интерферометры позволили более точно определять положение и иногда давали возможность строить простые модели структуры источника. Было обнаружено, что угловой размер лишь нескольких источников превышает 2′—3′ дуги.

Трудность составления подробных карт таких источников была очевидна: наблюдения велись на длинах волн, в миллионы раз превышающих оптические, и чтобы получить радиокартину даже с разрешением, соответствующим невооруженному человеческому глазу (примерно 1′ дуги), понадобился бы телескоп диаметром около 1 *км*, работающий на длине волны 50 *см*.

*) M. Ryle, Radio Telescopes of Large Resolving Power. Нобелевская лекция по физике 1974 г. Перевод Н. И. Гинзбург.

© The Nobel Foundation 1975.
© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1975 г.

В то же время такой инструмент был бы эффективен при условии достаточно хорошей поверхности для создания нужного изображения; для этого ошибка не должна превышать $\lambda/20$, т. е. несколько сантиметров. Огромные технические трудности создания такого телескопа очевидны.

К 1960 г. с появлением мазеров и параметрических усилителей повысилась чувствительность аппаратуры, принимающей излучение на сантиметровых длинах волн. В связи с этим стало возможно строить телескопы с диаметром 10—100 *м*, с высокой чувствительностью и с угловым разрешением около 1′ дуги. Но технические трудности создания достаточно жесткой поверхности были все еще весьма велики; было бы трудно создать обычный параболоид с угловым разрешением лучше 1′ дуги.

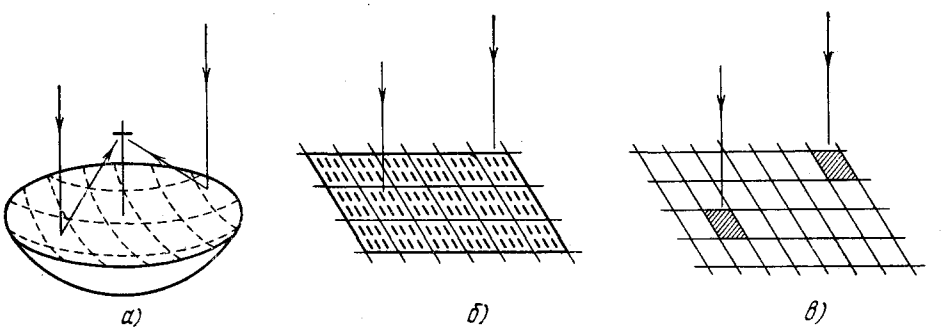

Рис. 1. Использование параболоида (*а*), системы диполей (*б*) и последовательная съемка волнового фронта маленькими антенными элементами (*в*).

Большая разрешающая сила получается в результате комбинирования сигналов от большой части приходящего волнового фронта.

Теперь мне хотелось бы описать совершенно иной подход к этой проблеме. Маленькие антенны располагают таким образом, чтобы последовательно заполнить всю большую плоскость. Разработкой и использованием таких систем «апертурного синтеза» занимается в основном наша группа в Кембридже в течение последних двадцати лет.

Принцип метода предельно прост. Во всех способах, используемых для получения большой разрешающей силы, т. е. возможности отделить волновой фронт с определенным направлением нормали от волновых фронтов с близлежащими нормалями, мы стараемся собрать измеряемое поле с наибольшей возможной площади волнового фронта.

В случае парабалоида мы достигаем этого специальной формой отражающей поверхности, позволяющей собрать в фокусе поля, отвечающие разным участкам изучаемого волнового фронта (рис. 1, *а*); напряжение на принимающем диполе соответствует сумме всех полей. Мы можем получить такой же результат с помощью устройства из диполей, соединенных вместе кабелями одинаковой длины (рис. 1, *б*).

Предположим теперь, что исследуется лишь маленькая часть волнового фронта, но поочередно поступают сигналы от различных его участков (рис. 1, *в*). Можно ли в этом случае, собрав сигнал, получить прежний результат? Поскольку мы не знаем величину фазы приходящего поля в различные моменты времени, обычно это невозможно. Если же, однако, мы длительное время будем измерять *один* из участков, наблюдая одновременно за другими, мы можем использовать сигнал от этого участка в качестве фазового репера с тем, чтобы скорректировать значения, измеренные на других участках волнового фронта. Таким образом, с помощью двух маленьких антенных элементов мы снова можем складывать поля

по всему волновому фронту, и площадь этого фронта определяется теперь размерами относительных расстояний между антенными элементами.

Можно подумать, что этот метод весьма трудоемок и занимает много времени. Действительно, если мы должны измерить площадь со стороной D с помощью элементов с размером d, то необходимо проводить наблюдения, используя $2D^2/d^2$ различных относительных положений двух антенных элементов. Однако на практике этот метод не требует существенно большего времени по сравнению с временем, необходимым в случае большого эквивалентного инструмента. Дело в том, что результаты большого количества наблюдений можно комбинировать с помощью вычислительной машины с внесением дополнительных разностей фаз (как и в случае сфазированной совокупности диполей), соответствующих многим различным направлениям волновой нормали. Таким образом, за один цикл наблюдений можно составить карту *части* неба, ограниченной лишь дифракционной картиной, соответствующей самым маленьким антенным элементам. Фактически таким способом можно сканировать D^2/d^2 различных направлений, которые нужно было бы последовательно исследовать обычным инструментом, так что полное время наблюдений для обоих методов почти совпадает.

Можно также видеть, что чувствительность системы много выше чувствительности маленьких антенных элементов, поскольку сигнал из определенной точки неба «наносится» на карту в течение *всего* периода наблюдений. Результирующее отношение сигнала к шуму эквивалентно фактически применению инструмента с полной собирающей площадью, равной $2d^2\sqrt{2D^2/d^2} \sim 3Dd$, т. е. величине, могущей оказаться значительно больше площади самих элементов. Правда, эта величина не так велика, как в случае создания инструмента с собирающей поверхностью D^2, но она может превысить площадь любого инструмента, который *можно* построить.

В отличие от параболоида или системы диполей, для которых и чувствительность и разрешающая сила оказываются фиксированными, как только выбрана длина волны, значение d можно подбирать таким образом, чтобы чувствительность для любой выбранной длины волны и типа наблюдений была согласована с разрешением.

Метод апертурного синтеза не требует решения чрезвычайно сложных технических задач, возникающих при постройке очень больших и точных параболоидов или систем диполей, и позволяет получать как высокую разрешающую силу, так и большую эффективную собирающую площадь с минимумом инженерных трудностей, а следовательно и с минимальными затратами.

Необходимо, правда, обеспечить возможность относительного перемещения маленьких элементов, и при этом необходимо знать их относительные положения и длину электрических путей с точностью, равной точности изготовления поверхности эквивалентного инструмента ($<\lambda/20$). Нужно также обеспечить автоматическое выполнение обратного фурье-преобразования, необходимого для получения карты неба из данных наблюдений.

Исторически прообразы инструментов такого типа появились на заре радиоастрономии, когда в Австралии и в Англии начали вести наблюдения с помощью разнесенных подвижных антенных элементов с целью получения радиояркости по диску Солнца. При обработке ранних наблюдений полагали, что Солнце обладает сферической симметрией, и поэтому нет надобности измерять фазу, а следовательно, и не нужно точное знание относительных положений элементов и электрических длин путей до

приемника. Аналогичной методикой пользовались при установлении распределения радиояркости вдоль плоскости Галактики [2].

Первый синтезирующий инструмент, с помощью которого можно было определять произвольное распределение источников, был построен Джоном Блитом в Кембридже в 1954 г.[3]. Инструмент состоял из тонкого длинного элемента, заменявшего фактически целый ряд на рис. 1, *в*, и меньшего элемента, который, двигаясь перпендикулярно, мог занимать 38 различных положений (рис. 2, *а*). Это было эквивалентно квадратному синтезирующему инструменту с разрешением, равным 2,2°. С помощью этого радиотелескопа были получены первые подробные карты для галактического излучения на длинных радиоволнах (7,9 *м*).

В последующие годы в Кембридже были построены более крупные инструменты с такой же конфигурацией. К ним относятся инструмент

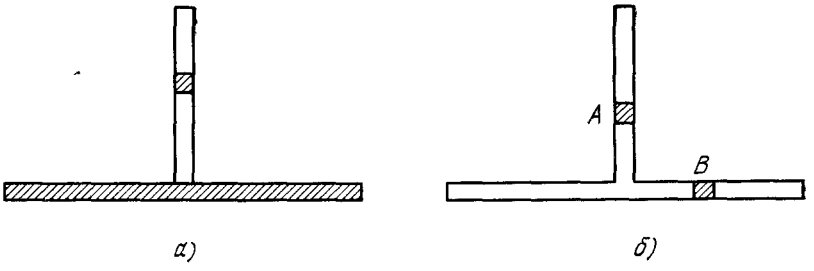

Рис. 2. Схема инструмента, построенного в 1954 г. Дж. Блитом (*а*), и эквивалентный инструмент с использованием двух маленьких элементов (*б*).

высокой чувствительности с разрешением 45′ дуги, работающий на той же длине волны 7,9 *м*[4], а также радиотелескоп с разрешением 25′ дуги и $\lambda = 1{,}7$ *м*, с помощью которого Скотт и др. обнаружили в северной части неба около 5000 источников [5,6].

В этих инструментах использовались конструкции очень дешевого типа. При $\lambda > 1$ *м* эффективно отражающей поверхностью может служить совокупность тонких (диаметром около 1 *мм*) проволок, расположенных на расстоянии 5—10 *см* друг от друга. В случае инструмента с $\lambda = 1{,}7$ *м* проволоки натягивались на простые параболические рамы из стальных трубок. В результате получался цилиндрический параболоид длиной 450 *м* и шириной 20 *м* (рис. 3), стоимость которого составляла около фунтов за квадратный метр.

С необходимостью получения все большей и большей разрешающей силы мы осознали, что более крупные системы, работающие на метровых длинах волн, неприменимы в силу ограничения, накладываемого неоднородностью электронной плотности в ионосфере. А на более коротких волнах, когда это обстоятельство несущественно, трудности возникают на пути создания эффективных отражателей из натянутых проволок. Проволоки смещались под влиянием ветра, и, кроме того, при необходимом теперь более тесном их расположении они могли касаться друг друга. Для работы на длинах волн <50 *см* нужна была существенно более жесткая опорная конструкция, и стоимость инженерных затрат становилась весьма большой.

Очевидным решением было использовать систему, приведенную на рис. 1, *в*. Здесь конструкция ограничивается созданием двух маленьких элементов — случай когда можно позволить значительно более дорогую стоимость 1 кв. метра. Метод при котором нужно изменять относительные положения двух элементов, связан с некоторыми практи-

ческими трудностями. Предположим, что элементы смонтированы на двух расположенных перпендикулярно рельсовых путях (рис. 2, *б*) и что для каждого положения *A* на пути север — юг *B* может занимать любое положение вдоль пути восток — запад. Для значений D/d около 50 получаем 5000 различных сочетаний. Если *B* передвигать один раз в день наблюдения займут 5000 дней, и хотя они дадут возможность получить карту целой полосы неба, период времени слишком длинен для кандидатской диссертации!

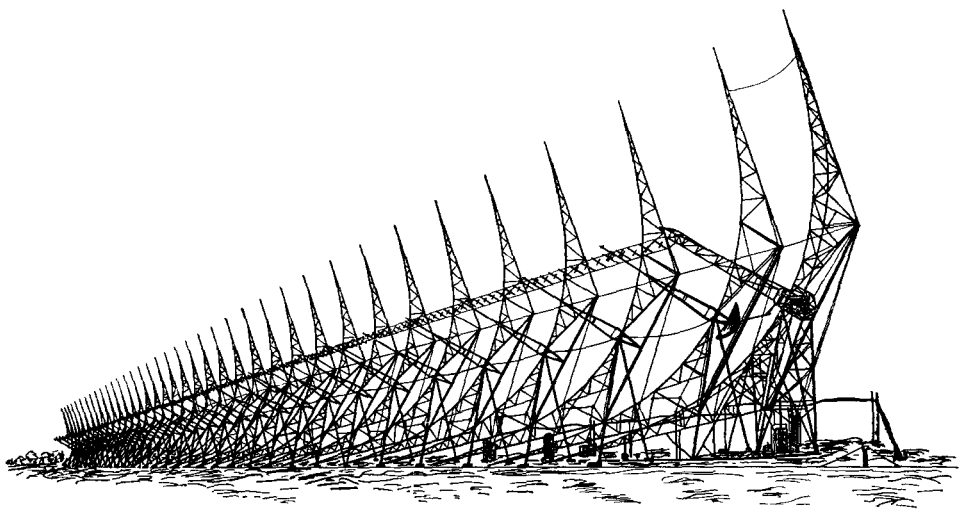

Рис. 3. Плечо восток—запад радиотелескопа, построенного в 1957 г. ($\lambda=1{,}7$ *м*), с помощью которого было обнаружено более 5000 источников.

Альтернативная возможность состоит в том, чтобы быстро двигать элемент *B* — так, чтобы он занимал несколько положений за период времени, в течение которого площадь неба остается в пределах диаграммы направленности малых элементов. Это снизит время наблюдений, но уменьшит исследуемую часть неба. Упомянутый период времени можно удлинить, что позволит увеличить число относительных положений элементов *A* и *B* в течение дня. Для этого нужно расположить элементы таким образом, чтобы они следили за выбранной точкой неба длительное время.

Вскоре мы осознали, что само вращение Земли обеспечивает относительное движение элементов *A* и *B* по отношению к источнику, и поэтому нет никакой необходимости передвигать их по поверхности Земли. Предположим, например, что оба элемента смонтированы вблизи Северного полюса, и мы наблюдаем с их помощью площадь неба около полюса мира. В этом случае можно вообще не двигать элементы. За 24 часа один из элементов прочертит окружность вокруг другого (рис. 4, *а*), а записанные за это время сигналы можно скомбинировать, чтобы получить такой же результат, как от эквивалентной антенны с круговой диаграммой направленности. Если просто изменять расстояние между элементами, двигая их вдоль одной прямой, в течение, скажем, 50 дней, можно осуществить полный апертурный синтез. В 1960—1961 гг. мисс Энн Невиль и я создали экспериментальную установку с целью опробовать метод и разработать вычислительную схему. С помощью этой установки, работая на длине волны 1,7 *м*, мы составили круговую карту участка неба диаметром 8°, расположенную вокруг Северного полюса мира [7]. Мы соединили различ-

ные 14-метровые секции длинного цилиндрического парабалоида (рис. 3) с маленькими антеннами таким образом, чтобы имитировать изменения расстояний между двумя элементами с диаметром 14 *м*. Эффективный диаметр синтезирующего инструмента был равен 1 *км*, что обеспечивало угловое разрешение 4,5′ дуги.

Мы не только доказали эффективность метода, но и получили некоторые интересные астрономические данные — в частности, детектировали источники в 8 раз более слабые наблюдаемых ранее. Хотя изученная часть неба составляла лишь 50 кв. градусов, полученные результаты оказались полезными для наших космологических исследований.

Практически, для наблюдений необходимо всего 12 часов. Дело в том, что симметрия системы и отсутствие необходимости проводить эксперимент с Северного полюса, ограничивая наблюдения полюсом мира, позволило расположить элементы на оси восток — запад. Это обеспечило возможность каждому из них прослеживать нужную область неба за 12 часов (рис. 4, *б*). При малых склонениях синтезирующий инструмент становится

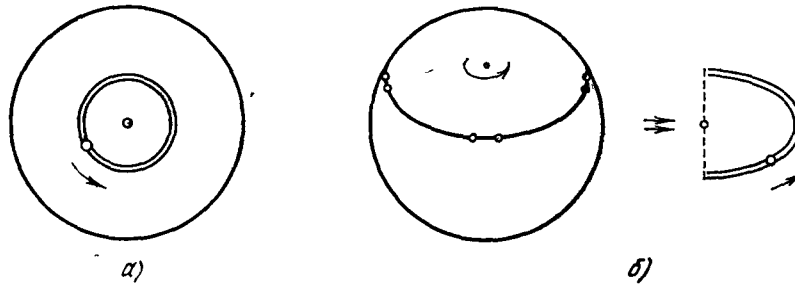

Рис. 4. *а*) Два антенных элемента, смонтированных около Северного полюса и ведущих наблюдения весь день, эквивалентны одному кольцу много большего инструмента; *б*) элементы можно использовать на других широтах или расположить их на линии восток — запад и следить за выбранной точкой в течение 12 часов.

эллиптическим, а аппертура в направлении север — юг снижается на sin δ. Простота конструкции, которая должна обеспечить лишь движение элементов по линии, и вытекающая из этого обстоятельства огромная экономия необходимой площади земельного участка давали, однако, такие великолепные возможности, что мы построили в Кембридже друг за другом три больших телескопа с эквивалентными диаметрами 0,8; 1,6 и почти 5 *км*.

Эти инструменты известны, как полумильный, одномильный и 5-километровый телескопы (создание последнего телескопа совпало с началом переговоров о вступлении Великобритании в Европейское сообщество).

Первым был построен одномильный телескоп, и его создание в 1964 г. положило начало наблюдениям.

Интересно отметить, что еще в 1954 г. мы обсуждали возможность постройки инструмента с большим разрешением, основанного на таких же точно принципах, и недавно я обнаружил в старой тетради две следующие записи:

«8.6.1954 г. *Возможная тема для студентов и другие проблемы.*

...3f. Обзор области Северного полюса на 81,5 *Мгц*. Эффективная собирающая площадь около 25 футов × 1500 ≈ 37500 кв. футов. Эффективная разрешающая площадь $\approx 10^6$ кв. футов».

Эта запись сопровождалась схемой предполагаемого антенного элемента.

«29.6.1954 г.

Выполнить обзор 3f во всех направлениях, для которых достижимо вращение на 180°? ...Больше примерно 20° может оказаться возможным при ориентации антенн последовательно в разных направлениях, т. е. при наблюдениях вне меридиана».

В третьей записи, относящейся к 22.7.1954 г., для осуществления последней программы обсуждался вопрос использования рельсовых путей восток — запад со смонтированными на них двумя 30-футовыми антеннами, а также об устройстве кабелей, необходимом для компенсации различных длин электрических путей к двум антеннам при наблюдении вне меридиана и о выборе направлений наблюдения, обеспечивающих «однородный вклад разных членов фурье-разложения».

Почему же при явной простоте и дешевизне мы не построили такого телескопа в 1954 г.? Дело в том, что в то время не было еще вычислительных машин с достаточной скоростью и памятью, чтобы осуществлять фурье-обращения получаемых данных. Первая вычислительная машина EDSAC I с запоминающим устройством была создана д-ром М. В. Уилкисом в математической лаборатории Кембриджского университета и поступила в эксплуатацию в 1949 г. С ее помощью Джон Блит обработал свои данные, причем около 15 часов машинного времени ушло на 38-точечное преобразование для каждых 4-х минут 24-х часового обзора неба. Было бы непрактично использовать эту машину для двумерного обращения, необходимого при синтезе с использованием вращения Земли.

К 1958 г. появилась значительно более быстрая EDSAC II, и развитые Д. Уилером из математической лаборатории быстрые фурье-преобразования (кстати сказать, за шесть лет до того, как эти методы получили широкое применение) сделали возможным эффективную обработку данных обзоров неба на волнах 7,9 и 1,7 *м*, а также позволили в 1961 г. осуществить на волне 1,7 *м* синтез с использованием вращения Земли. Однако и с EDSAC II обработка данных для малой области неба требовала целую ночь.

На ранних стадиях разработки проекта одномильного телескопа я обсуждал в 1961 г. с М. Уилкисом значительно большие трудности, стоящие на пути обработки данных от этого инструмента. Однако уже тогда было известно о планах замены EDSAC II новой вычислительной машиной TITAN, которая начала функционировать в 1963 г. и с легкостью могла справиться с данными на выходе одномильного телескопа. Развитие апертурного синтеза оказалось, таким образом, тесно связано с созданием все более мощных вычислительных машин. Интересно, как бы протекала наша работа в Кембридже, если бы развитие вычислительной техники запаздывало, например, на 15 лет.

Обе программы из моей тетради 1954 г. стали темой двух кандидатских диссертаций (Ph. D. Thesis) в 1964 и 1965 гг.

Теперь я вернусь к созданию больших инструментов, схема которых изображена на рис. 5. Одномильный телескоп состоит из 3-х 18-метровых чаш, две из которых закреплены в 0,8 *км* друг от друга, а третья смонтирована на рельсовом пути длиной тоже 0,8 *км* (рис. 6). Такое устройство дешевле, чем длинный рельсовый путь, и также позволяет использовать два базовых расстояния одновременно. Телескоп создавался для двух основных программ: а) Детектирование значительно более слабых, а следовательно, и более удаленных источников (рис. 7) с тем, чтобы получить данные о ранних стадиях эволюции Вселенной и таким образом попытаться отличать друг от друга разные космологические модели. б) Снятие радиокарт отдельных источников с тем, чтобы понять природу действующих в них физических механизмов. Мощные внегалактические объекты

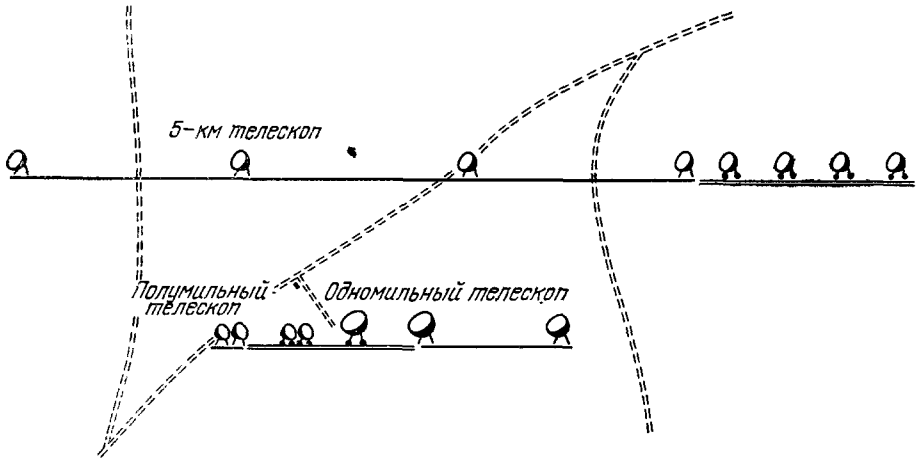

Рис. 5. Схема одномильного, полумильного и 5-километрового телескопов.

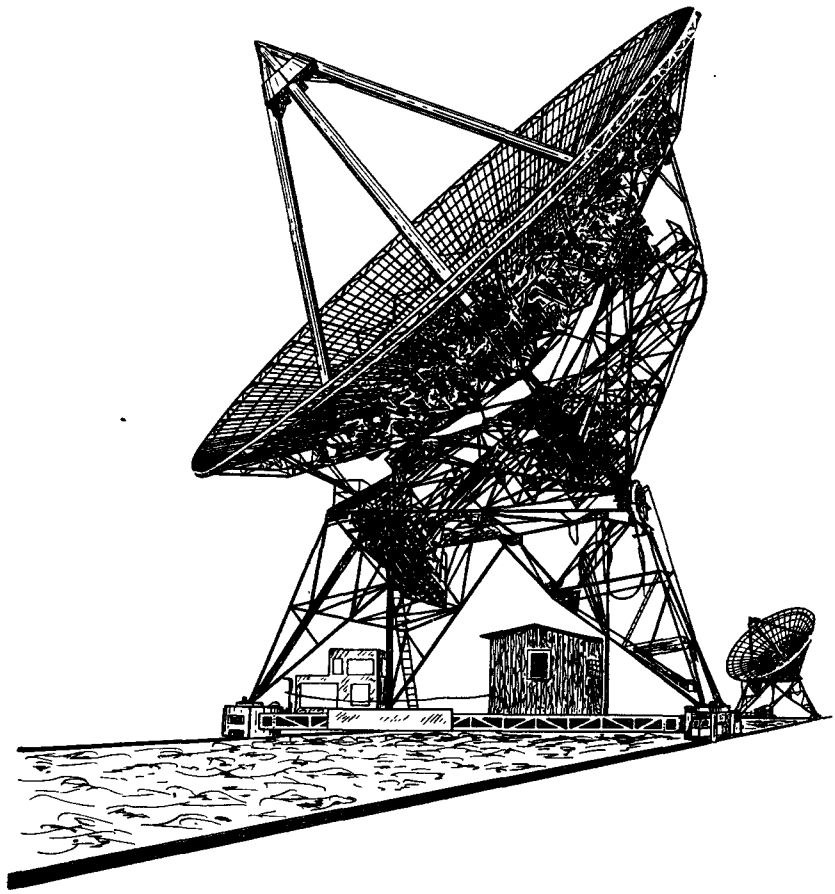

Рис. 6. Одномильный телескоп.
На переднем плане стоящая на рельсах западная чаша, позади — неподвижные чаши.

составляли большую часть изучаемых источников, но с физической точки зрения остатки взрыва сверхновых были не менее интересны.

Изучение физики радиогалактик и квазаров и космологическая проблема странным образом слились вместе. По-видимому, мы живем в нестационарной Вселенной, и в связи с запаздыванием сигналов мы видим очень удаленные источники такими, какими они были во времена более молодой Вселенной. Поэтому их строение может оказаться отличным от структуры представителей более близких источников. Однако наиболее мощные источники так редки, что близко от нас таких источников *нет*, в то время как слабые источники на большом расстоянии детектировать невозможно. Если мы хотим понять, как эволюционирует

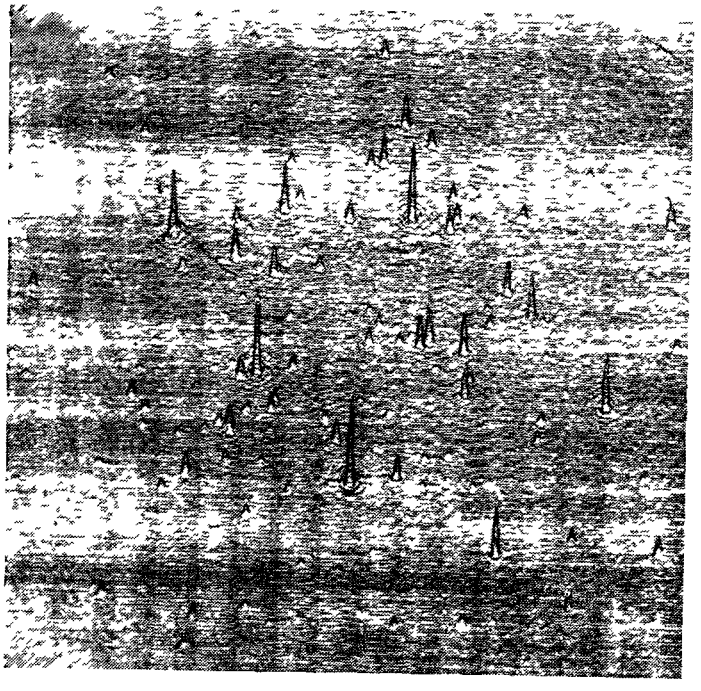

Рис. 7. Карта, полученная на одномильном телескопе. Видны источники примерно в сто раз слабее наблюдаемых ранее

Вселенная, прежде всего нужно разобраться в физике отдельного источника, с тем чтобы выяснить характер его эволюции в раннюю космологическую эпоху.

Полумильный телескоп был создан позже Джоном Шейкшафтом и Джоном Балдвиным. Его постройка обошлась фактически очень дешево, поскольку был использован уже имевшийся рельсовый путь (см. рис. 5), и мы смогли достать четыре 9-метровых чаши по цене металлолома. Нужно было построить лишь башенные опоры. Этот телескоп использовали в основном вместе с радиоспектрометром, работающим в полосе нейтрального водорода (длина волны 21 *см*). Были сняты карты распределения плотности и скорости водорода в близлежащих галактиках, что составляло часть программы, касающейся образования и эволюции галактик.

Пятикилометровый телескоп вступил в строй в 1971 г. (рис. 8). Поскольку он самый совершенный, я опишу его устройство подробнее. Телескоп был создан исключительно для изучения структуры отдельных

источников. Помимо того, что размер этого инструмента больше предыдущих, его чаши были сделаны точнее, что позволяло вести измерения на коротких волнах вплоть до 2 *см*. В результате угловое разрешение получилось равным примерно 1″ дуги — величине, сравнимой с разрешением больших оптических телескопов в хороших горных условиях. В настоящее время телескоп работает на длине волны 6 *см*, когда разрешение составляет 2″ дуги.

С целью увеличения скорости измерений были смонтированы четыре неподвижных элемента и четыре подвижных, установленных на рельсовом пути (см. рис. 5). Такое расположение элементов давало возможность работать с 16-базовыми расстояниями одновременно, и всего за 12 часов наблюдений получали с разрешением в 2″ дуги сигналы от круговых областей, разделенных расстоянием 42″ дуги. Картину источников протяженностью меньше 43″ дуги можно было снять за 12 часов наблюдений;

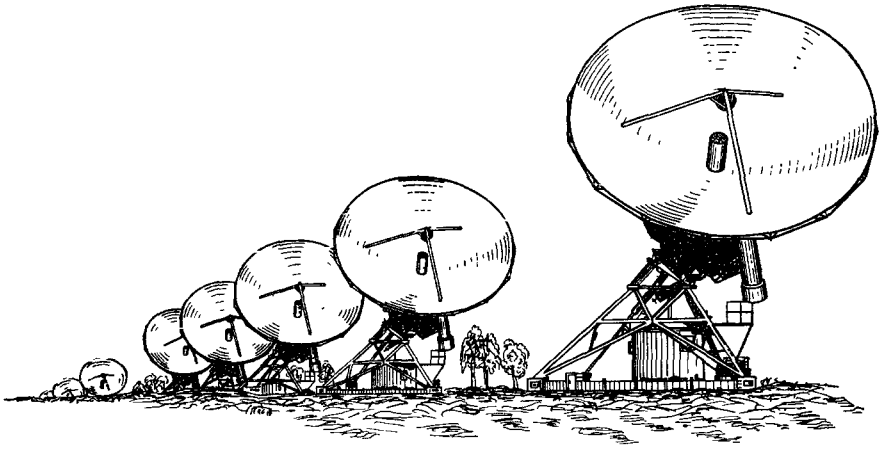

Рис. 8. 5-километровый телескоп с подвижными чашами на переднем плане.

для больших полей зрения нужны были дополнительные наблюдения с промежуточными положениями подвижных элементов, чтобы подавить боковые лепестки диаграммы направленности.

Для работы на таких коротких волнах точность установки элементов и длины электрических путей должна быть больше 1 *мм*. Обычные методы обзора позволяют установить каждый элемент с точностью ±10 *мм*, и окончательная юстировка должна полностью основываться на радионаблюдениях. Таким путем было найдено, что расстояние между двумя крайними неподвижными элементами (с помощью которых определяется склонение) равно 3 430 828,7 ± 0,25 *мм*; за два года работы это расстояние с указанной точностью оставалось неизменным. Комбинация азимута и долготы, определяющая прямое восхождение, устанавливалась по наблюдению яркой опорной звезды Алголь, являющейся слабым переменным радиоисточником.

Телескоп управлялся вычислительной машиной, которая автоматически подбирала для данного центра карты соответствующие прецессию, аберрацию и пр. и вычисляла разность путей (с поправкой на преломление в атмосфере) для каждой пары элементов. Затем эти данные использовались для проверки «электрического» запаздывания сигналов от каждого элемента и после этого поступали в приемники. Выходные сигналы от приемников обрабатывались вычислительной машиной и записывались

на магнитную ленту, чтобы после окончания наблюдений их можно было комбинировать для составления карты наблюдаемого участка неба. Эту карту рисовал самописец, управляемый вычислительной машиной.

С помощью этого инструмента было выполнено много астрономических наблюдений, начиная с изучения облаков ионизированного водорода в нашей Галактике до отдаленных квазаров. На основании точного калибровочного обзора неба стало ясно, что как астрономический инструмент (т. е. при определении координат на небесной сфере) наш телескоп по точности не уступает лучшим оптическим методам. Кроме того, он лишен некоторых недостатков, присущих оптическим приборам при измерениях больших углов. С целью определения крупномасштабных неоднородностей, которые могли бы существовать в астрометрических системах, Брюс Эльмор вместе с оптиками связал положения квазаров (некоторые из которых являются компактными источниками как в оптической, так и в радиообластях), измеренных радиометодами с положениями, полученными по отношению к опорным звездам. Он показал также, что такой тип инструмента, как наш радиотелескоп, можно использовать для непосредственных измерений астрономического времени — без совместных наблюдений на различных долготах для поправки на движение полюса. И все это опять с точностью, сравнимой с точностью оптических методов (около 5 *сек* за 12 часов наблюдений).

В другую программу входило изучение рождения звезд. Когда газовое облако конденсируется, образуя звезду, содержащаяся в нем пыль создает такой эффективный экран, что новорожденные звезды с окружающими их областями ионизированного водорода никогда нельзя увидеть оптическими методами. Звезда становится видна только после того, как рассеивается пыльное облако. При работе на радиоволнах пыль не вносит заметного искажения, и поэтому с помощью радионаблюдений области рождения новых звезд можно изучать на самых ранних стадиях.

Объект NGC 7538 — пример такой области. На верхней части рис. 9 изображена карта радиоизлучения, полученная на одномильном телескопе. Большая диффузная компонента соответствует почти точно оптической туманности и отображает газовое облако, ионизированное одной или большим количеством О-звезд, образовавшихся примерно миллион лет назад, и окруженное пылью, достаточно прозрачной для прохождения света. Компактная нижняя компонента соответствует газу, ионизированному значительно более молодыми звездами, которые все еще окутаны плотной, не пропускающей света пылью и поэтому не видны на фотографии. Когда эта южная компонента была снята с большим разрешением на пятикилометровом телескопе, получили нижнюю карту, на которой видно ионизированное облако диаметром около 10″ дуги, возникшее, возможно, в результате радиации звезды спектрального типа О8, а южнее другое более плотное облако, образовавшееся вокруг молодой звезды с возрастом лишь несколько тысяч лет. Пыль, окружающая эти две компактные области, нагревается находящимися в них молодыми звездами, и обе они были обнаружены по инфракрасному излучению [8].

Однако наиболее обширной программой было составление карт внегалактических источников — радиогалактик и квазаров. Эти галактики за короткий промежуток времени по сравнению с их возрастом выделяют энергию порядка 10^{60} *эрг*, эквивалентную полной аннигиляции вещества с массой, равной примерно миллиону солнечных масс. Механизм, приводящий к этому выделению энергии, еще не выяснен.

На рис. 10 изображена новая радиокарта источника в созвездии Лебедь — первой мощной из обнаруженных радиогалактик. Приведенное на рис. 11 распределение поляризованного излучения от северной

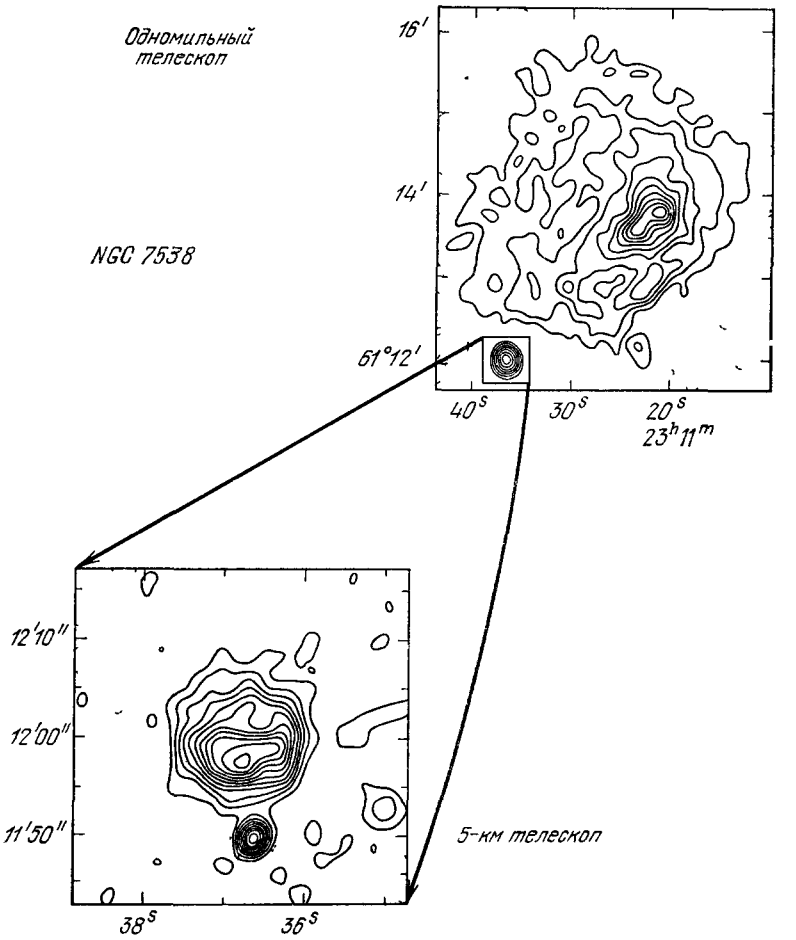

Рис. 9. Облако понизированного водорода NGC 7538.

Верхняя радиокарта соответствует большому облаку, дающему оптическое излучение, на юге расположена другая, компактная компонента, которая с большим разрешением изображена внизу.

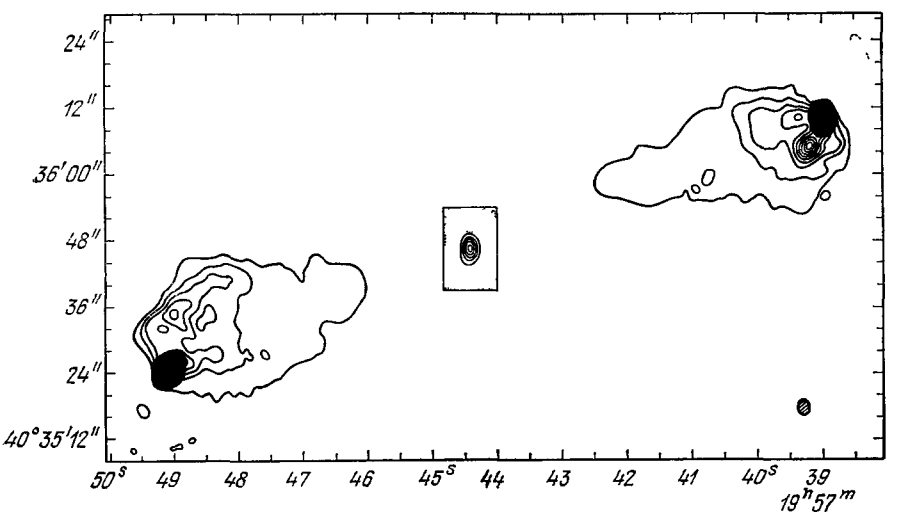

Рис. 10. Карта мощной радиогалактики в созвездии Лебедь, полученная на 5-километровом телескопе.

Компактные крайние компоненты необычайно ярки Центральная компонента, соответствующая ядру оптической галактики, очень слаба и изображена в другом масштабе

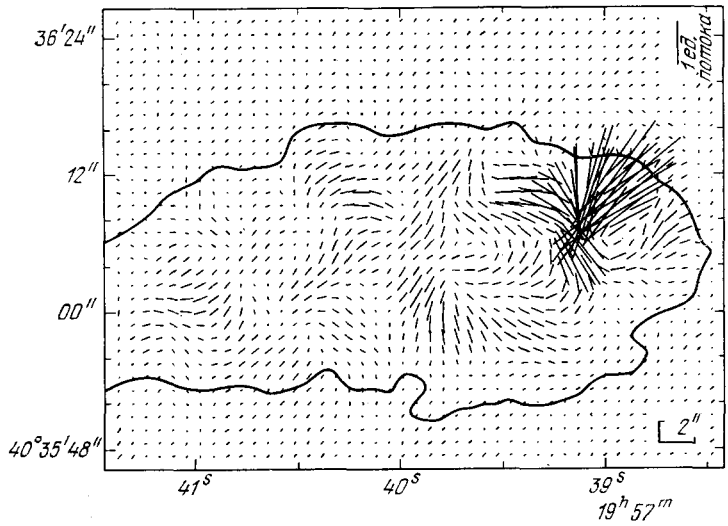

Рис. 11. Поляризация излучения от северной компоненты источника в Лебеде, свидетельствующая о турбулентности магнитного поля с характерным масштабом порядка 10^4 световых лет.

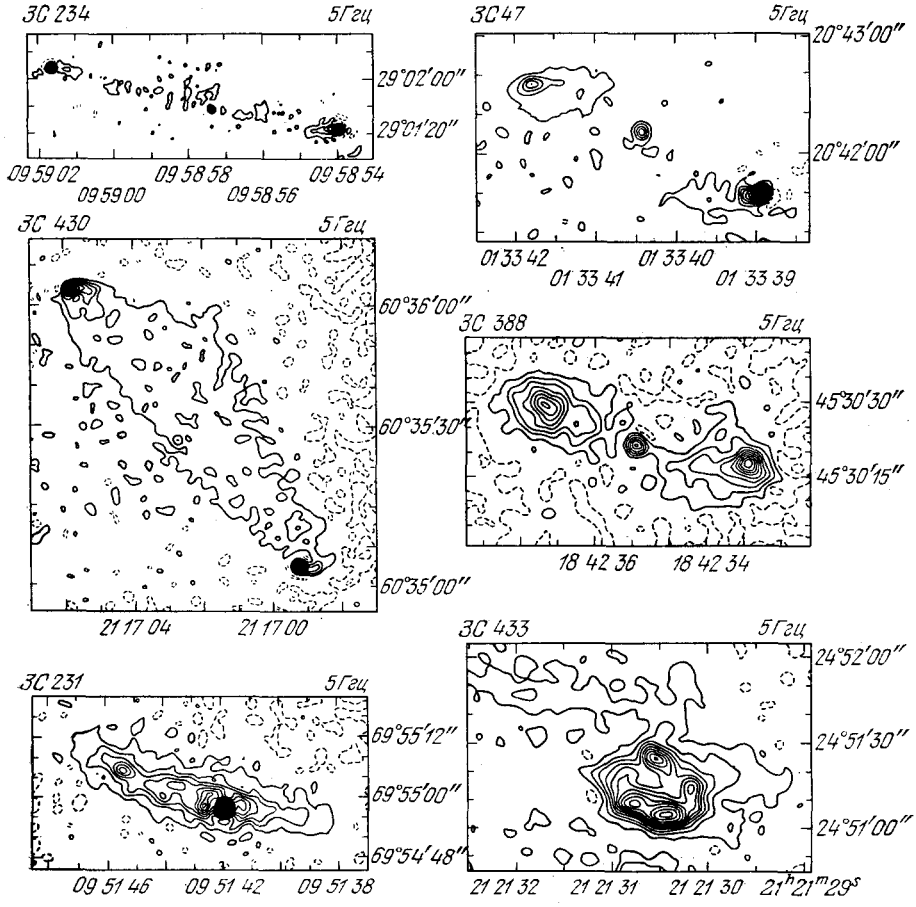

Рис. 12. Карты шести внегалактических радиоисточников.

компоненты дает информацию о магнитном поле. На рис. 12 изображены карты ряда других источников, полученные на пятикилометровом телескопе.

В большинстве случаев радиоизлучение зарождается в основном в двух огромных областях, расположенных далеко от связанных с ними галактик, хотя слабое излучение можно также детектировать от очень компактных центральных источников, совпадающих с ядром галактики. Иногда видны значительно более обширные компоненты или соединяющие их «мосты».

Изучение мелких деталей с помощью пятикилометрового телескопа уже позволяет сделать некоторые выводы. Выделение энергии происходит, вероятно, более или менее непрерывно в течение 10^7—10^8 лет в очень компактном ядре, а не является, как думали ранее, следствием одиночного взрыва. Источник этой энергии можно связать с гравитационным коллапсом большого количества звезд (см. лекцию А. Хьюиша [в этом же номере журнала на стр. 201.— *Ред.*]) или с падением вещества на значительно более массивный коллапсирующий объект в ядре галактики. Механизм переноса этой энергии к компактным «головам» главных компонент (см., например, рис. 10) пока неясен, но он может быть связан с существованием узкого пучка низкочастотных электромагнитных волн или релятивистских частиц [9,10]. Взаимодействие этого пучка с окружающей межгалактической средой может затем ускорять электроны, ответственные за радиоизлучение от компактных «голов», а их последующая диффузия в область, расположенную за «головами», может, вероятно, объяснить общую форму протяженных компонент.

Хотя много еще остается неясным, к вышеописанным заключениям пришли только после появления подробных карт. Физические процессы, протекающие в ядре, компактных головах и в длинных хвостах или мостах можно исследовать только после того, как станет понятной взаимосвязь между этими структурными компонентами.

Каковы перспективы на будущее? В 1954 г. первый телескоп с апертурным синтезом дал карты с разрешением 2,2°; сегодня мы располагаем картами с разрешением 2″ дуги. Можно ли предвидеть непрерывное улучшение радиоизображений с достижением значительно лучших разрешений, чем оптические? Технические трудности, связанные с увеличением апертуры или с уменьшением длин волн, на которых ведутся наблюдения, невероятно велики, но они тускнеют по сравнению с ограничениями, накладываемыми земной атмосферой. При оптических наблюдениях турбулентность атмосферы с масштабом порядка 10 *см* в нижних ее слоях вносит в приходящий волновой фронт неоднородности, которые обычно ограничивают разрешение величиной порядка 1″ дуги. На радиоволнах вклад этих мелкомасштабных неоднородностей несуществен, но в тропосфере имеются и крупномасштабные неоднородности показателя преломления. Два четко выраженных их типа были обнаружены в ряде наблюдений на одномильном и пятикилометровом телескопах. Ни один из них нельзя связать с вариациями плотности воздуха, и, по-видимому, оба они являются следствием неоднородности парциального давления водяных паров, которые на радиоволнах вносят существенный вклад в показатель преломления. Один из типов неоднородностей имеет характерный размер порядка 0,7 *км* и его связывают с турбулентностью в тропосфере, создаваемой нагревом Земли солнечными лучами (аналогично тому, как на чистом небе образуются кучевые облака). Эти неоднородности, однако, часто заметны и при ясной погоде без образования кучевых облаков; они возникают в дневное время и особенно велики в летние месяцы.

Второй тип неоднородностей лишь с небольшими суточными и годичными вариациями имеет много больший характерный размер — обычно

порядка 10—20 *км*, и не исключено, что существуют и большие размеры, еще не обнаруженные. Происхождение этих возмущений неизвестно, и поэтому невозможно предсказать, как они могут зависеть от географического положения.

При очень хороших условиях, длительность которых составляет примерно 1% общего времени, атмосферные неоднородности необычайно малы и соответствуют искажению приходящего волнового фронта меньше 0,2 *мм* на длине 5 *км*. При таких условиях возможна работа на длинах волн 4 *мм* или меньше, что дает карты с разрешением лучше 0,2″ дуги. Такие великолепные условия наблюдений возникают в период занимающих большую площадь зимних туманов, когда атмосфера предельно стабильна,— результат, иллюстрирующий, сколь различны требования при выборе хороших мест для постройки оптических и радиообсерваторий!

Большую часть времени атмосферные неоднородности мешают значительно сильнее, и хотя не существует еще достаточных данных о неоднородностях с характерными размерами >20 *км*, при использовании инструмента, большего 20 *км*, все равно возникнут трудности, связанные с кривизной атмосферы. Легко догадаться, что можно построить инструмент, который давал бы разрешение лучше 0,5″ дуги в течение может быть, 50% зимнего времени.

Для дальнейшего увеличения разрешения нужна новая методика, способная корректировать атмосферные эффекты. Простым, но дорогим решением проблемы была бы постройка второй чаши около каждого элемента, так чтобы наблюдения калибровочного точечного источника вблизи исследуемой площади можно было проводить одновременно для каждого расстояния между чашами. Полученные ошибки в определении фазы для этого калибровочного источника можно затем использовать для непрерывной коррекции сигналов, поступающих с исследуемой площади.

Ясно, что такую методику можно использовать и для интерферометров с базой во много тысяч километров (LVBI), создание которых стало возможным в результате усовершенствования атомных стандартов частоты. С помощью этих инструментов в некоторых источниках были обнаружены очень маленькие компоненты порядка 0,001″ дуги. В Джодрелл-Бэнк впервые использовали калибровочный источник для исключения фаз, вносимых и атмосферой и инструментом для специального случая исследования мазерной линии источников OH с $\lambda = 18$ *см*, когда различные компоненты внутри первичного пучка можно различать по их частоте. Если в этом случае одну из компонент использовать для отсчета фазы, можно найти относительные положения других [11]. Для непрерывных источников необходимы обычно опорные точки за пределами первичного пучка инструмента, и для этого в каждом месте нужны два элемента. Такой методикой для снижения фазовых вариаций, вносимых инструментом и атмосферой, пользуются в США при измерении гравитационного отклонения радиоволн, проходящих мимо Солнца [12]; одна пара элементов обозревает источник вблизи Солнца, а другая направлена на опорный источник, расположенный на расстоянии примерно 10°.

Точность поправки, а также наименьшая длина волны, на которой можно снимать карту, должна зависеть от углового расстояния между изучаемой площадью и опорным источником, который должен быть достаточно интенсивен и достаточно мал по угловому размеру. Но даже если на таком пути можно достичь необходимой фазовой стабильности, возникает практически серьезная трудность при снятии карт с разрешением порядка 0,001″ дуги в силу неизбежного слабого заполнения апертурной плоскости. Если даже на одном из полушарий Земли расположить пять

или шесть станций и, комбинируя всевозможные сочетания их сигналов, проводить измерения в течение нескольких часов, часть апертурной плоскости, которую можно заполнить, все еще будет очень мала, и поэтому поле зрения, которое можно снять однозначным образом (исключив роль вторичных сигналов), вряд ли превысит примерно 0,02″ дуги. С таким разрешением мало, по-видимому, надежды получить полные карты большинства источников. Однако безусловно существуют центральные компоненты, где такая карта может дать очень важные сведения.

Вместе с тем я думаю, что для понимания механизмов, действующих в главных компонентах радиоисточников, может оказаться полезным получение полных карт с промежуточным разрешением. Для этого необходимо совершенствовать метод апертурного синтеза, одновременно *сохраняя* хорошее заполнение апертурной плоскости.

Последние 25 лет мы были свидетелями замечательных успехов в развитии радиотелескопов, что в свою очередь привело к существенно лучшему пониманию странных источников «астрофизики высоких энергий» и природы Вселенной в целом.

Мне очень повезло, что я начал свои исследования в такое время, которое позволило мне и моим коллегам внести вклад в эти волнующие исследования.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Ryle, Proc. Roy. Soc. **A248**, 289 (1958).
2. P. A. G. Scheuer, M. Ryle, Mon. Not. RAS **113**, 3 (1953).
3. J. H. Bluthe, ibid. **117**, 644 (1957).
4. C. H. Costain, F. G. Smith, ibid. **121**, 405 (1960).
5. J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, Mem. RAS **69**, 183 (1965).
6. J. F. R. Gower, P. F. Scott, D. Wills, ibid. **71**, 49 (1967).
7. M. Ryle, A. C. Neville, Mon. Not. RAS **125**, 39 (1962).
8. C. G. Wynn-Williams, E. E. Becklin, G. Neugebauer, Astrophys. J. **187**, 473 (1974).
9. M. Rees, Nature **229**, 312 (1971).
10. P. A. G. Scheuer, Mon. Not. RAS **166**, 513 (1974).
11. A. J. Cooper, R. D. Davies, R. S. Booth, ibid. **152**, 383 (1971).
12. C. C. Counselmann, S. M. Kent, C. A. Knight, I. I. Shapiro, T. A. Clarke, H. F. Hinteregger, A. E. E. Rogers, A. R. Whitney (в печати).