1966 г. Февраль *Том 88, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

535.854+523

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ВЫСОКИМ УГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ *)

Г. Палмер

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты обзора дискретных источников радиоизлучения публикуются обычно в виде каталогов, содержащих небесные координаты и плотность потока «шумового» излучения этих источников на данной частоте. Используемые прежде для этой работы радиотелескопы конструировались для изучения возможно большего количества источников, работали на волне около 1 *м* и имели относительно низкую разрешающую способность, порядка 1° или даже ниже. Большинство же дискретных источников имеет значительно меньшие угловые размеры. Наиболее ранние измерения диаметра большинства интенсивных источников были произведены со специальными интерферометрами, в которых разнесение антенн было значительно больше размеров инструментов для обзора. Было найдено, что три наиболее интенсивных источника в Кассиопее, Тельце и Деве — примерно круговые с диаметром около 5′. Было найдено, что другой интенсивный источник в созвездии Лебедя имеет более сложную структуру, заключенную в пределах области размерами 2′ на 30″.

Исследования углового размера и структуры многих источников низкой интенсивности требует инструментов с большей эффективной площадью, способных разрешать детали часто менее 1′; размеры некоторых источников меньше даже 1″. Универсальным методом достижения такой разрешающей способности на метровых волнах является использование интерферометра, состоящего из радиотелескопов, находящихся на каждом конце «базы» длиной несколько километров. Для измерений угловых размеров источника необходим инструмент с достаточным отношением сигнала к шуму и достаточно длинной базой. Эти две проблемы обсуждаются в § 2 и 3.

По мере создания радиоинтерферометров с большей эффективной площадью и более совершенных приемников изучение угловых размеров дискретных источников развивалось в двух направлениях. Во-первых, были проведены предварительные измерения углового размера 400

---

*) H. P. Palmer (University of Manchester), High Resolution Studies in Radio Astronomy, Contemporary Physics 6 (6), 401 (1965). Перевод А. Д. Кузьмина и Р. Л. Сороченко.

В оригинале—резюме: «Описан интерференционный метод измерения угловых размеров дискретных источников радиоизлучения, резюмированы две серии измерений, вторая из которых относится примерно к 400 дискретным источникам, обсуждаются более детальные измерения структуры некоторых интенсивных источников. Большинство их отождествлено с галактиками или квазарами, видимыми на астрономических фотографиях».

наиболее ярких дискретных источников. Две серии таких наблюдений обсуждаются в § 4. Во-вторых, была исследована детальная структура многих интенсивных источников; результаты этих исследований обсуждаются в последнем разделе.

2. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Радиоинтерферометр может состоять из двух радиотелескопов, имеющих площади A_1 и A_2 и разнесенных на расстояние L. Предположим, что они направлены на одну и ту же часть небесной сферы, как показано на рис. 1 на стр. 371, и принимают излучение с плотностью потока S ватт на квадратный метр от отдаленного дискретного источника. Энергии источника, принимаемые каждой антенной, равны $SA_1\eta_1$ и $SA_2\eta_2$, где η_1 и η_2 — коэффициенты использования радиотелескопов, заключенные обычно в диапазоне от 0,6 до 0,9.

Для упрощения теоретических выкладок мы предположим сначала, что на вход приемников не поступает никаких других излучений, а излучение от источника можно представить в виде синусоидальной функции одной угловой частоты $\omega = 2\pi f$. Так как источник удален почти на бесконечное расстояние, мы предположим также, что приходящая радиоволна плоская.

Напряжения, наводимые в фидерах антенн A_1 и A_2, могут быть записаны в виде

$$u_1 = (SA_1\eta_1)^{1/2} \sin \omega t$$

и

$$u_2 = (SA_2\eta_2)^{1/2} \sin \omega (t_1 + t),$$

где t_1 — время распространения волны от N_1 до A_2. Если c — скорость света и радиоволн и θ — угол между базой и направлением на источник излучения, то $t_1 = \frac{L}{c} \cos \theta$. Дальнейшая система после задержки $t_2 = L/c$ воспроизводит эти напряжения на перемножителе M.

Напряжение на выходе перемножителя

$$v_1 v_2 = S (\eta_1 A_1 \eta_2 A_2)^{1/2} \sin \omega t \sin \omega \left(t + \frac{L}{c} \cos \theta \right) = \tag{1}$$

$$= \frac{S}{2} (\eta_1 A_1 \eta_2 A_2)^{1/2} \left[\cos \left(2\omega t + \frac{\omega L}{c} \cos \theta \right) - \cos \left(\frac{\omega L}{c} \cos \theta \right) \right]. \tag{2}$$

Каскады, следующие за перемножителем, не пропускают высокочастотную компоненту $2\omega t$, так что выходное напряжение содержит лишь член $\cos \left[\frac{\omega L}{c} \cos \theta \right]$. Так как θ изменяется при вращении Земли, выходное напряжение изменяется синусоидально, образуя интерференционные лепестки с максимумами при $\frac{\omega L}{c} \cos \theta = 2\pi$. Отсюда частота интерференционных лепестков определяется соотношением

$$F = \frac{\omega L}{2\pi c} \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{L}{\lambda} \cos \theta \frac{d\theta}{dt}, \tag{3}$$

где λ — длина волны принимаемого излучения. Величина θ может быть рассчитана по формулам сферической астрономии и представлена в координатах, связанных с базой. $d\theta/dt$ также зависит от этих координат, географической широты и скорости вращения Земли. Так, например, при базе в 1000 длин волн и широте места наблюдения 53° максимальная скорость лепестков (когда $\theta = 90°$) составляет 3 периода в минуту.

Амплитуда интерференционных лепестков пропорциональна произведению $u_1 \times u_2$, так что

$$\textit{амплитуда лепестков} \propto S\,(A_1\eta_1 A_2\eta_2)^{1/2}. \qquad (4)$$

Приведенный анализ применим также к интерферометру, на вход которого подается случайный шум в полосе частот β *Мгц* с временно́й задержкой t_1 и t_2 в одном канале, балансируемой компенсирующей задержкой t_3 в другом канале. Если разность между $(t_1 + t_2)$ и t_3 немного меньше $1/\beta$, корреляция шума в двух каналах теряется и амплитуда интерференционных лепестков сильно уменьшается. Подобное условие для оптического интерферометра сводится к тому, что «лепестки интерференции белого света» могут быть получены лишь в случае одинаковости оптических путей.

В любом реальном инструменте когерентный шумовой сигнал от источника будет разбавлен дополнительным шумом на входе каждого канала от Галактики или от Земли, а также собственным шумом приемников. Полная шумовая мощность каждого канала может быть выражена через шумовую температуру $T_ш$. После усиления и детектирования указанный шум вызовет случайное отклонение регистрирующего прибора. Средняя величина этого отклонения составляет $\sigma = T_ш(\beta\tau)^{-1/2}$, где τ — постоянная времени регистрирующего прибора. Таким образом, имеется ограничение возможности исследования слабых источников с данным инструментом; можно сказать, что источник является наблюдаемым, если амплитуда интерференционных лепестков значительно больше, чем случайное отклонение регистрирующего прибора. Ошибки, обусловленные шумом, несущественны, если мы потребуем, чтобы минимальная плотность потока радиоисточника $S_{мин}$ в шесть раз превышала среднеквадратичные шумовые отклонения. С учетом (4) указанное условие приводит к соотношению

$$S_{мин} \propto 6T_ш(\beta\tau)^{-1/2}(\eta_1 A_1 \eta_2 A_2)^{-1/2}. \qquad (5)$$

Численные значения указанных параметров для трех имеющихся интерферометров, используемых на радиоастрономической станции Джодрелл-Бэнк, и одного проектируемого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Дата	λ, *м*	A_1, *м*^{2}	A_2, *м*^{2}	$T_ш$, °К	τ, *сек*	$S_{мин} \times 10^{26}$, *вт м*$^{-2}$ *гц*$^{-1}$	Длина базы L/λ в длинах волн	Размеры источников (в секундах дуги)
1953—1956 г.	1,89	2000	36	1000	10	30	26—10 600	7200—12
1957—1963 г.	1,89	5000	100	1000	10	8	2 200—61 000	60—1
1964 г.	0,73	5000	30	150	10	3	60 000—180 000	1—0,4
1965 г.	2—0,3	5000	700	150	10	1	10 000—100 000	10—0,5

Каждый из параметров входит в степени $^1/_2$ и поэтому мало влияет на $S_{мин}$, однако после каждой модернизации инструмента $S_{мин}$ было уменьшено более чем в два раза.

Параметр $S_{мин}$ может также быть использован для оценки полного числа N источников, которые могут быть исследованы с данным инструментом. При некоторых упрощающих предположениях можно показать,

что

$$N \propto S_{\text{мин}}^{-1,5}.$$

Величины $S_{\text{мин}}$ даны в 7-й графе табл. I и показывают уменьшение $S_{\text{мин}}$ за 10 лет в 10 раз. Следовательно, N увеличилось в 30 раз от 16 в 1953 г. до более чем 400 в последних экспериментах.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Выше было принято, что излучающая область является точечным источником, т. е. его излучение приходит к интерферометру потоком параллельных лучей (см. рис. 1). Излучение с такой же плотностью потока, принимаемое из соседней точки в направлении $\theta + d\theta$, вызовет аналогичную интерференционную запись с фазой, отличной от фазы записи основного источника на

$$d\varphi = \frac{L}{\lambda} \sin\theta \, d\theta.$$

При увеличении $\frac{L}{\lambda} \sin\theta \, d\theta$ до $d\varphi \cong \pi/2$ интерференционные лепестки от двух источников взаимно погасятся. Амплитуда интерференционных лепестков при произвольном разнесении антенн, выраженная в долях амплитуды интерференционных лепестков этого же источника при малом разнесении антенн, называется амплитудой функции видимости γ. Говорят, что источник разрешен, когда разнесение антенн достаточно велико, чтобы γ уменьшилась до малой величины.

Предварительное определение угловых размеров нескольких сотен источников заключалось поэтому в измерении каждого источника при ступенчатом увеличении длины базы в 2÷3 раза до тех пор, пока интерференционные лепестки не пропадали в шумовой дорожке регистратора. При наблюдениях около меридиана, т. е. около верхней кульминации, с базой, ориентированной в направлении восток — запад, разрешающая способность в направлении базы составляет приблизительно λ/L радиан. Для базы, наклоненной к направлению восток — запад на угол A, разрешающая способность около верхней кульминации составляет $\frac{L}{\lambda} \sin A$. В более общем случае наблюдения до или после кульминации с произвольно ориентированной базой разрешающая способность определяется соотношением $\frac{\lambda}{L} \sin k$, где k — угол между направлением базы и направлением на источник.

Во время упомянутых наблюдений возникла необходимость увеличения базы за 100 *км*. Разнесение антенн на такие расстояния поставило дополнительные проблемы сохранения фазовой когерентности в системе, содержащей отдельные гетеродины на обоих концах базы, и компенсации с необходимой точностью задержки, обусловленной разностью хода по двум каналам. Необходимо также, чтобы частота следования интерференционных лепестков на регистраторе была не очень высокой

3.1. Сохранение когерентности

Сохранение когерентности в системе может быть достигнуто, если гетеродинирование на всех антеннах производится от одного общего источника или воспроизводится на антеннах без потери корреляции.

Это может быть достигнуто несколькими способами. Простейший из этих способов показан на рис. 1. Несущая частота, разумно близкая

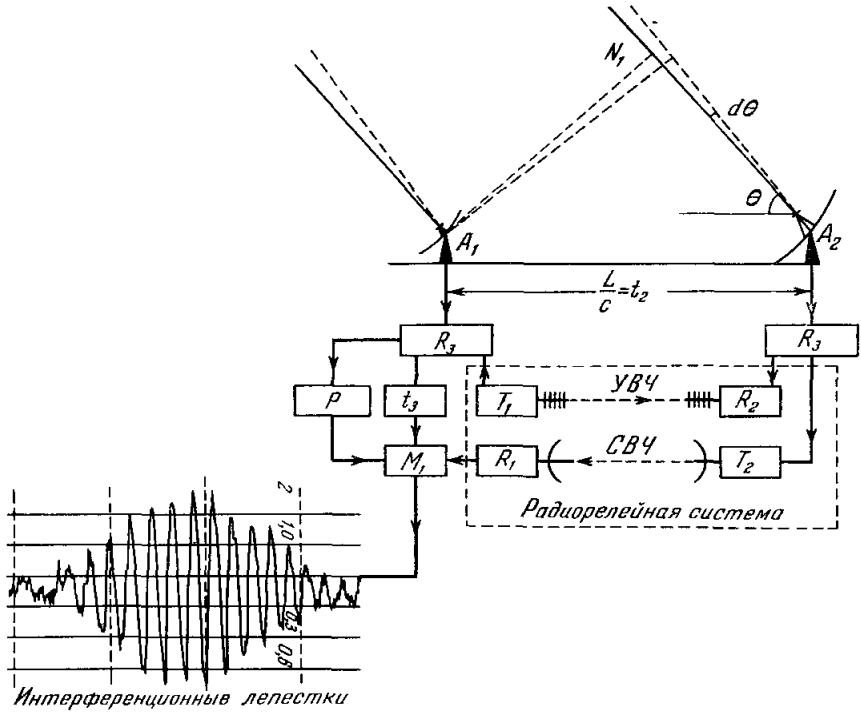

Рис. 1. *Упрощенная блок-схема радиоинтерферометра, включающая* УВЧ *и* СВЧ радиорелейные линии с элементами T_1, T_2, R_1, R_2.

Блоки R_3 являются основными радиоастрономическими приемниками; блок P является фазовращателем, контролирующим частоту следования интерференционных лепестков; блок M является перемножителем.

к частоте принимаемого излучения, передается на каждый радиотелескоп. Разностная частота сигнала с отдаленной антенны транслируется с помощью СВЧ радиорелейной линии.

3.2. Компенсация задержки

Во время всех этих наблюдений перемножитель M оставался на основной станции Джодрелл-Бэнк. Для компенсации разности хода от ближней и дальней антенн необходима дополнительная задержка t_3 (см. рис. 1). Величина этой задержки зависит от положения источника на небе, изменяясь при его движении. Для базы восток—запад длиною L при наблюдениях в кульминации ($\theta = 90°$) необходимо, чтобы $t_3 = 2/c$.

При $\theta = 0$ и $180°$ величины t_3 должны составлять 0 и $2L/c$ соответственно. Компенсирующая задержка должна плавно изменяться во всем указанном диапазоне. Для наибольшей базы, использованной в Джодрелл-Бэнк, этот диапазон составляет $0 \div 900$ *мксек*. При наблюдениях в полосе пропускания $\beta \simeq 0{,}75$ *Мгц* ошибка задержки t_3 должна быть значительно меньше 1,4 *мксек*, а ошибка величины dt_3/dt должна быть значительно меньше 0,1 *мксек/мин*.

Для коротких баз с задержкой до 17 *мксек* в Джодрелл-Бэнк использовалась спиральная линия задержки или цепочка *RLC*. Для получения больших задержек использовались акустические линии задержки, в которых радиошумы преобразуются в сверхзвуковые волны, распространяющиеся по ртутной или кварцевой линии задержки и затем опять преобразуемые в электрические сигналы.

Плавное изменение задержки от 30 до 330 *мксек* может быть достигнуто медленным перемещением отражающей пластины в ртутной линии. Большие задержки до 1 *мсек* достигаются включением нескольких кварцевых блоков.

3.3. Управление частотой следования интерференционных лепестков

Из соотношения (5) следует, что величина $S_{мин}$ может быть уменьшена использованием больших постоянных времени τ. Часто выбирается постоянная $\tau \cong 10$ *сек*, которая удобна для обычных самопишущих регистраторов. Однако такая постоянная времени уменьшает амплитуду интерференционных лепестков, период следования которых значительно меньше 2 *мин*. Для базы, ориентированной в направлении восток — запад, и источников, находящихся на небесном экваторе, период лепестков 2 *мин* соответствует разнесению антенн меньше 300 λ. Из уравнения (3) следует, что при более длинных базах частота следования лепестков пропорционально увеличивается; при наиболее длинной базе, использованной в Джодрелл-Бэнк, она составляет десять лепестков в секунду. Такие интерференционные лепестки могут быть зарегистрированы на магнитную ленту и обработаны на быстродействующей электронно-вычислительной машине. Альтернативным решением является замедление частоты следования интерференционных лепестков до величины, при которой возможно использование обычных самопишущих регистраторов. Такое замедление может быть достигнуто введением постоянного изменения фазы в один канал интерферометра относительно другого канала со скоростью ω_1 *рад/сек*. В этом случае частота следования интерференционных лепестков будет равна $f - (\omega_1/2\pi)$ и может быть сделана столь малой, как это желательно. При этом необходимо принять меры по исключению случайных инструментальных изменений фазы.

После успешного решения всех указанных проблем и измерения амплитуды интерференционных лепестков на самописце, можно точно рассчитать плотность потока радиоизлучения наблюдаемых дискретных источников. Это можно сделать непосредственно, если все параметры аппаратуры, входящие в уравнение (5), точно известны и все блоки аппаратуры работают стабильно. Однако практически шумовые температуры приемников и эффективность антенн известны еще недостаточно хорошо. Измерения параметров радиорелейной линии также сложны и поэтому практически проводятся редко. Поэтому крайне желательно производить калибровку интерферометра на каждой новой базе, повторяя ее время от времени, лучше всего ежедневно, для проверки медленных изменений параметров аппаратуры. Если из предыдущих работ уже известно, что один или несколько источников не разрешается при некоторой длине базы, то эти источники могут быть использованы в качестве опорных при наблюдениях с такой или более короткими базами. При более длинных базах использование такого метода, очевидно, исключается. В этом случае следует применять другие методы, речь о которых будет идти в § 5.

4. УГЛОВЫЕ РАЗМЕРЫ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Одно из наиболее ранних исследований угловых размеров слабых дискретных источников было проведено Хэнбери Брауном, Мориссом, Палмером и Томпсоном в течение 1953—1954 гг. [1,2]. Наблюдения проводились с помощью крупнейшей антенны — меридионального телескопа в Джодрелл-Бэнк на волне 1,89 *м* — наиболее короткой волне, где этот инструмент был еще эффективен. Телескоп представлял собой неподвижный направленный в зенит рефлектор, облучатель которого мог наклоняться в плоскости север — юг, обеспечивая наблюдения источников, проходящих в пределах 20° от зенита. В качестве второй антенны на другом конце базы была использована небольшая антенна с эффективной площадью 36 $м^2$. Основные параметры интерферометра приведены в первой строке табл. I. С помощью этой аппаратуры можно было исследовать 16 дискретных источников, включая два наиболее интенсивных в Кассиопее и Лебеде. Для выносной антенны было использовано 10 пунктов, что обеспечивало изменение интерференционной базы от 26 до 10 600 длин волн. Пункты от *A* до *D* находились на территории университетской станции в Джодрелл-Бэнк, и для передачи принимаемых сигналов от каждой антенны к месту сложения использовались коаксиальные кабели. Для других пяти пунктов, расположенных вне территории и удаленных более чем на 2 *км*, была разработана радиорелейная линия УКВ диапазона. На рис. 2 ближайшие восемь пунктов от *A* до *3* приходятся на квадрат *J* площадью 10 $км^2$, окружающий Джодрелл-Бэнк. Остальные два пункта *I* и *K*, находящиеся на расстоянии 12,5 и 20 *км* соответственно, показаны отдельно. Было обнаружено, что пять из 14 источников, изучаемых в этой серии наблюдений, оказались больше 1°, угловые размеры шести источников были заключены в пределах от 1° до 10′ и три источника оказались меньше 12″.

Результаты этих предварительных экспериментов показали, что многие источники, которые могли бы наблюдаться с помощью более чувствительных интерферометров, должны иметь угловые размеры меньше 1′. Когда в 1957 г. был построен радиотелескоп «Марк-I», измерение угловых размеров нескольких сотен дискретных источников было принято в качестве одной из первых программ для этого инструмента. Согласно уравнению (5) для решения поставленной задачи необходимо было иметь эффективную площадь выносной антенны 200 $м^2$. Такую антенну, существенно бо́льшую, чем использовалась ранее, необходимо было сделать не слишком дорогой, перемещаемой с помощью обычных транспортных средств и монтируемой небольшим числом людей, желательно без использования бетонных фундаментов. Окончательно принятой конструкцией был цилиндрический параболоид, показанный на рис. 3, *а*. Антенны этого типа первоначально были установлены в пункты *1* и *2*, находящиеся на расстоянии 4,5 и 18 *км* на запад от Джодрелл-Бэнк. Был реконструирован также интерферометр: применена радиорелейная линия СВЧ диапазона и использованы для компенсации акустические линии задержки [3].

Измерения, проведенные на этих двух базах, оказались исключительно трудными для интерпретации. По причинам, которые были непонятны в то время, результаты измерений многих источников на двух базах казались противоречивыми. В некоторых случаях интерференционные лепестки при базе 9700 λ были больше, чем при базе 2200 λ. Около 10% исследуемых источников оказались неразрешенными ни на одной из этих баз и, вероятно, были меньше 5″. Проведенные расчеты показали, что поверхностная яркость таких источников, или радиоизлучение с квадратной

секунды, также велико, как в наиболее ярком источнике Лебедь-А, который предполагается отождествленным с удаленной очень необычной галактикой. Это указывало на то, что источники минимальных угловых размеров являются исключительно интересными. Казалось весьма вероятным, что они сильно удалены и являются мощными источниками излучения. Было решено провести следующую серию наблюдений при еще бо́льших длинах баз, чтобы попытаться разрешить те 10% источников, угловые размеры которых были приняты меньше 5″. В течение 1960 г. антенны были установлены около Холуэлла во Флинтшире (пункт *3* на рис. 2), что́ давало длину базы 32 000 λ. Использовалась та же самая

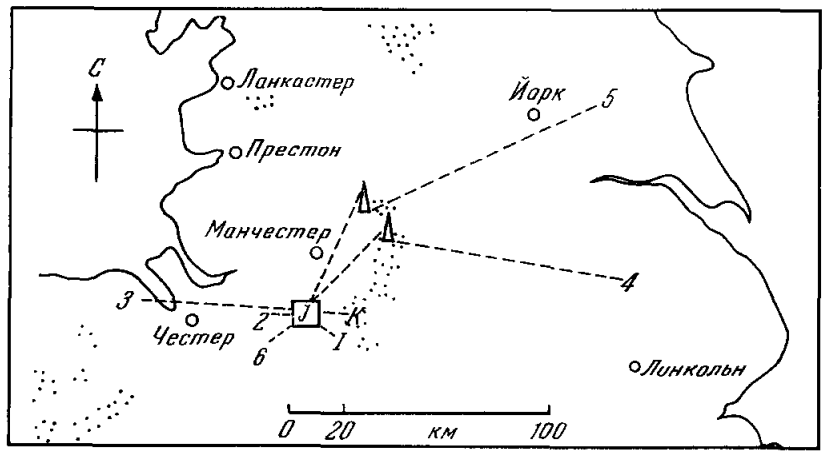

Рис. 2. Контурная карта Северной Англии, показывающая пункты расположения радиотелескопов, используемых для интерферометрических наблюдений с длинной базой.

Пункты от *A* до *3* (1-й эксперимент) и *1* (2-й эксперимент) находятся внутри 10 *км*², окружающих Джодрелл-Бэнк.

аппаратура. Наблюдения в этом месте были существенно осложнены влиянием помех, обусловленных практически открытым приемом от корабельных передатчиков с реки Мерсей, которые были ниже горизонта на предыдущих пунктах. Несколько раз антенна, стоящая на вершине открытого холма, была повреждена сильным ветром, но наблюдения, которые оказалось возможным провести, показали, что по крайней мере 5% первоначально исследуемых источников оставались еще не разрешенными ($\gamma > 0{,}5$)[4].

В 1961 г. антенны были установлены в Линкольне в 115 *км* восточнее Джодрелл-Бэнк (рис. 2, *4*). Так как и УКВ, и СВЧ релейные линии требуют для своей работы прямой видимости, что может быть на расстоянии, не превышающем 80 *км*, было необходимо использовать ретрансляционные системы. Было найдено, что прямое распространение может быть обеспечено при использовании ретрансляционной станции на вершине Пенин. По любезному разрешению Британской радиовещательной компании была использована аппаратура, работающая для телевизионной станции в Холм-Мосс. Наблюдения в этом месте оказались более удачными, помех от наземных передатчиков было очень мало. Были проведены наблюдения 187 источников, отобранных из ранее наблюдавшихся 305 источников, которые на базе 9700 λ давали наиболее отчетливую интерференционную картину. Фактически интерференция была видна только у 21 источника, и только семь источников остались неразрешенными.

Таким образом, не была получена информация об угловых размерах других источников, но можно было сказать, что угловые размеры неразрешенных источников меньше 0″,8.

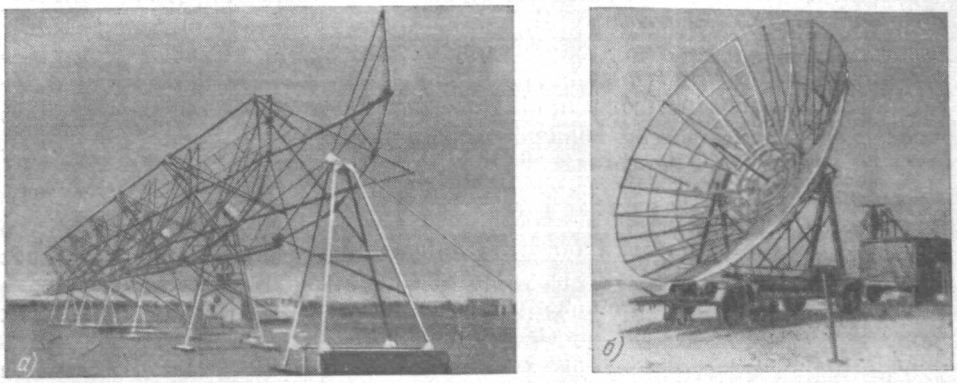

Рис. 3. Примеры радиотелескопов, используемых на выносных пунктах при наблюдениях с длинной базой.

Всего на одной или нескольких из четырех баз было изучено 384 дискретных источника. По-видимому, многие из источников имеют сложную

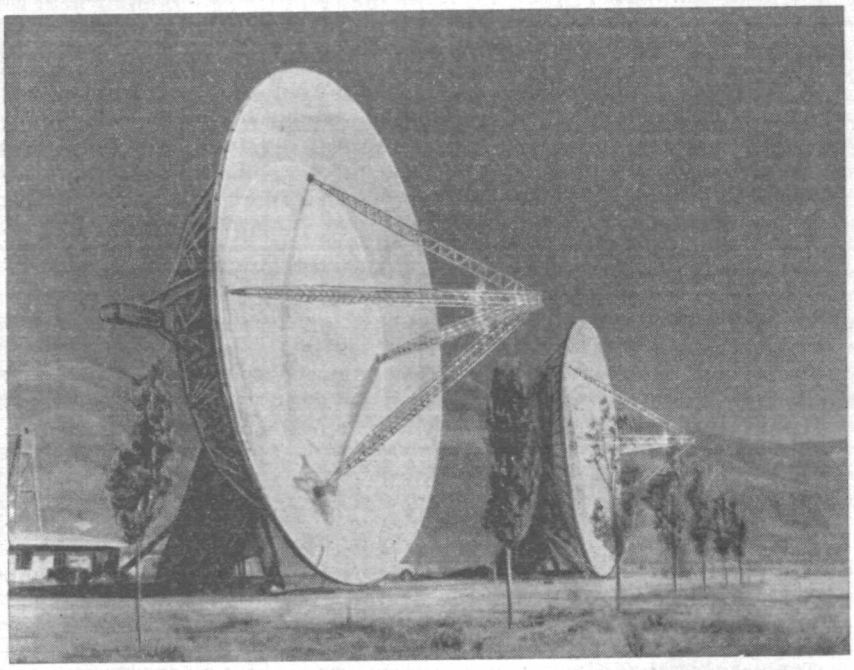

Рис. 4. Два 27-метровых радиотелескопа-интерферометра станции Оуэнс-Вэллей (Калифорния).

структуру и, возможно, являются двойными. Угловые размеры излучающих областей изменяются от 1″ для нескольких процентов источников до 30″ для большинства источников.

Примерно 30% источников имеют угловые размеры более 1′ [5, 6].

5. ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРЫ ИСТОЧНИКОВ

Весьма универсальный интерферометр для исследования структуры дискретных источников был сооружен в 1957—1958 гг. Калифорнийским технологическим институтом в долине Оуэнс-Вэллей, Сьерра Невада, севернее Лос-Анжелоса (рис. 4). Интерферометр состоит из двух телескопов с параболическими антеннами диаметром 27 *м*. Обе антенны установлены на рельсовый путь и могут передвигаться на расстояние до 600 *м* *) в направлении север — юг или восток — запад. Первая программа наблюдений была проведена на волне 30 *см*, так что длина базы в длинах волн могла изменяться в пределах 55—1577 λ.

Бóльшая часть наблюдений была проведена в кульминации. Однако наблюдения некоторых источников были выполнены также за несколько часов до или за несколько часов после кульминации с уменьшенной разрешающей способностью из-за укорочения базы. Были получены амплитуды функции видимости каждого источника по крайней мере для двух ориентаций базы и нескольких длин баз (Молтби и Маффет, 1962). На рис. 5 построены такие функции видимости для трех из этих источников, исследовавшихся в Калифорнии. На этом рисунке показаны также результаты измерения функции видимости в Джодрелл-Бэнк, проведенные с базами 2200 λ и 9700 λ, ориентированными в направлении восток — запад. Говорят, что источник неразрешен, если величина γ большая и постоянная, как это показано пунктирной линией на рис. 5 **). Функции видимости с резко выраженными минимумами (см., например, рис. 5, *б* и *в* для источников 3C 278 и 3C 33) характеризуют наличие в источнике двух излучающих областей, как это показано на фотографии рис. 5 ***). Функция видимости дает информацию о размерах каждой из упомянутых областей ****). Так, излучающие области источника 3C 278 имеют, вероятно, угловой размер около 1′ и примерно однородную радиояркость, так как интерференция при больших базах отсутствует. Однако для источника 3C 33 величина γ при базах 2200 λ и 9700 λ равна 0,3. Это свидетельствует о том, что 30% излучения исходит из одной или нескольких областей с угловыми размерами меньше 12″. Вероятно, эта область находится внутри одной, но неизвестно какой из больших радиоизлучающих областей.

На фотографиях (рис. 5) показаны области размером 5′ × 5′ около радиоисточника; на каждой из этих фотографий радиоисточник можно отождествить с какой-либо галактикой. Ближайшей является эллиптическая галактика NGC 4261, показанная на рис. 5, *б*. Она находится в созвездии Девы на расстоянии 34 миллионов световых лет. Видимая область имеет около 12 000 световых лет в поперечнике и содержит $10^{10} \div 10^{11}$ относительно старых и красных звезд. Этот размер соизмерим с ядрами гигантских спиральных галактик, таких, например, как M 31. Возможно, что NGC 4261 является конечным этапом эволюции гигантских спиралей после $10^9 \div 10^{11}$ лет. Две радиоизлучающие области лежат вне оптической галактики по обе стороны от нее.

---

*) Автор допускает неточность. На станции Оуэнс-Вэллей длина рельсовых путей составляет 480 *м* в направлении север—юг и 540 *м* в направлении восток — запад. (*Прим. перев.*)

**) Если источник неразрешен, $\gamma = 1$. (*Прим. перев.*)

***) Утверждение автора о том, что двойные источники характеризуются наличием резкого минимума функции видимости, неточно. Функция видимости равнояркого диска, являющегося заведомо не двойным источником, также имеет резкий минимум. Характерным признаком двойных источников является наличие в функции видимости этих источников больших вторичных максимумов. (*Прим. перев.*).

****) Из функции видимости можно также определить расстояние между излучающими областями и их взаимную ориентацию. (*Прим. перев.*)

В настоящее время отождествлено около 30 галактик, имеющих аналогичные двойные радиоисточники. Пока неизвестно, ни как образуются эти двойные источники, ни почему некоторые галактики излучают столь

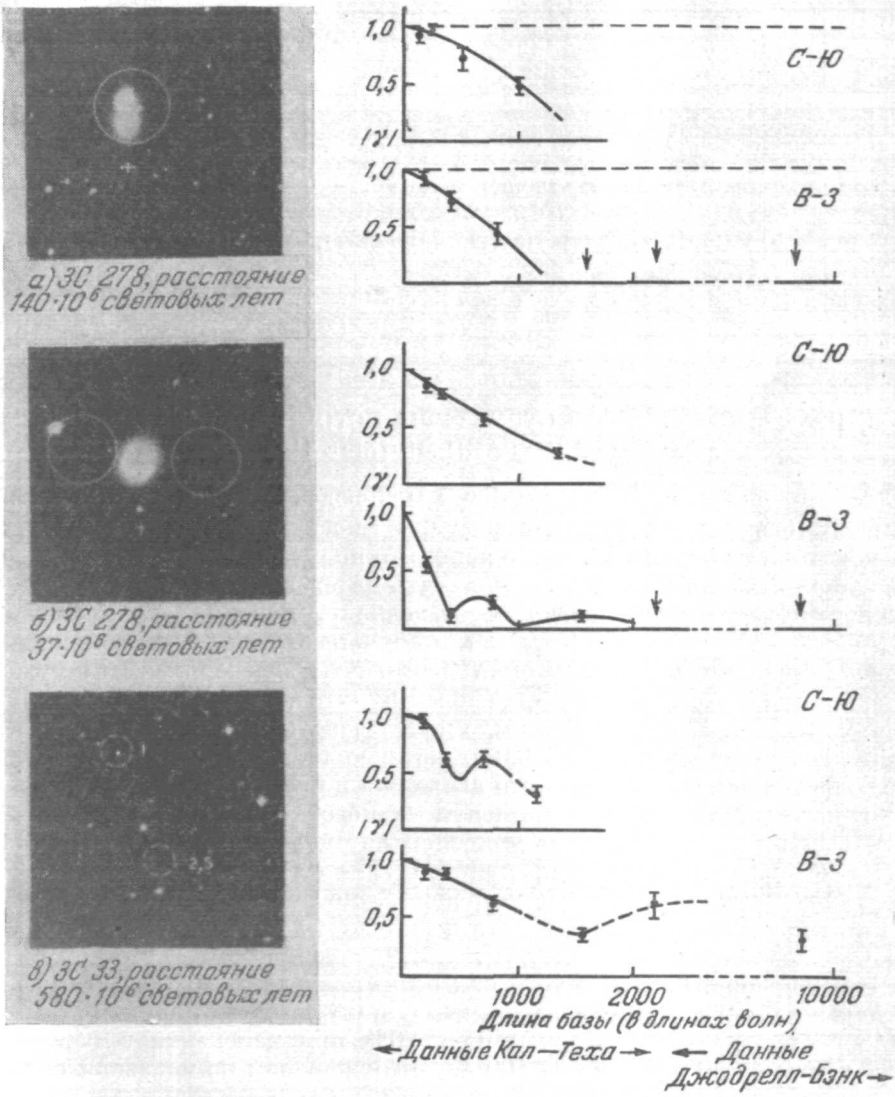

Рис. 5. Графики амплитуды функции видимости $|\gamma|$ в зависимости от длины базы для трех дискретных источников, отождествленных с видимыми объектами.

На каждой фотографии показана квадратная область неба со стороной в 300″, содержащая галактику, отождествляемую с источником радиоизлучения. Окружностями на рисунке показаны возможные радиоизлучения области. Крестиком показаны ошибки измерения положения радиоисточников.

огромную ($10^{40} \div 10^{45}$ *эрг/сек*) энергию в радиодиапазоне, в то время как излучение большинства других галактик меньше 10^{39} *эрг/сек*. Однако рассмотрение этой проблемы выходит за рамки настоящей статьи.

Для интерпретации результатов наблюдений обычно рассматривают несколько физически разумных моделей строения источника и сравнивают их расчетные функции видимости, полученные фурье-преобразова-

нием, с измеренными функциями видимости. Принимается модель, дающая лучшее согласие с экспериментом. Это — единственное, что может быть сделано при больших ошибках измерения или малочисленности экспериментальных данных. Поэтому в этом случае тонкая структура источника не может быть выявлена. Однако если, кроме того, измерить фазу функции видимости, произведя такие измерения с различными ориентациями базы, то, в принципе, возможно обратным фурье-преобразованием получить из наблюдений полную картину распределения радиояркости. Однако и в этом случае большие ошибки в измерении амплитуды и фазы могут привести к осциллирующему решению.

Измерения в Оуэнс-Вэллей показали, что две трети разрешенных источников являются двойными. В большинстве случаев обе компоненты примерно одинаковы по размерам и излучению, хотя в некоторых случаях отношение интенсивностей двух компонент достигает 1 : 4. Более половины источников в этом исследовании не было разрешено, что показало необходимость аналогичных измерений с большей разрешающей способностью *).

6. ИЗУЧЕНИЕ УГЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ИСТОЧНИКОВ С УГЛОВЫМИ РАЗМЕРАМИ МЕНЬШЕ 1′

Проведенные в Джодрелл-Бэнк наблюдения в кульминации при длинных базах показали, что размеры многих источников меньше 1′, а в некоторых случаях 1″. Было ясно, что полученные результаты можно будет существенно улучшить и получить интересные данные о структуре отдельных источников. Это требует, однако, максимально возможных изменений эффективной длины и позиционного угла базы. В принципе, такие изменения могли бы быть достигнуты перемещением выносной антенны по большому числу удаленных пунктов, но этот процесс был бы очень длителен. Более удобно было использовать изменение эффективной длины и позиционного угла базы, которое происходит, если источник наблюдается непрерывно при его движении по небу.

Предварительные эксперименты такого рода были проведены в 1961 г. при расположении выносной антенны в пункте *4* (61 100 λ). Использовавшаяся ранее для пунктов *A* — *K* выносная антенна была смонтирована на поворотном устройстве, которое могло устанавливать ее на любой азимут и перемещать в широком диапазоне по углу места.

Среднее значение амплитуды лепестков, наблюдаемых у 3C 48 и 295, показано на рис. 6. После того как были проделаны все известные коррекции на аппаратуру, оказалось, что амплитуда лепестков от источника 3C 48 не изменяется более чем на ±20% при изменении эффективной длины базы от 30 000 λ до 61 100 λ. Эти измерения не показали окончательно, что 3C 48 остался неразрешенным, но такая интерпретация казалась наиболее вероятной, и она была принята в качестве приближения для калибровки при наблюдениях остальных источников, особенно наблюдений исключительно интересного источника 3C 295. Этот источник находится около Северного полюса и при своем суточном движении в большей степени изменяет свой позиционный угол относительно базы, чем эффективную длину базы. Этот источник можно было наблюдать 12 часов каждый день, и, как это видно из рис. 6, его функция видимости содер-

*) В последующие годы на станции Оуэнс-Вэллей были проведены аналогичные измерения на волнах 20 и 10 *см* с базами до 6500 λ. В настоящее время (1965 г.) готовятся наблюдения на волне около 3 *см* и с базой до 20 000 λ. В 1966 г. ожидается включение в интерферометр нового 40-метрового радиотелескопа и увеличение базы в направлении восток — запад до 1000 *м* (30 000 λ на волне 3 *см*). (*Прим. перев.*)

жит два хорошо различимых минимума. Простейшая модель, которая объясняет эти и предыдущие наблюдения, представляет источник в виде двух несколько вытянутых компонент, отстоящих друг от друга на 4″, как это видно из рисунка.

Небольшая эффективная площадь используемого телескопа снижала чувствительность интерферометра. Применяя методику прохождения, на этой базе можно было изучить только шесть источников.

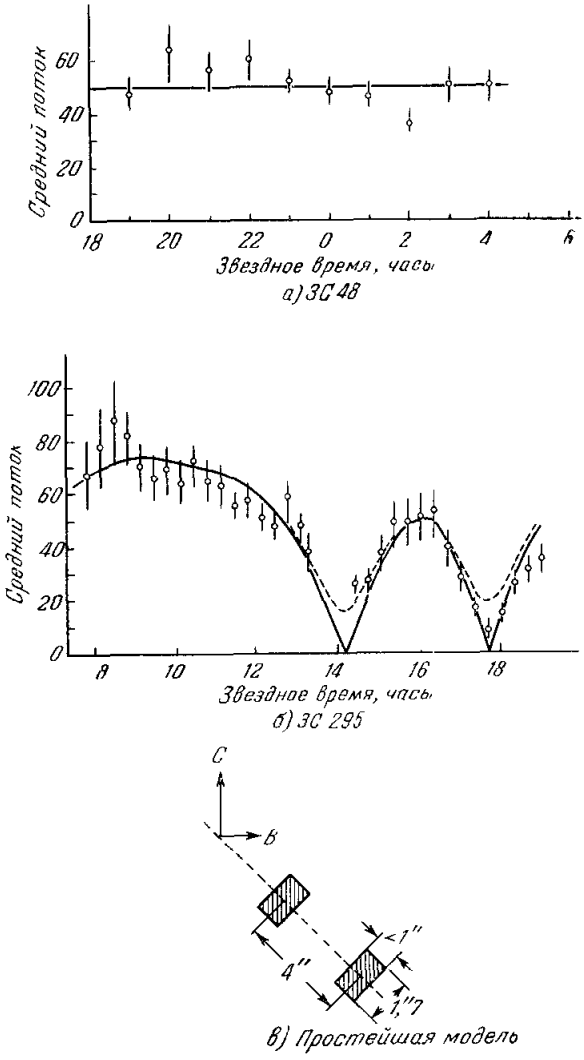

Рис. 6. Кривые видимости амплитуды в зависимости от звездного времени для источников 3С 48 и 295 по наблюдениям на интерферометре с полноповоротными антеннами и расстояниями между ними в 61 100 λ.

7. ДИСКРЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ МАЛЫХ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ, ОТОЖДЕСТВЛЯЕМЫЕ С КВАЗИЗВЕЗДАМИ

До 1961 г. все оптические объекты, отождествленные с радиоисточниками, были диффузными. Многие из них, относящиеся к внешним галактикам, были подобны или слабее галактик, показанных на рис. 5, видимая величина которых заключена в пределах от + 12 до + 16. (Увеличение на одну астрономическую величину соответствует уменьшению оптического потока, достигающего Земли, в 2,5 раза и, следовательно, увеличению расстояния для подобных объектов в $2{,}5^{1/2} = 1{,}58$ раза.) Пока положения радиоисточников оставались известными с точностью ±1′ или худшей, представлялось возможным проводить отождествление только с галактиками, так как было маловероятным, чтобы в соответствующей «площади ошибки» в одну или более угловой минуты галактика находилась случайно. Вместе с тем звезды сравнимой яркости встречаются по крайней мере в 20 раз чаще, и неправильное отождествление с ними было более вероятным.

В то время к отождествлению со звездами никто серьезно не относился, ожидая, что для всех сильных радиоисточников, лежащих в прозрачной, удаленной от галактической плоскости области, будет сделано отождествление с галактиками. Но фактически, по крайней мере

для 15 из 50, сильнейших источников таких галактик не было найдено, хотя они должны были быть легко видны на Маунт-Паломарском телескопе. Обращает внимание, что многие из этих 15 источников имели очень маленькие радиоразмеры. В течение 1960 и 1961 гг. положения нескольких из этих источников были уточнены на интерферометре в Оуэнс-Вэллей при среднеквадратичной ошибке измерений, уменьшенной до $\pm 2''$. В трех случаях в соответствующей «площади ошибок» находилось только по одному объекту, похожему на звезду 15—17 величины [8, 9]. Было найдено, однако, что эти объекты излучают значительно больше ультрафиолетового света, чем нормальные звезды, и имеют необычные оптические спектры. Казалось, что сделаны новые отождествления, но вначале было поставлено больше проблем, чем понято.

В ноябре 1962 г. доктор Хазард, профессор Болтон и их помощники [10] измерили положение дискретного источника 3С 273 с помощью нового метода, который доктор Хазард разработал в Джодрелл-Бэнк. С помощью 64-метрового австралийского радиотелескопа в Парксе, снабженного приемниками на 4-х частотах, измерялось точное время покрытия и открытия Луной радиоисточника, что давало возможность определить его положение со среднеквадратичной ошибкой, меньшей чем $\pm 0'',2$. В результате измерений было показано, что источник 3С 273 состоит из двух излучающих областей с размерами каждая меньше $1''$ и расстоянием между ними $19'',5$. При этом одна из областей точно совпадала со «звездой» +12-й величины, т. е. такой же яркой, как галактика на рис. 5, *б*, а другая казалась относящейся к слабосветящимся клочкам газа.

Было найдено, что этот четвертый звездный объект также дает избыток ультрафиолетового излучения и имеет оптический спектр, который нельзя было интерпретировать. Однако позиционное соответствие было таким хорошим и объект так сравнительно ярок, что загадка становилась реальностью. Доктор Шмидт, сфотографировавший спектр этой звезды, обнаружил, что если сделать коррекцию на красное смещение $d\lambda/\lambda = 0{,}158$, можно отождествить шесть из девяти наблюдаемых линий. Повторные исследования других трех объектов показали, что спектр одного из них мог быть также расшифрован при очень большой коррекции на красное смещение, равной 0,367. Было рассмотрено несколько объяснений такого большого красного смещения, но все они приводили к серьезным теоретическим трудностям. Кажется наиболее вероятным, что красное смещение связано с общим расширением вселенной. В этом случае соответствующие расстояния до этих объектов должны равняться 1500—6000 млн. световых лет. Если это правильно, то эти объекты не являются звездными, так как они находятся далеко за Млечным Путем и должны излучать примерно в 100 раз больше света, чем самые яркие галактики. Чтобы излучать столько энергии, такие источники должны быть очень массивными с массой, равной, возможно, миллиону солнечных масс. Кроме того, их световой выход изменяется нерегулярно от года к году, что было открыто независимо профессором Смитом [11] и доктором Сэндейджем [12], которые тщательно изучили астрономические пластинки, просмотрев их в одном случае за 70 лет.

Теоретические проблемы [13, 14], связанные с этими объектами, касаются очень высоких и переменных потоков светового излучения необычного радиоспектра, а также угловых размеров. Эти необычные оптические объекты были названы квазарами — мнемоническое сокращение от «квазизвездные объекты, отождествленные с дискретными радиоисточниками».

Объект, похожий на звезду 17-й величины, который показан в центре рис. 7,— один из трех квазаров, обнаруженных первыми. Возможно,

что это самый удаленный из них. В его спектре была найдена всего одна линия излучения. Доктор Шкловский предложил отождествление для этой линии, которое предполагает красное смещение 0,86. Однако такое отождествление не является однозначным, и поэтому в этом результате имеются еще большие сомнения.

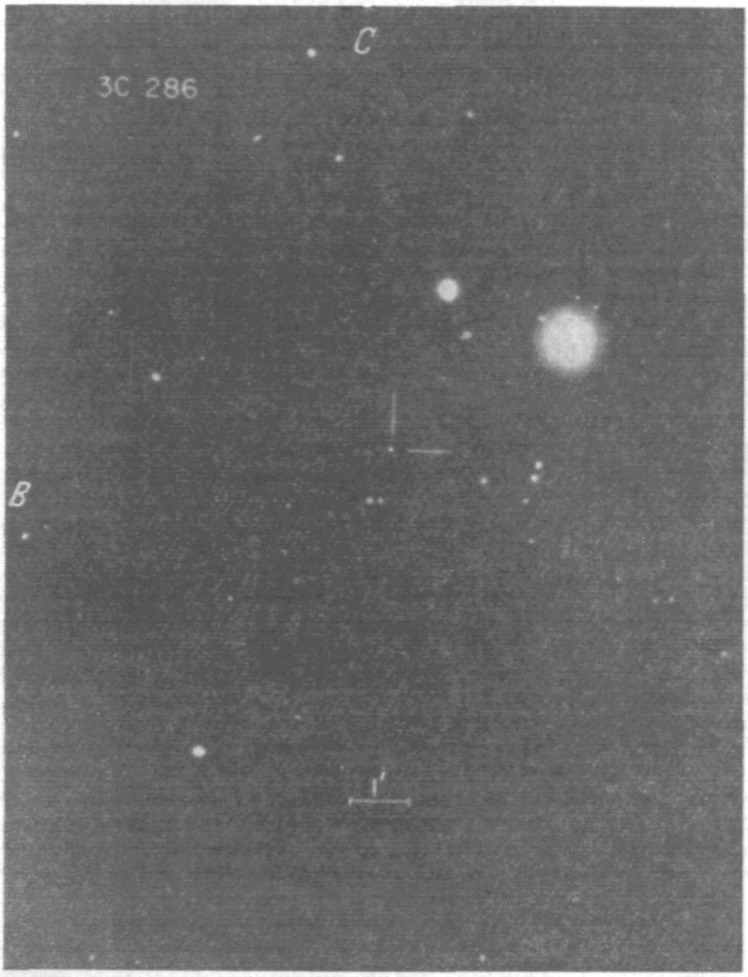

Рис. 7. Яркий объект на пересечении контрольных линий — квазизвездный радиоисточник 3C 286.

Было найдено, что два других квазара имеют красное смещение 0,425 и 0,545. До сих пор было сообщено еще о тридцати одном квазаре, большинство из которых выявлено доктором Сэндейджем [15]. Однако для них еще нет спектров или они не могут быть расшифрованы, так что расстояния до этих объектов пока неизвестны *). Большие красные смещения, а также обнаруженные высокие уровни излучаемой мощности

*) Статья, подготовленная в июне 1965 г., описывает последние работы Шмидта и Сэндейджа, сообщающих об измерениях еще бо́льших красных смещений и о многих звездообразных галактиках, из которых не все дают радиоизлучение.

указывают на то, что такие объекты можно было бы наблюдать при еще бóльших расстояниях. Так как, однако, их уже известные свойства меняются в широких пределах, пока не ясно, какой вклад сделают эти исследования непосредственно в космологию, хотя полученные данные являются весьма обнадеживающими.

8. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В связи с теоретическим интересом к очень маленьким источникам было целесообразно провести измерение радиоразмеров с еще более высокой разрешающей способностью, улучшив ее по возможности в два или более раз. Более высокая разрешающая способность могла быть получена при еще большем удалении выносной антенны и использованием 3, 4 или 5 звеньев радиорелейной линии, учитывая условия пересеченной местности. С другой стороны, перейдя на более короткие волны, можно было увеличить разрешение, используя те же самые линии связи и те же расстояния между антеннами. Правда, на более коротких волнах дискретные источники менее интенсивны, но расчеты показывают, что при использовании параметрических усилителей с их более низкими шумовыми температурами отношение сигнала к шуму должно получиться сравнимым, даже если будет использована несколько меньшая антенна на выносном пункте (табл. I, строка 3).

Показанный на рис. 3, *б* телескоп диаметром 7,5 *м* был сооружен для этих наблюдений и установлен в Йоркшире (пункт *5* на рис. 2) [16]. Этот телескоп мог быть направлен на любой участок неба выше 14° над горизонтом. Управление телескопом производилось дистанционно из Джодрелл-Бэнк. В это время телевизионная камера на выносном пункте позволяла операторам видеть положение индикаторных шкал.

В процессе наблюдения источника, продолжавшемся обычно несколько часов, небольшая аналоговая машина на выносном пункте управляла телескопом шагами по 1° через каждые 5—15 минут, обеспечивая с достаточной точностью сопровождение источника по небу. Эта относительно сложная система в первое время не работала надежно. Вначале достаточно серьезные (прерывающие наблюдения) неисправности случались в среднем каждый 3-й день. Весной и летом были улучшены надежность и свойства отдельных подсистем, так что в сентябре — октябре 1964 г. удалось провести шестинедельный период работы без неприятностей. В течение этого периода удалось установить, что три источника из числа ранее неразрешенных оказались разрешены на этой базе при различных направлениях наблюдений. Однако для четырех других источников амплитуда лепестков оставалась практически постоянной в течение всего времени, пока эти источники были выше 14° над горизонтом. Так как наблюдаемые амплитуды лепестков были в пределах величин плотности потока указанных в каталоге источников, было сделано заключение, что эти источники остались, вероятно, неразрешенными и их угловые размеры меньше 0″,4.

Одним из таких источников является приведенный на рис. 7 квазар, и, по крайней мере, еще два были отождествлены с аналогичными звездоподобными объектами; 9 других исследуемых источников имели лепестковую картину на этой базе, и у остальных 16 лепестки были неразличимы.

Детальный анализ приведенных измерений продолжается, и интерпретация полученных результатов пока еще не перешла от определения угловых размеров к выяснению угловой структуры источников.

9. ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА ПО ИНТЕРФЕРОМЕТРАМ С ДЛИННОЙ БАЗОЙ

Большинство результатов, полученных по угловым размерам источников радиоизлучения, сведены в табл. II. Они основаны на наблюдениях в кульминации в Джодрелл-Бэнк с базой, ориентированной примерно по линии запад — восток, а также аналогичных наблюдениях,

Таблица II

Сводные данные интерферометрических наблюдений дискретных источников на шести базах в 195—180 000 длин волн

	Калифорния		Джодрелл-Бэнк			
	$\lambda=0{,}30$ м		$\lambda=1{,}89$ м			$\lambda=0{,}73$ м
Длина базы	195 λ	1557 λ	2200 λ	9700 λ	61 100 λ	180 000 λ
Общее число наблюдаемых источников . .	105	109	274	305	187	36
Неразрешено ($\gamma \geqslant 0{,}8$)	76%, $\delta\theta < 60''$	40%, $\delta\theta < 32''$	34%, $\delta\theta < 25''$	13%, $\delta\theta < 5''$	< 4%, $\delta\theta < 0'',8$	< 1%, $\delta\theta < 0'',4$
Частично разрешено	20%	58%	41%	41%	< 8%	< 4%
Лепестки не наблюдались	0%	2%	25%	46%	> 88%	> 95%

проведенных в Калифорнии с более короткой базой, также ориентированной в направлении запад — восток. В табл. II приведены длины баз в длинах волн и общее число наблюдаемых источников для каждой базы. Эти источники разделены на три класса: неразрешенные (лепестки видны, $\gamma \geqslant 0{,}8$), частично разрешенные (лепестки видны, но $\gamma < 0{,}8$) и источники, для которых лепестки не наблюдались. Для неразрешенных источников в табл. II приведен соответствующий верхний предел угловых размеров излучающей области $\delta\theta$. Этот предел вычислен для данной длины базы в предположении, что каждый источник является простым, круглым и имеет гауссовское распределение яркости. На самой длинной базе были проведены наблюдения лишь небольшого числа источников, что частично обусловлено трудностями наблюдений и частично тем, что время наблюдений использовалось для определения структуры источников Были выбраны те источники, для которых ожидалось получение лепестков. Это принято во внимание при определении процента неразрешенных источников, и приведенные в двух последних столбцах величины выражают, таким образом, предельные значения. Они также наименее уверенные, так как анализ результатов по самой длинной базе еще не закончен. Числа в табл. II показывают, что примерно половина источников больше 2′. Эти результаты сильно отягощены калифорнийскими измерениями примерно 100 наиболее интенсивных источников, которые включают несколько галактических объектов с размерами во много угловых минут. Если исключить источники, располагающиеся около плоскости галактики, то почти все оставшиеся являются, по-видимому, внегалактическими и их средние угловые размеры составляют примерно 30″.

Источники, имеющие угловые размеры меньше 5″, приобрели недавно особый интерес, так как только один из них был отождествлен с внешней галактикой и примерно $^1/_3$ их была отождествлена с квазарами Одной из очевидных целей дальнейшей работы является увеличение разрешающей способности интерферометров до величины, достаточной

для определения угловых размеров источников, которые до сих пор невозможно было измерить, так как они меньше 0″,4. Не имеется строгих доказательств, как сильно надо увеличивать разрешающую способность, хотя некоторые теоретические пределы установлены астрофизиками Слышем [17] и Уильямсом [18]. Работая независимо в Москве и Кембридже, они изучали радиоспектры очень малых источников. После рассмотрения вероятного максимального уровня поверхностной яркости этих источников они пришли к выводу, что размеры двух источников, по всей вероятности, не должны быть меньше 0″,01. Но даже при этом необходимо увеличить разрешающую способность больше чем в 10 раз по сравнению с тем, что уже было достигнуто. По-видимому, можно получить коэффициент 3 или, возможно, 6, наблюдая на еще более коротких волнах и используя базы и системы связи, аналогичные тем, которые были разработаны для ранних наблюдений. Возможно, будет необходимо разработать и новую технику, если потребуется еще дальнейшее увеличение разрешающей способности. По измерениям интерферометрическим методом до сих пор выявлено только 40 источников, угловые размеры которых меньше 5″, и 10 источников с размерами в 1″. Более 10 других источников, имеющих компоненты менее 1″, были открыты доктором Хевишем и его коллегами в Кембридже [19] во время наблюдений мерцаний, обусловленных нерегулярностью в межпланетной среде *). Таким образом, дальнейшей целью является увеличение числа наблюдаемых очень малых источников, чтобы помочь поискам квазаров и получить большее количество данных для статистической обработки. Для этого необходимо использовать еще более слабые источники, так как об очень малых источниках среди первых 400 известно все или почти все. Значительно меньше сведений имеется об угловой структуре источников. Большинство из того, что известно, приведено в табл. III, где указано число источников, наблюдаемых по крайней мере при двух существенно различных направлениях базы. Это дает достаточно сведений для классификации источников в качестве простых или двойных. Некоторые исследованные источники имеют угловые размеры, различающиеся в различных направлениях, как 100 : 1. Настоящие данные позволяют сделать только грубейшую классификацию, как это и дано в табл. III.

Таблица III

Измерения структуры источников

Пределы используемых баз	27 – 1557 λ	30 000 – 60 000 λ	70 000–180 000 λ
Двойные источники	35	4	Анализ еще не проведен; имеются некоторые измерения структуры 11 источников
Одиночные источники (ядро и гало или простые)	10	2	

*) В Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР В. В. Виткевичем и др. методом мерцаний в межпланетной плазме также обнаружен целый ряд источников с угловыми размерами менее 1″. Этот метод увеличения разрешающей способности радиоастрономических исследований может быть использован для измерения *источников с очень малыми угловыми размерами.* (*Прим. перев.*)

Для изучения детальной структуры, измерений угловых размеров, а в дальнейшем и для определения угловой структуры более слабых источников необходимо улучшить отношение сигнала к шуму по крайней мере в четыре раза. Это может быть достигнуто только изменением какого-либо параметра, входящего в уравнение (5).

Наиболее подходящим для этой цели является диаметр выносного телескопа. Такое рассмотрение привело к разработке в Джодрелл-Бэнк радиотелескопа «Марк-III»— полностью подвижного рефлектора 26 × × 38 $м^2$, который будет использован совместно с «Марк-I» в качестве интерферометра с длинной базой. Ожидаемые количественные параметры даны в строке 4 табл. 1. Они показывают, что отношение сигнала к шуму должно быть по крайней мере в четыре раза лучше, чем в предыдущих экспериментах, что́ должно дать возможность исследовать по крайней мере в восемь раз большее количество источников. Телескоп «Марк-III» сооружается в пункте *6*, находящемся в 24 *км* юго-западнее от Джодрелл-Бэнк; ожидается его использование на нескольких длинах волн между 2 *м* и 21 *см*.

С учетом эффекта сокращения длины базы предполагается провести наблюдения многих источников в почти непрерывном диапазоне эффективных длин баз от 10 000 до 100 000 λ. Этот телескоп разрабатывается как транспортабельный инструмент таким образом, чтобы в нужное время он мог быть демонтирован и восстановлен во втором и, возможно, в 3-м пункте. С результатами, полученными только с одного пункта, нельзя во всех случаях достаточно легко выяснить, является ли функция видимости следствием изменения эффективной длины базы или эффективного позиционного угла. Однако комбинацией результатов, полученных с двух или трех пунктов, возможно полное разделение этих эффектов. Полная подвижность системы даст определенную информацию на каждой используемой частоте об угловой структуре тех источников, которые частично разрешены, и сделает более аккуратной калибровку каждого интерферометра.

Намеченные будущие программы являются многообещающими, они могут дать ответы на три очень интересных вопроса. Первым является наблюдательная проблема — нахождение максимальной разрешающей способности, которая может быть получена на радиоволнах. Определяется ли она инструментальными пределами, как это было в сравнимом оптическом инструменте Майкельсона, или мы ограничены природой: возможно, нет источников, меньших чем, например, 0″,1? Обращаясь к астрофизическим проблемам, можно поставить следующий вопрос: имеются ли среди слабых исследованных источников объекты с угловыми размерами меньше теоретически предсказанных? В частности, каковы угловые размеры неисследованного множества источников, имеющих интенсивность только в несколько единиц по потоку? Многие из этих источников могут быть очень далекими, так что можно поставить следующий вопрос: повлияют ли эти измерения на решение космологических проблем и на определение крупномасштабной структуры вселенной?

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. Hanbury Brown, H. P. Palmer, A. R. Tompson, Nature **173**, 945 (1954).
2. D. Morris, H. P. Palmer, A. R. Tompson, Observatory **2**, 103 (1957).
3. O. Elgaroy, D. Morris, B. Rowson, Month. Not. Roy. Astron. Soc. **124**, 395 (1962).
4. L. R. Allen, H. P. Palmer, B. Rowson, Nature **188**, 731 (1960).

5. H. P. Palmer, IAU. Symposium, No. 15. Problems of Extra-galactic Research (Ed. G. C. McVittie), MacMillan, 1961.
6. L. R. Allen, R. Hanbury Brown, H. P. Palmer, Month. Not. Roy. Astron. Soc. **125**, 57 (1962).
7. P. Maltby, A. T. Moffet, Astrophys. J. Suppl. 7, 93 (1962).
8. T. A. Matthews, J. G. Bolton, J. L. Greenstein, Sky and Telescope **21**, 148 (1961).
9. T. A. Matthews, A. K. Sandage, Astrophys. J. **138**, 30 (1963).
10. C. Hazard, M. B. Mackay, A. J. Shimmis, Nature **197**, 1037 (1963).
11. H. J. Smith, D. Hoffleit, PASP. **73**, 292 (1961).
12. A. R. Sandage, Astrophys. J. **138**, 32 (1963).
13. J. L. Greenstein, Sci. Amer. **209**, 54 (1963).
14. J. L. Greenstein, M. Schmidt, Astrophys. J. **140**, 1 (1964).
15. H. P. Palmer, New Scientist **25**, 16 (1965).
16. B. Anderson, N. Donaldson, H. P. Palmer, B. Rowson, Nature **205**, 375 (1965).
17. W. I. Slish, Nature **199**, 682 (1963).
18. P. S. S. Williams, Nature **200**, 56 (1963).
19. A. Hewish, P. F. Scott Wills, Nature **203**, 1214 (1964).