

плотность газа и индукцию пронизывающего газ магнитного поля. Информация, получаемая из спектра, позволяет также производить различные косвенные оценки (например, оценки расстояний до галактик — через закон Хаббла, светимости звезд — по существующим эмпирическим зависимостям между светимостью и относительной интенсивностью различных линий), и даже измерять массу и возраст звезд (по положению на диаграмме Герцшпрунга–Рессела). Поэтому спектральные наблюдения являются основными для астрофизических исследований.

3.5. Радиоастрономические наблюдения

3.5.1. Радиотелескопы

Радиотелескопы используются для приема космического излучения в пределах окна прозрачности земной атмосферы для радиоволн в диапазоне от миллиметров до декаметров. Две основные части радиотелескопа — антенна и радиометр (приемное устройство). Наиболее распространены *параболические антенны*, фокусирующие радиопоток. Полноповоротные антенны достигают диаметра 100 м (Грин Бэнк, США; Бонн, ФРГ). Крупнейшая неподвижная антенна — 300-метровый радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико, США). Крупнейший радиотелескоп из составных подвижных зеркал, примыкающих друг к другу и образующих круг диаметром около 600 м — РАТАН-600 (Россия).

В более длинноволновой части радиодиапазона также используются *синфазные антенны*, отдельными элементами которых могут быть элементарные облучатели (полуволновые диполи, спиральные антенны) или параболические рефлекторы малого диаметра. Сигнал от каждого облучателя подается по волноводам к приемнику с определенной задержкой, которая рассчитана таким образом, чтобы сигналы от источника с данным положением на небе попадали на приемник в одной фазе, то есть складывались. Изменение величины задержки позволяет управлять диаграммой направленности антенны.

Разрешающая способность радиотелескопа определяется шириной диаграммы направленности главного лепестка антенны и оценивается, как и в случае оптического телескопа, величиной $\Delta\theta \approx \lambda/D$, где λ — длина волны излучения, а D — диаметр антенны (или области, содержащей совокупность антенн) радиотелескопа.

Как и в случае оптических телескопов, возможности радиотелескопа зависят от размера (площади) объектива-антенны. В общем случае, для любого типа антенны её эффективную площадь можно выразить через длину волны и телесный угол Ω , под которым она «видит» на небе точечный радиоисточник: $A_{eff} = \lambda^2/\Omega$. Если антенна представляет собой круглое зеркало, собирающее всю энергию падающих на него радиоволн, то $\Omega \approx \lambda^2/D^2$, и $A_{eff} \approx D^2$ представляет собой её геометрическую площадь. С учетом того, что не вся энергия попадает в радиометр, эффективная площадь антенны, как правило, составляет 50–80% от её геометрической площади.

Шумы антенны и радиометра

Для оценки возможности радиотелескопа наблюдать слабые радиоисточники используется понятие *шумовой температуры*. Шумовая температура $T_{n,a}$ антенны характеризует суммарную мощность излучения $W_{n,a}$, собираемую антенной через все лепестки диаграммы направленности от посторонних источников: земной поверхности, атмосферы, ионосферы и фоновых космических источников в полосе частот $\Delta\nu$:

$$W_{n,a} = kT_{n,a}\Delta\nu.$$

Шумовые антенные температуры в области длинных радиоволн достигают нескольких тысяч К (до 1000 К на длине волны 3 м) и связаны с космическим радиофоном, но в области дециметровых и сантиметровых волн они ниже (до сотни К), и обусловлены в основном тепловым излучением Земли, самой антенны и окружающих предметов. Прохождение исследуемых слабых источников через главный лепесток диаграммы направленности антенны обычно вызывает малые изменения регистрируемой температуры излучения $\delta T_a \ll T_a$, и задача сводится к выделению слабого сигнала от источника на сильном шумовом фоне. Приемное устройство также создает свой собственный шум, неотличимый от космического шума. Шумовая температура приемника T_n складывается с T_a .

Каждый шумовой сигнал можно представить суммой двух компонент: постоянная (средняя) величина плюс хаотически меняющаяся составляющая, которую и считают собственно шумом. Если постоянный уровень помехи может быть исключен из рассмотрения специальной конструкцией приемного устройства, то связанный с ним шум, как и шум приемника, принципиально неустраним. Од-

нако его отрицательное влияние можно уменьшить путем усреднения принимаемого излучения по времени τ или по частоте в некотором интервале $\Delta\nu$ (он определяется полосой усилителя радиометра). В радиодиапазоне, в отличие от оптического, шумы обусловлены волновыми эффектами, а не числом принимаемых квантов. По этой причине ошибка измерений пропорциональна потоку принимаемого излучения (точнее, сумме антенной и шумовой температур):

$$\Delta T_{n,a} \approx B \cdot \frac{T_a + T_n}{\sqrt{\Delta\nu \tau}}, \quad (3.6)$$

где параметр $B \approx 2-3$ зависит от типа используемого приемника. Значение $\Delta T_{n,a}$ характеризует точность измерения сигнала от радиоисточника при антенной температуре T_a и шумовой температуре T_n . На языке волновых процессов интерпретация этой формулы выглядит следующим образом. Пусть источник излучения представляет собой непрерывный широкополосный сигнал, измеряемый в течение времени τ . Шумовые флуктуации, связанные с фоновым сигналом, будем характеризовать среднеквадратичным отклонением σ . Из-за конечности (узости) полосы детектора шум можно считать постоянным, так что за время, превышающее $\tau_{coh} = 1/\Delta\nu$ (время сохранения когерентности) различные реализации шума становятся нескоррелированными, иными словами, участки записи длиной τ_{coh} независимы. Тогда за время накопления сигнала τ имеем $n = \tau/\tau_{coh}$ независимых реализаций фона, каждая из которых характеризуется разбросом значений σ . Значит, за время наблюдения среднеквадратичная ошибка изменения суммы случайных независимых величин (фоновых отсчетов) уменьшается в \sqrt{n} раз: $\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2/n(n-1) \approx \sigma^2/n$. Обнаружимый сигнал должен превышать $\sigma_n \approx (\sigma/\sqrt{n})$, что с точностью до числового коэффициента эквивалентно формуле (3.6). Радиоисточник считается обнаруженным, если связанное с ним изменение антенной температуры составляет $(C/\Pi) \cdot \Delta T_{n,a}$, где пороговое значение отношения C/Π (сигнал/шум) принимается равным 3-5.

Как видно из формулы (3.6), для улучшения чувствительности радиотелескопа требуется расширение полосы приемника и/или увеличение времени накопления сигнала. Это общее правило для любых приемников излучения. Для узкополосных сигналов (например, линий мазерного излучения молекул воды) или импульсных

сигналов (от пульсаров) формула для предельного обнаружения несколько изменится: в этих случаях $\Delta\nu$ или, соответственно, τ будет ограничено характером излучения. Так, для оптимального приема узкополосных сигналов величина $\Delta\nu$ должна определяться шириной радиолинии, а для импульсных сигналов с характерным временем $\hat{\tau}$ полоса приемника должна быть $\sim 1/\hat{\tau}$, поскольку при использовании более широкой полосы импульсы будут сглаживаться.

3.5.2. Радиоинтерферометры. Метод апертурного синтеза

Из-за большой длины радиоволн разрешающая способность отдельных радиотелескопов даже с очень большим диаметром антенны остается низкой даже в сантиметровом и дециметровом диапазонах (в лучшем случае порядка угловой минуты). Для увеличения разрешающей способности, ограниченной дифракцией радиоволн, требуется увеличение расстояний между отдельными элементами антенны или отдельными совместно работающими антеннами. Последнее достигается методом радиоинтерферометрии, когда сигналы от двух или более радиотелескопов, разнесенных на расстояние S , складываются вместе (с учетом фазы), или, если антенны стоят далеко друг от друга, записываются приемным устройством на каждом телескопе, а затем совместно обрабатывается. Эффективная разрешающая способность при этом становится порядка λ/S . Если радиоинтерферометр содержит две антенны, то угловое разрешение будет высоким только в направлении, параллельном линии, соединяющей антенны. Иными словами, диаграмма направленности интерферометра окажется вытянутой в направлении, перпендикулярном этой линии, а изображение точечного источника повторит вытянутую форму диаграммы.

Для получения резкой двумерной картины требуется либо одновременное использование многих антенн, либо проведение большого количества наблюдений с двумя или несколькими антеннами; при наблюдениях варьируется расстояние между антеннами (база) и угол между базой и направлением на источник. В радиоастрономии используют оба подхода.

Радиоинтерферометры могут содержать десятки антенн. В интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) используются телескопы, расположенные в разных странах и даже на разных континентах, то есть величина S для них сравнима с диаметром земного шара. Принимаемые сигналы синхронизируются с помощью атомных ча-

сов, и их записи обрабатываются совместно. В РСДБ наблюдениях достигается разрешающая способность менее десятитысячной доли угловой секунды, то есть на 2–4 порядка лучше, чем при оптических наблюдениях.

Восстановление изображения (то есть получение распределения яркости источника $I_\nu(\alpha, \delta)$ по двум координатам) при приеме радиоизлучения несколькими антеннами представляет собой сложную математическую задачу, не имеющую однозначного решения. Остановимся на этом подробнее.

При использовании одиночной антенны сигнал на выходе отражает распределение яркости источника, сглаженное конечным угловым разрешением антенны λ/D . Иными словами, в изображении отсутствуют пространственные частоты, более высокие, чем D/λ . Если одновременно работает несколько антенн, то любую пару можно рассматривать как отдельный интерферометр. При анализе сигналов от антенн интерферометра вместо двумерных распределений радиояркости $I_\nu(\alpha, \delta)$ и диаграммы направленности $A(\alpha, \delta)$ обычно рассматриваются их Фурье-образы, называемые соответственно функцией видимости источника и пространственно-частотной характеристикой. Они представляют собой разложение распределений радиояркости и диаграммы направленности на гармонические компоненты по пространственным координатам в плоскости, перпендикулярной направлению на источник (т. е. в плоскости неба).

При наблюдениях источника сигналы от антенн поступают на специальное устройство — коррелятор, который сравнивает сигналы, учитывая их фазы, и оценивает корреляцию между ними. Коррелятор выдает значение амплитуды гармоники на данной пространственной частоте S/λ по обоим координатам, где S — проекция базы (отрезка, соединяющего антенны), на рассматриваемую плоскость. Эти значения определяют одну точку на плоскости пространственных частот (обычно называемой uv -плоскостью). Если количество антенн N больше двух, и каждая пара образует свою базу, то общее число баз, как и число гармоник с измеренной амплитудой, будет равно $N(N - 1)/2$.

Но даже с двумя телескопами можно измерить амплитуду на разных пространственных частотах от нуля до S_{max}/λ , то есть получить много точек на плоскости частот, изменяя расстояние между антеннами, либо наблюдая источник в различные моменты времени, поскольку из-за вращения Земли происходит непрерывное изменение

ориентации базы. Таким образом удается получить частичное заполнение uv -плоскости.

Если бы можно было заполнить всю плоскость частот, то, совершив обратное Фурье-преобразование от функции видимости, мы получили бы карту распределения радиояркости источника любой протяженности с бесконечно высоким разрешением. Однако, поскольку каждая пара радиотелескопов имеет минимальную ширину диаграммы, примерно равную λ/S , ее можно рассматривать как фильтр, пропускающий только определенную частоту $\sim S/\lambda$. Угловое разрешение системы в целом будет определяться самым высокочастотным фильтром: парой антенн с наибольшей величиной $S = S_{max}$, то есть будет соответствовать разрешению одной антенны с диаметром, равным максимальному расстоянию между антеннами интерферометра.

В математическом методе восстановления изображения используется то обстоятельство, что наблюдаемая функция видимости есть произведение истинной функции видимости, то есть пространственного спектра источника, определяемого его действительной формой, на пространственно-частотную характеристику. Тем самым задачу восстановления изображения можно свести к нахождению истинной функции видимости по наблюдаемой. Обратное преобразование Фурье восстановленной истинной функции видимости дает распределение радиояркости источника, то есть воссоздает его двумерное изображение. Такой метод получения изображения называется методом апертурного синтеза.

Поскольку на получаемой из наблюдений функции видимости присутствуют не все частоты, математическая задача восстановления изображения по отклику приемников излучения относится к классу некорректных задач, и получить изображение со сколь угодно высоким разрешением невозможно. Однако разработаны различные методы поиска наиболее вероятных решений, позволяющие реализовать угловое разрешение $\sim \lambda/S_{max}$. Таким образом, для построения двумерного изображения источника с большим числом деталей нужно измерить как можно больше пространственных гармоник, что достигается при наблюдении источника большим числом антенн радиointерферометров с разными базами и взаимными ориентациями в течение длительного промежутка времени.

Например, большая антенная решетка VLA (Very Large Array) в Нью-Мексико (США) состоит из 27 антенн диаметром 25 м каждая,

с максимальным расстоянием между антеннами равным 36 км. Разрешение VLA составляет до $1''$ на длине волны 10 см. Еще большей разрешающей способности позволяют достичь глобальные РСДБ-сети — глобальная европейская сеть EVN, североамериканская сеть VLBA, инструмент MERLIN (Великобритания). Наибольшего разрешения можно добиться, выведя один из радиотелескопов в космос (космический радиоинтерферометр). В настоящее время рассматривается и реализуется ряд таких проектов, в т. ч. и в России (проект «Радиоастрон»).

3.6. Рентгеновские телескопы и детекторы

Для регистрации жестких квантов используют их особенности взаимодействия с веществом. Для фотонов с энергией до 20–30 кэВ применяются детекторы, использующие фотоэффект в газе или в твердом теле. К ним относятся *пропорциональные газонаполненные счетчики*, амплитуда электрического импульса на выходе которых пропорциональна (в некотором спектральном диапазоне) энергии падающего фотона E .

Эффективность таких детекторов определяется сечением фотоионизации газа-наполнителя (обычно инертный газ Ar, Xe) и коэффициентом пропускания окна счетчика (используется фольга легких металлов Be, Al толщиной 10–100 мкм, или органические пленки толщиной 1–10 мкм и меньше). Для быстрого прекращения электрического разряда в инертном газе, вызванного попаданием жесткого кванта, добавляют отрицательно заряженные молекулы метана или CO_2 . Спектральное разрешение таких счетчиков невелико ($E/\Delta E \sim 5$) и обратно пропорционально квадратному корню из энергии падающего фотона. Площадь отдельных газонаполненных пропорциональных счетчиков доходит до 300 см^2 .

Фотоны с энергией $h\nu$ от 30 кэВ до 10 МэВ регистрируются *сцинтиляционными детекторами*, в качестве которых используют кристаллы NaI или CsI с добавками Tl или сцинтилирующие органические пластмассы. Падающий фотон вызывает в сцинтилирующем веществе вспышку УФ или видимого излучения, амплитуда которой в определенном спектральном диапазоне пропорциональна энергии поглощенного кванта. Импульсы видимого излучения регистрируются фотоумножителями. Площадь сцинтиляционных детекторов ограничена технологией выращивания монокристаллов CsI