

ОБ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВЫХ ДИАМЕТРОВ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

С 1946 г., когда были открыты первые дискретные источники космического радиоизлучения, обнаружено уже более двухсот дискретных источников. До сих пор, однако, природа радиоизлучения этих своеобразных небесных объектов остаётся неясной. Для выяснения истинного механизма, ответственного за радиоизлучение дискретных источников, последние прежде всего должны быть отождествлены с теми или иными видимыми небесными объектами. Очевидно, что эта задача сводится к возможно более точному определению координат и угловых размеров источников. За последние годы было предпринято несколько попыток измерить угловые диаметры некоторых наиболее выдающихся дискретных источников. Измерения эти оказались неудачными в том смысле, что из-за относительно низкой угловой разрешающей силы применявшихся радиоинтерферометров (порядка нескольких угловых минут на волнах метрового диапазона) даже для наиболее мощных источников, лежащих в созвездиях Кассиопея, Лебедь, Телец, была найдена лишь верхняя граница угловых размеров.

Недавно Миллсу¹ и Смитсу², которые работали со специально сконструированными радиоинтерферометрами, удалось добиться успеха и измерить угловой диаметр нескольких наиболее «крупных» источников.

В основу применявшихся в^{1,2} радиоинтерферометров положен модуляционный метод измерения радиоизлучения дискретных источников, впервые описанный и использованный Райлем³. Принцип действия предложенного Райлем модуляционного радиоинтерферометра заключается в следующем. Две антенны (см. рис. а), разнесённые на значительное по сравнению с длиной волны принимаемого радиосигнала расстояние, работают на общий приёмник. Диаграмма направленности такого антенного устройства состоит из множества отдельных лепестков, причём ширина центральных

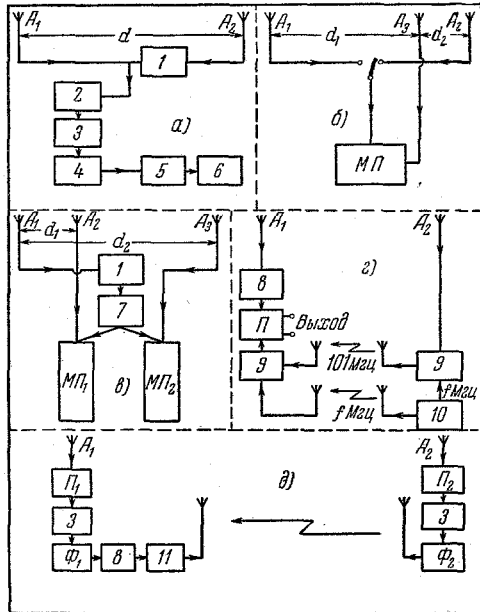
лепестков диаграммы порядка $\frac{\lambda}{d}$, где d — расстояние между антеннами.

Если электрические длины l_1 и l_2 отрезков кабеля, соединяющих приёмник с левой и правой антенной интерферометра, одинаковы, то при $\theta = 0$, очевидно, должен быть максимум диаграммы направленности. Наоборот,

если $|l_1 - l_2| = \frac{\lambda}{2}$, при $\theta = 0$ должен быть минимум диаграммы. Особый переключатель периодически, с частотой нескольких десятков герц, включает отрезок кабеля длиной $\frac{\lambda}{2}$ в одно из плеч интерферометра. Из сказанного только что следует, что приёмная диаграмма направленности

будет с той же частотой периодически смещаться на полуширину одного её лепестка, так что максимумы диаграммы направленности будут сменяться минимумами и наоборот за время, равное полупериоду модуляции. В результате сигнал от «точечного» источника (т. е. от источника, угловая

ширина которого $\ll \frac{\lambda}{d}$), находящегося в зоне приёмной диаграммы направленности, поступающий из антенного устройства интерферометра в приёмник, оказывается модулированным по амплитуде с той же самой частотой, т. е. с частотой, на которой работает «переключатель фазы». Входной



Схемы радиointерферометров, применяемых для измерения угловых размеров радиоизлучающих космических объектов: 1 — переключатель фазы, 2 — высокочастотный усилитель, 3 — квадратичный детектор, 4 — низкочастотный усилитель, 5 — балансный детектор, 6 — самописец, МП — модуляционный приёмник, 7 — высокочастотный разветвитель, 8 — цепь задержки, П — приёмник, 9 — конвертер, 10 — вспомогательный передатчик контроля фазы, Φ_1 и Φ_2 — полосовые фильтры, 11 — коррелятор.

высокочастотный усилительный каскад приёмника одинаково усиливает как полезный (модулированный) сигнал, так и шумы подключённых к нему внешних цепей. После следующего за усилителем квадратичного детектора переменный ток модуляционной частоты, амплитуда которого пропорциональна интенсивности принимаемого радиоизлучения, усиливается низкочастотным узкополосным усилителем и поступает затем в «балансный детектор». Величина постоянного тока, даваемого балансным детектором, которая оказывается пропорциональной интенсивности поступающего в антенну полезного сигнала, регистрируется самопишущим гальванометром. Знак тока (а следовательно, и знак отклонений пера самописца) опреде-

ляется знаком разности фаз низкочастотных сигналов (один из которых является вспомогательным и подаётся в «балансный детектор» непосредственно от «переключателя фазы»), подводимых к «балансному детектору», т. е. зависит в конечном счёте от положения источника радиоизлучения относительно лепестков диаграммы направленности антенного устройства.

При перемещении источника радиоизлучения в зоне лепестков характеристики направленности (например из-за суточного вращения Земли) перо самописца описывает волнистую линию. Максимальные отклонения самописца отвечают при этом случаю, когда источник в процессе работы «переключателя фазы» попеременно попадает то в максимумы, то в минимумы диаграммы направленности. Наоборот, в том случае, когда источник находится в той части одного из лепестков диаграммы, которой при смещении всей картины в пространстве на полуширину лепестка отвечает симметричная точка того же самого или соседнего лепестка, отклонения самописца должны быть минимальными (не равными нулю лишь за счёт флуктуаций, обусловленных шумами аппаратуры или из-за наличия других источников радиоизлучения, скажем, общего радиоизлучения Галактики *).

До сих пор предполагалось, что радиоизлучение исходит из источника, угловые размеры которого много меньше ширины лепестков диаграммы направленности («точечный» источник). Элементарный расчёт показывает, что при учёте конечности угловых размеров источника, имеющего вид равномерно светящейся прямоугольной полоски шириной $2 \cdot \Delta\theta$, интерференционная картина, фиксируемая на ленте самописца, по своему характеру будет такова же, как и для «точечного» источника той же интенсивности, однако амплитуда переменной компоненты записи во втором случае будет в

$$\frac{\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta\right)}{\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta} \text{ меньше, чем для «точечного» источника **).}$$

Зная отношение амплитуд переменных компонент записей самописца, полученных для двух разных расстояний d между антеннами интерферометра, можно, очевидно, найти угловую ширину источника $2\Delta\theta$.

По сравнению с интерферометрами, применявшимися ранее для измерения координат и угловых размеров дискретных источников радиоизлучения, описанный модуляционный интерферометр обладает рядом несомненных преимуществ: 1) Применение его позволяет практически почти полностью исключить общее радиоизлучение Галактики, которое при измерениях радиоизлучения дискретных источников является нежелательным (мешающим) фоном. Выходные приборы приёмной установки фиксируют при этом лишь интенсивность той фурье-составляющей углового распределения интенсивности космического радиоизлучения по небосводу, угловой период которой порядка $\frac{\lambda}{d}$. На практике $\frac{\lambda}{d}$ обычно $\leq 10^{-2}$. Интенсивность же фурье-составляющей распределения плотности радиоизлучения (даже в районе Млечного пути, где «радиояркость» меняется наиболее резко и прихотливо) на волнах

*) Принято говорить, что источник (цель) находится в этом случае в «равносигнальной зоне».

**) Для источника в виде круглого, равномерно светящегося диска этот

фактор следует заменить на $\frac{I_1\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta\right)}{\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta}$, где I_1 — первая функция Бесселя.

метрового диапазона, на которых обычно наблюдают дискретные источники, как правило, много меньше интенсивности источника и может быть ещё более уменьшена путём увеличения расстояния между антеннами интерферометра. 2) Важным достоинством модуляционного интерферометра является его высокая чувствительность, что позволяет обнаружить с его помощью очень слабые источники, интенсивность радиоизлучения которых составляет всего лишь 10^{-3} от уровня шумов приёмной аппаратуры (модуляционный выигрыш). 3) Для компенсации затухания, которое испытывает сигнал в соединяющих антенны и приёмник отрезках кабеля, в интерферометрах применяются вспомогательные высокочастотные усилители, устанавливаемые непосредственно на выходе антенн интерферометра. Существенно, что различие в коэффициентах усиления этих вспомогательных усилителей, стоящих в левой и правой половинах модуляционного интерферометра, практически не влияет на амплитуду переменной компоненты записи самописца, т. е. в конечном счёте на точность измерений угловых размеров радиоизлучающих объектов. Кроме того, как уже отмечалось, согласно Райлю³ угловой размер источника должен находиться из отношений амплитуд записей самописца, отвечающих двум разным значениям расстояния d между антеннами интерферометра. Оказывается, что отношение это зависит только от значения углового размера излучающего объекта и не зависит от коэффициентов направленного действия антенн интерферометра, благодаря чему оказывается возможным применять антенны с разными коэффициентами направленного действия. По свидетельству Райля, который с помощью описанного модуляционного интерферометра измерял координаты дискретных источников космического радиоизлучения и угловые размеры радиоизлучающих солнечных пятен на волнах 1,4; 3,7; 6, 7 и 8 м, угловая разрешающая способность подобного устройства может быть сравнительно легко доведена до $0,15 \frac{\lambda}{d}$.

Основное конструктивное различие между модуляционным радиоинтерферометром Смита (см. рис. б), использованным им для измерения угловых диаметров двух наиболее мощных дискретных источников в созвездиях Лебедь и Кассиопея, и описанным только что интерферометром Райля, заключается в том, что в нём используются три приёмные антенны, причём две крайние антенны неподвижны, а средняя может перемещаться между ними и работать в паре как с левой, так и с правой антенной². Коэффициенты направленного действия (к. н. д.) антенн A_1 и A_2 равны и не должны меняться в процессе измерений, чего, однако, нетрудно достичь, так как антенны A_1 и A_2 неподвижны. К. н. д. подвижной антенны A_3 произволен по отношению к к. н. д. антенн A_1 и A_2 . Три антенны в комбинациях $A_1 - A_3$ и $A_2 - A_3$ вместе с модуляционным приёмником образуют два интерферометра с соответствующими базами d_1 и d_2 . Если при некотором фиксированном положении A_3 произвести запись радиоизлучения дискретного источника с помощью обоих интерферометров и взять отношение амплитуд записей самописца, отвечающих базам d_1 и d_2 , то, как уже указывалось, последнее не зависит от значения к. н. д. антенны A_3 , а определяется лишь диаметром источника.

С помощью описанного интерферометра Смит измерял угловые диаметры дискретных источников в Кассиопее и Лебеде на $\lambda = 3,7$ и $1,43$ м., однако удачными оказались лишь измерения на $\lambda = 1,43$ м. Расстояния $d = d_1 + d_2$ между крайними антеннами интерферометра равнялись 430 λ . Угловая ширина центральных лепестков диаграммы направленности равнялась при этом $8'$. Измерения показали, что угловой диаметр источников в Кассиопее и Лебеде значителен. Для источника в Кассиопее было найдено $5,55' \pm 0,2'$, а для источника в Лебеде — $3,6' \pm 0,3'$. Эти цифры, разумеется, несколько условны, так как они получены в предположении о том, что источники представляют собой круглые равномерно светящиеся диски. Более определённые данные о их размерах могут быть при этом получены лишь при детальном знании их формы и распределения поверхностной радиояркости.

Чрезвычайно важным обстоятельством, проливающим свет на вопрос о природе дискретных источников космического радиоизлучения, является то, что на месте, где расположен источник в Кассиопее, обнаружена газовая туманность приблизительно круговой формы с угловым диаметром $\sim 5'$, имеющая сложную волокнистую структуру. Последнее говорит о том, что дискретные источники радиоизлучения, повидимому, связаны с туманностями.

Миллс¹ на основании результатов своих измерений, краткое описание которых дано ниже, также приходит к заключению о том, что дискретные источники связаны с туманностями. Упрощённая схема интерферометра, с которым экспериментировал Миллс, приведена на рис. 6. Как и в интерферометре Смита, в описываемом устройстве имеется три антенны. Регистрация радиоизлучения производится одновременно двумя совершенно одинаковыми приёмниками. Устройство в целом представляет собой два одновременно работающих интерферометра с базами $d_1 = 60$ и $d_2 = 270$ м. Измерения велись на $\lambda = 3$ м. Угловой раствор интерференционных лепестков, отвечающих базам d_1 и d_2 , равен соответственно 3° и $40'$.

Зная отношение амплитуд записей интерференционных картин при прохождении источника через многолепестковые диаграммы, отвечающие большей и меньшей базе интерферометра, можно, как это следует из сказанного выше, определить угловой диаметр источника. Измерив по возможности точно координаты шести дискретных источников, Миллс отождествил четыре наиболее мощных из них, расположенных в созвездиях Лебеда, Тельца, Центавра и Девы, с туманностями. Источник в Лебеде, как оказалось, расположен вблизи слабой внегалактической туманности с координатами $\alpha = 19^h 57^m 44,6^s$ и $\delta = 44^\circ 35,7'$. Что же касается источников в Тельце, Центавре и Деве, то, как уже сообщалось в УФН⁴, они отождествлялись Болтоном и Стендеем с туманностями M1 («Крабовидная» туманность), N. G. C. 5128 и N. G. C. 4486. Результаты измерений Миллса подтверждают это заключение (координаты этих источников измерены им с точностью $1 \div 2'$). Угловая разрешающая сила радиоинтерферометра Миллса при определении угловых размеров источника была невелика (порядка $10'$). В связи с этим ему удалось измерить угловые диаметры лишь у двух наиболее «крупных» источников, расположенных в созвездиях Центавра и Печи ($\sim 20'$).

Реферируемые работы^{1,2} являются, насколько нам известно, первыми работами, авторам которых удалось измерить угловые размеры некоторых дискретных источников и доказать тем самым, что эти объекты являются туманностями, а не звёздами. Совсем недавно появились три новые короткие и вместе с тем весьма интересные сообщения, принадлежащие перу разных авторов и объединённые общим заглавием «Кажущиеся угловые размеры дискретных источников радиоизлучения»⁵. В этой статье содержатся новые данные о размерах некоторых дискретных источников, их форме и распределении «поверхностной радиояркости».

В Кембридже Смитом на $\lambda = 1,43$ м велись измерения распределения «радиояркости» в дискретных источниках Кассиопеи и Лебеда, причём он использовал для этого описанный выше модуляционный радиоинтерферометр (рис. 6), уже применявшийся в². Меняя в процессе измерения расстояния между антеннами интерферометра от нуля до 400λ , он получил зависимость амплитуды фурье-компоненты $A(\omega)$ распределения «радиояркости» от расстояния между антеннами или, что то же самое, от угла, характеризующего период и циклическую частоту ω , соответствующей гармонической составляющей распределения. Искомое угловое распределение «радиояркости» $I(\theta)$ есть, очевидно, фурье-сопряжённая $A(\omega)$, так что

$$I(\theta) = \int_0^\infty A(\omega) \cos(\omega\theta + \varphi_\omega) d\omega,$$

где φ_{ω} — фаза соответствующей гармонической компоненты, отвечающей частоте ω . По ряду причин авторам⁵ не удалось найти φ_{ω} . Если, однако, предположить, что $I(\theta)$ есть симметричная функция θ , то $\varphi_{\omega} \equiv 0$ и $I(\theta)$ можно построить, зная лишь $A(\omega)$. Найденные Смитом спектры $A(\omega)$ оказались близкими к тем, которые должны были бы получиться в предположении о том, что источники в Лебеде и Кассиопее являются «равномерно светящимися» дисками с диаметрами соответственно 3,5 и 5,5'. Последнее, как это следует из изложенного выше, согласуется с результатами, полученными им ранее².

Во второй заметке Миллс сообщает о результатах измерений угловых размеров четырёх дискретных источников на $\lambda = 3$ м, проводившихся в Сиднее. Схема применявшегося им интерферометра дана на рис. 2.

Интересной и важной особенностью этого устройства является то, что в нём отсутствует соединяющий антенны электрический кабель. Связь между антеннами интерферометра осуществляется путём беспроводной ретрансляции принимаемого одной из антенн высокочастотного сигнала с помощью вспомогательного передатчика-конвертера в приёмник, находящийся в непосредственной близости от другой антенны и подключённый к ней через цепь задержки, задерживающую сигнал на время, равное времени распространения сигнала в свободном пространстве между антеннами интерференционного устройства. Отсутствие соединительного кабеля позволяет практически неограниченно увеличить расстояние между антеннами. В описываемом эксперименте это расстояние доводилось до 10 км, что отвечало ширине интерференционного лепестка $\frac{\lambda}{\alpha} \sim 0,1'$. Миллс, так же

как и Смит, определял спектр углового распределения интенсивности радиоизлучения, а затем находил само распределение и вычислял эффективные размеры источников,

значения которых даны в приводимой таблице*). Миллс указывает, что расхождение между значением радиодиаметра источника в Центавре ($\sim 20'$), приведённым в ¹, и значением, приведённым в таблице ($6'$), связано с тем, что в таблице, в соответствии с определением понятия «эффективный размер», дан диаметр наиболее радиояркой центральной части источника. Точно так же можно попытаться объяснить и расхождение между табличным значением диаметра источника в Лебеде ($\sim 1'$) и числом, фигурирующим у Смита ($3,5'$)². Кроме того, подобное расхождение между значениями радиодиаметров может быть также связано с тем, что источники в Лебеде и Центавре не обладают круговой симметрией, причём в ^{1,2} и ⁵ речь идёт о их размерах в разных направлениях. В отношении источника в Лебеде последнее подтверждается приводимыми в ⁵ материалами наблюдений Брауна и др. Наблюдая на $\lambda = 2,4$ м источники в созвездиях Лебедь и Кассиопея в разное время суток, т. е. для разных положений последних относительно линии, соединяющей антенны интерферометра, эти авторы нашли, что источник в Кассиопее

Название источника	Эффективный размер в направлении восток — запад
Лебедь А	1,1'
Телец А	4'
Дева А	5'
Центавр А	6'

*) «Эффективный угловой размер» определяется в данном случае как угол между половинными значениями поверхностной радиояркости.

имеет приблизительно круговую форму, в то время как источник в Лебедь напоминает эллипс с отношением полуосей ~ 4 . Радиодиаметр источника в Кассиопее оказался равным $4'$, а наибольший размер источника в созвездии Лебедь $2'10''$. Схема радиоинтерферометра, с помощью которого были получены эти результаты, приведена на рис. 8. Как и в описанном только что интерферометре Миллса (рис. 2), в нём нет соединяющего антенны кабеля. Описываемый интерферометр выгодно отличается от интерферометра Миллса тем, что радиосвязь между его антеннами используется как средство для передачи низкочастотных (порядка нескольких тысяч герц) составляющих спектра исследуемого радиоизлучения. Принцип действия интерферометра заключается вкратце в следующем. Поступающее в антенны A_1 и A_2 радиоизлучение принимается на два независимых, но совершенно одинаковых приёмника. На выходе полосовых фильтров Φ_1 и Φ_2 , полоса пропускания которых простирается от 10^3 до 2×10^3 гц, существуют случайные во времени напряжения $V_1(t)$ и $V_2(t)$, отвечающие узкому (порядка 10^3 гц) участку спектра поступающего в антенны радиоизлучения. В случае, когда антенны A_1 и A_2 расположены рядом, функции $V_1(t)$ и $V_2(t)$, очевидно, должны быть одинаковы. При увеличении расстояния d между антеннами корреляция между $V_1(t)$ и $V_2(t)$ уменьшается, а при $d = \frac{\lambda}{\theta}$, где θ — угловая ширина эквивалент-

ного источника с постоянной «поверхностной радиояркостью», исчезает полностью. Последнее, как легко показать, означает, что разности хода между лучами, проведёнными от «центров тяжести» двух половинок источника в точки, где расположены антенны интерферометра, отличаются на $\frac{\lambda}{2}$. В результате, так как разные части источника колеблются совершенно независимо, между поступающими в антенны A_1 и A_2 сигналами, а следовательно, и между V_1 и V_2 в этом случае нет никакой корреляции (иногда говорят, что при этом нарушается «условие когерентности»). Описанное устройство является более надёжным в работе и позволяет производить измерения с большей точностью, нежели это можно сделать с помощью интерферометра Миллса, основным источником ошибок в котором является нестабильность фазы высокочастотного сигнала, ретранслируемого от одной из антенн в приёмник.

Отождествлённая с дискретным источником в Лебедь слабая пекулярная туманность является внегалактической. Наиболее яркая часть туманности с размером $\sim 3/4'$ окружена более разреженной оболочкой с диаметром $\sim 2'$. Газовая туманность в Кассиопее имеет, как уже отмечалось, приблизительно круговую форму. Диаметры туманности и её яркой центральной части равны соответственно $5'$ и $1,5'$. Внегалактическим объектом является также, по видимому, и туманность N. G. C. 5128, отождествляемая с источником в Центавре. Этот источник, как указано выше, имеет значительные угловые размеры. Последнее сказывается, в частности, на характере флуктуаций интенсивности радиоизлучения, связанных с дифракцией радиоизлучения на ионосферных неоднородностях. Для источника в Центавре эти флуктуации заметно меньше, чем для других дискретных источников, имеющих меньший угловой диаметр¹.

Туманность M1, являющаяся результатом вспышки сверхновой 1054 г., с которой связывается источник в Тельце, — объект галактический.

Координаты центра источника слегка отличаются от координат центра туманности. Радиодиаметр источника ($\sim 4'$) приблизительно равен видимым размерам туманности ($\sim 4 \div 5'$).

Работы, содержание которых изложено выше, разумеется, не исчерпывают полностью вопроса об угловых размерах дискретных источников хотя бы потому, что в настоящее время измерены угловые диаметры лишь у нескольких наиболее выдающихся источников. Тем не менее уже сейчас

ясно, что гипотезы о связи дискретных источников с объектами звёздного типа, повидимому, несостоятельны. Дискретные источники космического радиоизлучения — это не «радиозвёзды», а скорее «радиотуманности». Коль скоро это так, отпадает возможность свести всё, или во всяком случае большую часть наблюдаемого космического радиоизлучения, к совокупному излучению дискретных источников, так как в противном случае необходимо было бы принять, что число «радиотуманностей» в Галактике по крайней мере на порядок превышает число находящихся в ней звёзд⁶. Это означает, что, помимо радиоизлучения дискретных источников, должно существовать общее радиоизлучение Галактики, за которое ответственна межзвёздная среда.

Не имея возможности подробно осветить вопрос о природе космического радиоизлучения, укажем всё же, что наиболее вероятным механизмом, ответственным как за радиоизлучение дискретных источников, так и за общее радиоизлучение Галактики, является механизм тормозного излучения релятивистских электронов, движущихся в слабых межзвёздных и околозвёздных магнитных полях $H \sim 10^{-4} \div 10^{-6}$ гаусс⁷.

Г. Г.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. Y. Mills, Austr. Journ. Sci. Res. **5**, 456 (1952).
2. F. G. Smith, Proc. Phys. Soc. **65**, 971 (1952).
3. M. Ryle, Proc. Roy. Soc. **211A**, 351 (1952).
4. Г. Г. Германцев, УФН **44**, 527 (1951).
5. R. H. Brown, R. C. Jennison and M. K. Das Gupta, B. Y. Mills, F. G. Smith, Nature **170**, 1061 (1952).
6. И. С. Шкловский, Астрономический журнал **29**, 418 (1952).
7. В. Л. Гинзбург, ДАН, **76**, 377 (1951).