



ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
ПРОФЕССОР

С. Э. ХАЙКИН

РАДИОАСТРОНОМИЯ

Серия III
№№ 38-39

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва — 1954

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Доктор физико-математических наук
профессор

С. Э. ХАЙКИН

РАДИОАСТРОНОМИЯ

Переработанная и дополненная стенограмма
публичной лекции, прочитанной в Центральном
лектории Общества в Москве

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1954

ОТ АВТОРА

С тех пор как создатель радио, выдающийся русский физик А. С. Попов, впервые использовал электромагнитные волны для целей связи, во все возрастающем количестве появляются новые научные и практические применения радиоволн. На базе этих применений возникли многочисленные новые области науки и техники. Одной из этих новых областей науки является радиоастрономия, которая применяет радиоволны для изучения Вселенной.

В двух лекциях, конечно, невозможно изложить содержание целой новой науки. Задача этих лекций, являющихся результатом переработки и дополнения стенограммы публичной лекции, — изложить лишь идеи основных методов, применяемых в радиоастрономии, и рассказать о результатах некоторых наблюдений для того, чтобы дать представление о тех проблемах, которые ставит и решает радиоастрономия, и о тех новых широчайших возможностях изучения Вселенной, которые радиоастрономия открыла перед нами.

Радиоастрономия, несмотря на свою молодость, — лишь десяток лет тому назад она делала первые шаги, — сегодня стала уже одним из мощных средств познания Вселенной. Поэтому общее представление о методах радиоастрономических наблюдений и о сведениях, получаемых с помощью этих наблюдений, должен иметь всякий, кто интересуется развитием науки о Вселенной и ее успехами. Для этого широкого круга читателей, не являющихся специалистами ни в области радио, ни в области астрономии, но следящих за развитием науки вообще, и предназначены настоящие лекции.

Лекция 1-я

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОАСТРОНОМИИ

Источники сведений о космических телах

Сведения о строении и свойствах различных космических объектов и физических процессах, в них происходящих, мы можем получить только наблюдая какие-либо явления, возникшие в том или ином космическом объекте и достигшие Земли.

Известны только два явления, которые могут сквозь огромные межзвездные пространства достигать Земли: это космические лучи, т. е. потоки элементарных частиц (электронов, протонов и т. д.) и электромагнитное излучение (в частности, световые волны). Эти явления представляют собой единственные источники, из которых астрономия может получать необходимые ей сведения о космических объектах, их состоянии и процессах, в них происходящих. Но между этими двумя вестниками из космических пространств существует принципиальная разница, определяемая тем, что условия распространения элементарных частиц и электромагнитного излучения в межзвездном пространстве неодинаковы.

В то время как электромагнитное излучение в чрезвычайно разреженной межзвездной среде распространяется прямолинейно, пути элементарных частиц могут очень сильно искривляться магнитными полями, существующими в межзвездном пространстве. Поэтому, наблюдая электромагнитное излучение, в частности, световые лучи, можно точно сказать, откуда они пришли. Наблюдая же попавшие на Землю космические лучи, нельзя непосредственно сказать, из каких космических объектов или даже из каких областей мирового пространства они пришли (об этом можно судить только иногда, исходя из некоторых косвенных соображений).

В силу этого, хотя космические лучи в некоторых случаях и могут дать исключительно важные для астрономии сведения, все же основным источником наших знаний о космических объ-

ектах служит электромагнитное излучение, возникающее в этих объектах и достигающее Земли. Вот почему мы начинаем наше изложение с вопросов о том, как возникает электромагнитное излучение и как характер этого излучения связан со строением и свойствами тех тел, в которых оно возникает.

Электромагнитное излучение

Как известно, всякий электрический заряд создает вокруг себя электрическое поле, а если он движется, то и магнитное поле. Когда электрический заряд движется с постоянной скоростью или прямолинейно и равноускоренно (т. е. с постоянным ускорением), то создаваемые им электрическое и магнитное поля движутся вместе с зарядом с той же скоростью и поэтому остаются все время связанными с ним. Когда же электрический заряд движется с переменным ускорением, т. е. так, что меняются либо величина, либо направление испытываемого им ускорения, либо и то и другое вместе, то его электрическое и магнитное поля ведут себя совсем по-иному. В этом случае начинает играть роль связь между переменными электрическими и магнитными полями, которая состоит в том, что такие поля порождают друг друга: при изменении магнитного поля возникает электрическое поле и, наоборот, при изменении электрического поля возникает магнитное поле.

Возбуждая друг друга, эти переменные электрическое и магнитное поля распространяются в пространстве, окружающем движущийся заряд, вокруг которого они возникли. Такие переменные поля, порождающие друг друга, представляют собой единое электромагнитное поле, в котором электрическое и магнитное поля вполне определенным образом связаны между собой: направления обоих полей всегда перпендикулярны друг к другу и изменения напряженности этих полей происходят по одному и тому же закону.

Скорость распространения электромагнитного поля никак не связана с той скоростью, с какой движется возбуждавший поле заряд, а определяется свойствами того пространства, в котором это поле распространяется. В «пустом пространстве» (т. е. в сильно разреженной среде) электромагнитное поле распространяется со скоростью около 300 000 км/сек (скорость, с которой распространяется свет)¹. В пространстве, заполнен-

¹ Тот факт, что электромагнитное поле и свет распространяются с одинаковой скоростью, и послужил в свое время доказательством электромагнитной природы света.

ном какой-либо средой, скорость распространения электромагнитных полей меньше, чем в пустоте, и зависит от свойств среды.

Так как порожденное зарядом, движущимся с переменным ускорением, электромагнитное поле распространяется со скоростью, отличной от скорости самого заряда, оно все больше и больше удаляется от заряда и теряет свою связь с ним. При этом оно ослабевает по мере удаления от заряда, но ослабевает медленнее, чем ослабевают с увеличением расстояния те постоянные электрическое и магнитное поля, которые создаются зарядом, движущимся с постоянной скоростью. Это более медленное ослабление тем и обусловлено, что постоянные поля создаются находящимся вдали зарядом, а в электромагнитном поле электрическое и магнитное поля создаются, так сказать, «на месте», одно за счет изменений другого. Такое электромагнитное поле, потерявшее связь с зарядами, называют электромагнитным излучением. Так как электрическое и магнитное поля обладают энергией, то, значит, движущийся с переменным ускорением заряд, излучающий электромагнитное поле, теряет часть своей кинетической энергии, которая в виде энергии электрического и магнитного полей уносится вместе с электромагнитным излучением.

Электромагнитные волны

Электромагнитное излучение, создаваемое движущимся с переменным ускорением электрическим зарядом, определяется характером движения самого заряда. Если заряд совершает периодические колебания, то и его ускорение изменяется периодически; в силу этого и создаваемое им электромагнитное излучение также имеет периодический характер; напряженность электрического и магнитного полей в излучаемом электромагнитном поле изменяется с тем же периодом, с каким колеблется и сам заряд.

В каждой точке пространства, в котором распространяется электромагнитное поле, определенное значение напряженностей электрического и магнитного полей (например, наибольшее их значение) повторяется через период. С другой стороны, это поле с постоянной скоростью распространяется в пространстве, поэтому и в нем определенные значения напряженностей электрического и магнитного полей, например, наибольшие их значения, в каждый данный момент времени, повторяются на оп-

ределенном расстоянии. Получается картина, аналогичная той, которая наблюдается в случае волн, распространяющихся по поверхности жидкости. В каждой точке поверхности уровень жидкости периодически подымается и опускается, а те места, в которых уровень жидкости имеет в каждый данный момент одну и ту же высоту, например, наибольшую (гребни волн), расположены на одинаковом друг от друга расстоянии, называемом длиной волны.

По аналогии электромагнитные поля, изменяющиеся периодически, называют электромагнитными волнами. Конечно, аналогия между волнами на поверхности жидкости и электромагнитными волнами чисто внешняя, так как электромагнитные волны не связаны с каким-либо механическим движением. Но эта внешняя аналогия помогает наглядно представить себе структуру электромагнитных волн и, в частности, связь между изменениями во времени напряженностей электрического и магнитного полей в данной точке и их изменениями в пространстве. Волна на поверхности жидкости представляет собой чередование горбов и впадин определенной формы, которые движутся как одно целое, сохраняя свою форму¹ по поверхности жидкости, т. е. в направлении, перпендикулярном к тому, в котором смещается уровень жидкости. Точно так же электромагнитная волна представляет собой электромагнитное поле с определенным чередованием значений напряженностей электрического и магнитного полей, движущихся в пространстве как одно целое, в направлении, перпендикулярном к направлениям этих полей.

Наиболее важным является случай, когда изменения электрического и магнитного полей со временем происходят по так называемому гармоническому закону, т. е. такому закону, которым определяется синус или косинус угла, возрастающего с постоянной скоростью. В дальнейшем мы ограничимся только этим случаем так называемых гармонических волн.

В таких волнах напряженности электрического и магнитного полей не только во времени, но и в пространстве изменяются по синусоидальному закону. Иначе говоря, если изображать электрическое и магнитное поля отрезками, направление которых указывает направление полей, а длина равна (в ка-

¹ В некоторых случаях при распространении по поверхности жидкости волна изменяет свою форму. Однако эти более сложные случаи ни для волн на поверхности жидкости, ни для электромагнитных волн рассматриваться не будут.

ком-то масштабе) напряженности поля, то концы таких отрезков в каждый момент времени располагаются по синусоидам (рис. 1). Картину распространения электромагнитной

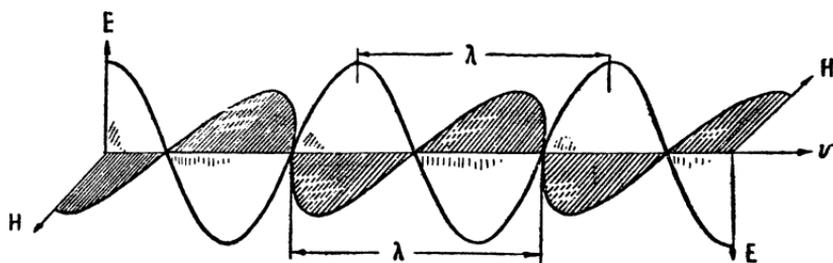


Рис. 1. Распределение электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. Стрелки E и H указывают направление, а их длина — величину напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей; стрелка v — направление распространения волны. Расстояние между двумя одинаковыми точками волны (например, двумя горбами) — это длина волны λ .

волны мы получим, представив себе, что обе эти синусоиды движутся вместе вдоль направления v со скоростью распространения волны.

Длина волны

Время, в течение которого напряженности электрического и магнитного полей волны проходят через все промежуточные значения и возвращаются к исходному, называется периодом колебаний поля в электромагнитной волне или короче — периодом волны (он совпадает с периодом колебаний зарядов, создающих данную волну). С другой стороны, длина волны — это расстояние между двумя смежными одинаковыми точками, например, горбами в синусоиде, изображающей распределение поля в пространстве.

Ясно, что в каждой точке пространства значение напряженности электрического поля будет повторяться в такие моменты времени, которые соответствуют прохождению через эту точку одинаковых точек синусоиды, например, горбов. Так как эти повторения должны происходить через период волны T , то, значит, синусоида должна за время T передвинуться как раз на один горб, т. е. на расстояние, равное длине волны. Следовательно, длина волны λ — это то расстояние, которое электромагнитная волна проходит за один период волны, т. е. $\lambda = cT$,

где c — скорость распространения электромагнитной волны. Если среда, в которой распространяются электромагнитные волны, обладает достаточно малой плотностью, то $c=300.000.000$ м/сек, а длина волны в метрах

$$\lambda = 300.000.000 \cdot T = \frac{300.000.000}{n}$$
, где T — период колебаний в секундах, n — частота колебаний в герцах ($гц$), т. е. число колебаний в 1 секунду $\left(n = \frac{1}{T}\right)$.

Например, если колебания электрического заряда в антенне передающей радиостанции происходят с частотой 2 000 000 $гц$ (2000 килогерц), то длина волны, излучаемой этой станцией, будет равна 150 м. Примерно с такими волнами работал создатель радио А. С. Попов во время своих первых опытов по радиосвязи. Но по мере развития радио для различных целей стали применять волны как более длинные, вплоть до многих километров, так и более короткие, вплоть до миллиметровых. Поэтому весь этот диапазон электромагнитных волн называют радиоволнами.

Радиоволны

Рассмотрим более детально картину электромагнитных волн, создаваемых радиопередатчиком. Если в антенне радиопередатчика (которая в простейшем случае представляет собой прямолинейный проводник) протекает быстропеременный электрический ток, т. е. происходят колебания электрических зарядов, то вокруг антенны возникают быстропеременные электрическое и магнитное поля. В достаточном удалении от антенны (на расстоянии, превышающем несколько длин волн) электрическое и магнитное поля уже полностью теряют свою связь с антенной, т. е. превращаются в электромагнитные волны, в которых эти поля возникают одно за счет изменений другого.

Как уже указывалось, оба поля — электрическое и магнитное, перпендикулярны друг к другу, а направление распространения волны перпендикулярно к направлениям обоих полей. Однако в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения, тот прямой крест, который образуют направления электрического и магнитного полей, может быть ориентирован, вообще говоря, по-разному. В случае радиоволн, излучаемых прямолинейной антенной, ориентировка этого креста опреде-

ляется направлением самой антенны. В этом случае направление электрического поля волны всегда лежит в той же плоскости, в которой расположена сама антенна (рис. 2). Такая электромагнитная волна, электрическое, а значит, и магнитное поля которой все время сохраняют неизменными направления в пространстве, называется плоскополяризованной.

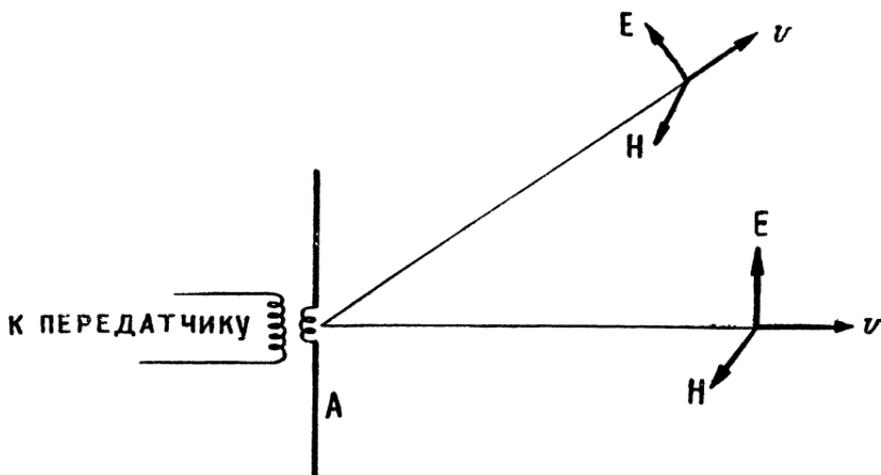


Рис. 2. Электрическое поле E радиоволны лежит в той же плоскости, в которой расположена излучающая эту радиоволну антенна, а магнитное поле H перпендикулярно к этой плоскости.

Радиопередатчики излучают обычно такие плоскополяризованные волны. Но в некоторых случаях возникают электромагнитные волны, направление электрического и магнитного полей которых может изменяться по определенному закону. В частности, в одном из типов волн прямой крест, который образован этими направлениями, вращается вокруг направления распространения волны так, что делает полный оборот за период волны. Такие волны называются поляризованными по кругу.

В других случаях изменение направления электрического и магнитного полей электромагнитной волны происходит нерегулярно, хаотически, т. е. в каждый данный момент крест направлений полей может быть ориентирован как угодно в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. Такая волна называется неполяризованной или естественной.

Рассмотрим теперь, как связаны между собой изменения во времени электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. В каждой точке пространства, в котором распространяется электромагнитная волна, происходят колебания напряженности электрического и магнитного полей, причем напряженности обоих полей изменяются не только по одному и тому же (гармоническому) закону, но и так, что в каждой точке пространства оба эти колебательных процесса одновременно проходят через одно и то же состояние — одну и ту же фазу колебательного процесса. Иначе говоря, колебания напряженностей электрического и магнитного полей в электромагнитной волне совпадают по фазе, или, как говорят, происходят синфазно.

Очевидно фаза этих обоих колебаний в волне, или, короче, фаза волны, в разных точках пространства, вообще говоря, будет различна. В самом деле, при распространении электромагнитных волн требуется время на то, чтобы какое-либо определенное состояние колебательного процесса распространилось из одной точки пространства в другую. Поэтому волна тем позже пройдет через данную фазу, чем дальше лежит рассматриваемая точка на пути распространения волны. Иначе говоря, между различными точками, лежащими на пути распространения волны, существует сдвиг фазы, тем больший, чем больше расстояние между этими точками.

Величину сдвига фаз можно найти из следующих простых соображений. Если волна распространяется со скоростью c , а расстояние между двумя рассматриваемыми точками на пути распространения волны есть d , то данная фаза придет из первой точки во вторую через время $\frac{d}{c}$ или через долю перио-

да, равную $\frac{d}{cT}$. Сдвиг фаз измеряется в углах, причем сдвиг фаз на полный период принимается равными 2π (360°).

Следовательно, угол сдвига фаз $\varphi = 2\pi \frac{d}{cT} = 2\pi \frac{d}{\lambda}$ (так как

$\lambda = cT$). Если расстояние между точками d как раз равно длине волны, то угол сдвига фаз равен 2π , т. е. запоздание по фазе равно целому периоду. Но по прошествии целого периода состояние в волне снова повторяется, следовательно, сдвиг фаз в волне на 2π или вообще на целое число, кратное 2π , означает, что напряженности полей в этих точках в каждый момент

равны по величине и направлению, — колебания происходят опять в одинаковой фазе. Если расстояние d между точками равно половине длины волны, то сдвиг фаз равен π (запаздание по времени равно полупериоду), и напряженности полей в этих точках в каждый данный момент равны по величине, но противоположны по знаку — колебания происходят в противофазе. Это же будет иметь место, если d равно не только половине длины волны, но и целому числу длин волн плюс одна полуволна, т. е. нечетному числу полуволн.

Прием радиоволн

Рассмотрим теперь, как осуществляется прием радиоволн, излучаемых радиопередатчиком. Если на пути распространения электромагнитной волны встречаются проводники электрического тока, то электромагнитное поле волны возбуждает в них колебания электрических зарядов, происходящие по тому же закону, как и колебания полей в волне. Эти колебания подобны колебаниям тех зарядов, которыми создана электромагнитная волна.

Проводники, специально предназначенные для приема радиоволн, называются приемными антеннами. Простейшая приемная антенна представляет собой прямолинейный проводник, расположенный таким образом, чтобы проходящая электромагнитная волна возбуждала в нем возможно более сильные токи. Для этого направление проводника должно совпадать с направлением электрического поля проходящей электромагнитной волны. Так как это поле всегда направлено перпендикулярно к направлению распространения волны, то, значит, проводник, служащий приемной антенной, должен быть расположен в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. При этом он должен быть ориентирован в этой плоскости так, чтобы его направление совпадало с направлением электрического поля волны (рис. 3).

Если это условие не соблюдается, т. е. антенна расположена под некоторым углом к направлению электрического поля волны, то прием ослабевает и тем сильнее, чем больше этот угол. Когда же этот угол становится равным 90° , то прием вовсе прекращается. Поэтому при приеме радиоволн, которые обычно являются плоскополяризованными, ориентировка провода антенны существенно влияет на силу приема. Если же принимаемые электромагнитные волны поляризованы по кругу или являются неполяризованными, то при любой ориенти-

ровке провода в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, будет получаться прием одинаковой силы (так как в поляризованной по кругу или в неполяризованной волне электрическое поле имеет всевозможные направления).

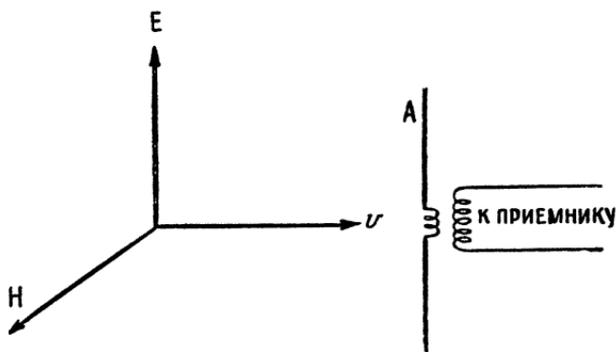


Рис. 3. Приемную антенну А выгодно располагать так, чтобы ее направление совпадало с направлением электрического поля Е принимаемой волны.

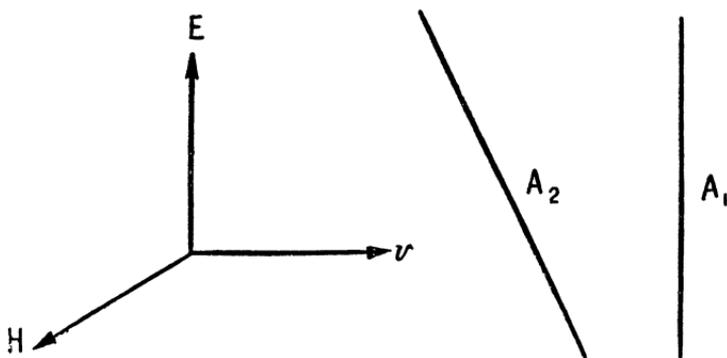


Рис. 4. Когда приемная антенна (A_2) не лежит в плоскости, перпендикулярной к направлению прихода волны, то прием слабее, чем в случае, когда антенна (A_1) лежит в этой плоскости.

Однако и в случае неполяризованной волны прямой проводник в зависимости от своего направления будет принимать эту волну по-разному. Если приемный провод не лежит в плоско-

сти, перпендикулярной к направлению распространения волны, т. е. образует некоторый угол с направлением электрического поля, то прием будет слабее, чем в случае провода, перпендикулярного к направлению распространения волны (рис. 4). Если провод направить прямо на передатчик, т. е. перпендикулярно к направлению электрического поля волны, то прием прекратится вовсе; иначе говоря, «с торца» прямолинейный проводник вообще не принимает радиоволн. Таким образом, даже простейшая антенна в виде прямолинейного проводника обладает различной способностью принимать радиоволны, проходящие из различных направлений, т. е. обладает некоторой направленностью приема.

Диаграммы направленности антенн

Направленность антенны удобно характеризовать графически. Для этого строятся так называемые диаграммы направленности. Представим себе, что передатчик, излучающий электромагнитные волны, мы перемещаем во всевозможных направлениях вокруг приемного провода так, что расстояние между ними не изменяется. Будем в каждом направлении откладывать отрезок, длина которого (в некотором условном масштабе) изображает ту мощность, которую приемный провод принимает от передатчика, лежащего в этом направлении (рис. 5). Тогда при перемещении передатчика вокруг прямолинейного приемного провода в перпендикулярной к нему плоскости сила приема не будет изменяться. Все отрезки будут иметь одинаковую длину и, соединив концы их плавной кривой, мы получим окружность, которая и представляет собой диаграмму направленности для данного случая.

При перемещении передатчика в плоскости, в которой лежит провод, картина получается сложнее и зависит от длины провода. Поэтому мы рассмотрим только простейший случай, когда длина приемного провода равна половине длины волны. Такие провода длиной в полволны, так называемые полуволновые вибраторы, применяются очень часто. Мы их дальше для краткости будем называть просто вибраторами.

Если перемещать передатчик в плоскости, в которой лежит вибратор, то прием будет наибольшим, когда передатчик лежит в направлении, перпендикулярном к вибратору, и упадет до нуля, когда передатчик будет лежать в направлении, совпадающем с направлением вибратора. Отложив во всех направлениях отрезки, изображающие силу приема, и сое-

динив их плавной кривой, мы получим «восьмерку», которая и представляет собой диаграмму направленности вибратора в его плоскости (рис. 6).

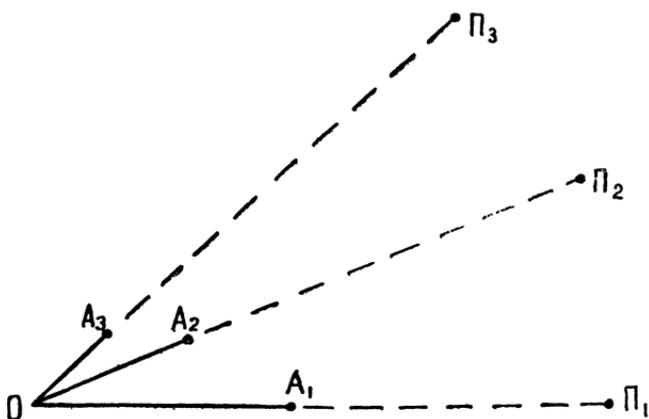


Рис. 5. Построение диаграммы направленности антенны В каждом направлении откладываются отрезки $OA_1; OA_2...$, длина которых в условном масштабе изображает мощность, принимаемую от лежащего в этом направлении передатчика $\Pi_{(1, 2, 3)}$ антенной, помещенной в точке О.

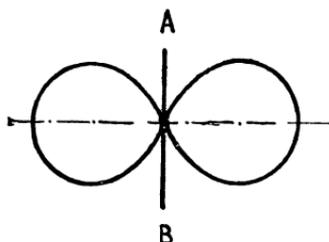


Рис. 6. Диаграмма направленности полуволнового вибратора АВ в плоскости самого вибратора имеет форму восьмерки.

Рассмотрим, какова будет диаграмма направленности не одного, а двух параллельных вибраторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга и присоединенных к приемнику кабелями одинаковой длины. Приходящая волна будет возбуждать на входе приемника колебания, сдвиг фаз между которыми будет равен разности фаз волны в точках расположения обоих вибраторов, так как в кабелях одинаковой длины обе волны испытывают одинаковый сдвиг фаз. В

точках расположения обоих вибраторов фазы волны будут различны, если волна из источника прошла до обоих вибраторов неодинаковые пути. Разность фаз волны в точках расположения обоих вибраторов зависит от разности этих путей, или, как говорят, от разности хода. Очевидно угол сдвига фаз

будет определяться тем же выражением, которое было приведено на стр. 10, если под d понимать разность хода.

Если источник радиоволн лежит очень далеко, т. е. расстояние до него очень велико по сравнению с расстоянием между обоими проводниками, то можно считать, что в точки А и В, где расположены вибраторы, волна пришла по параллельным направлениям. Тогда прямая АС, перпендикулярная к одному из направлений, перпендикулярна и к другому (рис. 7). Следовательно, от источника до этой прямой волна по обоим направлениям прошла одинаковые пути. Значит, разность хода равна тому дополнительному пути СВ, который проходит волна до точки В.

Легко видеть, что эта разность хода будет равна нулю, когда источник лежит на перпендикуляре к линии, соединяющей точки расположения обоих вибраторов, и будет увеличиваться по мере увеличения угла φ между этим перпендикуляром и направлением на источник.

(Разность хода также возрастает по мере увеличения расстояния между вибраторами). Наибольшая разность хода, которая может быть получена, равна, очевидно, расстоянию между вибраторами. Это будет в том случае, когда источник лежит на продолжении линии, соединяющей точки, в которых расположены вибраторы. Что же касается разности фаз волн в точках, где расположены оба вибратора, то она, как сказано, равна разности хода, умноженной на 2π и разделенной на длину волны; значит, при данной разности хода она тем больше, чем меньше длина волны.

После всего сказанного нетрудно построить диаграмму направленности для антенны, состоящей из двух соединенных вместе параллельных вибраторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Для этого нужно учесть, что

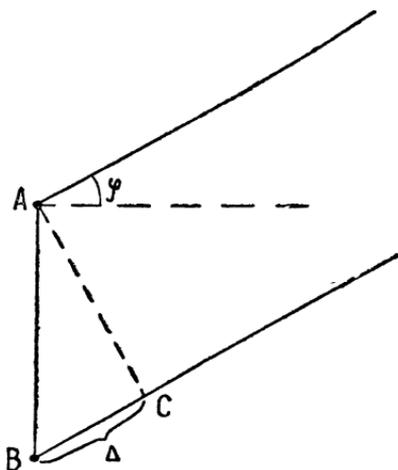


Рис. 7. Когда источник, излучающий радиоволны, находится очень далеко, разность хода Δ для точек А и В равна расстоянию между прямой АС, перпендикулярной к направлению распространения волны, и точкой В, т. е. отрезку СВ. Разность хода зависит от угла φ между направлением на источник и перпендикуляром к линии АВ.

когда разность фаз волны в точках, где расположены оба вибратора, равна нулю или целому числу волн, то колебания, возбуждаемые волной в обоих вибраторах будут происходить в одинаковой фазе и, складываясь, будут усиливать друг друга. Когда же разность фаз волны равна половине ее длины или нечетному числу полуволн, то колебания в двух вибраторах будут происходить в противофазе и, складываясь, уничтожат друг друга. При всех промежуточных значениях разности фаз колебания будут складываться с некоторым сдвигом по фазе и давать различные значения, отличные от нуля (всегда меньшие, чем те, которые получаются при сложении колебаний в фазе). Это явление взаимного усиления или ослабления волн, складывающихся с различными сдвигами фаз, называется интерференцией волн.

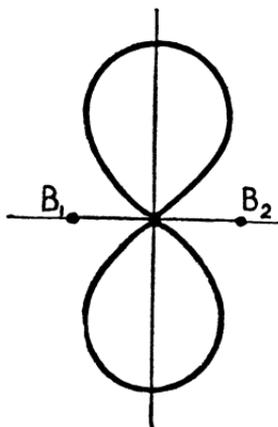


Рис. 8. Диаграмма направленности двух параллельных вибраторов V_1 и V_2 , находящихся на расстоянии полуволны друг от друга, имеет в плоскости, перпендикулярной к вибраторам, форму восьмерки.

Рассмотрим теперь диаграмму направленности двух вибраторов при различных расстояниях между ними. Начнем со случая, когда расстояние равно половине длины принимаемой волны. Если источник лежит на перпендикуляре к линии, соединяющей оба вибратора, разность хода, а значит, и разность фаз всегда равна нулю (независимо от длины волны и расстояния между вибраторами), т. е. прием будет наиболее сильным. По мере отклонения источника в обе стороны от перпендикуляра, разность фаз будет возрастать и, значит, сила приема падать. Для источника, лежащего на продолжении прямой, соединяющей оба вибратора, разность хода будет равна расстоянию между ними, т. е. половине длины волны, и колебания

будут складываться в противофазе, т. е. уничтожать друг друга, — прием упадет до нуля. При перемещении источника вокруг приемной антенны прием дважды достигнет максимума — на перпендикуляре к прямой, на которой лежат вибраторы, и дважды упадет до нуля — на продолжении этой прямой (рис. 8).

Значит, диаграмма направленности антенны, состоящей из двух параллельных вибраторов, расположенных на расстоянии

полволны, в плоскости, перпендикулярной к вибраторам, имеет вид «восьмерки», в то время как для одного вибратора в той же плоскости диаграмма направленности имеет вид окружности. Следовательно, переход от одного вибратора к двум придает антенне направленность в той плоскости, в которой один вибратор никакой направленностью не обладал (в плоскости, в которой лежат вибраторы, диаграмма направленности при переходе от одного к двум вибраторам не изменится).

Нетрудно сообразить, как будет изменяться диаграмма направленности при увеличении расстояния между вибраторами. Если увеличить это расстояние до целой длины волны, то при источнике, находящемся на продолжении прямой, соединяющей вибраторы, разность хода будет равна длине волны, и колебания в обоих проводах будут происходить синфазно. Следовательно, снова получим максимум приема так же, как и в направлении, перпендикулярном к прямой, соединяющей оба вибратора. Где-то между этими направлениями будет лежать такое направление, в котором разность хода будет равна половине длины волны, колебания будут складываться в противофазе и приема не будет. Вместо «восьмерки» получится более сложная диаграмма направленности с четырьмя максимумами и четырьмя минимумами (рис. 9).

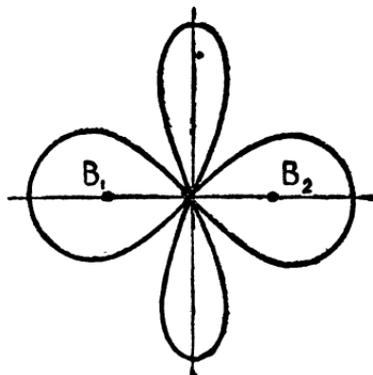


Рис. 9. Диаграмма направленности двух параллельных вибраторов B_1 и B_2 , находящихся на расстоянии длины волны друг от друга, имеет в плоскости, перпендикулярной к вибраторам, четыре лепестка.

При дальнейшем увеличении расстояния между вибраторами число максимумов и минимумов будет возрастать, и при расстоянии между вибраторами, равном большому числу волн, диаграмма будет иметь много максимумов и минимумов, т. е. будет состоять из большого числа отдельных «лепестков» (рис. 10). Угловая ширина («раствор») каждого из лепестков такой многолепестковой диаграммы тем меньше, чем больше число волн, которое укладывается на расстоянии между вибраторами. Например, если расстояние между вибраторами равно 500 длинам волн, то раствор наиболее острого лепестка (в направлении

перпендикуляра к линии, соединяющей оба вибратора) составляет около 6 угловых минут. Такие системы с многолепестковыми диаграммами широко применяются в радиоастрономии.

Вместо двух отдельных вибраторов практически применяются более сложные антенны¹, разнесенные на значительное

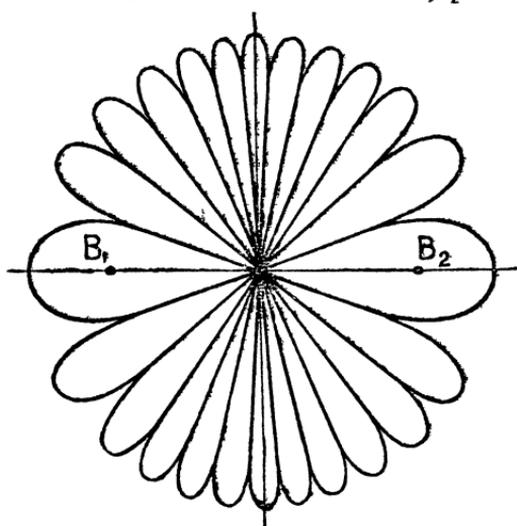


Рис. 10. Два вибратора B_1 и B_2 , находящиеся на расстоянии многих длин волн, в плоскости, перпендикулярной к вибраторам, имеют многолепестковую диаграмму (на рисунке изображена диаграмма для расстояния между вибраторами, равного 6 длинам волн).

расстояние. Поскольку многолепестковая диаграмма получается в результате интерференции волн, такие установки получили название радиоинтерферометров.

Методы повышения направленности антенн

Рассмотрим теперь, как будет меняться диаграмма направленности антенны при увеличении числа вибраторов в ней. Например, для антенны, состоящей из четырех вибраторов, лежащих на одной прямой на расстоянии полволны друг от друга (рис. 11), максимум приема будет

получаться в тех направлениях, в которых колебания, возбуждаемые во всех четырех вибраторах, будут происходить в одинаковой фазе, т. е. опять-таки, когда источник лежит на перпендикуляре к линии, соединяющей все четыре вибратора.

По мере удаления источника от этого направления будет появляться сдвиг фаз между колебаниями в разных вибраторах, и сила приема будет убывать. Но минимум наступит не тогда, когда источник дойдет до направления, являющегося продолжением прямой, на которой лежат все вибраторы (как это имело место в случае антенны из двух вибраторов, лежа-

¹ Почему выгодно применять не отдельные вибраторы, а более сложную антенну больших размеров, будет ясно из дальнейшего.

щих на расстоянии в полволны), а раньше. В этом нетрудно убедиться на основании следующих соображений.

Антенну, состоящую из четырех вибраторов, расположенных на расстоянии полволны друг от друга, можно рассматривать как две антенны, «вставленные» одна в другую (рис. 11). Первая антенна состоит из вибраторов V_1 и V_3 , а вторая—из вибраторов V_2 и V_4 .

Расстояние между двумя смежными вибраторами этих двух антенн равно половине длины волны. Для такой антенны где-то между прямой, соединяющей оба вибратора, и перпендикуляром к этой прямой, лежит направление, в котором прием падает до нуля. Но если каждая такая антенна не дает приема в этом направлении, то и будучи соединены вместе, они также не дадут приема, т. е. мы получим первый минимум на диаграмме направленности.

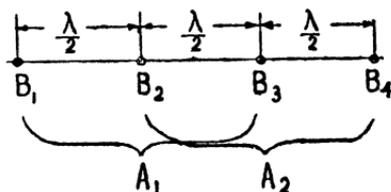


Рис. 11. Антенну из четырех вибраторов V_1, V_2, V_3, V_4 , находящихся на расстоянии полволны друг от друга, можно рассматривать как две антенны A_1 и A_2 , «вставленные» одна в другую, с расстоянием в целую волну между вибраторами в каждой антенне.

Если источник лежит на продолжении прямой, соединяющей вибраторы, то в вибраторах V_1 и V_3 первой антенны колебания будут в фазе, и одна эта антенна дала бы максимум приема. Точно так же и вторая антенна (вибраторы V_2 и V_4) одна дала бы максимум приема. Но в этих двух антеннах колебания будут происходить в противофазе (так как соответственные вибраторы двух антенн сдвинуты друг относительно друга на полволны) и, следовательно, уничтожат друг друга. Значит, в направлении прямой, соединяющей все вибраторы, получится второй минимум на диаграмме направленности. Правда, между этими двумя минимумами будет лежать максимум, но он будет гораздо слабее того максимума, который получается в направлении перпендикуляра к линии, соединяющей провода антенн. В конечном счете мы получим диаграмму направленности, состоящую из двух «главных» лепестков (значительно более узких, чем в случае антенны, состоящей из двух вибраторов, расположенных на расстоянии полволны) и двух слабых побочных лепестков, которые вообще не играют большой роли (рис. 12). Таким образом, при переходе от двух вибраторов к четырем, направленность антенны существенно возрастает.

Подобными же рассуждениями можно показать, что дальнейшее увеличение числа вибраторов, например, переход от четырех к восьми, дает еще более узкий главный лепесток, а появляющиеся дополнительные побочные лепестки оказываются все более и более слабо выраженными. Увеличивая число отдельных вибраторов, из которых состоит антенна, т. е. в конечном счете увеличивая размеры антенны (так как расстояние

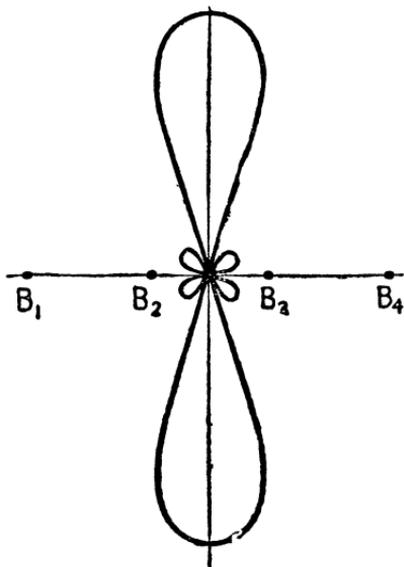


Рис. 12. Диаграмма направленности антенны из четырех вибраторов, с расстоянием в полволны между ними, в плоскости, перпендикулярной к вибраторам.

между соседними вибраторами остается прежним — полволны), можно получить достаточно узкие главные лепестки, а следовательно, и большую направленность антенны.

Выясним, как зависит угол раствора главного лепестка диаграммы направленности антенны от ее размеров. Острота диаграммы направленности определяется тем, как близко к направлению главного максимума (т. е. к оси главного лепестка) лежит направление минимума. Удвоенный угол между этими направлениями и представляет собой угол раствора главного лепестка. Следовательно, для ответа на поставленный вопрос нужно определить, от чего зависит направление минимума, ограничивающего главный лепесток.

На примере антенны, состоящей из четырех вибраторов, мы убедились, что первый минимум лежит в направлении, для которого разность хода между вибраторами B_1 и B_3 (и между вибраторами B_2 и B_4) равна половине длины волны. Это справедливо и для большого числа вибраторов, если их можно так скомбинировать попарно, чтобы для каждой пары разность хода была равна половине длины волны. Но если разность хода для крайних вибраторов равна длине волны, то всегда можно так разбить всю антенну на группы «вставленных» друг в дру-

га антенн, чтобы разность хода между двумя вибраторами одной антенны была бы равна половине длины волны, подобно тому, как мы это сделали для антенны из четырех вибраторов. Тогда каждая из таких антенн не даст приема в этом направлении, а значит, и вся антенна в целом в этом направлении будет иметь минимум. Таким образом, если d — расстояние между крайними вибраторами, то направление, в котором лежит минимум, образует с направлением главного максимума угол φ , определяющийся из соотношения¹ $\varphi = \frac{\lambda}{d}$. Следовательно, полный

раствор главного лепестка $2\varphi = 2 \frac{\lambda}{d}$ радиан.

В рассмотренных антеннах диаграмма направленности получается симметричной относительно плоскости, в которой расположены вибраторы. Так как «задние» лепестки антенны обычно не используются для приема, то для их уничтожения, на некотором расстоянии позади вибраторов, помещают плоскую поверхность (сплошную металлическую или из отдельных проводов), отражающую радиоволны. Вследствие этого волны, приходящие сзади, не достигают вибраторов, и задние лепестки

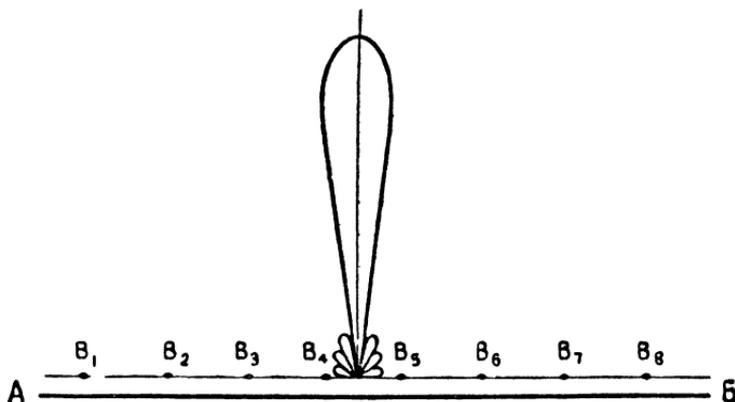


Рис. 13. Диаграмма направленности антенны из восьми вибраторов V_1 — V_8 с плоским отражателем АБ в плоскости, перпендикулярной к вибраторам.

уничтожаются. Вместе с тем в результате отражения от этой поверхности приходящих спереди волн прием на передние лепестки

¹ Если угол φ мал, то синус этого угла можно заменить самим углом, выраженным в радианах.

стки антенны еще более усиливается. Антенна с плоским отражателем имеет диаграмму только с одним, а не с двумя главными лепестками (рис. 13).

Такие антенны, состоящие из большого числа вибраторов, расположенных над плоским отражателем, широко применяются в радиоастрономии.

Спектр электромагнитного излучения

Колебания электрических зарядов могут происходить с гораздо более высокими частотами чем те, которые создаются в антеннах радиопередатчиков и соответствуют наиболее коротким (миллиметровым) радиоволнам. Вместе с тем и возбуждаемые этими колебаниями электромагнитные волны будут иметь гораздо меньшую длину, чем самые короткие радиоволны. Правда, мы пока не умеем создавать непосредственно в электрических цепях колебания электрических зарядов сколько угодно высокой частоты, а значит, и не можем получать таким способом электромагнитные волны значительно более короткие, чем миллиметровые. Наибольших успехов в направлении получения коротких волн достигли отечественные ученые: П. Н. Лебедев получал электромагнитные волны длиной примерно до 1 мм, а А. А. Глаголева-Аркадьева — до 0,1 мм.

Очень быстрые колебания электрических зарядов могут возникать под влиянием различных причин, и в этих случаях возникают электромагнитные волны, гораздо более короткие, чем самые короткие радиоволны. Например, в молекулах могут происходить колебания отдельных атомов, а так как атом состоит из электрически заряженных частиц (ядра и электронов), взаимное расположение которых при колебаниях изменяется, то возникает электромагнитное излучение с длиной волны в несколько микрон (микрон — одна тысячная миллиметра) или десятков микрон, т. е. лежащее в области инфракрасных волн. Излучение отдельных атомов может лежать в области инфракрасных волн (длина волны от 100 до 0,7 микрона), видимого света (от 0,7 до 0,4 микрона), ультрафиолетовых лучей (от 0,4 до 0,01 микрона) и, наконец, рентгеновых лучей (от 0,01 до 0,0001 микрона). Еще более короткие волны (менее 0,0001 микрона), так называемые гамма-лучи, возникают при распаде ядер радиоактивных элементов.

Следует отметить, что электромагнитное излучение атомов лишь для наглядности можно представлять себе, как излучение, возникающее непосредственно в результате колебаний электрических зарядов. В действительности процесс возникно-

вения излучения сложнее, и длина волны этого излучения определяется не частотой колебаний зарядов, а другими условиями. Однако с внешней стороны дело обстоит так, как будто в атомах происходят периодические колебания зарядов, вследствие чего возникает излучение с вполне определенной длиной волны.

Периодические колебания электрических зарядов хотя и важный, но специальный случай движения зарядов с переменным ускорением. Очень часто электрически заряженные частицы (электроны, ионы), двигаясь, испытывают ускорения, которые изменяются не периодически, например, при столкновении частиц между собой. При этом ускорение заряженной частицы быстро меняется; возникающее электромагнитное излучение является кратковременным и не периодическим. Поэтому такие отдельные импульсы электромагнитного излучения не имеют какой-либо определенной длины волны. Но излучение, составленное из отдельных кратковременных импульсов, можно рассматривать как «набор» электромагнитных волн всевозможных длин.

Весь «набор» электромагнитных волн разной длины, которые входят в состав данного излучения, называется спектром этого излучения. Каждая волна определенной длины, входящая в состав излучения, называется отдельной спектральной линией¹. Следовательно, электромагнитное излучение одной определенной длины волны имеет спектр, содержащий только одну спектральную линию; электромагнитное излучение, содержащее несколько волн различной длины, имеет спектр, состоящий из соответствующего числа отдельных спектральных линий. Такой спектр называется линейчатым. Излучение же, состоящее из множества кратковременных импульсов, каждый из которых можно представить, как набор волн всевозможной длины, имеет спектр, содержащий бесконечное число линий, сливающихся друг с другом. Такой спектр называется сплошным.

Поскольку излучение, имеющее сплошной спектр, содержит всевозможные длины волн, полная энергия этого излучения распределена между всеми составляющими его волнами. Но распределение энергии между отдельными волнами может быть неравномерным: одни длины волн представлены в излу-

¹ Это название возникло потому, что в спектроскопе при наблюдении видимого света, в тех случаях, когда в его состав входят только некоторые волны определенной длины, получаются отдельные линии различных цветов, соответствующие различным длинам волн.

чении сильнее, и на их долю приходится больше энергии, другие слабее, и на их долю приходится меньше энергии.

Распределение энергии по спектру зависит от характера тех импульсов, из которых состоит излучение. Чем «острее» отдельные импульсы излучения, тем бóльшая доля энергии излучения приходится на коротковолновую часть спектра. Характер же самих импульсов зависит от того, как быстро изменяется ускорение зарядов, создающих электромагнитное излучение (чем быстрее изменяется ускорение заряда, тем острее импульсы). Поэтому электромагнитное излучение, имеющее сплошной спектр, может иметь совершенно различное распределение энергии по спектру.

Тепловое электромагнитное излучение

Рассмотренный процесс возникновения отдельных кратковременных импульсов излучения при резком торможении электрических зарядов является причиной существования так называемого теплового электромагнитного излучения, имеющего сплошной спектр.

Картину возникновения теплового излучения и его свойства рассмотрим сначала для случая, когда источником излучения является тело, обладающее способностью поглощать все падающее на него электромагнитное излучение, независимо от длины волны. Тело, обладающее такой способностью, принято называть черным телом. В природе нет тел, способных полностью поглощать все падающее на них излучение. Поэтому черное тело — это воображаемое тело, к свойствам которого лишь приближаются свойства некоторых реальных тел (например, сажи).

Поглощение электромагнитного излучения любой длины волны, проникшего в тело, может происходить в том случае, если тело содержит большое число «свободных» электронов, т. е. электронов, слабо связанных с атомами. Тогда под действием проникших в тело электромагнитных волн «свободные» электроны будут приобретать некоторую скорость, и энергия электромагнитных волн будет превращаться в кинетическую энергию электронов. Но при соударении с атомами электроны будут отдавать накопленную ими энергию и приводить атомы в беспорядочное колебательное движение, т. е. нагревать тело. Таким образом, вся энергия электромагнитного излучения будет превращаться в теплоту. Так происходит поглощение

энергии в телах, которые по своим свойствам близки к черному телу.

Посмотрим теперь на эту же картину с другой стороны. Если в теле содержится большое количество «свободных» электронов, которые слабо связаны с атомами, то они все время находятся в хаотическом тепловом движении. При соударении с атомами тела эти хаотически движущиеся электроны испытывают резкое торможение, вследствие чего возникает электромагнитное излучение в виде отдельных коротких импульсов. Так как это излучение обуславливается тепловым движением электрических зарядов, его называют тепловым (или температурным) электромагнитным излучением. Энергия теплового излучения заимствуется из кинетической энергии, которой обладают электроны вследствие хаотического движения и которую они отдают в виде электромагнитного излучения. При этом, очевидно, энергия хаотического движения уменьшается и, значит, температура тела понижается. Следовательно, в результате теплового излучения излучающее тело остывает.

Таким образом, электромагнитное излучение обуславливает тепловой обмен между телами, так как тело, поглощающее электромагнитное излучение, нагревается, и, наоборот, тело, испускающее электромагнитное излучение, охлаждается. Если между телами нет какой-либо среды, например, воздуха, в котором тепловой обмен может происходить другими способами (за счет теплопроводности или конвекции), то электромагнитное излучение является единственным средством теплового обмена между телами. В случае космических тел, разделенных огромными пространствами, заполненными чрезвычайно разреженной средой, именно этот случай имеет место.

Как известно, тепловой обмен между телами во всех случаях (в том числе и когда он осуществляется только путем электромагнитного излучения) может происходить только в одном направлении — от тела более горячего к телу более холодному, причем более холодное тело нагревается, а более горячее остывает. В случае же если температуры тел равны, тепловой обмен прекращается. Но ведь тепловое излучение каждого из тел должно существовать независимо от того, какова температура другого тела. Значит, тепловой обмен между двумя телами, находящимися при одинаковой температуре, может прекратиться только потому, что каждое из тел, продолжая излучать электромагнитную энергию, получает от другого тела столько же электромагнитной энергии, сколько оно

излучает. Отсюда сразу следует важный вывод: тело способно излучать электромагнитную энергию, только если оно поглощает падающую на него электромагнитную энергию.

В самом деле, допустим, что это не так и что существуют такие тела, которые способны излучать электромагнитную энергию, но не способны поглощать ее, и, наоборот, такие тела, которые способны поглощать энергию, но не способны ее излучать. Тогда два таких тела—первое только излучающее и второе только поглощающее, — находясь вначале при одинаковой температуре, дальше вели бы себя следующим образом. Первое тело, излучая, охлаждалось бы, а второе, поглощая это излучение, нагревалось бы. Температура первого понижалась бы, а второго повышалась. Иначе говоря, происходил бы переход тепла от тела более холодного к более горячему, что невозможно. Значит, не может существовать тел, которые способны испускать электромагнитное излучение, не поглощая его, или поглощать излучение, не испуская его.

Все тела способны испускать электромагнитное излучение лишь постольку, поскольку они его поглощают. Этот чрезвычайно важный закон справедлив не только для всего спектра электромагнитного излучения, но и для отдельных участков спектра. Поэтому его можно применить не только к телам, близким к черному телу, но и существенно от него отличающимся. Если тело полностью прозрачно в каком-либо участке спектра, т. е. вовсе не поглощает электромагнитных волн, лежащих в этом участке спектра, то оно и не излучает этих волн — в спектре его теплового излучения эти волны отсутствуют. Если тело только частично прозрачно, т. е. только частично поглощает падающее на него излучение, то оно и излучает соответственно слабее, чем тело, полностью поглощающее, т. е. чем черное тело. Однако в случае частично поглощающих тел существенную роль играет их толщина (размер в направлении распространения излучения). Если какая-либо среда частично поглощает падающее на нее излучение, то в достаточно толстом слое это излучение полностью поглотится. Значит, этот достаточно толстый слой будет давать такое же тепловое излучение, какое дает черное тело.

Спектр теплового излучения

Рассмотрим теперь, как для тел, по своим свойствам близких к черному телу, характер теплового излучения зависит от температуры. Чем выше температура тела, тем быстрее дви-

жуются электроны, поэтому тем больше происходит столкновений и тем резче при этом меняется ускорение. Вследствие этого возрастает и энергия каждого отдельного импульса электромагнитного излучения и число этих импульсов. Вместе с тем и каждый отдельный импульс становится острее. Все это приводит к тому, что при повышении температуры тела быстро растет общая энергия теплового излучения и изменяется его спектральный состав: спектр распространяется в сторону более коротких волн и изменяется распределение энергии по спектру.

Характерной чертой теплового излучения является наличие максимума в распределении энергии по спектру. При данной температуре тела максимум в кривой распределения энергии по спектру приходится на некоторую определенную длину волны. В сторону более коротких волн энергия, приходящаяся на одинаковые малые участки спектра, быстро уменьшается — кривая распределения быстро падает. Поэтому со стороны коротких волн спектр теплового излучения имеет сравнительно резкую границу. В сторону же более длинных волн от максимума энергия, приходящаяся на отдельные участки спектра, уменьшается медленнее — кривая распределения спускается более полого. При повышении температуры тела кривая распределения энергии становится более острой, а вместе с тем максимум этой кривой смещается в сторону более коротких волн. Это значит, что при повышении температуры тела энергия излучения быстрее всего растет на участке, соответствующем максимуму излучения, и сам этот участок перемещается в сторону более коротких волн (рис. 14).

При низкой температуре, для которой максимум кривой распределения лежит еще далеко в инфракрасной области, тело не только дает слабое электромагнитное излучение, но в спектре этого излучения практически отсутствуют волны коротче определенной длины. Например, при температуре в 700° абсолютной шкалы¹ в спектре теплового излучения практически еще отсутствуют волны, лежащие в области видимого света, и поэтому тело не светится. Спектр теплового излучения тела, нагретого до указанной температуры, начинается примерно от длины волны в 1 микрон (т. е. инфракрасных волн, близких к границе видимого света).

¹Абсолютной шкалой температур называется шкала в которой отсчет температуры ведется от абсолютного нуля, т. е. от минус 273°C . Эту шкалу называют шкалой Кельвина и обозначают буквой К.

Максимум энергии в этом спектре лежит в области около четырех микрон; в сторону более длинных волн энергия, приходящаяся на отдельные участки спектра, постепенно уменьшается. Однако это уменьшение происходит более плавно, чем в сторону коротких волн, и поэтому электромагнитное излучение тела при температуре 700° может быть обнаружено (при

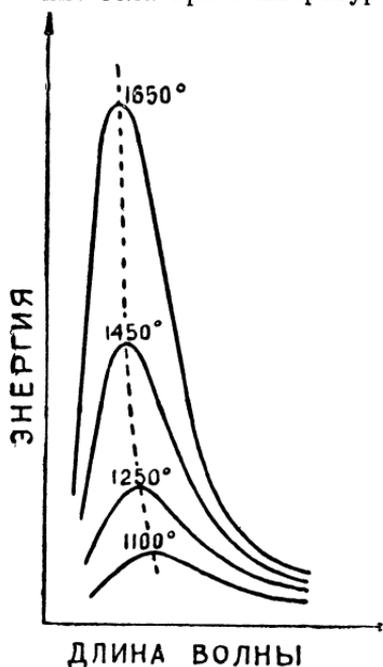


Рис. 14. Кривые распределения энергии по спектру для теплового излучения черного тела при разных температурах. Пунктирная кривая указывает, как смещается максимум энергии при изменении температуры.

наличии чувствительных приемников) не только в инфракрасной области, но и в области радиоволн, вплоть до сравнительно длинных метровых волн. При повышении температуры тела общая мощность излучения возрастает, и спектр излучения развивается в сторону более коротких волн, поэтому тело светится все сильнее и сильнее; цвет этого свечения постепенно изменяется от темнокрасного до белого.

При повышении температуры быстрее всего растет энергия в той области спектра, куда перемещается максимум энергии, т. е. в коротковолновой части спектра. В длинноволновой же части энергия излучения возрастает гораздо медленнее. В частности, в области радиоволн энергия возрастает пропорционально температуре, в то время как в области максимума энергия растет пропорционально пятой степени температуры.

Из сказанного следует, что обнаружить тепловое излучение в области видимого света, т. е. обнаружить свечение тела, можно только в том случае, если оно нагрето до достаточно высокой температуры. Обнаружить же тепловое излучение в диапазоне радиоволн можно и от тел, не только нагретых, но и холодных. Поясним это следующим примером. При нагревании тела примерно до 800°K глаз только начинает улавливать его свечение. Вместе с тем радиоприемники вполне мо-

гут обнаружить тепловое излучение нагретого до 800°K тела в диапазоне сантиметровых волн, если оно вообще обладает способностью излучать волны этого диапазона (т. е. если для этого диапазона оно не полностью прозрачно). Положим теперь, что мы охладили это тело до температуры в 100 раз меньшей, т. е. до 8°K (примерно минус 265°C). Тогда энергия излучения в максимуме уменьшится в 100^5 , т. е. в 10^{10} раз (так как она пропорциональна пятой степени температуры), кроме того, и сам максимум сместится далеко в инфракрасную область. Поэтому энергия излучения в области видимого света уменьшится еще больше, чем в 10^{10} раз, и никаким самым чувствительным приемником светового излучения (заметим кстати, что среди таких приемников глаз является одним из самых чувствительных) нельзя будет обнаружить свечение этого тела.

В области радиоволн энергия излучения уменьшится пропорционально первой степени температуры, т. е. только в 100 раз, и поэтому оказывается возможным обнаружить тепловое излучение глубоко охлажденного тела.

Таким образом, тепловое излучение тел в диапазоне сантиметровых волн может быть обнаружено даже в том случае, когда это тело имеет температуру, близкую к абсолютному нулю. На первый взгляд это кажется поразительным. Но по существу ничего непонятного в этом нет. Ведь и при температурах, близких к абсолютному нулю, существует тепловое движение электронов в телах, а значит, и тепловое электромагнитное излучение. И хотя общая энергия этого излучения мала, но зато почти вся она приходится на область радиоволн (максимум излучения при этой температуре приходится на длину волны около $0,4\text{ мм}$). Поэтому с помощью достаточно чувствительных радиоприемников это излучение может быть обнаружено.

В случае тел, по своим свойствам существенно отличающихся от черного тела, все обстоит гораздо сложнее, так как сама способность тел поглощать и испускать электромагнитное излучение может в этом случае зависеть от температуры. Но если тело полностью поглощает волны, лежащие в каком-то достаточно большом участке спектра, т. е. ведет себя в этой области как черное тело, то мощность излучения в этом участке примерно такая же и изменяется с температурой почти так же, как и в случае черного тела.

Наряду с тепловым излучением могут возникать и другие типы электромагнитных излучений, имеющие в некоторой об-

ласти сплошной спектр. Например, колебания электронов и ионов в ионизированном газе, возникающие под действием различных причин, нарушающих «электрическое равновесие» в нем, могут быть источником электромагнитного излучения. Поскольку эти колебания вызваны не собственным тепловым движением электронов, а какими-то внешними причинами (например, движением потока заряженных частиц сквозь этот газ), то обусловленное этими колебаниями электромагнитное излучение не является тепловым. Частота этих колебаний зависит от состояния ионизированного газа, и если оно в разных местах неодинаково, то газ в целом может излучать волны весьма различной длины, т. е. может давать излучение с сплошным спектром, занимающим достаточно широкую полосу.

Электромагнитное излучение с сплошным спектром, занимающим широкую полосу, может возникать также при быстром движении электрически заряженных частиц в магнитных полях. Так как магнитное поле действует на движущиеся заряды с некоторой силой, перпендикулярной к направлению их движения, то траектории зарядов искривляются, т. е. заряды движутся с переменным ускорением, вследствие чего возникает электромагнитное излучение, длина волны которого зависит от скорости частиц. Если в магнитном поле движутся частицы с достаточно большими, но различными скоростями, то они излучают волны разной длины и общее их излучение имеет сплошной спектр, занимающий достаточно широкую полосу.

Чтобы закончить рассмотрение свойств электромагнитного излучения, коснемся еще вопроса о поляризации этого излучения. Как указывалось, при излучении радиоволн поляризация излучения определяется направлением колебаний зарядов, создающих эти волны. Именно потому, что заряды в антенне колеблются в определенном направлении (вдоль прямолинейного провода), они создают плоскополяризованные волны. В случае же теплового движения, когда электроны движутся хаотически, по всевозможным направлениям, они создают тепловое излучение, в котором направление электрического поля изменяется хаотически, т. е. поле может быть направлено как угодно. Следовательно, тепловое излучение, вообще говоря, должно быть естественным (неполяризованным).

Однако под действием магнитного поля хаотическое движение электронов приобретает некоторую регулярность вследствие того, что все траектории электронов искривляются полем,

и электроны начинают двигаться по окружностям или винтовым линиям. Поэтому в направлении поля электроны будут давать излучение, поляризованное по кругу (в других направлениях картина будет более сложной). Под действием магнитного поля электромагнитное излучение в некоторых случаях может оказаться и плоскополяризованным.

Мощность источника электромагнитного излучения, имеющего сплошной спектр, можно характеризовать эффективной температурой источника, т. е. той температурой, при которой черное тело излучало бы в данном участке спектра ту же мощность, которую излучает источник. Так как для черного тела мощность электромагнитного излучения на данном участке спектра однозначно связана с температурой (определяется кривой распределения энергии по спектру), то, указывая температуру черного тела, т. е. эффективную температуру, мы тем самым определяем мощность радиоизлучения.

Следует иметь в виду, что эффективная температура источника не обязательно совпадает с истинной его температурой. Она может быть меньше истинной, если излучающее тело по своим свойствам существенно отличается от черного и на данном участке спектра излучает меньше, чем черное тело. Но эффективная температура может быть и выше истинной температуры источника, если электромагнитное излучение не является тепловым (а обусловлено какими-либо другими причинами) и мощность его значительно больше той, которая соответствует излучению черного тела данной температуры.

Лекция 2-я

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Возникновение радиоастрономии

Из всего изложенного следует, что космические тела должны давать тепловое электромагнитное излучение в диапазоне радиоволн. Весь вопрос заключается в том, возможно ли наблюдать это радиоизлучение на Земле. Три обстоятельства решают этот вопрос. Во-первых, интенсивность этого излучения у границы земной атмосферы, во-вторых, прозрачность атмосферы для рассматриваемого излучения, и, в-третьих, чувствительность приемников излучения. Ясно, что первые два из этих обстоятельств ни в какой мере не зависят от нас и опре-

деляются самой природой. Что же касается третьего обстоятельства, то оно в значительной степени зависит от уровня техники приема радиоволн. Правда, и для чувствительности радиоприемных устройств существуют некоторые принципиальные пределы, определяемые самой природой явлений, происходящих в этих устройствах. Но пока этот предел не достигнут, чувствительность приемных устройств может быть повышена, и она непрерывно повышается по мере развития радиотехники.

Именно развитие радиотехники и усовершенствование радиоприемных устройств в годы, непосредственно предшествовавшие второй мировой войне, и особенно в годы войны (главным образом в связи с развитием радиолокации), сделали возможным прием радиоизлучения космических тел. Было обнаружено радиоизлучение Солнца, а затем и других космических объектов — всей Галактики¹ в целом, отдельных туманностей, Луны², межзвездной материи.

При этом выяснилось, что помимо радиоизлучения теплового происхождения в некоторых случаях наблюдается излучение, имеющее иную (не тепловую) природу. Но во всех случаях наблюдение радиоизлучения космических объектов дает много новых и исключительно важных сведений о строении космических тел и процессах, в них происходящих.

Так возникла новая наука — радиоастрономия, превратившаяся сейчас в одну из важных и быстро развивающихся областей астрономии. Этому быстрому развитию способствовали усилия радиофизиков, много сделавших для создания специальной радиоастрономической аппаратуры и усовершенствования методов радиоастрономических наблюдений. За последние годы было создано много типов специальных ра-

¹ Галактикой называется та звездная система, состоящая из огромного количества звезд, в которую входит, в частности, Солнце. В пределах Галактики помимо звезд заключено также большое количество туманностей, и вся она заполнена разреженным межзвездным газом. Все звезды Галактики сосредоточены главным образом в области, имеющей форму очень сильно сплюсненной сферы. Поэтому все далекие звезды Галактики, сливаясь вместе, видны на небе в виде сплошной светлой полосы — так называемого Млечного пути.

Первые указания о наличии радиоизлучения Галактики были получены еще в 1931 году на волнах длиной около 15 м.

² Радиоизлучение Луны удалось наблюдать на волнах сантиметрового диапазона. Эффективная температура Луны на этих волнах порядка 100—200° К, т. е. много ниже 0°С. Радиоизлучение Луны является тепловым, и здесь мы имеем как раз тот случай, когда наблюдается тепловое радиоизлучение холодного тела.

диоприемных устройств, предназначенных для приема радиоизлучения космических объектов. Эти специальные приемные устройства получили название радиотелескопов.

Наряду с исследованием собственного радиоизлучения космических объектов наметились и другие возможности применения радиофизических методов в астрономии. Так, например, оказалось возможным наблюдать радиоизлучение, посылаемое мощными радиопередатчиками с Земли и отраженное от небесных тел. Уже удалось наблюдать радиоволны, отраженные от Луны, а в дальнейшем, по мере усовершенствования аппаратуры, повидимому, удастся наблюдать радиоволны, отраженные и от других небесных тел, например, от планет.

Этот метод наблюдения отраженных радиоволн нашел широкое применение в метеорной астрономии. Метеорные тела, влетая с большой скоростью в атмосферу Земли и сгорая в атмосфере, оставляют за собой следы, которые не только светятся, но и обладают способностью отражать радиоволны. Обусловлено это отражение тем, что под влиянием высокой температуры в следах метеоров возникает сильная ионизация—из нейтральных молекул образуются положительно и отрицательно заряженные частицы (ионы и электроны). Поэтому радиоволны, посылаемые с Земли, отражаются от метеорных следов, и таким образом удастся наблюдать метеоры тогда, когда их оптически наблюдать невозможно (днем и в пасмурную погоду), определять скорости метеоров, направления, по которым они приходят на Землю, и т. д.

Таким образом, наряду с наблюдением собственного радиоизлучения небесных тел, в радиоастрономии развиваются и другие методы исследований, которые основаны на наблюдении радиоволн, посылаемых с Земли и отражающихся от исследуемых объектов, т. е. методы, применяемые в радиолокации. Однако основным и наиболее важным направлением в радиоастрономии является исследование собственного радиоизлучения небесных тел. Именно это направление дало уже огромное количество новых сведений о небесных телах, стало мощным средством изучения Вселенной. Поэтому в дальнейшем мы сосредоточим наше внимание только на этом основном направлении современной радиоастрономии — наблюдении собственного радиоизлучения космических объектов. Это направление является прямым продолжением того направления, в котором развивалась астрономия вообще за все время своего существования.

Источником всех сведений о космических объектах в астрономии прежде служили наблюдения за их электромагнитным излучением, лежащим главным образом в области видимого света и отчасти в ультрафиолетовой области, непосредственно примыкающей к границе видимого света, и в некоторых участках инфракрасной области, т. е. в конечном счете в диапазоне, охватывающем очень небольшую часть всего обширнейшего спектра электромагнитных волн.

Развитие радиоастрономии позволило значительно расширить область спектра, которая используется для наблюдений электромагнитного излучения космических объектов.

Однако возможность наблюдения электромагнитного излучения космических объектов в различных областях спектра существенно зависит от второго обстоятельства, указанного в начале этого раздела, а именно — от степени прозрачности атмосферы для того или иного участка спектра электромагнитных волн.

Электромагнитное излучение и земная атмосфера

Расширение используемой для астрономических наблюдений области спектра электромагнитных волн в сторону более коротких ультрафиолетовых волн крайне затруднено тем, что земная атмосфера сильно поглощает эти волны. Поэтому наблюдать с Земли, т. е. сквозь всю толщу атмосферы, излучение космических тел, лежащее в области коротких ультрафиолетовых волн, практически невозможно. Исследовать эту область спектра излучения небесных тел можно только на приборах, поднятых так высоко над поверхностью Земли, чтобы наблюдаемое излучение мало поглощалось слоями атмосферы, лежащими выше приборов. Для этого приборы должны быть подняты на высоту многих десятков километров (такие наблюдения сейчас осуществляются с помощью ракет).

Расширение области спектра электромагнитных волн, используемых для астрономических наблюдений, в сторону более длинных инфракрасных волн наталкивается на те же препятствия. Почти все инфракрасные волны тоже очень сильно поглощаются атмосферой за исключением отдельных небольших участков спектра волн, для которых атмосфера достаточно прозрачна.

Таким образом, возможности астрономии жестко ограничены тем, что лишь немногие «окна» открыты в атмосфере для отдельных участков всего спектра электромагнитных волн,

если не считать области радиоволн. Здесь дело обстоит несравненно лучше. Начиная от миллиметровых волн и вплоть до волн порядка 15 м, земная атмосфера практически прозрачна, за исключением нескольких отдельных узких областей, непрозрачных для некоторых волн, короче 2 см. Наличие этих областей обусловлено тем, что волны, лежащие в этих участках, сильно поглощаются молекулами воды и отчасти газов, входящих в состав атмосферы, так что для этих радиоволн непрозрачными оказываются нижние, наиболее плотные слои атмосферы. Что же касается границы области прозрачности со стороны длинных волн, то ее существование обуславливается свойствами высоких слоев атмосферы, в которых под действием различных причин, главным образом ультрафиолетового излучения Солнца, возникает сильная ионизация. Эти высокие слои атмосферы, содержащие большое количество свободных электрических зарядов (ионов и электронов), получили название ионосферы. Вследствие присутствия свободных зарядов ионосфера оказывается непрозрачной для радиоволн длиннее 15—25 м — она отражает и отчасти поглощает все радиоволны, длиннее некоторой «критической волны» (длина критической волны зависит от степени ионизации ионосферы и поэтому в течение суток и в течение года может изменяться в указанных пределах). Вследствие этого радиоволны, излучаемые космическими телами и имеющие длину больше критической, не могут достичь Земли¹. Тем самым ставится жесткая граница расширению радиоастрономических наблюдений в область волн длиннее 15—25 м.

Антенны радиотелескопов

Рассмотрим теперь третье обстоятельство, определяющее возможность приема радиоизлучения космических тел, а именно вопрос о чувствительности радиотелескопов, т. е. аппаратуры для приема радиоизлучения космических объектов.

Электромагнитное излучение космических тел имеет, как правило, очень малую интенсивность. Например, если сравнить интенсивность излучения, создаваемого Московским телевизионным центром, работающим на волне около 6 м, и интен-

¹ По той же причине волны, излучаемые передатчиком, расположенным вблизи Земли, если они имеют длину больше критической, не могут выйти за пределы ионосферы. Отражаясь от нее, они возвращаются на Землю, часто на значительном расстоянии от передатчика. Именно благодаря этому становится возможной радиосвязь на большие расстояния (далеко за пределами прямой видимости) на волвах длиной в десятки метров.

сивность радиоизлучения Солнца на той же волне, то окажется, что интенсивность радиоизлучения Солнца на Земле в миллионы раз слабее интенсивности излучения, создаваемого телецентром на расстоянии 50 км от него. Поэтому устройства для приема радиоизлучения космических объектов должны обладать гораздо большей чувствительностью, чем обычные радиоприемные устройства.

Двумя способами можно повысить чувствительность приемных устройств: во-первых, увеличив мощность электромагнитного излучения, попадающего в приемное устройство, и, во-вторых, создав более благоприятные условия для обнаружения принятого излучения на выходе приемника. Первое обстоятельство зависит от свойств антенны, которой снабжено приемное устройство, а второе — от свойств приемника.

Остановимся на той роли, которую играет приемная антенна. Чем больше площадь антенны, на которую падает электромагнитное излучение, тем большую мощность этого излучения она принимает¹. Поэтому для повышения чувствительности приемного устройства приходится пользоваться антеннами, собирающими электромагнитное излучение с большой площади. Для этого применяют либо большое число соединенных между собой отдельных вибраторов, покрывающих большую площадь, либо применяют большие отражатели (рефлекторы), имеющие форму параболоидов вращения и собирающие все попадающее на них радиоизлучение в фокусе отражателя, куда помещается приемная антенна.

Первый тип антенн, принцип работы которых был нами рассмотрен ранее, так называемые многовибраторные антенны, применяется главным образом на более длинных волнах, начиная от 1,5—2 м. Второй тип антенны с параболическим рефлектором применяется как на длинных, так и на коротких волнах.

В зависимости от длины волны, для которой предназначен рефлектор, он должен удовлетворять различным требованиям, и поэтому конструкции рефлекторов, предназначенных для длинных и коротких волн, бывают существенно различны.

Прежде всего, для того чтобы отражать падающие на него радиоволны, рефлектор не обязательно должен представлять собой сплошную металлическую поверхность. Отражающая поверхность может иметь отверстия, но они должны быть

¹ Это справедливо, однако, при увеличении размеров антенны только до определенного предела.

малы по сравнению с длиной отражаемой волны. Поэтому рефлекторы, предназначенные для не слишком коротких волн, могут быть выполнены из сравнительно редкой металлической сетки или металлических листов с большими отверстиями (перфорацией), что облегчает конструкцию рефлектора и уменьшает давление ветра на него. Для самых же коротких волн (сантиметровых и миллиметровых) рефлекторы приходится делать в виде сплошной металлической поверхности.

С другой стороны, для того чтобы все падающие радиоволны хорошо собирались в фокусе отражающей поверхности, она должна быть выполнена достаточно точно, т. е. не отличаться заметно по форме от параболоида вращения. Искажения формы рефлектора, которые всегда неизбежны при изготовлении или из-за его деформации под действием ветра, силы тяжести и т.д., начинают заметно ухудшать работу рефлектора, если эти отклонения достигают примерно $\frac{1}{8}$ от длины волны, которую рефлектор отражает. Поэтому, например, в рефлекторе, предназначенном для приема волн длиной 1,5 м, допустимы отклонения формы рефлектора от заданной даже на 15 см, а в рефлекторе, предназначенном для приема волн длиной 3 см, отклонения формы от заданной даже на 0,4 см уже недопустимы. Таким образом, чем короче волна, тем точнее должен быть изготовлен рефлектор и тем меньше должны быть его деформации. Ясно, что чем больше размеры рефлектора, тем труднее выполнить эти требования. Поэтому оказывается целесообразным строить различные типы рефлекторов для приема волн различной длины.

Для метровых и отчасти дециметровых волн делают рефлекторы больших размеров, но сравнительно малой точности

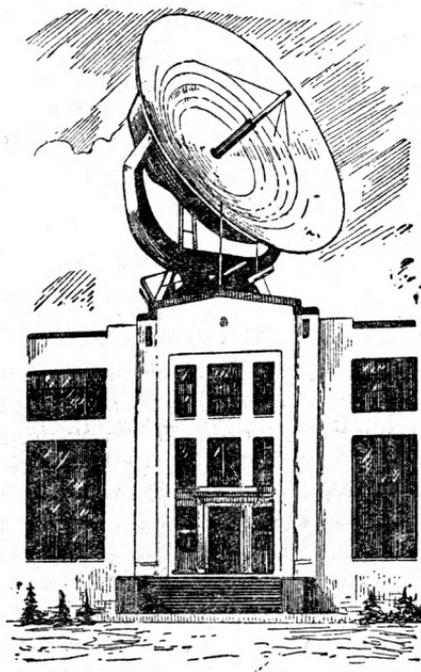


Рис. 15. Антенна с параболическим рефлектором диаметром 15 м.

(в отношении формы поверхности), и в качестве отражающей поверхности применяют редкую металлическую сетку; для сантиметровых волн делают рефлекторы меньших размеров, в виде сплошной металлической поверхности, форма которой с гораздо большей точностью приближается к параболюиду вращения. Сейчас уже существуют рефлекторы до 75 м в поперечнике, предназначенные для волн метрового диапазона, и до 15 м в поперечнике для волн сантиметрового диапазона (рис. 15).

В современных радиотелескопах применяются иногда и другие типы антенн. Но независимо от типа способность антенн собирать мощность падающего излучения (так называемое «усиление антенны») зависит от ее площади, т. е. от ее размеров. Поэтому основной частью всякого современного чувствительного радиотелескопа является антенна достаточно больших размеров.

Разрешающая способность радиотелескопов

Большие размеры антенны обеспечивают не только высокую чувствительность радиотелескопа, но и другое важное его качество, которое называется разрешающей способностью. Для всякого телескопа, в том числе и радиотелескопа, разрешающая способность — это способность из всего излучения, попадающего в телескоп по всевозможным направлениям, выделять излучение, лежащее в каком-то определенном ограниченном угле направлений.

Ни один телескоп принципиально не способен выделить только излучение, приходящее точно из одного определенного направления. Телескоп всегда выделяет излучение, приходящее сразу из некоторого «пучка направлений», заключенного внутри какого-то определенного телесного угла. Поэтому, если какие-либо два источника излучения лежат внутри этого угла, то телескоп не способен разделить излучение и воспринимает его так, как если бы оно исходило из одного источника. Иначе говоря, в этом случае телескоп не дает возможности установить наличие двух источников, не способен их «разрешить». Чем меньше тот угол, в котором заключен «пучок направлений», не разделяемых телескопом, тем меньше угол между направлениями на два источника¹, которые телескоп еще

¹ Угол между направлениями на два небесных тела называется угловым расстоянием между ними. Угол между направлениями на две крайние точки одного и того же небесного тела называется угловым размером тела. Дальше мы будем пользоваться этими терминами.

в состоянии разрешить. Этим наименьшим углом и определяется разрешающая способность телескопа, от которой существенно зависят возможности телескопа как прибора для изучения космических объектов.

Чем выше разрешающая способность телескопа, тем точнее можно определить направление, в котором лежит источник излучения, тем больше отдельных источников излучения можно выделить и изучать, тем меньшие угловые размеры источников можно измерить и, наконец, тем более детально можно исследовать распределение яркости излучения по поверхности источника. Поэтому повышение разрешающей способности радиотелескопа, так же как и повышение его чувствительности, является одной из основных задач на пути усовершенствования радиоастрономических наблюдений.

Разрешающая способность радиотелескопа, как легко видеть, определяется диаграммой направленности его антенны. Для того чтобы радиотелескоп мог разрешить два источника, угловое расстояние между этими источниками должно быть больше, чем половина угла раствора главного лепестка антенны. В случае многовibratorной антенны, полный раствор главного

лепестка равен $2\frac{\lambda}{d}$, а следовательно, разрешающая способность радиотелескопа равна $\frac{\lambda}{d}$ радиан.

Так же примерно обстоит дело и в случае антенны с параболическим рефлектором. Подобно тому как в многовibratorной антенне сила приема определяется соотношением между фазами, с которыми волна приходит к разным вибраторам, в случае параболического рефлектора сила приема определяется соотношением между фазами, с которыми волна, падающая на разные участки и отразившаяся от них, приходит в фокус рефлектора.

Если волна со всех участков рефлектора приходит в одной и той же фазе, то получается наиболее сильный прием. Направление прихода волны, для которого соблюдается это условие, и является направлением главного максимума. В параболическом рефлекторе это условие соблюдается для волны, падающей в направлении оси рефлектора. Разность хода, которая получается для участка волны, попадающего на центр рефлектора, по сравнению с участком волны, попадающим на край рефлектора, после отражения компенсируется тем, что расстояние от центра рефлектора до фокуса меньше, чем рас-

стояние от края до фокуса как раз на величину разности хода (это есть свойство параболы, поэтому и применяются рефлекторы в форме параболоидов вращения). Участки же волны, попадающие на два противоположных края рефлекторов, имеют одинаковую фазу (нет разности хода), но вместе с тем и расстояние от обоих краев до фокуса одинаково, поэтому фаза участков волны, пришедших от краев рефлектора, также оказывается одинаковой.

Если же направление прихода волны отклоняется от направления оси рефлектора, то для участков, попадающих на края рефлектора, получается некоторая разность хода, с которой они и приходят в фокус после отражения от поверхности рефлектора (рис. 16). И в этом случае, как и в случае многови-

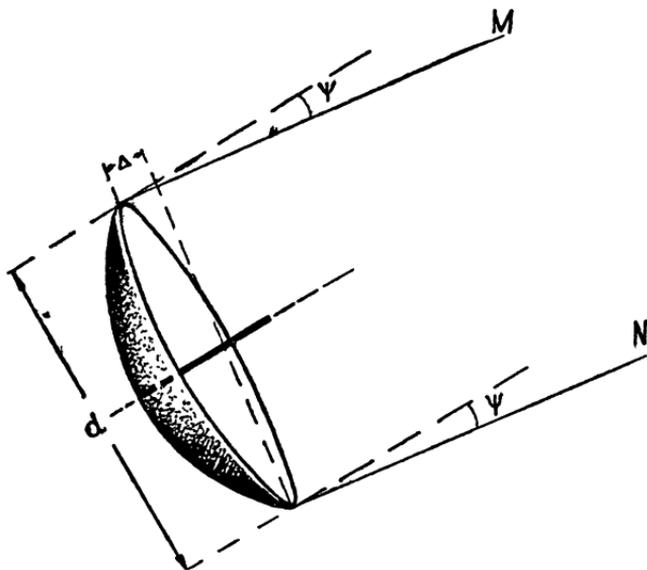


Рис. 16. Волна MN, идущая в направлении, которое образует угол ψ с осью рефлектора, приходит на края рефлектора с разностью хода $\Delta = \psi d$ (угол ψ мал).

браторной антенны, минимум диаграммы направленности лежит в направлении, для которого на краях зеркала получается разность хода, равная длине волны. В самом деле, если между крайними точками рефлектора получается разность хода, равная длине волны, то можно разбить весь рефлектор на отдельные малые полоски и так скомбинировать эти полоски между собой, чтобы для каждой пары полосок разность хода

равнялась половине длины волны. Тогда участки волны, отраженные от каждой такой пары полосок, придут в фокус в противоположных фазах и погасят друг друга. Поэтому и весь рефлектор в целом не создаст излучения в фокусе. Таким образом, в случае параболического рефлектора направление минимума определяется теми же условиями, как и в случае многовибраторной антенны, значит, его разрешающая способность также равна $\frac{\lambda}{d}$ радиан, где d диаметр рефлектора¹. Чтобы

получить разрешающую способность в угловых минутах, нужно умножить это отношение на число угловых минут в радиане (приблизительно 3500').

Для иллюстрации приведем результаты подсчета разрешающей способности двух больших радиотелескопов при различной длине волны.

Рефлектор диаметром 15 м		Рефлектор диаметром 75 м	
Длина волны	Разрешающая способность	Длина волны	Разрешающая способность
20 см	46'	3 м	2° 20'
10 см	23'	1,5 м	1° 10'
3 см	7'	50 см	23'
0,8 см	1,8'	20 см	9'

Таким образом, даже наибольшие из существующих радиотелескопов с параболическими рефлекторами обладают разрешающей способностью в лучшем случае не более 1,8 угловых минут. Между тем в современных оптических телескопах легко может быть достигнута разрешающая способность в доли угловой секунды, т. е. в тысячи раз выше, чем в радиотелескопе. Причину этого огромного различия нетрудно понять.

Для оптического телескопа разрешающая способность определяется теми же соотношениями, что и для радиотелескопа, так как явления, происходящие в радиотелескопе и в оптическом телескопе, по существу одни и те же. Но длина волны в радиотелескопе в сотни тысяч, миллионы и десятки миллионов раз больше длины оптической волны. Поэтому даже при самых больших мыслимых размерах радиотелескопов совер-

¹ Все наши рассуждения очень упрощены, и поэтому они дают только приближенное значение угла раствора лепестка диаграммы; но для оценки разрешающей способности радиотелескопов полученные соотношения дают вполне достаточную точность.

шенно невозможно приблизиться к тем разрешающим способностям, которые легко достижимы в оптических телескопах.

Наблюдения, которые требуют большей разрешающей способности, чем достижимая в современных радиотелескопах, в известных случаях могут быть осуществлены с помощью упоминавшихся уже радиоинтерферометров, или других аналогичных им систем, использующих несколько (иногда много) отдельных антенн, разнесенных на большие расстояния (в сотни или даже тысячи длин волн).

Приемники радиотелескопов

Прием радиоизлучения космических объектов в принципе осуществляется так же, как прием всяких радиосигналов (поэтому мы это излучение тоже будем называть «сигналом»). Колебания, созданные проходящим радиоизлучением в приемной антенне, усиливаются и преобразуются с помощью электронных ламп и направляются в то или иное выходное устройство, которое позволяет зарегистрировать принятое радиоизлучение, определить его мощность и некоторые другие характеристики, например, спектральный состав.

Однако условия приема радиоизлучения космических объектов, как правило, в двух отношениях существенно отличаются от условий приема обычных радиосигналов. Прежде всего попадающая в приемник мощность этого излучения, как уже указывалось, обычно бывает очень мала, гораздо меньше той мощности, которая попадает в приемник при приеме обычных радиосигналов. Во-вторых, спектральный состав радиоизлучения космических объектов, как правило, существенно отличается от спектрального состава обычных радиосигналов. Оба эти различия приводят к тому, что для приема радиоизлучения космических тел приходится применять специальные методы, во многом отличные от тех, которыми пользуются для приема обычных радиосигналов. Рассмотрим оба эти различия более подробно.

Прежде всего уточним положение в отношении принимаемых мощностей в случае космического радиоизлучения и обычных радиосигналов. Конечно, и для приема обычных радиосигналов было бы полезно создать высокочувствительные приемники, которые позволили бы принимать радиосигналы, имеющие столь же малую мощность, как и принимаемое радиоизлучение космических тел. Это позволило бы повысить дальность приема и понизить мощность радиопередатчиков. Но воз-

возможность повышения чувствительности приемников жестко связана с временем, которым мы располагаем для того, чтобы принять каждый отдельный сигнал.

Эта жесткая связь, существующая между чувствительностью всякого приемного или измерительного устройства и тем временем, которое должно быть затрачено на каждое отдельное измерение, имеет весьма общий характер и может быть прослежена на самых разнообразных типах приемных и измерительных устройств. Приведем простейший пример. При повышении чувствительности весов неизбежно увеличивается период колебаний их коромысла, а значит, возрастает и то время, которое приходится затрачивать на отдельное взвешивание (чтобы точно констатировать равновесие, нужно наблюдать достаточно большое число качаний коромысла). Аналогично при повышении чувствительности гальванометра неизбежно возрастает период колебаний его подвижной системы.

Так же обстоит дело и с повышением чувствительности радиоприемных устройств. Повышение чувствительности приемника может быть достигнуто только за счет увеличения времени, затрачиваемого на обнаружение и регистрацию каждого отдельного принимаемого «радиосигнала», будь то обычный радиосигнал или радиоизлучение космических тел. Но как раз в этом отношении в случае приема обычных радиосигналов и радиоизлучения космических тел дело обстоит совершенно по-разному. При приеме обычных радиосигналов мы всегда располагаем ограниченным временем — это время тем меньше, чем быстрее следуют друг за другом принимаемые сигналы. Например, в случае телевидения, когда в секунду необходимо принимать несколько миллионов сигналов (частота модуляции несколько мегагерц), для приема каждого отдельного сигнала мы располагаем временем в несколько десятимиллионных долей секунды. Даже в гораздо более «легком» случае приема радиотелефонных передач, например радиовещания, это время не должно превышать десятитысячных долей секунды.

При приеме же радиоизлучения космических тел мы обычно располагаем гораздо большим временем. За исключением отдельных специальных случаев, когда приходится наблюдать быстрые изменения в характере радиоизлучения космических тел, мы располагаем для наблюдения и регистрации этого излучения временем порядка многих секунд, даже минут, а если бы было нужно, то в некоторых случаях и часов. Увеличивая время, затрачиваемое на регистрацию радиоизлучения, можно

значительно повысить чувствительность радиоприемников и осуществить прием радиоизлучения космических тел, несмотря на то, что мощность этого излучения, попадающая в приемник, в сотни и даже тысячи раз меньше той мощности, которая требуется для надежного приема обычных радиосигналов.

Для того чтобы стало ясно, почему, увеличивая время наблюдения, можно повысить чувствительность приемника, необходимо принять во внимание обстоятельство, с которым нам уже пришлось встретиться, а именно наличие хаотического теплового движения электронов в проводниках, которое ослабевает при понижении температуры проводников, но принципиально не может быть устранено полностью.

Хаотическое движение электронов является причиной не только теплового электромагнитного излучения, но и нерегулярных колебаний напряжения на концах проводников. В самом деле, при хаотическом движении электронов через каждое сечение проводника в обе стороны в среднем проходит одинаковое количество электронов и средний ток в проводнике (при отсутствии электродвижущих сил) равен нулю. Но за отдельные малые промежутки времени через отдельные сечения проводника в обе стороны может проходить разное число электронов, а это значит, что в проводнике всегда существуют слабые нерегулярные токи, величина которых хаотически изменяется. Эти токи создают на концах всех проводников слабые нерегулярно меняющиеся падения напряжения.

Следовательно, если проводник включен на вход приемника, то нерегулярные изменения напряжения на его концах усиливаются приемником и мощность этих нерегулярных колебаний на выходе приемника может достигнуть значительной величины. Эти нерегулярные колебания напряжения легко могут быть обнаружены с помощью измерительных приборов или телефона, включенного на выход приемника. В этом случае нерегулярные колебания напряжения обнаруживаются в виде ровного сплошного шума, и поскольку причина их лежит в самом приемнике (в отличие от радиопомех, попадающих в приемник через антенну), эти нерегулярные колебания называют собственными шумами приемника¹.

Если бы собственные шумы в приемнике отсутствовали, то, повышая усиление, мы могли бы какой угодно слабый сигнал, подаваемый на вход приемника, увеличить до такой мощно-

¹ Причиной собственных шумов могут быть также нерегулярные процессы в электронных лампах приемника.

сти, которая необходима для регистрации сигнала прибором, включенным на выходе приемника. Но в приемнике вместе с принимаемым сигналом усиливаются и собственные шумы; и если мощность сигнала, попадающего на вход приемника, меньше мощности собственных шумов на входе, то она и при дальнейшем усилении останется меньшей. Следовательно, трудность заключается не в том, чтобы повысить мощность сигнала, а в том, чтобы обнаружить этот сигнал на фоне более мощных собственных шумов приемника. Именно для этого необходимо располагать достаточно большим временем для наблюдения сигнала.

Методы повышения чувствительности приемников

Под влиянием собственных шумов, т. е. нерегулярных электрических колебаний на входе приемника, указатель электроизмерительного прибора, включенного на выход приемника, будет совершать нерегулярные колебания около некоторого среднего положения. Принимаемый сигнал, т. е. попадающее в антенну космическое радиоизлучение должно вызвать некоторое постоянное¹ отклонение прибора, т. е. смещение того среднего положения, около которого происходят нерегулярные колебания указателя прибора.

Непосредственно по отсчету одного какого-либо положения указателя смещение среднего положения, конечно, не может быть обнаружено, если это смещение под действием сигнала значительно меньше, чем величина тех колебаний, которые совершает указатель. Но если отмечать много различных положений колеблющегося указателя (например, много его крайних положений подряд), а затем взять среднее между ними, то среднее положение указателя определится достаточно точно, а значит можно будет обнаружить и смещение этого среднего положения под действием принимаемого излучения. И чем дольше наблюдать за движением указателя, тем точнее определяется то среднее положение, около которого он колеблется, и тем меньшее смещение этого положения под действием принимаемого космического радиоизлучения можно обнаружить.

Таким образом, наблюдая в течение достаточно долгого времени показания выходного прибора и затем усредняя нуж-

¹ Отклонение можно считать постоянным, если наблюдение ведется долгое время и во время наблюдения мощность принимаемого радиоизлучения не меняется.

ным образом полученные результаты, мы сможем обнаружить принимаемое радиоизлучение космических тел даже в том случае, когда отклонение прибора, вызываемое этим излучением, меньше (и во много раз), чем колебания выходного прибора, вызванные собственными шумами приемника.

Конечно, нет надобности непосредственно следить за колебаниями указателя выходного прибора, а затем их усреднять. Нерегулярные токи, существующие в выходной цепи приемника и вызывающие колебания указателя прибора, можно прямо усреднять при помощи какого-либо устройства, например, заряжать ими конденсатор большой емкости и, накапливая эти заряды долгое время, затем измерять среднее напряжение на конденсаторе. Можно осуществить и другие методы накопления, позволяющие усреднить показания на выходе приемника за такое большое время, которое обеспечило бы требуемое повышение чувствительности приемника к принимаемому космическому радиоизлучению. Принципиальный предел повышения чувствительности приемника, таким образом, определяется только тем временем, в течение которого можно вести наблюдение радиоизлучения того или иного космического источника и в течение которого характер этого излучения остается неизменным.

Рассмотрим теперь другое различие между условиями приема радиоизлучения космических источников и обычных радиосигналов, а именно различие в спектральном составе принимаемого излучения. Обычные радиосигналы, как правило, представляют собою колебания вполне определенной частоты, которые в результате модуляции изменяются по амплитуде, частоте или фазе в соответствии с передаваемыми сигналами. Но частота этих изменений (частота модуляции) обычно мала по сравнению с частотой самих колебаний, и поэтому спектр частот колебаний, из которых состоит сигнал, занимает сравнительно узкую полосу около той частоты, на которой передаются сигналы. Космическое же радиоизлучение имеет широкий сплошной спектр (за исключением одного случая, о котором будет идти речь ниже). Поэтому при приеме обычных радиосигналов и космического радиоизлучения к приемникам предъявляются разные требования в отношении ширины спектра принимаемых частот, т. е. в отношении полосы пропускания приемника.

Для приема радиосигналов полоса пропускания приемника должна быть равна ширине спектра (обычно небольшой) принимаемого сигнала, и увеличивать ее дальше не только не

нужно, но и вредно. Это связано с тем, что расширение полосы пропускания, не увеличивая мощности принимаемого сигнала, приводит к росту мощности собственных шумов приемника (они имеют сплошной спектр и чем шире полоса пропускания приемника, тем большая мощность шумов попадает на выход приемника). Поэтому соотношение между мощностью сигнала и шумов на выходе приемника ухудшается.

В случае же космического радиоизлучения, имеющего сплошной спектр, расширение полосы пропускания приемника в одинаковой степени увеличивает мощность принимаемого радиоизлучения и мощность собственных шумов на выходе приемника, поэтому соотношение между ними остается неизменным. Однако возможность выделения принимаемого радиоизлучения на фоне собственных шумов определяется не этим соотношением.

Как было изложено выше, эта возможность определяется соотношением между мощностью принимаемого излучения и мощностью тех колебаний около среднего уровня шумов, которые происходят на выходе приемника. При расширении полосы пропускания приемника мощность этих колебаний около среднего уровня собственных шумов растет медленнее, чем сама средняя мощность собственных шумов. Это по существу обуславливается тем же процессом накопления и усреднения во времени, который мы рассматривали выше. Чем шире полоса пропускания приемника, тем большее число отдельных нерегулярных колебаний попадает на выход и усредняется выходным прибором. А увеличение числа усредняемых независимых нерегулярных колебаний дает такой же эффект, как и увеличение времени, за которое происходит накопление и усреднение (потому что в конечном счете все определяется общим числом усредняемых нерегулярных отклонений). Среднее значение мощности нерегулярных колебаний растет, но колебания около этого среднего значения становятся относительно меньше. Значит, по мере расширения полосы пропускания приемника мощность колебаний собственных шумов около среднего значения растет медленнее, чем мощность принимаемого космического радиоизлучения.

Таким образом, расширение полосы пропускания улучшает условия наблюдения принимаемого космического радиоизлучения, имеющего сплошной спектр, и позволяет повысить чувствительность приемников для такого излучения (по сравнению с той, которой обладают приемники для обычных радиосигналов).

Оптические и радиоастрономические наблюдения

Мы переходим к изложению результатов наблюдений радиоизлучения космических источников. Но прежде чем излагать конкретные результаты, рассмотрим общий вопрос о том, насколько наблюдения радиоизлучения космических объектов расширяют возможность астрономии по сравнению с оптическими наблюдениями.

Прежде всего напомним, что всякое тело способно излучать только те электромагнитные волны, которые оно поглощает, и притом излучать тем сильнее, чем сильнее поглощает. Поэтому, если космические объекты по-разному поглощают электромагнитные волны различной длины, то они и по-разному их излучают. В частности, если космические объекты абсолютно прозрачны для видимого света, то они не излучают световых волн, т. е. невидимы, но если те же объекты полностью поглощают радиоволны, то они их же и излучают, и эти невидимые объекты можно «увидеть», наблюдая их радиоизлучение.

Исследуя радиоизлучение, можно изучать строение этих объектов и процессы, в них происходящие, так же как изучают видимые космические объекты, исследуя их световое излучение. Сказанное справедливо не только в случае тел, абсолютно прозрачных для видимого света и абсолютно «непрозрачных» для радиоволн, но и для тел, частично поглощающих как те, так и другие волны, если величина этого поглощения для видимого света гораздо меньше, чем для радиоволн. Такие объекты часто бывает гораздо легче «увидеть», наблюдая их радиоизлучение, чем увидеть в буквальном смысле слова, т. е. наблюдая их световое излучение. В тех случаях, когда в силу указанных причин космические объекты не могут быть обнаружены оптически, их радиоизлучение является единственным источником наших сведений о них. Но и в тех случаях, когда космические объекты видимы, наблюдения их радиоизлучения дают важные и принципиально новые сведения о строении этих объектов и процессах, в них происходящих.

Спектральный состав электромагнитного излучения самым тесным образом связан со строением излучающего тела, его состоянием и происходящими в нем процессами. Поэтому данные о спектральном составе электромагнитного излучения космических объектов, относящиеся к совсем новой области спектра (области радиоволн), которая раньше не изучалась, всегда

дают много новых и принципиально важных сведений о космических объектах, являющихся источниками этого излучения.

Наконец, еще в одном отношении радиоастрономические наблюдения раздвигают те рамки, которыми ограничены оптические наблюдения космических объектов. Дело в том, что межзвездное пространство, вследствие наличия в нем космической пыли, не является абсолютно прозрачным. Пока расстояния не очень велики, ослабление света, вызываемое межзвездной пылью, мало, но на очень больших расстояниях оно оказывается столь значительным, что наблюдения становятся невозможными. Поэтому космические объекты, удаленные на очень большие расстояния, не могут быть наблюдаемы оптически, даже если они являются источниками света. Ослабление же радиоволн, вызываемое космической пылью, несравненно меньше, чем ослабление видимого света (ослабление тем меньше, чем длиннее волна). Поэтому радиоастрономические наблюдения позволяют «увидеть» те космические объекты, которые находятся за пределами видимой нами части Вселенной.

Приведенные общие соображения показывают, насколько радиоастрономия расширяет возможность изучения Вселенной.

Переходим теперь к изложению некоторых конкретных результатов наблюдений радиоизлучения различных космических объектов.

Радиоизлучение спокойного Солнца

Хотя мощность, излучаемая Солнцем в диапазоне радиоволн, ничтожно мала по сравнению с той мощностью, которую оно излучает в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, оно по сравнению с другими космическими источниками радиоизлучения является все же мощным излучателем. Радиоизлучение Солнца можно принимать (даже на сравнительно небольшие антенны) на всех волнах, начиная примерно от 15 м (граница прозрачности ионосферы) и вплоть до самых коротких миллиметровых волн, т. е. радиоизлучение Солнца имеет весьма широкий сплошной спектр.

Мощность радиоизлучения Солнца, как оказалось, изменяется со временем. Было обнаружено, что эти изменения связаны с развитием солнечных пятен, а отчасти и других процессов, происходящих на Солнце. Однако характер изменений мощности радиоизлучения Солнца в различных участках спектра совершенно различен. На метровых волнах мощность радиоизлучения изменяется в широких пределах, причем иногда

очень резко, так что за несколько минут она может возрасти в тысячи и даже миллионы раз и затем за такое же примерно время упасть до прежнего значения (эти резкие кратковременные повышения мощности радиоизлучения получили название «всплесков радиоизлучения»). Одновременно происходят изменения мощности радиоизлучения и на более коротких волнах, но чем короче волна, тем менее резко выражены эти изменения.

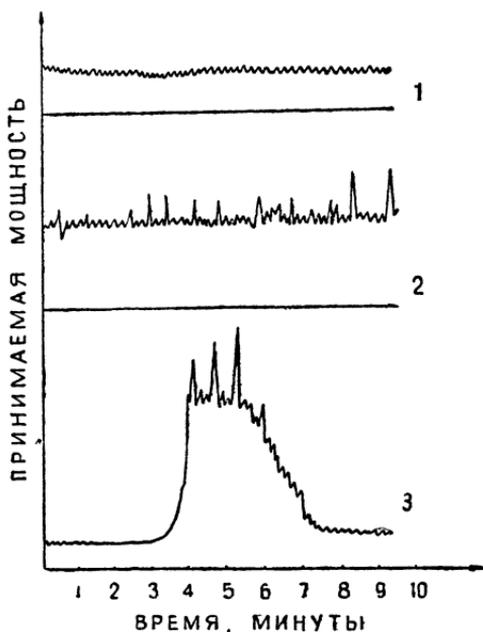


Рис. 17. Записи приема радиоизлучения Солнца: 1 — спокойное Солнце; 2 — радиоизлучение при развитии пятна; 3 — всплеск радиоизлучения Солнца.

радиоизлучение, связанное с солнечными пятнами, а иногда и всплески радиоизлучения (рис. 17).

Мощность радиоизлучения Солнца в различных участках спектра существенно различна — она наибольшая на метровых волнах и падает по мере уменьшения длины волны. На метровых волнах мощность радиоизлучения спокойного Солнца соответствует эффективной температуре порядка одного миллиона градусов, на дециметровых волнах — температуре в сотни тысяч градусов, а на сантиметровых — в десятки тысяч граду-

сия. На дециметровых волнах эти изменения мощности редко превышают несколько десятков процентов, а на миллиметровых обычно лежат в пределах десяти процентов. Когда пятен на Солнце нет, мощность его радиоизлучения на всех волнах снижается до некоторого определенного уровня и остается более или менее постоянной до тех пор, пока не появляются пятна и другие образования. Таким образом, общее радиоизлучение Солнца представляет собой некоторое постоянное излучение «спокойного Солнца» (т. е. в отсутствии пятен и других образований на нем), к которому добавляется ра-

сов¹. Это существенное различие в эффективных температурах на различных участках спектра может быть объяснено либо тем, что радиоизлучение Солнца не является тепловым, либо тем, что радиоизлучение различной длины волны исходит из различных его областей, имеющих неодинаковую температуру.

Теоретическими исследованиями (среди которых важное место занимают работы советских ученых В. Л. Гинзбурга и И. С. Шкловского) было показано, что правильным является второе объяснение. Сводится оно к следующему. Солнце представляет собой газообразное тело, которое имеет на разной глубине разную плотность и температуру. Внешние менее плотные его слои образуют солнечную атмосферу вокруг более плотной центральной части — фотосферы. Внутренняя, более плотная часть солнечной атмосферы, так называемая хромосфера, имеет температуру порядка десятков тысяч градусов, а внешняя, так называемая корона, порядка миллиона градусов.

Хромосфера и корона представляют собой ионизированный газ, который обладает способностью поглощать электромагнитное излучение, и тем сильнее, чем длиннее волна. Поэтому наиболее длинные (метровые) радиоволны должны поглощаться уже в высоких слоях солнечной короны, а по мере укорочения длины волны они должны проникать все глубже и глубже в солнечную атмосферу. Сантиметровые волны должны проникать сквозь всю толщу короны и поглощаться в хромосфере. Наконец, видимый свет должен проникать сквозь всю солнечную атмосферу и поглощаться только в фотосфере. Соответственно, собственное электромагнитное излучение Солнца разных длин волн должно исходить из тех глубин солнечной атмосферы, на которых должно было бы поглощаться падающее извне излучение той же длины волны. В частности, видимое излучение исходит из фотосферы, и видимый диаметр Солнца — это диаметр того тонкого слоя, из которого исходит подавляющая часть всего излучаемого света². Эффективная температура Солнца, определенная по видимому излучению, равна температуре этого слоя.

Слои солнечной атмосферы, излучающие радиоволны, лежат выше фотосферы, и чем выше эти слои, тем длиннее волна. Иначе говоря, «радиодиаметр» Солнца больше, чем его ви-

¹ Эффективная температура Солнца, определенная таким же образом по излучению в видимой области спектра, составляет около 6000 градусов.

² Так как этот слой очень тонкий, то Солнце выглядит как светящийся диск с резкими краями.

димый диаметр, и тем больше, чем длиннее волна. Соответственно и эффективная температура Солнца на разных длинах волн должна примерно совпадать с температурой слоев, излучающих эти волны.

Это объяснение получило полное подтверждение в дальнейших исследованиях. Наиболее убедительными были наблюдения за радиоизлучением Солнца во время солнечных затмений. Поскольку радиодиаметр Солнца больше, чем видимый, то полные затмения для видимого излучения являются кольцевыми затмениями для радиоизлучения. И ширина незакрытого Лунной кольца, излучающего радиоволны, тем больше, чем длиннее волна.

Внешний диаметр кольца, а значит, и радиодиаметр Солнца можно определить по отношению мощностей радиоизлучения во время полной фазы затмения и незатменного Солнца. По предложению академика Н. Д. Папалекси такие наблюдения были проведены в Бразилии советской экспедицией 20 мая 1947 года, изучавшей полное солнечное затмение. Было установлено, что радиодиаметр Солнца для волны 1,5 м примерно на 40% больше видимого диаметра. Во время последующих затмений таким же образом были определены радиодиаметры Солнца и на других волнах, и было подтверждено, что радиодиаметр уменьшается по мере укорочения волны и для сантиметровых волн лишь на несколько процентов превышает видимый диаметр Солнца.

После того как высоты слоев, излучающих данную длину волны, установлены, определение эффективной температуры Солнца по его радиоизлучению на той или иной длине волны непосредственно дает температуру соответствующих слоев солнечной атмосферы. Таким образом, радиоастрономические наблюдения позволяют непосредственно в любое время измерять распределение температуры в солнечной короне, чего оптическими методами прямо сделать нельзя (хотя оптические наблюдения и давали указание на то, что температура короны должна быть очень высокой, порядка миллиона градусов).

Вообще наблюдения за радиоизлучением Солнца стали важным источником наших сведений о строении солнечной короны и ее состоянии, поскольку регулярные (не во время затмений) оптические наблюдения короны связаны с большими трудностями. Причина этих трудностей лежит в том, что корона почти прозрачна для видимого света и поэтому, несмотря на высокую температуру, излучает очень мало видимого све-

та, совершенно теряющегося в общем видимом излучении Солнца.

Исследование солнечной короны является убедительной иллюстрацией тех общих соображений о значимости радиоастрономических наблюдений для изучения объектов, почти прозрачных для видимого света и сильно поглощающих радиоволны.

Радиоизлучение активного Солнца

Как уже указывалось, при наличии пятен на Солнце, т. е. при повышенной солнечной активности, мощность его радиоизлучения сильно возрастает, особенно на метровых волнах. Естественно предположить, что это добавочное излучение, которое накладывается на излучение спокойного Солнца, исходит из тех областей, в которых лежат солнечные пятна. Однако это предположение не может быть проверено непосредственно с помощью одного радиотелескопа.

Как видно из таблицы, приведенной на стр. 41, разрешающая способность даже самого большого радиотелескопа на метровых волнах недостаточна для того, чтобы разделить излучение, исходящее из различных областей Солнца, угловой радиодиаметр которого на этих волнах составляет около $45'$. Следовательно, с помощью одного радиотелескопа нельзя определить, из каких областей исходит то добавочное радиоизлучение, которое связано с пятнами. Решить эту задачу удалось с помощью радиоинтерферометров.

При достаточно большом расстоянии между антеннами угол раствора отдельного лепестка многолепестковой диаграммы направленности радиоинтерферометра может быть уменьшен до нескольких угловых минут, т. е. сделан много меньше углового диаметра Солнца. При движении Солнца по небу его излучение будет попадать в разные лепестки диаграммы направленности, но в каждый момент оно будет попадать сразу в несколько лепестков. Поэтому если Солнце излучает равномерно по всей поверхности, то мощность принимаемого излучения не будет изменяться, так как то ослабление приема, которое обусловлено уходом Солнца из последнего лепестка, будет как раз компенсировано тем, что оно с другой стороны войдет в следующий лепесток. Но если на Солнце есть какая-то область повышенного излучения, угловые размеры которой меньше, чем угловой раствор лепестка, то при движении Солнца излучение, исходящее из этой области, будет попа-

дать в каждый момент только в один лепесток, вследствие чего мощность принимаемого излучения будет изменяться, увеличиваясь, когда это излучение попадет в максимум какого-либо лепестка, и уменьшаясь, когда оно попадет в минимум между двумя лепестками.

Следовательно, наличие на Солнце малых областей повышенного излучения при приеме на радиоинтерферометр проявится в виде периодических изменений интенсивности приема, отсутствие же таких периодических изменений будет свидетельствовать о том, что Солнце излучает равномерно по всей поверхности (рис. 18). Более того, если на Солнце существует

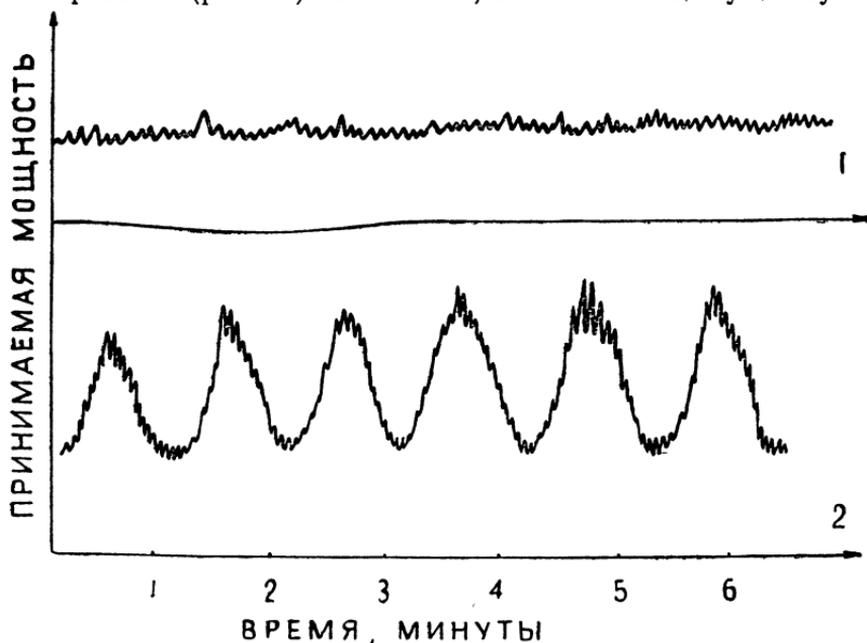


Рис. 18. Прием радиоизлучения Солнца на радиоинтерферометр: 1 — равномерное излучение по всей поверхности; 2 — при наличии области повышенного излучения.

только одна область повышенного излучения, то, зная расположение отдельных лепестков диаграммы направленности, можно по времени, когда наступают максимумы и минимумы приема, точно определить направление, в котором лежит эта область, т. е. найти ее положение на Солнце. Такие наблюдения показали, что области повышенного излучения лежат над

пятнами в короне, на той примерно высоте, из которой исходит радиоизлучение данной длины волны.

Принципиально таким же методом может быть решена задача определения положения тех областей, из которых исходят всплески радиоизлучения. Однако в этом случае возникают трудности, связанные с тем, что всплески излучения длятся очень короткое время. За то время, пока Солнце перемещается на один лепесток диаграммы направленности, всплеск радиоизлучения вообще может закончиться. Поэтому до сих пор не удавалось непосредственно следить за положением области, из которой исходит всплеск излучения. Но косвенным путем было установлено, что обычно эти области быстро движутся вверх. Об этом свидетельствует тот факт, что участок спектра, в котором главным образом сосредоточена энергия всплеска радиоизлучения, непрерывно перемещается в сторону длинных волн, т. е. излучение возникает последовательно в более и более высоких слоях солнечной короны.

Сейчас предложено несколько новых типов радиоинтерферометров (в частности, один из них предложен советским физиком В. В. Виткевичем), позволяющих непосредственно наблюдать за движением областей, из которых исходят всплески радиоизлучения, и более детально проследить это исключительно важное для изучения физики Солнца явление.

В заключение этого раздела следует коснуться еще вопроса о поляризации радиоизлучения активного Солнца. Как указывалось, в том случае, когда излучающая среда находится в магнитном поле, возникающее излучение может иметь круговую поляризацию (то же самое может произойти, если неполяризованное излучение проходит сквозь поглощающую среду, находящуюся в магнитном поле). Но, как известно из других наблюдений, в области пятен часто возникают сильные магнитные поля. Поэтому следует ожидать, что радиоизлучение, связанное с пятнами, может иметь круговую поляризацию. Были поставлены специальные наблюдения, которые позволили обнаружить эту поляризацию.

Такие наблюдения осуществляются, например, следующим образом. Как указывалось, излучение, поляризованное по кругу, отличается от неполяризованного излучения тем, что в первом случае направление вектора напряженности электрического поля вращается, делая один оборот за период волны, во втором же случае направление этого вектора меняется хаотически. Поэтому если вести прием на два расположенных накрест вибратора, то при круговой поляризации между колебаниями в

обоих вибраторах будет существовать постоянный сдвиг фаз в $\frac{\pi}{2}$ (так как направление электрического поля совпадет с направлением второго вибратора на четверть периода позже, чем с направлением первого). При сложении в приемнике колебаний от обоих вибраторов с дополнительным сдвигом фаз на $\frac{\pi}{2}$ на входе приемника получаются колебания либо в фазе, либо в противофазе, в зависимости от того, в колебания какого из вибраторов введен дополнительный сдвиг фаз. Поэтому, изменяя сдвиг фаз между колебаниями, мы получим либо увеличение силы приема до максимума (когда оба колебания окажутся в фазе), либо уменьшение до нуля (когда они окажутся в противофазе).

В случае же неполяризованного излучения сдвиг фаз между колебаниями в обоих вибраторах будет быстро и хаотически изменяться (так же как направление напряженности электрического поля) и поэтому дополнительный сдвиг фаз на $\frac{\pi}{2}$ ничего не изменит. Среднее значение мощности на входе приемника будет оставаться неизменным при изменении сдвига фаз между колебаниями, и оно никак не будет влиять на силу приема. Так можно отличить излучение, поляризованное по кругу, от неполяризованного.

Исследования показали, что радиоизлучение Солнца иногда бывает частично поляризованным по кругу. Наблюдая поляризацию радиоизлучения Солнца, можно сделать заключения о характере магнитных полей на нем, что также имеет огромное значение для изучения физики Солнца.

Природа мощного радиоизлучения, которое возникает при развитии пятен и других процессов на Солнце, еще не может считаться окончательно установленной. Но уже ясно, что на метровых волнах это излучение имеет не тепловую, а какую-то иную природу.

Радиоизлучение Галактики

Радиоизлучение Галактики, так же как и радиоизлучение Солнца, имеет сплошной спектр, занимающий широкую полосу частот. Однако мощность радиоизлучения Галактики по мере укорочения длины волны ослабевает быстрее, чем радиоизлучения Солнца. Поэтому радиоизлучение Галактики удается

наблюдать только на волнах метрового и дециметрового диапазона; на сантиметровых волнах обнаружить это радиоизлучение пока еще не удалось.

Мощность радиоизлучения, исходящего из разных областей Галактики, весьма различна. Наибольшую мощность имеет радиоизлучение, приходящее к нам с того направления, в котором лежит центр Галактики¹. По мере удаления от этого направления мощность радиоизлучения постепенно падает, однако в некоторых направлениях, лежащих в плоскости Галактики, она снова несколько возрастает. Таким образом, Галактика, в отличие от Солнца, представляет собой весьма протяженный источник радиоизлучения; поэтому при наблюдении ее радиоизлучения радиотелескопы работают в несколько иных условиях, чем при наблюдении источников, имеющих малые угловые размеры, например, Солнца.

Различие между этими двумя случаями состоит в следующем. При увеличении размеров антенны уменьшается угол раствора ее диаграммы, но пока этот угол остается больше угловых размеров источника, в антенну попадает радиоизлучение, исходящее из всех частей источника. Если же угол раствора диаграммы направленности становится меньше угловых размеров источника, то в антенну попадает радиоизлучение, исходящее только из части источника, «вырезанной» диаграммой направленности антенны. При этом по мере увеличения размеров антенны мощность, принимаемая с единицы площади той части источника, которая «вырезана» диаграммой направленности, продолжает увеличиваться, но сама «вырезанная» площадь уменьшается (вследствие сужения диаграммы направленности антенны). Иначе говоря, по мере увеличения размеров антенны, мощность, принимаемая из областей, близких к направлению оси диаграммы антенны, увеличивается, но зато мощность, принимаемая из других, более далеких областей, уменьшается. Поэтому общая принимаемая мощность перестает увеличиваться, когда угол раствора диаграммы направленности становится меньше, чем угловые размеры источника.

При приеме радиоизлучения Галактики, вследствие значи-

¹ Галактика, как указывалось, имеет форму сильно сплюсненной сферы, центр которой и называется центром Галактики. Плоскость, перпендикулярная к тому направлению, в котором сплюснена сфера, называется плоскостью Галактики. Солнечная система лежит вблизи плоскости Галактики, но на большом расстоянии от центра — около 23 тыс световых лет (световой год — расстояние, проходимое светом за один год, т. е. примерно 10^{13} км).

тельных ее угловых размеров, уже при сравнительно небольших антеннах достигается указанный предел, и дальнейшее увеличение их не повышает чувствительности радиотелескопа¹. Однако увеличение размеров антенны все же очень существенно расширяет возможность исследования радиоизлучения Галактики, так как увеличивает разрешающую способность радиотелескопа и позволяет более детально изучить распределение мощности радиоизлучения, приходящего из различных направлений. Но особенно существенно увеличение размеров антенны для расширения возможности обнаружения и изучения отдельных имеющих малые угловые размеры источников радиоизлучения, которые были открыты в Галактике и получили сначала неудачное название «радиозвезд».

Оказалось, что на общем фоне радиоизлучения Галактики в отдельных направлениях наблюдается резкое повышение его мощности. Особенности радиоизлучения, в первую очередь «мерцание» его, аналогичное мерцанию видимых звезд, заставили предположить, что источники такого радиоизлучения имеют малые угловые размеры². Окончательно это было подтверждено с помощью радиоинтерферометров, которые позволили выделить радиоизлучение, исходящее из этих источников, на фоне общего радиоизлучения Галактики. Задача здесь совершенно аналогичная той, которая возникает при выделении отдельных малых областей повышенного радиоизлучения на фоне общего радиоизлучения Солнца.

Как было показано при рассмотрении этой последней задачи, при приеме на радиоинтерферометр источник с большими угловыми размерами, т. е. вся Галактика в целом, не дает периодических изменений мощности на выходе приемника, которые получаются от источника, имеющего достаточно малые угловые размеры (рис. 19). Таким методом было обнаружено большое число отдельных источников радиоизлучения в Галак-

¹ Конечно, все сказанное принципиально остается правильным и при приеме радиоизлучения источников, имеющих угловые размеры гораздо меньшие, чем угловые размеры Галактики, например, Солнца. Но такое положение, когда угол раствора диаграммы антенны оказывается меньше, чем угловые размеры источника, практически может быть достигнуто в случае источников с малыми угловыми размерами (например, Солнца) только на коротких волнах — сантиметровых и миллиметровых.

² Мерцание звезд вызывается случайными малыми колебаниями величины преломления света в атмосфере. При достаточно больших угловых размерах источников колебания величины преломления для лучей, идущих от разных точек источника, усредняются, и поэтому такие источники (например, Луна) не мерцают.

тике, два наиболее мощные из которых лежат в созвездиях Лебедь и Кассиопея. Радиоизлучение этих источников настолько интенсивно, что мощность принимаемого от них излучения приближается к мощности радиоизлучения спокойного Солнца. С помощью радиоинтерферометров были не только обнаружены эти источники радиоизлучения, но и определены их угловые размеры.

По мере увеличения размеров антенн (а также повышения чувствительности приемной аппаратуры) удастся обнаружить все более слабые источники. Сейчас открыто уже свыше 100 таких отдельных источников радиоизлучения в Галактике.

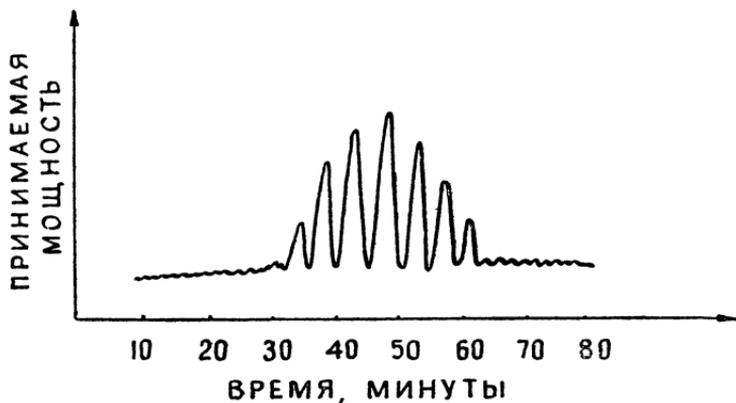


Рис. 19. Запись приема на радиоинтерферометр источника радиоизлучения в созвездии Лебедь.

Вопрос о происхождении общего радиоизлучения Галактики и отдельных источников еще не решен до конца, но уже предложены теории, объясняющие происхождение этого радиоизлучения и его особенности. В развитии этих теорий важная роль принадлежит советским ученым (В. Л. Гинзбург, И. С. Шкловский, Г. Г. Гетманцев).

Согласно этим теориям часть общего радиоизлучения представляет собой тепловое радиоизлучение облаков ионизированного газа, заполняющих отдельные области Галактики. Другая часть этого излучения имеет не тепловое происхождение и представляет собой излучение быстрых электронов, которое, как уже указывалось, возникает при движении их в магнитных полях. Оптические наблюдения уже раньше давали указания на то, что в межзвездном пространстве существуют магнитные

поля. Исследование радиоизлучения Галактики является новым средством изучения быстрых электронов (так называемых первичных космических лучей) и вместе с тем этих магнитных полей.

Наконец, радиоизлучение отдельных источников в Галактике И. С. Шкловский объясняет как излучение, возникающее в газовых оболочках, образующихся вокруг сверхновых звезд после вспышки¹. Он показал, что наиболее мощные источники радиоизлучения лежат как раз в тех направлениях, в которых когда-то были отмечены вспышки таких звезд. Газовые оболочки, окружающие сверхновые звезды, представляют собой одну из разновидностей так называемых газовых туманностей. По этой причине, а также потому, что отдельные источники радиоизлучения имеют размеры, характерные для туманностей, а не для звезд², И. С. Шкловский предложил эти отдельные источники называть не «радиозвездами», как их называли сначала, а «радиотуманностями».

Наблюдение радиотуманностей не только само по себе представляет огромный интерес, но позволяет также осуществить новый метод изучения солнечной короны. Этот метод, предложенный В. В. Виткевичем, состоит в следующем. Среди радиотуманностей есть одна, так называемая крабовидная туманность, которая в течение нескольких суток в году видна близко от Солнца (конечно, это видимое сближение происходит не из-за движения Солнца, а тем более самой крабовидной туманности, а вследствие годичного движения Земли). В это время радиоизлучение крабовидной туманности, попадающее на Землю, проходит сквозь высокие слои солнечной короны. Наблюдая с помощью радиointерферометров излучение крабовидной туманности, угловые размеры которой в несколько раз меньше угловых размеров Солнца, можно выделить ее радиоизлучение на фоне радиоизлучения Солнца и обнаружить то влияние, которое оказывает солнечная корона на проходящее сквозь нее радиоизлучение, в частности, исследовать преломление и рассеяние радиоволн в короне. По величине же преломления и рассеяния радиоволн в солнечной ко-

¹ Сверхновыми называются звезды, в которых происходят явления типа взрыва. Яркость этих звезд резко возрастает до огромной величины, а затем постепенно уменьшается до нормального значения. За два тысячелетия наблюдалось несколько таких вспышек сверхновых звезд

² Звезды, даже самые близкие к нам, имеют угловые размеры гораздо меньше 1". Следовательно, и линейные размеры звезд гораздо меньше линейных размеров туманностей.

роне можно судить о ее строении. Этот метод позволил исследовать такие высокие слои солнечной короны, которые иным способом вообще невозможно изучать, и дал уже весьма интересные данные об этих высоких слоях солнечной атмосферы.

Радиоизлучение межзвездного водорода

Все то космическое радиоизлучение, о котором мы говорили выше, несмотря на различное происхождение, имеет одну общую черту: сплошной спектр, занимающий широкую полосу частот. Но сравнительно недавно было открыто космическое радиоизлучение, имеющее столь узкий спектр, что его можно рассматривать как излучение с одной определенной длиной волны или как монохроматическое¹ излучение.

Излучение это возникает в межзвездном водороде. Среди тех частот, которые входят в состав линейчатого спектра излучения атомов водорода, наряду с очень высокими частотами, соответствующими областям видимого и инфракрасного света, есть гораздо более низкая частота, лежащая в радиодиапазоне и соответствующая длине волны примерно в 21 см.

Ожидаемую мощность радиоизлучения межзвездного водорода на волне 21 см теоретически рассчитал И. С. Шкловский. Он показал, что эта мощность достаточна для того, чтобы ее можно было обнаружить чувствительным приемником. Это оказывается возможным несмотря на то, что водород в межзвездном пространстве находится в чрезвычайно разреженном состоянии (примерно один атом в кубическом сантиметре). Дело в том, что мощность излучения определяется не плотностью водорода в межзвездном пространстве, а общим числом атомов водорода, излучение которых попадает в приемную антенну. А это число зависит от тех расстояний, с которых радиоизлучение атомов водорода еще может достичь приемной антенны.

Вследствие очень слабого поглощения радиоволн в межзвездном пространстве они могут проходить без заметного ослабления огромные расстояния: порядка десятка тысяч световых лет. Общее число атомов водорода, которые лежат на пути «луча зрения» приемной антенны на таком громадном расстоянии, очень велико, несмотря на чрезвычайно малую

¹ Монохроматическое — означает одноцветное; так как в случае видимого света каждой длине волны соответствует свой цвет, то излучение одной определенной длины волны и называют монохроматическим.

плотность водорода. Поэтому общая мощность радиоизлучения, попадающая в приемную антенну от всех этих атомов, оказывается достаточной для того, чтобы излучение можно было обнаружить.

Следует иметь в виду, что мощность эта не может быть увеличена свыше определенного предела изменением размеров антенны. Причина этого по существу та же, что и в случаях, рассмотренных выше, когда угол раствора диаграммы направленности антенны оказывается меньше угловых размеров источника; но в случае излучения межзвездного водорода эта причина может быть объяснена особенно наглядно.

Дело в том, что по мере увеличения площади антенны растет мощность излучения, попадающая в антенну от каждого отдельного атома, но так как одновременно суживается диаграмма направленности антенны, то уменьшается число атомов, излучение которых попадает в антенну, так что в конечном счете принимаемая мощность остается неизменной. Так как радиоизлучение водорода на волне 21 см имеет очень узкий спектр, то нельзя также воспользоваться вторым из указанных выше основных методов повышения чувствительности приемника. При расширении полосы пропускания приемника за пределы ширины спектра принимаемого излучения (которая очень мала) будет увеличиваться только мощность шумов, а не мощность принимаемого излучения. Вследствие этого для повышения чувствительности приемников монокromaticкого радиоизлучения межзвездного водорода потребовались иные методы. Один из таких методов (предложенный впервые В. В. Виткевичем) и применяется сейчас для наблюдения радиоизлучения межзвездного водорода.

В этом методе настройка приемника изменяется несколько десятков раз в секунду таким образом, что из всего узкого спектра принимаемого излучения вырезается то одна, то другая еще более узкая полоса, и на выходе сравнивается принимаемая мощность при той и другой настройке приемника. Если помимо этих периодических изменений настройки приемника медленно менять настройку приемника в одном направлении, то он будет вырезать последовательно разные участки спектра и на выходе приемника будет получаться сигнал, соответствующий разности мощностей в двух узких полосах, перемещающихся вдоль всей полосы спектра принимаемого излучения. По этому сигналу может быть не только обнаружено излучение, но и найдено распределение мощности во всей полосе спектра (так называемый контур линии).

Особую ценность наблюдениям радиоизлучения межзвездного водорода придает то обстоятельство, что водород излучает волну в 21 см, находясь в таком состоянии, в котором он не излучает никаких других линий, лежащих в инфракрасной или видимой областях спектра (так называемое невозбужденное состояние). Именно в этом состоянии он находится в большей части межзвездного пространства. Поэтому наблюдения радиоизлучения водорода на волне 21 см являются единственным источником наших сведений о межзвездном водороде, находящемся в невозбужденном состоянии. Эти наблюдения уже дали исключительно ценные сведения о распределении водорода в межзвездном пространстве, о движении отдельных облаков межзвездного водорода и т. д.

* * *

Изложенные выше краткие сведения об электромагнитном излучении космических объектов, методах наблюдения этого излучения и некоторых результатах таких наблюдений представляют собой как бы физическое введение в радиоастрономию. Это краткое введение, конечно, не может дать исчерпывающего представления о современной радиоастрономии.

Для желающих более подробно ознакомиться с радиоастрономией в конце лекции указана литература. Но, чтобы понимать содержание этой науки, следить за ее успехами, прежде всего необходимо знакомство с физическими основами радиоастрономии. Изложить эти основы в общедоступной форме — такова была главная задача настоящих лекций.

ЛИТЕРАТУРА

А. Саломонович. — Что такое радиоастрономия. Госкультпросветиздат. 1953.

И. С. Шкловский. — Радиоастрономия. Популярный очерк. Гос-техтеоретиздат. 1953

Б. Ловелл и Дж. Клегг. — Радиоастрономия. Изд. иностранной литературы. 1953.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1-я

	<i>Стр.</i>
Физические основы радиоастрономии	
Источники сведений о космических телах	3
Электромагнитное излучение	4
Электромагнитные волны	5
Длина волны	7
Радиоволны	8
Прием радиоволн	11
Диаграммы направленности антенн	13
Методы повышения направленности антенн	18
Спектр электромагнитного излучения	22
Тепловое электромагнитное излучение	24
Спектр теплового излучения	26

Лекция 2-я

Радиоастрономические наблюдения

Возникновение радиоастрономии	31
Электромагнитное излучение и земная атмосфера	34
Антенны радиотелескопов	35
Разрешающая способность радиотелескопов	38
Приемники радиотелескопов	42
Методы повышения чувствительности приемников	45
Оптические и радиоастрономические наблюдения	48
Радиоизлучение спокойного Солнца	49
Радиоизлучение активного Солнца	53
Радиоизлучение Галактики	56
Радиоизлучение межзвездного водорода	61
Литература	63

Автор
Семен Эммануилович Хайкин

Редактор С. Е. Кипнис
Техн. редактор П. Г. Ислентьева

A06640. Подписано к печ. 23/IX 1954 г. Тираж 63000 экз. Изд. № 220.
Бумага 60×84^{1/16} — 2 бум л = 4 печ. л. Учетно изд. 3,62 л. Заказ 3045

Типография изд-ва «Московская правда» Потаповский пер., д. 3.

Цена 1 р. 20 к.