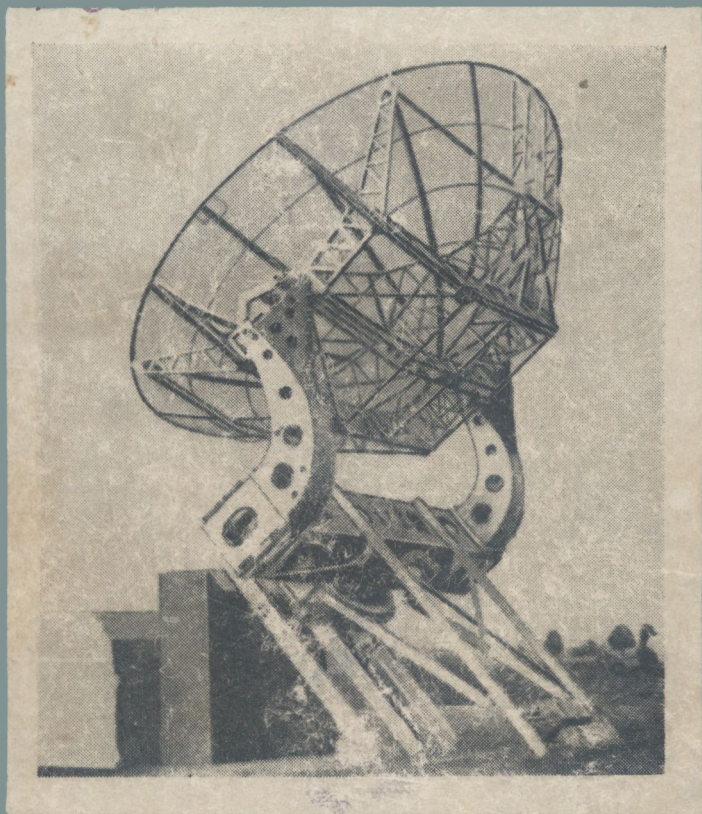


И.С. Шкловский · РАДИОАСТРОНОМИЯ



И.С. Шкловский

РАДИОАСТРОНОМИЯ

ПОПУЛЯРНЫЙ ОЧЕРК

И. С. ШКЛОВСКИЙ

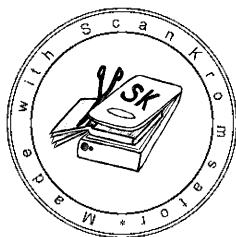
РАДИОАСТРОНОМИЯ

ПОПУЛЯРНЫЙ
ОЧЕРК

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ДОПОЛНЕННОЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1955



Scan AAW

Шкловский Иосиф Самуилович. Радиоастрономия.

Редактор *И. Е. Рахлин.*

Техн. редактор *С. С. Гаврилов.*

Корректор *Е. А. Белицкая.*

Сдано в набор 9/II 1955 г. Подписано к печати 21/V 1955 г. Бумага 84×108^{1/32}.
Физ. печ. л. 19,25. Услов печ. л. 15,17. Уч.-изд. л. 14,85. Тираж 25000 экз.
Т-04317. Цена книги 5 р. 45 к. Заказ № 160.

Государственное издательство технико-теоретической литературы
Москва, В-71. Б. Калужская, 15

Министерство культуры СССР. Главное управление полиграфической
промышленности. 4-я тип. им. Евг. Соколовой.
Ленинград, Измайловский пр., 29.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

В этой книге будет рассказано о новой науке — радиоастрономии, возникшей и бурно развивающейся в последние годы на базе достижений радиолокации. Развитие науки настоятельно требует систематического изложения её успехов. Не менее важно популяризировать науку. Достижения радиоастрономии должны быть хорошо известны самым широким слоям советской общественности. В свою очередь и наука не может двигаться вперёд, если её достижения не станут достоянием народа.

Радиоастрономия — наука своеобразная. Она находится на стыке таких наук, как радиофизика, астрофизика, теоретическая физика. Без знания основ земной и космической физики нельзя, да и бессмысленно, изучать радиоастрономию. В конечном итоге радиоастрономия есть один из методов познания материальной вселенной. Этот метод, конечно, не является единственным. Он существенно дополняет другие, более старые методы. Игнорировать их — значит получить крайне одностороннее, искажённое представление о вселенной.

Трудно излагать в общедоступной форме основы радиоастрономии. Насколько нам известно, подобных книг ни в советской, ни в зарубежной литературе пока не существует. Вряд ли вообще раньше можно было излагать основные проблемы радиоастрономии, так как картина космического радиоизлучения стала более или менее ясной совсем недавно.

Книга рассчитана на читателей самой различной квалификации, в основном на имеющих образование в объёме средней школы. Может быть, некоторым читателям покажутся слишком элементарными отдельные места

книги, зато в других местах они найдут достаточную пищу для размышлений. В книге почти нет формул, а если и попадаются формулы, то они содержат только элементарные алгебраические операции. Особое внимание обращено на простоту изложения физической стороны вопроса. Такие важнейшие проблемы современного естествознания, как проблема происхождения первичных космических лучей, проблема космического магнетизма и т. д., излагаются в популярной форме впервые. Мы убеждены, что как бы ни была сложна та или иная физическая теория, её всегда можно изложить общедоступно. Насколько нам это удалось — пусть судит читатель.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Второе издание «Радиоастрономии» отличается от первого включением большого количества новых результатов, полученных за последние два года. В частности, заново написаны главы XI и XII, где содержится изложение новейших исследований, касающихся природы дискретных источников космического радиоизлучения, что является центральной проблемой современной радиоастрономии. Значительно увеличено число иллюстраций.

Вместе с тем мы сочли возможным опустить элементарные сведения об электромагнитных волнах, которые были во вводной главе первого издания. Эти сведения предполагаются известными читателю из курса средней школы.

Читая эту книгу, следует иметь в виду, что её автор — астрофизик, работающий в области радиоастрономии. Поэтому, естественно, наиболее полно освещена астрономическая сторона радиоастрономических исследований. Чисто аппаратурным, радиофизическим вопросам уделяется меньше внимания, хотя и эти вопросы мы старались осветить с необходимой полнотой.

Хотя книга рассчитана на самые широкие круги читателей, имеющих среднее образование и интересующихся физико-математическими науками, нам кажется, что она будет небесполезной и для специалистов — астрономов и физиков.

И. Шкловский

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Древнейшая из наук — астрономия — обладает одной важной особенностью, резко отличающей её от других наук о природе. Астрономия — наука наблюдательная, в отличие, например, от физики, в основе которой лежит опыт. Опыт предполагает активное воздействие исследователя на изучаемое явление природы. Для выявления характерных особенностей изучаемого явления физик-экспериментатор создаёт условия, обычно в природе не встречающиеся.

Астрономы пока не могут активно вмешиваться в течение космических процессов, а следовательно, не могут ставить опыты над небесными телами. Из этого правила имеются только два исключения: во-первых, астрономы могут экспериментировать над упавшими на землю метеоритами, — например, определять их химический и изотопный составы. Второе исключение как раз относится к области радиоастрономии: речь идёт о посылке на Луну импульса радиоволн и о получении сигнала, отражённого от лунной поверхности. Впервые в истории человечества расстояние до космического тела — Луны (определяемое по времени запаздывания прихода отражённого сигнала) было установлено опытным путём, а не из наблюдений, как это всегда делалось и делается.

Разумеется, и в других науках наблюдения часто играют выдающуюся роль — вспомним зоологию или ботанику. Но нигде они не являются практически единственным источником познания изучаемых объектов.

Что же наблюдают астрономы? Единственным источником сведений о небесных или космических телах являются электромагнитные волны, излучаемые или отражённые

этими телами. Впрочем, и здесь имеется исключение из общего правила: некоторые небесные тела излучают так называемые первичные космические лучи, состоящие из ядер разных элементов, движущихся с огромными скоростями. Попадая в земную атмосферу, эти частицы сталкиваются с её молекулами и порождают новые, вторичные частицы. Как первичные, так и вторичные космические частицы наблюдаются при помощи различных физических приборов. Наше Солнце тоже излучает быстро движущиеся частицы, главным образом ионы водорода и кальция, но их энергия несравненно меньше, чем энергия первичных космических частиц. Это излучение обычно наблюдается тогда, когда на Солнце много пятен. Выброшенные из Солнца частицы попадают в земную атмосферу и вызывают явления полярных сияний и так называемых магнитных бурь, т. е. возмущений магнитного поля Земли потоками заряженных частиц.

Но это исключение не меняет основного вывода: все сведения, которыми располагает современная наука о природе космических тел, в конечном итоге почерпнуты из анализа электромагнитных волн, излучаемых или отражаемых этими телами.

Изучая электромагнитные волны, приходящие от небесных светил, астрономы сумели узнать многое.

Они с высокой точностью определили положение большого числа небесных тел и хорошо изучили их движения. Это оказалось возможным сделать, потому что направления на небесные светила определяются направлениями распространения излучённых ими электромагнитных волн. Не видя светил, нельзя было бы определить их положение в пространстве, нельзя было бы ничего сказать об их движениях. Можно возразить, что иногда небесные тела сами по себе не наблюдаются, а их положения и движения тем не менее известны. Но ведь мы потому и узнаём кое-что об этих невидимых телах, что они оказывают влияние на соседние небесные тела, которые наблюдаются. Мы, например, непосредственно не можем наблюдать сравнительно маленькие тела, по массам лишь немного превосходящие Юпитер и обращающиеся вокруг некоторых ближайших к нам звёзд. Но мы наблюдаем особенности в движении звёзд и отсюда

на основании законов механики доказываем существование невидимых планетоподобных тел, обращающихся вокруг этих звёзд.

Астрономы сумели определить химический состав поверхностных слоёв Солнца, звёзд и планет. Для этого они разлагают в спектр электромагнитное излучение, идущее к нам от этих небесных тел. Каждая линия в спектре — это «паспорт» какого-нибудь химического элемента. Анализ спектров позволяет установить не только наличие какого-нибудь элемента в атмосфере звезды, но и определить его количество. Кроме того, спектр позволяет судить о температуре, давлении газов, наличии магнитных полей и скорости вращения звезды.

Важной характеристикой звезды является полный поток излучения, падающий от неё на Землю. Знание этой величины в ряде случаев позволяет определить расстояние до звезды. Расстояния до звёзд определяются и другими способами — по спектру, по небольшому изменению направления на звезду при наблюдении с разных точек земной орбиты и т. д., но все эти способы тоже основываются на анализе электромагнитных волн, испускаемых звёздами.

Мы намеренно везде употребляли выражение «электромагнитные волны», а не «световые волны». Хорошо известно, что световые волны — это небольшой участок спектра электромагнитных волн. Основная характеристика излучения — длина волны — для световых волн лежит в пределах от 0,4 микрона (фиолетовые лучи) до 0,75 микрона (красные лучи). Электромагнитные волны — более общее понятие, охватывающее все виды излучения с длиной волны от нуля до бесконечности. Излучение с длиной волны, меньшей, чем у видимого света, называется ультрафиолетовым. Длина волны самых коротковолновых ультрафиолетовых лучей в сто раз меньше, чем фиолетовых. Ещё короче длина волны рентгеновских лучей (до 10^{-10} см), и уже совершенно ничтожна длина волны гамма-лучей. Излучение с длиной волны, большей, чем у красных лучей, называется инфракрасным. Область этих невидимых лучей (часто называемых тепловыми) простирается до длин волн около миллиметра. Наконец, самое длинноволновое излучение охватывает так назы-

ваемый радиодиапазон. Сюда относится всякое излучение с длиной волны больше нескольких миллиметров. Это — область радиоволн. На рис. 1 схематически дана последовательность (шкала) электромагнитных волн.

До последнего времени почти все наши сведения о природе небесных тел были получены из анализа посланных ими световых лучей. Почему же не использовались в должной мере другие электромагнитные волны, приходящие к нам от небесных тел?

Всякое нагретое тело, например Солнце, испускает одновременно электромагнитные волны разных длин.

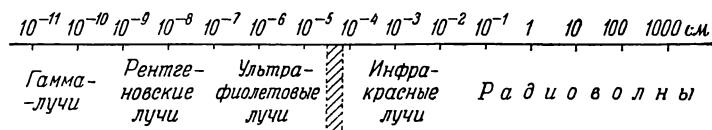


Рис. 1. Последовательность электромагнитных волн. Область световых лучей заштрихована.

Распределение энергии излучения по разным длинам волн или, как говорят, распределение энергии по спектру зависит только от температуры поверхности излучающего тела. На рис. 2 дано распределение по спектру энергии излучения тела, нагретого до температуры в 6000° . Температура поверхностных слоёв Солнца, откуда к нам приходит его излучение, близка к 6000° . Мы видим, что большая часть излучения Солнца падает на видимый свет. Большинство звёзд имеет температуры поверхностных слоёв от 4500 до 10 000 $^{\circ}$. Следовательно, наблюдая их свет, мы наблюдаем большую часть их электромагнитного излучения. Однако есть небольшое число очень горячих звёзд — с температурами поверхностных слоёв в 25 000, 50 000 и даже 100 000 $^{\circ}$. Эти звёзды большую часть энергии излучают в виде ультрафиолетовых лучей. На том же рис. 2 дано распределение по спектру энергии излучения звёзд с температурой поверхностных слоёв в 8000, 10 000, 15 000 и 20 000 $^{\circ}$. Существуют звёзды, температура поверхностных слоёв которых близка к 4000, 3000 $^{\circ}$ и даже ниже. Такие звёзды большую часть энергии излучают в инфракрасной области спектра. В видимых

лучах они излучают сравнительно мало. На рис. 2 приведено распределение излучения по спектру у звёзд с температурой поверхности в 5000 и 4000° *).

Чем бóльшую часть спектра звезды или другого небесного тела будут наблюдать астрономы, тем более полными будут наши сведения о природе небесных тел. По-

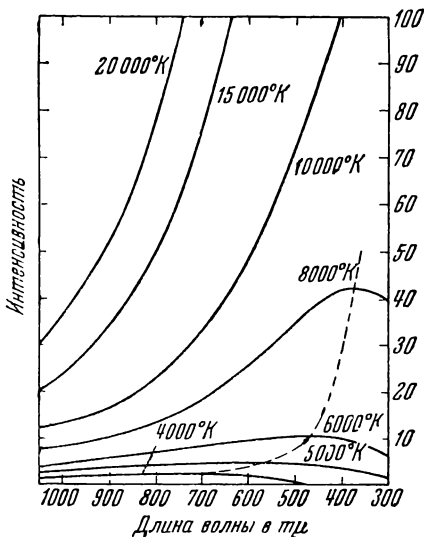


Рис. 2. Распределение энергии в спектре раскалённого тела для разных температур.

этому астрономы всегда стремятся расширить область своих исследований как в сторону более коротких, так и более длинных волн, чем видимое излучение.

Ультрафиолетовые и инфракрасные лучи невидимы. Для наблюдения этих лучей требуются особые приёмники, например, фотографическая пластинка — для ультрафиолетовых лучей, особые фотоэлементы — для инфракрасных лучей. Эти приёмники применяются в астрономии сравнительно недавно: фотография — с середины

*) Необходимо заметить, что излучение звёзд зачастую отклоняется от теоретического закона, даваемого кривыми на рис. 2.

прошлого века, фотоэлементы для наблюдений в инфракрасной области — всего несколько лет. Ясно, что раньше астрономы могли наблюдать только световые лучи, — других приёмников, кроме человеческого глаза, не было.

Но есть ещё одна причина, из-за которой астрономы использовали преимущественно видимые лучи. Прежде чем попасть в телескоп, электромагнитное излучение внеземного происхождения должно пройти через земную атмосферу, а она — старинный «враг» астрономов.

Неоднородности и движения атмосферы приводят к дрожанию изображений звёзд, что очень сильно мешает наблюдениям. Но самое главное — это то, что атмосфера поглощает часть электромагнитных волн, идущих к нам от небесных светил. Это поглощение не одинаково для волн разной длины. Видимые лучи атмосферой поглощаются лишь в незначительной степени *), но ультрафиолетовые лучи с длиной волны, меньшей чем 0,29 микрона, полностью поглощаются атмосферой. Это значит, что ультрафиолетовое излучение Солнца, звёзд и планет с длиной волны, меньшей 0,29 микрона, к нам не доходит. А между тем, эта область электромагнитных волн представляет для астрономов и физиков особый интерес. Недавно при помощи ракет удалось поднять приёмники ультрафиолетового излучения на огромную высоту — свыше 100 км — и впервые исследовать коротковолновое излучение Солнца, потому что на таких высотах атмосфера сильно разрежена и производит незначительное поглощение. Но даже таким путём пока нельзя поднимать сложные, требующие неподвижной установки астрономические приборы для исследования ультрафиолетового излучения звёзд.

Инфракрасные лучи также сильно поглощаются земной атмосферой, главным образом из-за наличия в ней паров воды. На рис. 3 схематически изображена пропускная способность земной атмосферы для излучений различных длин волн. Образно выражаясь, мы смотрим

*) Впрочем, при точных астрономических наблюдениях это незначительное поглощение надо учитывать со всей тщательностью, а это делать нелегко, так как атмосферные условия меняются быстро и притом самым беспорядочным образом,

на вселенную через «окно прозрачности» в нашей атмосфере; только то внеземное излучение, длина волны которого лежит в пределах окна прозрачности, доступно для астрономов. Но из того же рис. 3 следует, что в нашей атмосфере есть ещё одно окно прозрачности и притом гораздо больших размеров: земная атмосфера пропускает излучение с длинами волн (примерно) от 1,25 см до 16—30 м. Это окно целиком расположено в радиоди-

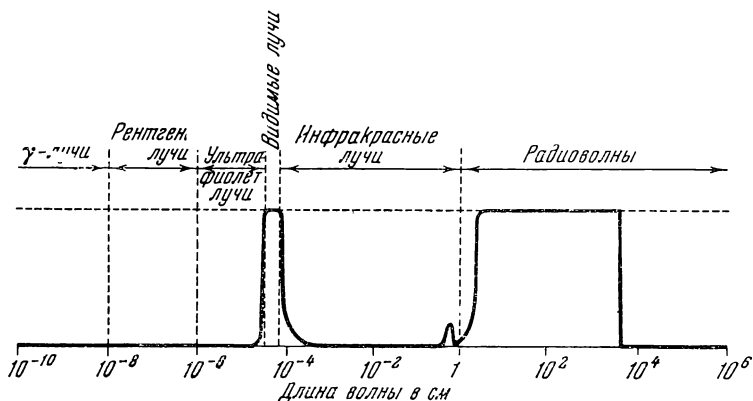


Рис. 3. Прозрачность земной атмосферы для электромагнитных волн разных длин. По оси абсцисс отложена длина волны, по оси ординат — процент энергии излучения, пропускаемой атмосферой при перпендикулярном падении электромагнитной волны.

апазоне. Излучение с длиной волны меньше 1,25 см поглощается молекулами кислорода и водяных паров *). Излучение с длиной волны, большей чем 16—30 м, поглощается верхними слоями земной атмосферы, проводящими электричество, — так называемой ионосферой **). Указать точно длину волны, для которой имеет место полное поглощение в ионосфере, нельзя. Эта критическая длина волны зависит от того, под каким углом

*) Заметим, однако, что для длин волн около 8 мм земная атмосфера сравнительно прозрачна (см. рис. 3).

**) Кроме того, приходящие из мирового пространства радиоволны с длиной волны больше 16—30 м будут сильно отражаться от земной ионосферы.

пересекает радиолуч земную атмосферу, и от физического состояния ионосферы, которое сильно меняется. Излучение с длиной волны, меньшей 10 м, проходит через атмосферу, не испытав почти никакого поглощения, поэтому эти волны, используемые, например, в телевидении, не применяются для связи на далёких расстояниях. В этом случае радиосигнал просто уходит в мировое пространство. Поэтому в настоящее время телепередачи возможны лишь в пределах видимого горизонта *). На рис. 4, а схематически изображены условия распространения волн,

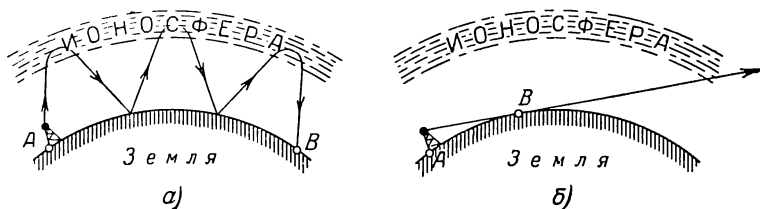


Рис. 4. Схема, показывающая распространение обычных коротких волн (а) и ультракоротких волн, применяемых в телевидении (б)

отражающихся от ионосферы, а на рис. 4, б — условия распространения весьма коротких волн, применяемых в телевидении.

Таким образом, в нашей атмосфере имеются два «окна» прозрачности: «оптическое окно», пропускающее видимые, близкие ультрафиолетовые и часть инфракрасных лучей, и «радиоокно», пропускающее космические радиоволны. До самого последнего времени это «окно» прозрачности совершенно не использовалось по двум причинам. Во-первых, через «радиоокно» по сравнению с «оптическим окном» к нам приходит ничтожное количество лучистой энергии. Из кривых на рис. 2 видно, что большая часть излучения обычных звёзд сосредоточена в видимой, близкой ультрафиолетовой и инфракрасной областях.

*) Изредка телепередачи принимались и на весьма значительных расстояниях. Например, московские телепередачи в единичных случаях принимались в Праге. Это объясняется особыми возмущениями в земной атмосфере.

Подсчёты показывают, что звезда с температурой поверхностных слоёв в 6000° только ничтожную часть энергии будет излучать в виде электромагнитных волн с длиной больше одного метра. Наблюдения показали, что действительно через «радиоокно» попадает на Землю весьма малое количество энергии, хотя далеко не такое малое, как можно было ожидать на основании предварительных теоретических расчётов в предположении, что звёзды излучают как раскалённые тела соответствующей температуры.

Во-вторых, до последнего времени принимать космическое радиоизлучение мешали малая чувствительность радиоприёмников и малая направленность антенн. Эти причины тесно связаны с предыдущей: если бы космическое радиоизлучение было достаточно мощным, то даже приёмники малой чувствительности смогли бы его обнаружить. Успехи радиолокации за последние годы позволили повысить чувствительность радиоприёмников, работающих на метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах, и улучшить конструкцию антенн. Всё это привело к такому улучшению качества радиоприёмных устройств, что оказалось возможным принимать и измерять радиоизлучение космических объектов, приходящее на Землю через «радиоокно прозрачности» (8 м — 16 — 16—20 м), хотя это излучение и очень слабо.

Мы являемся свидетелями возникновения и бурного развития новой науки — радиоастрономии. Так замечательное изобретение великого русского учёного А. С. Попова — радио — получило новое важнейшее применение: оно стало мощным орудием исследования природы небесных тел.

В настоящее время в радиоастрономии наметились два направления. Первое направление занимается исследованием излучения небесных тел в области радиоволн. Это направление можно назвать радиоастрономией в собственном смысле слова. Наука эта — чисто наблюдательная.

Второе направление — это радиолокационная астрономия. Методы исследования небесных тел в радиолокационной астрономии состоят в посылке радиосигналов на небесные тела и в изучении полученных отражённых

сигналов. Для этой цели можно использовать мощные радиолокационные станции. По самой методике активного воздействия на исследуемый объект радиолокационная астрономия обладает всеми чертами опытной науки.

Хотя радиолокационная астрономия и достигла ряда выдающихся успехов (например, локация Луны и метеоров), возможности её ограничены. Даже при идеальных условиях объектами локации могут быть только тела нашей солнечной системы, так как даже ближайшие звёзды слишком далеки от нас, чтобы можно было получить от них отражённый радиосигнал.

Основные успехи последних лет были достигнуты в области собственно радиоастрономии. Поэтому почти вся эта книга будет посвящена изложению результатов и методов исследования радиоизлучения различных небесных тел. В этом смысле мы и будем дальше употреблять термин «радиоастрономия», и лишь в конце книги будет кратко сказано о достижениях радиолокационной астрономии.

ГЛАВА II

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ И МЕТОДИКИ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Приборы, позволяющие обнаружить и измерить космическое радиоизлучение, получили название радиотелескопов. С обычными оптическими телескопами их роднит как назначение (исследование излучения космических тел), так и принципиальная схема устройства. У оптического телескопа основной частью является либо зеркало, либо объектив, задачей которых является улавливание излучения, идущего от исследуемого объекта, и собирание его в фокусе телескопа, где устанавливается приёмник излучения — фотографическая пластинка, фотоэлемент, щель спектрографа. У радиотелескопов для этой же цели служат либо антенны, либо металлические зеркала, имеющие форму параболоида, в фокусе которых установлены небольшие антенны.

Сложные антенны, применяемые в радиоастрономии, обычно выполняются в виде системы одиночных антенн, так называемых полуволновых диполей. Каждый полуволновой диполь представляет собой металлический стержень, длина которого равна половине длины волны того излучения, которое должна принимать данная антенна. Следовательно, одиночная антенна — полуволновой диполь — всегда настроена на определённую волну.

В сложной многодипольной антенне полуволновые диполи располагаются и соединяются так, чтобы быстропеременные токи, возбуждаемые падающим излучением, во всех диполях были в одинаковой фазе, а напряжения, создаваемые всеми диполями на входе приёмника, складывались. Такие антенны называются **с и н ф а з н ы м и**.

В синфазных многодипольных антеннах диполи располагаются в одной плоскости и параллельно друг другу (рис. 5). Чтобы напряжения, создаваемые отдельными диполями на входе приёмника, складывались, расстояния между диполями обычно делают равными половине длины принимаемой волны.

Площадь плоской многодипольной антенны является её важной характеристикой. Ввиду указанного выше рас-

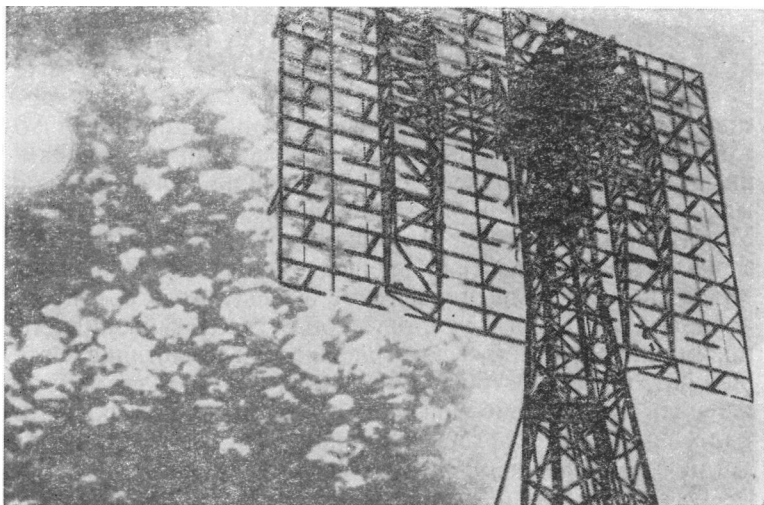


Рис. 5. Синфазная многодипольная антенна.

положения диполей, число диполей, которое можно разместить на антенне данной площади, является строго определённой величиной. Чем короче длина волны, тем больше диполей можно разместить на данной площади. Если число диполей будет больше или меньше оптимального (для данной длины волны), то качество антенны ухудшится.

Космическое радиоизлучение обычно является смесью электромагнитных волн всех длин с самыми различными, беспорядочно и независимо меняющимися фазами. Иначе говоря, это излучение обладает непрерывным

спектром (об одном важном исключении будет подробно рассказано в главе VIII).

В этом отношении космическое радиоизлучение резко отличается от излучения передающих антенн радиостанций. Последнее является монохроматическим, так как передающие радиостанции работают на совершенно определённых частотах. В радиотехнике излучение с непрерывным спектром носит название «шумов». Такое название возникло потому, что если на выходе приёмника поставить громкоговоритель, то будет слышен характерный шипящий шум. Кроме космического радиоизлучения, шумовой характер носит излучение различных источников помех радиоприёму: промышленных (искрение в системе зажигания автомашин, дуговая электросварка и т. д.) и атмосферных (грозовые разряды).

Многодипольная антенна, состоящая из отдельных настроенных элементов, «вырезает» из спектра падающего радиоизлучения довольно узкую полосу, сосредоточенную около интересующей исследователя длины волны.

Электрическое поле радиоволны вызывает в полуволновых диполях электрические колебания. Заметим, что в данной антенне колебания вызывает не всё электрическое поле падающей волны, а только проекция вектора напряжённости электрического поля на ось диполей.

Если падающая волна линейно-поляризована и направление поляризации перпендикулярно к оси диполей, то электрических колебаний в антенне не возникает. Если же падающая волна не поляризована, как это обычно бывает, то из-за беспорядочности колебаний электрического вектора среднее значение проекции электрического вектора E на ось диполей будет равно $\frac{1}{\sqrt{2}} E$.

Электромагнитная энергия этих колебаний собирается от всех диполей в один канал. Обычно это хорошо изолированный кабель. Энергия течёт в пространстве между проводом и внутренней поверхностью кабеля и поступает на вход радиоприёмника. При условии равенства входного сопротивления приёмника волновому сопротивлению антенны на вход приёмника поступит максимальная часть энергии, уловленной антенной. Для коротких волн (сантиметровый и дециметровый диапазоны) передача

энергии от антенны к приёмнику осуществляется с помощью волноводов, которые представляют собой полые трубы определённой формы и размеров сечений.

В последнее время вместо многодипольных антенн для сравнительно коротких волн всё чаще применяются металлические параболические зеркала, в фокусе которых находится небольшая приёмная антенна, называемая

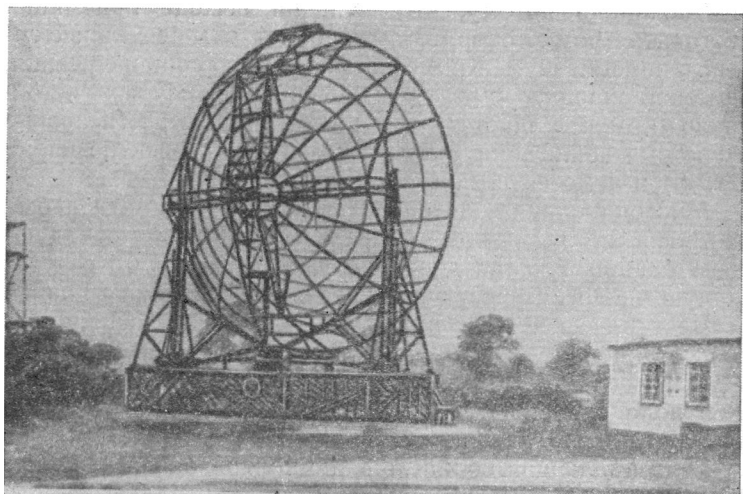


Рис. 6. Радиотелескоп параболическим зеркалом.

облучателем. Облучатель соединяется со входными клеммами приёмника. Для излучения с длиной волны, превышающей примерно 3 м, выгоднее применять многодипольные антенны. На сантиметровом и дециметровом диапазонах применяются исключительно зеркала. Параболическое зеркало ещё больше сближает между собой обычный оптический и радиотелескоп. В обоих приборах функции зеркала одинаковы: уловить побольше излучения и собрать его в фокусе. Радиотелескоп с параболическим зеркалом изображён на рис. 6.

Однако необходимо заметить, что параболическое зеркало как радиотелескопа, так и оптического телескопа

собирает излучение не в точке, а в более или менее протяжённой области, окружающей фокус. Причиной этому является диффракция. Если бы размеры зеркала были бесконечно велики, то излучение действительно собиралось бы в точку. Но конечность размеров зеркала неизбежно приводит к тому, что излучение, собранное зеркалом, будет сконцентрировано около фокуса в более или менее ограниченной области.

Чтобы понять это, посмотрим, как объясняется фокусировка излучения параболическим зеркалом. Электромагнитное поле подающей волны возбуждает на поверхности металлического зеркала радиотелескопа переменные токи. Эти токи, меняющиеся со временем так же, как и напряжённость электромагнитного поля падающей волны, создают электромагнитные волны, распространяющиеся от зеркала во все стороны, и эти волны будут интерферировать друг с другом.

В фокусе зеркала условия таковы, что электрические колебания от всех волн происходят в одинаковой фазе. Следовательно, там электрическое поле от волн, излучённых всеми частями поверхности зеркала, будет складываться. В других точках пространства, достаточно удалённых от фокуса, интерференция волн приведёт к их погашению. Ясно, однако, что волны будут усиливать друг друга не только в фокусе, но и в смежных точках пространства, ибо фазы колебаний при переходе из одной точки пространства в другую меняются плавно.

Таким образом, возникает «фокальное пятно», в котором собрана электромагнитная энергия, уловленная зеркалом. Размеры этого пятна будут тем меньше, чем больше размеры зеркала и чем меньше длина волны.

Так как длины радиоволн в сотни тысяч и в миллионы раз больше, чем длины световых волн, то даже для зеркал самых больших радиотелескопов размер фокального пятна, обусловленного диффракцией, будет весьма значительным.

Явление диффракции имеет исключительно большое значение в радиоастрономии. Оно резко ограничивает разрешающую способность радиотелескопов.

Представим себе, что в «поле зрения» радиотелескопа находятся два источника космического радиоизлучения,

находящиеся на некотором угловом расстоянии друг от друга *). Тогда радиотелескоп соберёт излучение от этих источников в два «пятна», расположенных в его фокальной плоскости. Очевидно, что источники можно будет наблюдать раздельно только тогда, когда пятна не перекрываются. Оказывается, что при длине волны космического радиоизлучения около 1 м и диаметре зеркала радиотелескопа в 5 м, источники, находящиеся друг от друга на угловом расстоянии, меньшем 10° , уже нельзя наблюдать раздельно.

С разрешающей способностью тесно связано важное свойство *направленности* радиотелескопа.

Если источник радиоизлучения находится в направлении оси зеркала (или перпендикуляра к плоскости многодипольной антенны), то на вход приёмника будет падать наибольшая мощность. Если же направление на источник составляет некоторый угол с осью зеркала, то мощность, поступающая на вход приёмника, будет меньше. Удвоенный угол между осью зеркала и направлением на источник, при котором мощность, поступающая на вход приёмника, будет равна половине максимальной мощности, характеризует *направленность* радиотелескопа: чем меньше этот угол, тем выше направленность. Если направление на источник излучения будет меняться меньше, чем угол направленности, то падающая на вход приёмника мощность будет меняться незначительно, и мы даже не сможем зарегистрировать её изменение. Это означает, что положение источника излучения на небе может быть определено только с точностью до некоторой доли угла направленности.

Таким образом, направленность определяет разрешающую силу радиотелескопа. Направленность радиотелескопа тем выше, чем больше диаметр зеркала и чем меньше длина волны принимаемого радиоизлучения. Для зеркала диаметром в 10 м при длине волны в 1 м направленность близка к 6° , а при длине волны в 10 см то же зеркало даст направленность в $0^\circ,6$ (или $36'$).

*) Угловым расстоянием между двумя телами (в частности, небесными) называется угол между направлениями на эти тела, вершина которого совпадает с положением наблюдателя.

Аналогичным образом можно определить характеристику направленности многодипольной антенны. В этом случае плоская поверхность такой антенны играет роль поверхности зеркала. При этом имеется в виду такая

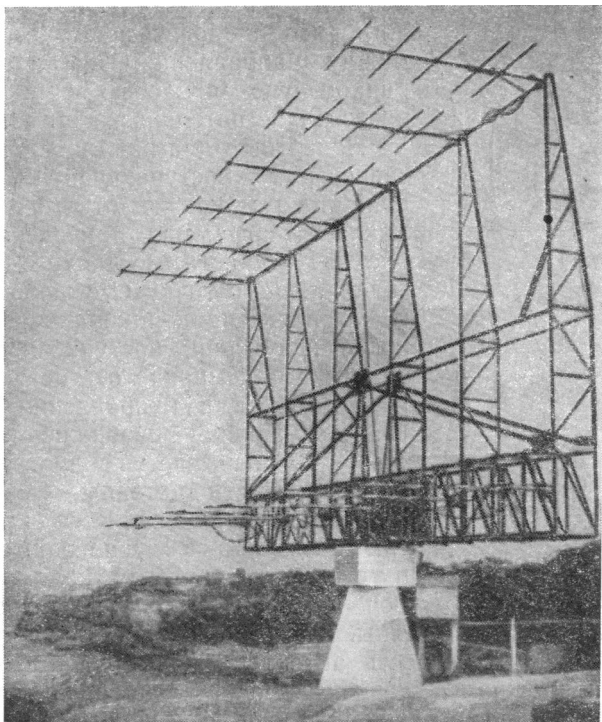


Рис. 7. Многодипольная антенна.

плоская поверхность антенны, на которой диполи размещены наиболее рациональным образом. В случае, когда диполи расположены не в одной плоскости, а в пространстве (рис. 7), направленность антенны зависит от числа и взаимного расположения диполей.

Мы можем направленность антенны определить более точно. Помещая какой-нибудь искусственный

источник радиоизлучения постоянной мощности на одинаковом расстоянии от антенны, но под разными углами к её оси, мы будем наблюдать, что мощность, поступающая на вход приёмника, будет меняться в зависимости от этого угла. Она будет наибольшей, когда источник излучения находится на оси антенны (зеркала). Можно сказать, что в зависимости от угла

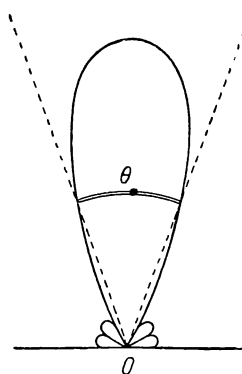


Рис. 8. Диаграмма направленности антенны, показывающая главный и боковые лепестки; θ — угол направленности антенны.

между направлением на источник радиоизлучения и осью зеркала меняется чувствительность антенны.

Начертим диаграмму, дающую зависимость поступающей на вход приёмника мощности от этого угла. Такая диаграмма приведена на рис. 8. На диаграмме длина отрезка, соединяющего точку O с любой точкой кривой, пропорциональна мощности излучения, поступающего на антенну приёмника от источника, находящегося в направлении этого отрезка. Кривая, изображённая на рис. 8, называется диаграммой направленности антенны. Основной её особенностью является наличие так называемого главного лепестка, вытянутого в направлении

оси антенны. Угол θ определяет направленность антенны. В направлении главного лепестка чувствительность антенны максимальна.

Однако кроме главного лепестка на рис. 8 видно несколько меньших, так называемых боковых лепестков. Боковые лепестки вызваны дифракцией. По своей природе они вполне аналогичны дифракционным кольцам, окружающим изображение звезды в фокусе оптического телескопа. При радиоастрономических наблюдениях необходимо тщательно учитывать наличие этих боковых лепестков.

Представим себе, что зеркало радиотелескопа наведено на область неба, где нет никаких источников космического радиоизлучения, а в направлении бокового лепестка находится сравнительно сильный источник радио-

излучения. Излучение этого источника через боковой лепесток попадёт на вход приёмника, и наблюдатель может прийти к выводу, что в направлении оси радиотелескопа обнаружен источник радиоизлучения. Такие случаи в истории радиоастрономии бывали.

Как уже указывалось, с направленностью тесно связана разрешающая способность радиотелескопа. Вообразим себе, что имеются два источника радиоизлучения, находящиеся друг от друга на угловом расстоянии, меньшем, чем угол направленности радиотелескопа θ . Поскольку положение источника радиоизлучения определяется только с точностью до угла направленности, радиотелескоп не сможет воспринять раздельно излучение от двух источников, находящихся на небе на угловом расстоянии, меньшем, чем угол направленности θ . Наблюдателю будет казаться, что он регистрирует излучение от одного источника.

Разрешающая способность радиотелескопов очень низка — редко меньше 1° . В оптической астрономии тоже существует такое малое угловое расстояние между двумя звёздами, при котором их уже нельзя в данный телескоп наблюдать раздельно. Однако вследствие малости длины световых волн разрешающая способность оптических телескопов огромна. Так, если объектив телескопа-рефлектора имеет диаметр в 20 см (это очень небольшой телескоп!), то разрешающая способность его будет около $0'',1$. Под таким углом виден человеческий волос с расстояния в 300 метров! Следовательно, в отношении разрешающей способности радиотелескопы сильно уступают оптическим телескопам. Казалось бы, поэтому нельзя наблюдать большое количество радиоизлучающих объектов, так как они будут «сливаться», если угловое расстояние между ними будет меньше нескольких градусов. Но искусным приёмом, о котором будет рассказано в этой главе, учёные преодолели это препятствие.

Очевидно, что чем большее количество излучения улавливает антенна, тем выше её чувствительность. Если угловые размеры источников космического радиоизлучения малы по сравнению с углом θ , характеризующим направленность радиотелескопа, то количество уловленного космического радиоизлучения будет пропорцио-

нально площади зеркала. Это следует из того, что на большую площадь падает больший поток излучения. Но большей площади антенны для данной длины волны соответствует и большая направленность. Следовательно, чувствительность антенны тем выше, чем выше её направленность. Но когда размеры зеркала становятся настолько большими, что угловые размеры его главного лепестка сравнимы с угловыми размерами источника, дальнейшее увеличение размеров зеркала уже не даёт увеличения количества уловленного радиоизлучения, т. е. не повышает чувствительности антенны. Дело в том, что в этом случае радиотелескоп будет принимать излучение уже не от всего источника, а только от его центральной части, которая попадает в главный лепесток, что как раз компенсирует увеличение размеров зеркала.

Это имеет значение при наблюдении радиоизлучения Солнца. Угловой диаметр Солнца около $32'$. Если наблюдения ведутся на волне 1 см , то уже при диаметре зеркала в 2 м ширина главного лепестка (т. е. угол θ) будет меньше угловых размеров Солнца. На метровых волнах, однако, потребовались бы очень большие, практически недостижимые размеры антенн, чтобы главный лепесток был меньше $32'$.

Однако существуют весьма протяжённые источники космического радиоизлучения, занимающие на небе много градусов, например, отдельные участки Млечного Пути. В этом случае и для сравнительно длинных волн угловые размеры главного лепестка будут меньше угловых размеров источника излучения. Поэтому даже антенны с малой направленностью, а следовательно, с низкой чувствительностью, могут обнаружить радиоизлучение от столь протяжённых источников. Именно этим объясняется тот любопытный факт, что радиоизлучение Млечного Пути было обнаружено ещё в 1931 г., а радиоизлучение Солнца только в 1944 г. Применявшиеся в тридцатых годах антенны сравнительно низкой чувствительности и малой направленности позволили обнаружить излучение от такого слабого, но протяжённого источника, каким является Млечный Путь, но не смогли обнаружить гораздо более мощное излучение Солнца, занимающего на небе площадь меньше $1/4$ квадратного градуса.

Остановимся на этом вопросе более подробно. Солнце на волне 2 м излучает в 200—300 раз больше, чем самые «яркие» участки Млечного Пути, имеющие угловые размеры, равные угловым размерам Солнца. Другими словами, поверхностная яркость Солнца на этой волне в 200—300 раз больше поверхностной яркости самых «ярких» участков Млечного Пути. Пусть угол направленности антенны равен 30° . Это означает, что антенна одновременно принимает излучение с огромного участка неба площадью около 700 квадратных градусов, т. е. большего, чем вся область созвездия Большой Медведицы *) и в 2800 раз больше, чем диск Солнца. Даже если учесть, что ширина полосы Млечного Пути около 15° и что яркость отдельных его участков в радиолучах может быть значительно ниже максимальной, всё же получается, что от Млечного Пути антенна примет поток излучения, в 3—4 раз больший, чем от Солнца, ибо сравнительно малая яркость Млечного Пути более чем компенсируется его значительными угловыми размерами. Если же направленность (а следовательно, и чувствительность) антенны увеличилась бы в 10 раз, что можно достигнуть увеличением площади антенны, то принимаемый ею поток радиоизлучения от Солнца тоже увеличился бы в 10 раз, а поток излучения от Млечного Пути остался бы неизменным. В этом случае мощность принимаемого от Солнца сигнала в несколько раз превысила бы мощность сигнала от Млечного Пути.

В фокусе радиотелескопа с параболическим зеркалом ставится такая приёмная система (например, несколько диполей с отражателями), которая собирает излучение со всей поверхности зеркала. Для этого нужно, чтобы угол направленности этой приёмной системы (облучателя) был равен углу, под которым из фокуса зеркала виден его диаметр. Если угол направленности облучателя будет меньше указанного значения, то фактически будет работать только внутренняя часть зеркала, размеры которой

*) Полезно отметить, что угловое расстояние между крайними звёздами «ковша» и «ручки» Большой Медведицы около 25° , расстояние между двумя крайними звёздами «ковша», дающими направление на Полярную звезду, — около 5° .

определяются углом направленности приёмной системы. Это значит, что зеркало радиотелескопа не будет использовано полностью, и по существу получается, что размеры зеркала радиотелескопа как бы уменьшаются. Это приводит к понижению разрешающей способности радиотелескопа и к уменьшению количества уловленной мощности от исследуемых космических источников радиоизлучения.

Если угол направленности облучателя будет больше угла, под которым из фокуса виден радиус зеркала, то значительная часть уловленной зеркалом космической электромагнитной энергии будет бесполезно излучена облучателем в окружающее пространство, так как всякое приёмное устройство (в частности, полуволновой диполь) не только принимает, но и излучает электромагнитные волны.

Большим преимуществом радиотелескопа с параболическим зеркалом является его способность работать на разных волнах. В самом деле, свойство параболической поверхности собирать падающую на неё систему параллельных лучей в одну точку (фокус) никак не зависит от длины волны. Меняя приёмное устройство в фокусе, можно настраивать радиотелескоп на нужную длину волны, работая с одним и тем же зеркалом. При этом, однако, надо будет менять и приёмник, который обычно рассчитывается на работу около одной определённой длины волны. Диаграмма направленности радиотелескопа тоже будет меняться, причём для данного зеркала направленность телескопа будет тем выше, чем меньше длина волны.

Изготовление металлических зеркал для больших радиотелескопов — задача технически гораздо более простая, чем изготовление большого зеркала для оптического телескопа. Для того чтобы падающие на зеркало лучи хорошо фокусировались, поверхность зеркала телескопа не должна уклоняться от идеальной геометрической поверхности параболоида больше чем на $1/10$ длины волны. Следовательно, размеры всякого рода шероховатостей и неровностей на поверхности зеркала не должны превышать $1/10$ длины волны. Если изготавливается хорошее оптическое зеркало, то размеры неровностей поверх-

ности не должны превышать пяти сотых микрона! Изготовление большого зеркала, удовлетворяющего этому условию, является весьма трудной задачей. Поэтому большие оптические телескопы так редки и дороги.

То же условие не вызывает технических затруднений при изготовлении зеркал для радиотелескопов. Если даже радиотелескоп будет работать на волне $1,25\text{ см}$, то вполне достаточно придать его зеркалу параболическую форму с точностью до 1 мм .

В настоящее время уже имеются цельнометаллические зеркала с диаметром около 15 м . Такая машина по размерам и весу похожа на орудийную башню современного линкора. Недавно в Англии был построен радиотелескоп-гигант диаметром в 65 м . Однако его зеркало не является цельнометаллическим, а состоит из металлической сетки, натянутой на столбы *). В центре зеркала на высокой мачте установлен полуволновой диполь, куда сеткой фокусируется космическое радиоизлучение. На рис. 9 изображена часть этого радиотелескопа. Так как размеры ячеек сетки довольно велики, то этот радиотелескоп может работать только на волнах метрового диапазона; для более коротких волн поверхность сетки уже становится очень грубой. Такой тяжёлый радиотелескоп очень трудно перемещать, что значительно уменьшает число наблюдаемых объектов, так как наблюдениям доступна только сравнительно узкая полоса неба, которая проходит вблизи оси этого радиотелескопа при суточном вращении небесной сферы.

Обычно зеркала радиотелескопов подвижны и допускают перемещение по двум координатам, чаще всего по азимуту и высоте. Такая установка носит название азимутальной. Подобный радиотелескоп можно направить в любую точку неба. В оптической астрономии принята другая система установки телескопов, так называемая параллактическая, при которой телескоп вращается вокруг оси, параллельной оси вращения Земли. Параллактическая установка более удобна, так как вращение телескопа при помощи часового механизма происходит с той

*) Это возможно потому, что размеры ячеек сетки малы по сравнению с длиной принимаемой волны.

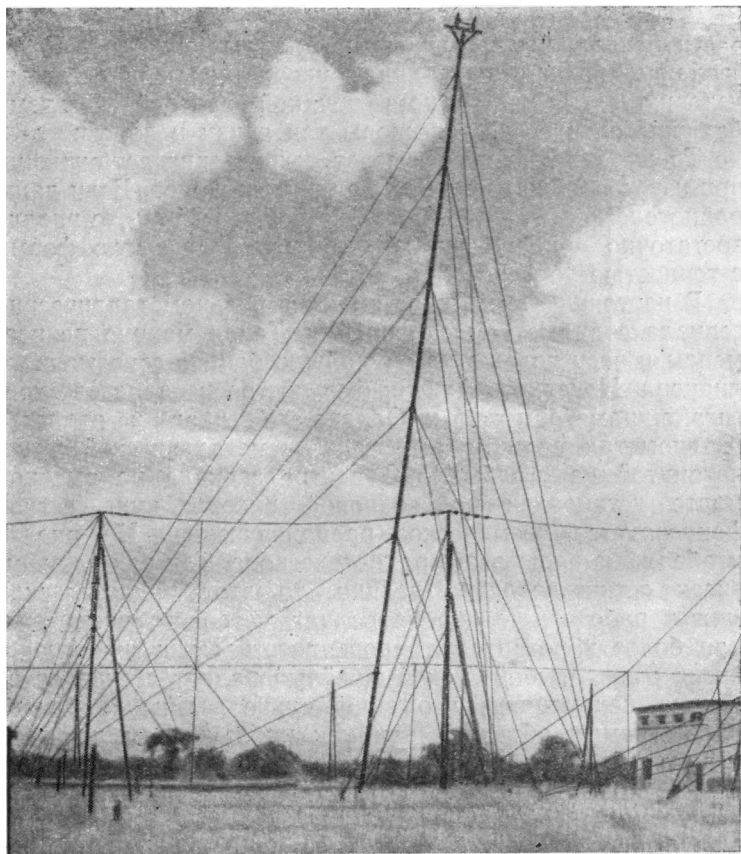


Рис. 9. Часть гигантского радиотелескопа с диаметром зеркала 65 м. Металлическая сетка, являющаяся поверхностью зеркала, укреплена на специальных устоях. Ячейки сетки на этой фотографии не видны. В фокусе зеркала находится приёмное устройство, установленное на высокой мачте. На этой фотографии мачта наклонена на угол 7° , что позволяет наблюдать часть неба на угловом расстоянии в 7° от зенита. Если бы мачта стояла вертикально, то наблюдать можно было бы только те участки неба, которые при суточном вращении небесной сферы проходят от зенита на угловом расстоянии, не превышающем угла направленности радиотелескопа, равного для волн метрового диапазона $1-2^\circ$. Возможность наклона мачты в пределах 7° значительно увеличивает число объектов, доступных наблюдениям с этим радиотелескопом.

же скоростью, с какой вращается небесная сфера, и поэтому телескоп непрерывно следит за наблюдаемым объектом. Это особенно важно при фотографировании с длительными экспозициями. Между тем, если радиотелескоп смонтирован на азимутальной установке, то для того, чтобы следить за наблюдаемым объектом, телескоп нужно перемещать одновременно по двум координатам, что, разумеется, неудобно. В настоящее время уже имеется несколько радиотелескопов на параллактической установке.

На рис. 10 изображён гигантский радиотелескоп, строящийся в Англии. Диаметр зеркала 76 м, вес телескопа около 1300 т, установка азимутальная. Этот телескоп будет готов летом 1955 г.

Выше мы подчёркивали, что разрешающая способность радиотелескопов несравненно меньше, чем у оптических телескопов. Даже для зеркала диаметром в 30 м при длине волны в 1 м угол направленности составляет всего лишь около 2° . Солнце — весьма часто наблюдаемый в радиоастрономии объект — имеет угловой диаметр около $1/2^\circ$. На Солнце могут появляться отдельные области, особенно интенсивно излучающие радиоволны. Определить положение такой области на диске Солнца при помощи радиотелескопа низкой разрешающей способности невозможно. Однако остроумное использование явления интерференции значительно повышает разрешающую способность радиотелескопов.

С подобной проблемой сталкиваются и в оптической астрономии. Хотя разрешающая способность больших оптических телескопов исключительно велика, всё же она недостаточна, чтобы наблюдать диск какой-нибудь звезды. Звёзды находятся от нас на таких огромных расстояниях, что угловые размеры даже самых больших и близких из них не превышают $0'',01$ *). И в этом случае на помощь астрономам приходит интерференция, применение которой значительно увеличивает разрешающую способность оптических телескопов.

*) На фотографиях звёзды видны не в виде точек, а в виде дисков различных размеров, что объясняется влиянием фотографических и инструментальных причин.

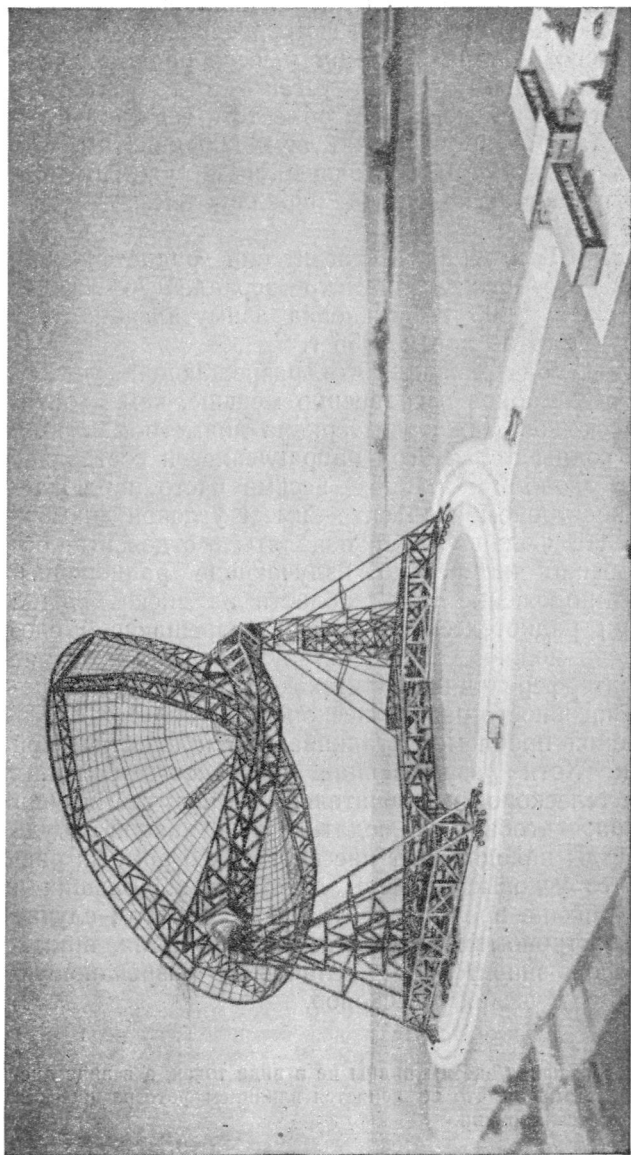


Рис. 10. Проект гигантского радиотелескопа с диаметром зеркала 76 м. Зеркало металлическое, сетчатое. Радиотелескоп будет вращаться вокруг вертикальной оси при движении опорных башен по рельсам при помощи системы 100-сильных моторов. Вращение вокруг горизонтальной оси также будет производиться при помощи моторов.

Представим себе, что у нас имеются две совершенно одинаковые неподвижные антенны, работающие на метровом диапазоне, находящиеся друг от друга на довольно значительном расстоянии, например, нескольких сот метров. От обеих антенн энергия через кабель поступает на вход одного приёмника. Схема такой установки приведена на рис. 11, а общий вид — на рис. 12. Фазы напряжённости электрического поля волны в местах, где находятся обе антенны, будут различны (см. рис. 11).

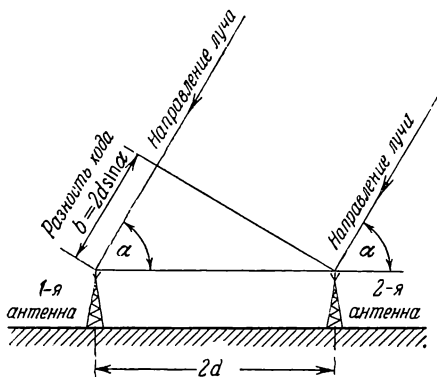


Рис. 11. Схема двухантенного радиоинтерферометра.

Поэтому вызываемые полем волны электрические колебания в обеих антеннах будут иметь различные фазы и, следовательно, между напряжениями, создаваемыми обеими антеннами на входе приёмника, будет некоторая разность фаз. Если эта разность фаз равна 0° , напряжения будут складываться, если 180° — они будут гасить друг друга. Иными словами, на входе приёмника будет иметь место интерференция напряжённостей от обеих антенн.

Разность фаз между электрическими колебаниями в обеих антеннах будет зависеть не только от расстояния между антеннами, но и от наклона падающих на землю от источника радиоизлучения лучей. Этот наклон определяется видимым положением источника на небе. Из-за вращения Земли источник радиоизлучения (например,

Солнце) будет перемещаться по небу, отчего наклон радиолучей будет плавно меняться, а следовательно, будет плавно меняться и разность фаз между интерферирующими напряжениями на входе приёмника.

Когда при некотором положении источника радиоизлучения на небе разность фаз будет равна 180° , радиоизлучение от него не будет наблюдаться. Напряжения

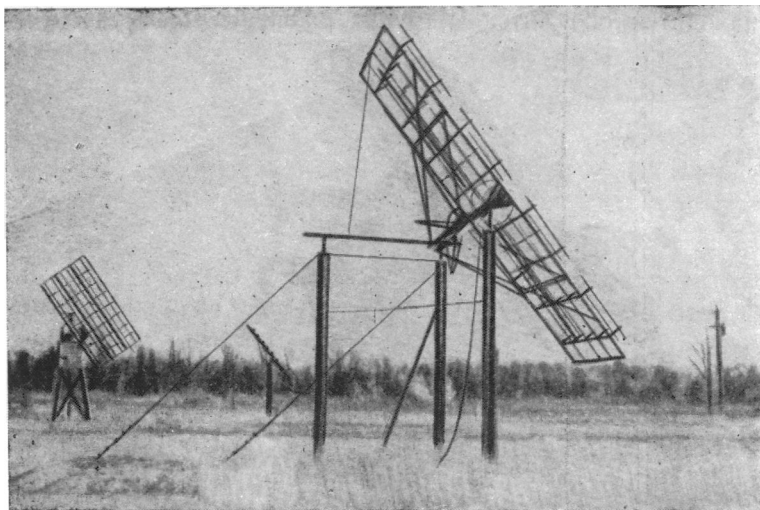


Рис. 12. Общий вид двухантенного радиоинтерферометра.

от обеих антенн будут на входе приёмника «гасить» друг друга. В следующий момент времени высота источника радиоизлучения над горизонтом изменится, разность фаз станет другой и на вход приёмника поступит некоторая мощность. Она достигнет наибольшего значения, когда разность фаз будет равна нулю. Дело обстоит так, как будто чувствительность радиотелескопа резко зависит от направления, в котором находится источник. На рис. 13 графически изображена такая зависимость. Кривая рис. 13 имеет характерную многолепестковую форму. Направления, где чувствительность радиотелескопа наибольшая (вершины лепестков, точки a_1 , a_2 , a_3 ,... на рис. 13),

суть те направления, где разность фаз интерферирующих волн равна нулю. Направлениям, где чувствительность радиотелескопа наименьшая (точки b_1, b_2, b_3, \dots), соответствуют разности фаз 180° .

Сравним эту картину с диаграммой направленности для одной антенны на той же волне. Эта диаграмма приведена на рис. 8. Как мы видели раньше, направленность антенны, определяемая такой кривой, зависит от размеров антенны и длины волны. На рис. 13 количество лепестков, а следовательно, ширина их, зависит от расстояния между антеннами. Чем расстояние больше, тем больше лепестков и тем они уже. При длине волны 1,5 м и расстоянии между антеннами (так называемом базисе) 450 м угловые размеры каждого лепестка будут около $10'$. Вспомним, что разрешающая способность обычной антенны около 10° .

Необходимо, однако, заметить, что диаграмма направленности, состоящая из узких лепестков, получается только в одном направлении, а именно, в направлении базиса. В направлении, перпендикулярном к базису, диаграмма направленности будет такой же, как у каждой из антенн. Тем не менее, даже сужение лепестков диаграммы направленности только в одном направлении значительно расширяет возможности радиоастрономических исследований.

Если источник радиоизлучения, имеющий небольшие угловые размеры (меньше, чем угловые размеры каждого лепестка), из-за вращения Земли будет перемещаться по небу и как бы проходить через лепестки неподвижной диаграммы направленности двух антенн, то

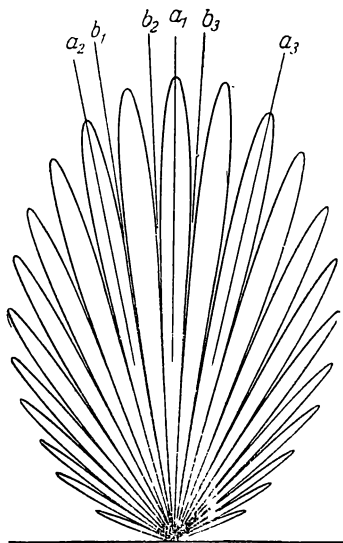


Рис. 13. Многолепестковая диаграмма направленности радиointерферометра.

установленный на выходе приёмника прибор (например, осциллограф), непрерывно регистрирующий излучение, будет выписывать волнистую линию (рис. 14). Наибольшие показания регистрирующего прибора будут тогда, когда источник радиоизлучения будет проходить через вершину лепестка, наименьшие — когда он будет «проваливаться» между лепестками.

Угловые размеры источника радиоизлучения, если они не намного меньше угловых размеров лепестка, можно определить из отношения максимальных и минимальных

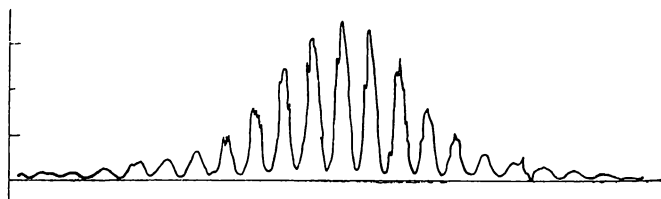


Рис. 14. Запись осциллографа, полученная при прохождении источника радиоизлучения через лепестки диаграммы направленности радиоинтерферометра.

показаний осциллографа. Это отношение тем меньше, чем больше угловые размеры источника радиоизлучения. Если угловые размеры источника радиоизлучения заметно превосходят ширину лепестков, осциллограф будет выписывать плавную линию, без максимумов и минимумов.

Таким образом, только что описанный интерференционный метод в радиоастрономии позволяет обнаружить источники радиоизлучения малых угловых размеров, даже если они наблюдаются на фоне радиоизлучения от источников большой протяжённости. Кроме того, этот метод в ряде случаев позволяет определить угловые размеры источника радиоизлучения. Этим методом было сделано несколько замечательных открытий, о которых речь будет идти дальше. Он успешно используется как при исследовании деталей радиоизлучения Солнца, так и радиоизлучения Галактики.

Существует важное видоизменение описанного выше интерференционного метода. Вместо двух антенн употре-

бляют одну антенну, расположенную на высокой горе над морем. Для интерференции необходимо иметь два луча, прошедших разный путь от общего источника. В этом случае один луч падает от источника на антенну непосредственно, а второй — после отражения от поверхности моря, которую для радиоволн можно считать зеркальной. На рис. 15 изображён принцип действия

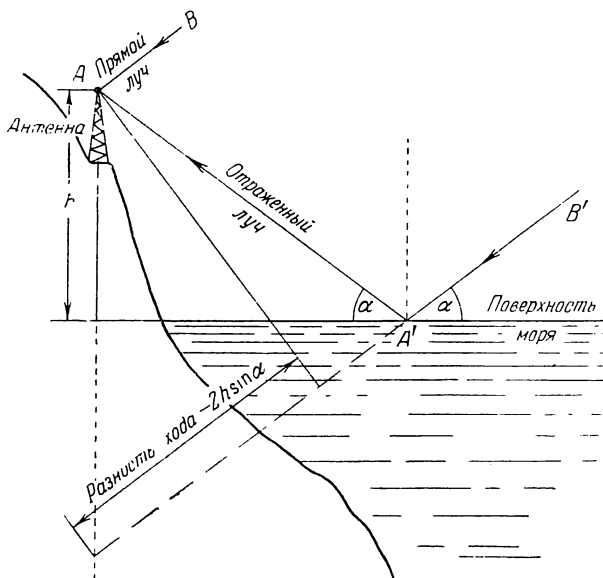


Рис. 15. Схема «морского» радиоинтерферометра.

такого «морского» радиоинтерферометра. Он вполне аналогичен принципу действия описанного выше двухантенного интерферометра, причём роль второй антенны играет зеркальное изображение первой. Нужно иметь в виду, что два параллельных луча AB и $A'B'$ исходят от одного источника, расположенного на очень большом расстоянии. Для «морского» интерферометра разности фаз между интерферирующими лучами, как видно из рис. 15, зависят от высоты источника над горизонтом. В этом случае мы также имеем многолепестковую диаграмму чув-

ствительности антенны. По мере того, как источник радиоизлучения небольших угловых размеров поднимается всё выше и выше над горизонтом (из-за вращения Земли), он будет пересекать лепестки диаграммы, и осциллограф будет выписывать волнистую линию, подобную изображённой на рис. 14. Лепестки будут тем уже, чем выше расположена антенна над морем и чем меньше длина волны.

Этот тип радиоинтерферометра выгодно отличается от описанного раньше тем, что используется только одна



Рис. 16. 32-зеркальный радиоинтерферометр.

антенна. Однако «морским» интерферометром можно проводить наблюдения только тогда, когда источник радиоизлучения расположен низко над горизонтом, т. е. либо при восходе, либо при заходе. Это не всегда бывает удобно.

Недавно в Австралии был изготовлен интерферометр с огромной разрешающей способностью. Описанные выше типы интерферометров (двухантенный и «морской») используют интерференцию двух колебаний. В интерферометре, фотография которого приведена на рис. 16, интерферируют 32 колебания. Установка состоит из 32 зеркал, выставленных в ряд. Каждое из таких зеркал имеет диаметр около двух метров, а весь ряд зеркал тянется

в длину на расстояние свыше 200 м. В принципе такая установка аналогична дифракционной решётке. Этот интерферометр работает на волне 21 см. Диаграмма направленности состоит из узких лепестков шириною около $3'$, отстоящих один от другого на угловом расстоянии в $1^\circ,5$. Лепестки диаграммы направленности узки только в направлении, по которому выстроены зеркала, а в перпендикулярном направлении их размер определяется разрешающей способностью одного зеркала. Для волны 21 см ширина лепестка диаграммы направленности в перпендикулярном направлении будет около 5° .

Весьма эффективная и вместе с тем простая интерференционная система была недавно изготовлена в Австралии Миллсом.

Рассмотрим сложную антенну, состоящую из выстроенных в один ряд надлежащим образом соединённых полуволновых диполей. Диаграмма направленности такой антенны будет узкой только по одной координате, перпендикулярной к линии, вдоль которой выстроены диполи. Она будет тем уже, чем больше диполей. Ширина диаграммы направленности в направлении оси антенны (т. е. линии, соединяющей диполи) будет такая же, как и у одного диполя, т. е. очень большая. Такая антенна, очевидно, будет принимать радиоизлучение от всех источников, находящихся на небе в пределах узкой и длинной полосы, изображённой на рис. 17. Рассмотрим теперь другой такой же ряд диполей, перпендикулярный к первому. Эта антенна будет принимать радиоизлучение от полосы на небе, перпендикулярной к первой полосе.

Представим теперь, что эти две линии диполей соединены «в фазе» *). Тогда приёмник будет принимать радиоизлучение от всех источников, находящихся в пределах двух перпендикулярных друг к другу полос или «креста». В том месте, где полосы пересекаются (чёрный квадрат на рис. 17), чувствительность антенны будет удвоена по сравнению с другими участками «креста» (так как две линии антенны соединены в фазе!)

*) Это означает, что когда электрические колебания от обоих рядов диполей поступают в один общий канал, то их фазы одинаковы.

А теперь представим себе, что две описанные линии диполей соединены в противоположной фазе. Тогда коле-

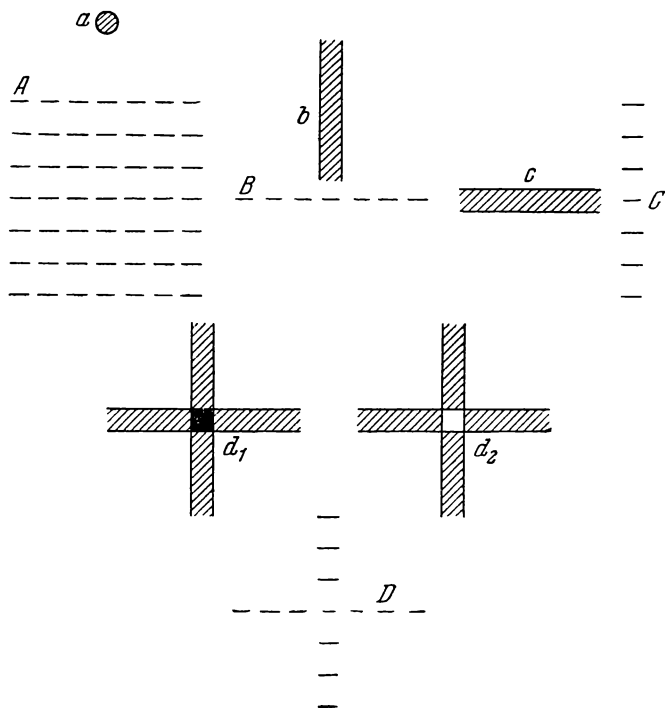


Рис. 17. «Крестообразная» антенна. *A* схематически изображает синфазную плоскую антенну, *a* — диаграмма направленности такой антенны, ограниченная по двум координатам (точнее говоря, это сечение диаграммы направленности плоскостью, перпендикулярной к оси антенны). *B* — ряд питаемых в фазе диполей, *b* — диаграмма направленности этого ряда, ограниченная по одной координате. *C* — такой же ряд диполей, но расположенный перпендикулярно к первому, *c* — его диаграмма направленности. *D* — крестообразная антенна, *d₁* и *d₂* — её диаграмма направленности при соединении рядов диполей в фазе и противофазе.

бания, приходящие из области центра «креста» в один ряд диполей, будут находиться в противоположной фазе с колебаниями, приходящими из той же области в другой

ряд диполей. Следовательно, приёмник не регистрирует излучения от источника, если он находится в центральном квадрате «креста» (см. рис. 17, «белый квадрат»).

Допустим, что два ряда диполей попеременно подключаются то в фазе, то в противофазе. Тогда центральный квадрат креста начнёт как бы «мигать» с частотой, равной частоте переключения «фаза—противофаза». Обычно эта частота — 20—30 герц. Если поставить в приёмнике специальный усилитель, настроенный на эту частоту, то можно будет отделить излучение, идущее к нам от центрального квадрата «креста», от излучения, идущего на вход приёмника от всех остальных частей «креста».

Этим достигается ограничение диаграммы направленности по двум координатам. Например, если ряд содержит 50 диполей, то сторона центрального квадрата будет около 1° . Если бы мы захотели достигнуть такой же диаграммы направленности путём изготовления плоской многодипольной синфазной антенны (типа изображённой на рис. 5), то нам пришлось бы покрыть диполями площадь в несколько тысяч квадратных метров, установив на ней 2500 диполей! А в описанной выше интерференционной системе для той же разрешающей способности требуется только 100 диполей.

Необходимо, однако, заметить, что хотя в обоих случаях разрешающая способность будет одинаковой, чувствительность «креста» будет гораздо меньше, так как последняя определяется площадью антенного полотна. Однако для целого ряда задач очень важна хорошая разрешающая способность. При помощи описанного «креста» уже удалось получить ряд интересных результатов.

Специальная установка двухантенного радиointерферометра позволяет обнаружить и изучить круговую поляризацию радиоизлучения, что важно, например, при исследовании радиоизлучения Солнца. Для этой цели у двухантенного радиointерферометра диполи обеих антенн располагают взаимно перпендикулярно. Схема такой установки изображена на рис. 18. Как уже указывалось в этой главе, каждая антенна принимает только одно направление поляризации падающей электромагнитной волны. При установке интерферометра, изображённой на рис. 18, антенны будут принимать радиоволны

со взаимно перпендикулярными направлениями поляризации.

Если падающая электромагнитная волна не поляризована, то её можно разложить на две линейно-поляризованные волны, направления поляризации которых взаимно перпендикулярны и параллельны осям диполей в обеих антеннах радиоинтерферометра. При этом разность фаз колебаний электрического вектора у обеих волн будет меняться самым беспорядочным образом и никакой интерференции не будет. Если же падающая волна поляризована по кругу, то между колебаниями, идущими от

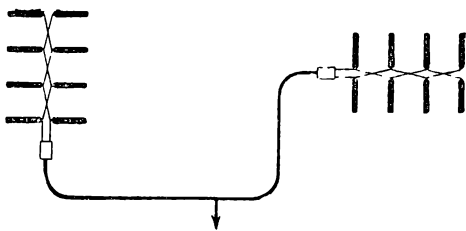


Рис. 18. Схема установки для обнаружения круговой поляризации радиоизлучения.

обеих антенн, будет постоянная разность фаз и, следовательно, будет иметь место интерференция. При движении источника радиоизлучения, обусловленном суточным вращением Земли, перо самописца регистрирующего прибора будет выписывать характерную волнистую линию. Такие наблюдения позволяют также определить направление вращения (правое или левое) электрического вектора в поляризованной по кругу волне.

До сих пор у нас шла речь только об антеннах. Другой важнейшей частью радиотелескопов являются приёмники. Условия работы приёмников у радиотелескопов существенно отличаются от условий работы обычных приёмников, принимающих излучение от передающих радиостанций. Как мы уже подчёркивали, радиостанции излучают радиоволны совершенно определённой частоты, между тем как космическое радиоизлучение, как правило, представляет собой смесь волн различных частот с совершенно независимыми фазами.

Всякий приёмник наряду с полезным сигналом принимает большое количество помех. Помехами являются всевозможные источники шумов индустриального и атмосферного происхождения, а также «собственные шумы» приёмника, о которых речь будет идти ниже. В обычном приёмнике слабый полезный сигнал выделяется на фоне помех путём настройки приёмника на частоту излучения передающей радиостанции. Следовательно, для выделения полезного сигнала используется монохроматичность излучения передающей радиостанции. В радиоастрономии полезный сигнал (космическое радиоизлучение) по своему характеру («шум») совершенно неотличим от всевозможных помех. Так как мощность космических «шумов» ничтожно мала, их отделение от мешающих шумов является нелёгкой задачей. Поэтому требования, предъявляемые к приёмникам в радиоастрономии, исключительно высоки.

Основной функцией приёмника является усиление и детектирование весьма слабых электрических колебаний, поступающих на его вход. Всякий приёмник усиливает только узкую полосу частот. Величина интервала частот, усиливаемых данным приёмником, определяет ширину его полосы пропускания. В радиоастрономии ширина полосы пропускания у приёмников обычно бывает 2—4 мегагерц *). Таким образом, приёмник «фильтрует» падающее радиоизлучение, «вырезая» из его спектра довольно узкую полосу частот.

Выше мы указывали, что многодиольная антенна принимает только ограниченную область частот падающего излучения, следовательно, она также является «фильтром». Но главным фильтром является приёмник, а не антенна, так как полоса частот, пропускаемая приёмником, гораздо уже полосы частот, принимаемой антенной. Радиотелескоп является поэтому монохроматором, т. е. прибором, пропускающим излучение лишь определённой длины волны. Это свойство радиотелескопа очень ценно: характер излучения космических объектов может оказаться и оказывается различным на разных

*) Мегагерц — частота колебаний в 1 000 000 герц; герц — единица частоты — одно колебание в секунду.

волнах. Заметим, что приёмники обычного оптического телескопа — глаз и фотографическая пластинка — реагируют одновременно на очень широкий промежуток длин волн, что делает, например, невозможным качественный анализ падающего от звезды света. Чтобы этот анализ был выполнен, приходится сочетать телескоп со спектрографом или применять другие методы.

После усиления и детектирования падающих на вход приёмника колебаний они поступают на регистрирующий прибор — миллиамперметр или осциллограф. Показания прибора дают возможность измерить величину падающего на Землю космического радиоизлучения.

На рис. 19 схематически показаны преобразования, которые приёмник выполняет над космическим радиоизлучением. В электромагнитном космическом излучении содержатся волны всех частот с независимыми фазами. Поэтому его электрическое поле крайне быстро и беспорядочно меняется со временем. На рис. 19, *а* по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — величина электрического поля космического радиоизлучения. После того, как приёмник усилит в пределах некоторой полосы частот принимаемые электрические колебания, они будут иметь вид, изображённый на рис. 19, *б*. Затем в приёмнике осуществляется преобразование высокой частоты в промежуточную частоту, более низкую, по которой и производится дальнейшее усиление. После усиления по промежуточной частоте электрические колебания имеют вид, изображённый на рис. 19, *в*. Время, в течение которого сохраняется более или менее постоянная амплитуда этих колебаний (отрезок τ_1 по оси абсцисс, рис. 19, *в*), обратно пропорционально ширине полосы пропускания приёмника, т. е. $\tau_1 = 1/\Delta\nu$. Однако очень быстро меняющиеся со временем электрические колебания, изображённые на рис. 19, *в*, никак не могут быть зарегистрированы миллиамперметром или осциллографом, так как напряжение на выходе приёмника будет менять свой знак десятки и сотни миллионов раз в секунду, и никакой регистрирующий прибор не сможет уследить за этими колебаниями. Поэтому колебания, изображённые на рис. 19, *в*, подвергаются квадратичному детектированию, т. е. они подаются на прибор (детектор, или выпрямитель), пропускающий

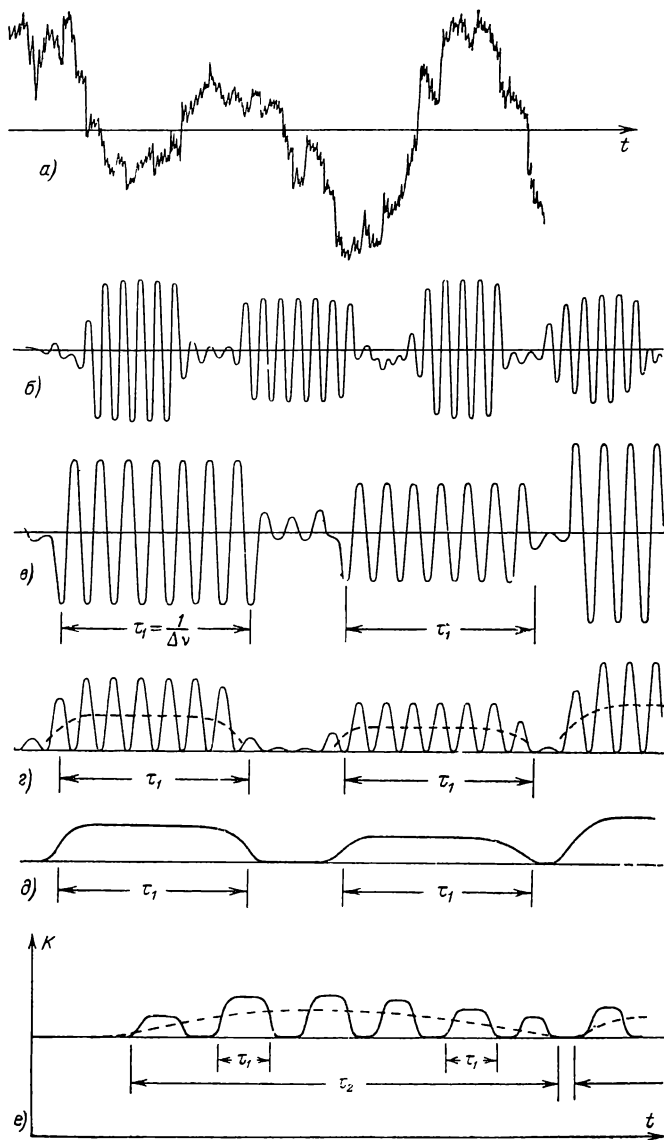


Рис. 19. Схема преобразований радиоизлучения в приёмнике.

ток только одного направления. После детектирования колебания принимают вид, изображённый на рис. 19, *г*. Затем при помощи особых фильтров переменная часть этих колебаний срезается, и сглаженные колебания (рис. 19, *д*) регистрируются на выходе приёмника миллиамперметром или осциллографом.

Дальнейшее сглаживание колебаний и усреднение их по времени инерции τ_2 регистрирующего прибора изображено на рис. 19, *е*. Дело в том, что прибор не может сколь угодно быстро реагировать на изменение электрических колебаний. Он всегда обладает некоторым временем инерции, которое обычно бывает заранее известно. Иногда вместо «времени инерции» говорят о «постоянной времени» регистрирующего прибора. Например, стрелке миллиамперметра необходимо некоторое время, чтобы «успокоиться». Заметим, что постоянную времени регистрирующего прибора можно менять в довольно широких пределах.

Всякое независимое показание прибора есть результат действия большого числа импульсов, подобных изображённым на рис. 19, *д*. Каждый такой импульс имеет длительность, приблизительно равную τ_1 . Поэтому каждое независимое показание регистрирующего прибора складывается в среднем из $\frac{\tau_0}{\tau_1}$ импульсов несколько различной мощности. Однако при этом будут иметь место отклонения от этого среднего количества импульсов, попадающих в прибор. Очевидно, чем меньше число импульсов, тем больше эти отклонения.

Приведём простой пример, до некоторой степени поясняющий сказанное, хотя и не имеющий отношения к радиоастрономии. Пусть мы имеем большой объём, наполненный пшеницей. Далее, вообразим, что у нас имеются различных размеров ведра, которыми мы черпаем зерно. Взвешивая последовательно порции зерна, которые черпаются при помощи одного и того же ведра, мы убедимся, что показания весов будут несколько различны. В этом примере результат каждого взвешивания аналогичен каждому независимому показанию регистрирующего прибора на выходе приёмника.

Причина различия результатов взвешивания понятна: в разных черпках одним и тем же ведром содержится несколько различное количество зёрен, и, кроме того, зёрна различны по весу. Количество зёрен в каждом черпке аналогично количеству импульсов, из которых складывается одно независимое показание регистрирующего прибора, вес каждого зерна — величине отдельного импульса, а размер ведра — постоянной времени прибора. Если объём ведра очень мал, так что в нём помещается всего 5—6 зёрен, то различия в весе будут очень велики: может случиться, что в одно такое «ведро» попадёт 4 зерна, а в другое 7, да и сильно скажутся различия в весе отдельных зёрен. Но если объём ведра велик, различия в весе наполненных вёдер (сами по себе небольшие) будут относительно тем меньше, чем больше объём ведра.

У радиотелескопа показания регистрирующего прибора тоже будут отличаться одно от другого тем сильнее, чем меньше количество импульсов, из которых складывается каждое его показание.

Таким образом, даже если падающее на антенну космическое радиоизлучение имеет строго постоянную мощность, показания регистрирующего прибора будут неизбежно колебаться около некоторого среднего значения. Относительное колебание, т. е. отношение среднего квадратичного отклонения к среднему значению показаний прибора, будет равно единице, делённой на корень квадратный из среднего числа импульсов, определяющих один независимый отсчёт, т. е.

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta\nu \tau_2}},$$

где $\Delta\nu = \frac{1}{\tau_1}$ — ширина полосы пропускания приёмника.

Как правило, мощность радиоизлучения небесных тел очень мала. Например, поток радиоизлучения Солнца, когда на нём нет пятен, на волне 1,5 м примерно в 200 000 раз меньше, чем от 50-ваттного передатчика, работающего на той же волне и удалённого на 100 км. В самом радиотелескопе всегда возникают помехи, кото-

рые во много раз превышают мощность космического радиоизлучения. Если, например, ко входу приёмника просто подключить какой-нибудь проводник, то приёмник будет принимать помехи, вызванные беспорядочными тепловыми движениями электронов этого проводника. Такие движения электронов вызывают на концах проводника напряжения, беспорядочно меняющиеся со временем. Эти напряжения пропорциональны температуре проводника и тоже имеют характер «шумов».

Такие помехи принципиально неустранимы, ибо нельзя уничтожить тепловое движение электронов в проводнике. Хотя мощность этих помех совершенно ничтожна, но она зачастую в десятки и даже сотни раз больше, чем мощность радиоизлучения от небесного тела, уловленная антенной. Кроме того, в самом приёмнике непрерывно генерируются электрические колебания, беспорядочно меняющиеся со временем (собственные шумы приёмника), мешающие радиоастрономическим наблюдениям. Источниками подобных шумов являются главным образом электронные лампы.

Шумы, обусловленные аппаратурой, носят совершенно такой же характер, как и «полезные» шумы космического происхождения. Все шумы аппаратурного происхождения усиливаются приёмником наряду с полезными сигналами космического радиоизлучения, причём, как правило, полезная мощность сигнала составляет доли процента от мощности аппаратурных шумов.

В радиоастрономии приёмники в большинстве случаев работают на пределе чувствительности. Чувствительность приёмников ограничивается двумя обстоятельствами. Во-первых, уровнем шумов приёмника. Чем меньше уровень шумов приёмника, тем легче на их фоне обнаружить слабое космическое радиоизлучение. В настоящее время у самых лучших приёмников, работающих на метровом диапазоне, уровень шумов всего лишь в 2—3 раза превышает теоретический предел, определяемый тепловыми движениями электронов в проводнике. Во-вторых, чувствительность приёмника зависит от того, каково предельное значение отношения полезной мощности к шумовой, которое ещё можно более или менее уверенно обнаружить.

Из рис. 14 видно, что даже когда на антенну никакого излучения не падает, осциллограф выписывает не плавную линию, а сложную кривую, отклоняющуюся от плавной линии в ту или другую сторону. Эти отклонения вызываются неизбежными колебаниями в показаниях регистрирующего прибора. Поэтому, если мощность космического радиоизлучения будет меньше, чем средние колебания интенсивности шумов аппаратурного происхождения, то космическое излучение не будет обнаружено. Тем самым определяется предельное значение мощности, которая ещё может быть зафиксирована.

Выше мы писали, что среднее относительное отклонение стрелки регистрирующего прибора (или пера самописца) обратно пропорционально корню квадратному из произведения ширины полосы пропускания приёмника на постоянную времени регистрирующего прибора. Казалось бы, можно сделать это отклонение сколь угодно малым, безгранично увеличивая полосу пропускания приёмника и постоянную времени регистрирующего прибора.

Если бы это было так, то приёмник мог бы зарегистрировать сколь угодно слабое космическое радиоизлучение, т. е. был бы безгранично чувствителен. В действительности, однако, это сделать нельзя. Ширина полосы пропускания приёмника не может быть сколь угодно большой. Увеличение ширины полосы пропускания неизбежно приводит к уменьшению коэффициента усиления приёмника, что, учитывая малую мощность космического радиоизлучения, весьма нежелательно.

Кроме того, приёмник с очень широкой полосой пропускания мало пригоден для интерференционных наблюдений. Лепестки радиоинтерферометра, соответствующие разным частотам, лежащим в пределах полосы пропускания приёмника, будут перекрываться, и это сделает невозможным обнаружение слабых источников небольших угловых размеров.

Так как полоса пропускания приёмника радиоинтерферометра конечна, то всегда имеет место частичное наложение лепестков диаграммы направленности разных частот. Это наложение особенно велико для лепестков, соответствующих направлениям, значительно отличаю-

щимся от направления оси радиотелескопа. По этой причине интерференционная картина оказывается «смазанной», и число лепестков в многолепестковой диаграмме направленности обычно не очень велико. Оптический аналог этого явления — окрашивание интерференционных колец.

Постоянную времени регистрирующего прибора по техническим причинам также нельзя безгранично увеличивать. Всё это приводит к тому, что чувствительность приёмника не может быть безграничной.

Так как принимаемая радиотелескопом мощность космических источников радиоизлучения обычно во много раз меньше мощности собственных шумов приёмника, то требуются специальные методы наблюдений, позволяющие выделить слабое космическое излучение на фоне гораздо более мощных собственных шумов. Разумеется, такое выделение возможно только тогда, когда мощность космического излучения превосходит некоторую минимальную величину, определяемую чувствительностью приёмника.

В наиболее простом случае поступают следующим образом. Антенну отводят от источника космического радиоизлучения. Регистрирующий прибор на выходе приёмника будет отмечать только собственные шумы. Ток в регистрирующем приборе компенсируют током от некоторого источника постоянного напряжения, например, батареи аккумуляторов. Следовательно, когда антенна не направлена на источник космического радиоизлучения, стрелка регистрирующего прибора будет совершать около нуля небольшие беспорядочные колебания, причина которых была объяснена выше. Затем антенну наводят на источник радиоизлучения, и ток в регистрирующем приборе оказывается уже не скомпенсированным. Стрелка прибора (или перо самописца) отклонится на величину, зависящую от мощности падающего на антенну космического радиоизлучения.

Компенсация собственных шумов приёмника позволяет на его выходе ставить самые чувствительные приборы, которые могут перегореть, если через них пропустить не скомпенсированный (и потому — не ослабленный) ток.

Казалось бы, компенсационный метод позволяет использовать чувствительность радиоприёмника до предела, определяемого шириной его полосы пропускания и постоянной времени выходного прибора. Однако на практике чувствительность приёмника оказывается раз в десять ниже теоретической.

Дело в том, что по разным причинам компенсация непрерывно нарушается. Одной из таких причин являются непрерывные и беспорядочные изменения уровня собственных шумов приёмника. В том же направлении действуют небольшие неправильные изменения коэффициента усиления приёмника. Причина этого кроется в неизбежном непостоянстве режима питания ламп приёмника, а также в ряде других явлений, трудно учитываемых.

Для повышения чувствительности приёмников в радиоастрономии и приближения её к вышеуказанному теоретическому пределу был разработан весьма эффективный модуляционный метод, часто называемый методом радиометра. Идея этого метода состоит в следующем.

Ко входу приёмника попеременно подключается антенна, на которую падает излучение от космического источника, и антенна, на которую космическое радиоизлучение не падает. Обычно вместо второй антенны используют просто сопротивление, называемое эквивалентом. Частота переключений антенны и эквивалента — 20—30 периодов в секунду. Таким образом, поток энергии от космического тела периодически прерывается (модулируется) с указанной частотой.

Модуляционный метод чаще применяется для сантиметрового диапазона, хотя он может быть успешно применён и для других диапазонов.

Схема, иллюстрирующая принцип действия радиометра для сантиметрового диапазона, приведена на рис. 20. От антенны электромагнитная энергия течёт по волноводу B в приёмник. В волноводе вырезана щель, в которой помещён вращающийся диск. Одна половина диска изготовлена из вещества, пропускающего электромагнитные волны, вторая половина — из вещества, полностью их поглощающего. Диск вращается со скоростью

30 оборотов в секунду и будет попеременно то поглощать, то пропускать идущие через волновод электромагнитные волны, модулируя их с частотой в 30 периодов в секунду.

Когда в волновод погружена поглощающая половина диска, космическое радиоизлучение, уловленное антенной, не будет попадать на вход приёмника. Туда попадёт лишь излучение от поглощающей части диска, зависящее от его температуры. Когда же в волновод погружена часть диска, пропускающая радиоволны, на вход приёмника

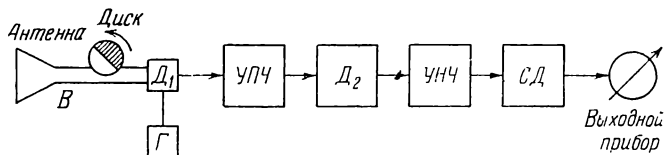


Рис. 20. Схема радиометра.

будет поступать космическое радиоизлучение. Легко видеть, что в этой схеме роль эквивалента играет часть диска, поглощающая радиоволны. Таким образом, космическое радиоизлучение оказывается модулированным, что и позволяет отделить его от шумов аппаратурного происхождения.

После прохождения через смеситель частот колебания преобразуются в промежуточную частоту и затем усиливаются. После этого через детектор D_2 сигнал подаётся на вход усилителя низкой частоты УНЧ, настроенного на частоту 30 герц. В этом усилителе происходит отделение (фильтрация) космического радиоизлучения от шумов аппаратуры. Затем сигнал поступает на синхронный детектор СД, где, в частности, осуществляется преобразование переменного тока частоты 30 герц в постоянный, отмечаемый регистрирующим прибором.

Основное достоинство метода радиометра состоит в том, что он выделяет падающее космическое радиоизлучение, так сказать, в чистом виде. Чувствительность этого метода не ограничена изменениями уровня его собственных шумов, ибо можно считать, что за время каждого

перерыва ($1/30$ секунды) уровень шумов остаётся почти постоянным. В этом случае чувствительность приёмника становится близкой к максимальной теоретически возможной.

На рис. 21 показана регистрирующая аппаратура 65-метрового радиотелескопа. На ленте видна запись

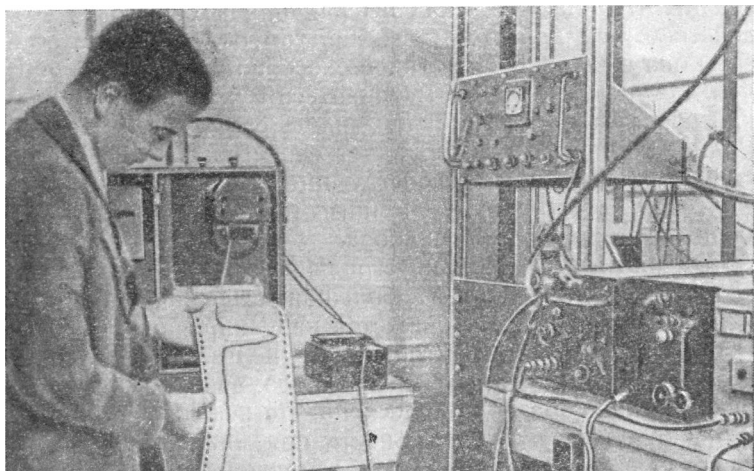


Рис. 21 Регистрирующая аппаратура 65-метрового радиотелескопа. На ленте видна запись осциллографа от мощного источника радиоизлучения в созвездии Лебедя.

радиоизлучения от мощного источника в созвездии Лебедя.

У самых чувствительных современных приёмников, применяемых в радиоастрономии, наименьшее отношение полезной мощности к шумовой, которое ещё можно обнаружить, составляет около одной сотой процента.

Можно подсчитать, что если такой чувствительностью обладает радиотелескоп, работающий на волне 1 м и пропускающий полосу частот шириной в 1 мегагерц, то абсолютное количество лучистой энергии, которое на

пределе ещё можно измерить, в несколько сот раз меньше, чем от самых слабых из получаемых на фотографиях при помощи больших оптических телескопов звёзд! Таким образом, по своей абсолютной чувствительности радиотелескопы намного превосходят все оптические приёмники радиации.

Известно, что фотографическая пластинка как приёмник излучения обладает свойством интегральности. Это значит, что пластинка как бы накапливает световое воздействие: чем больше выдержка, тем более слабые объекты она выявляет. Глаз такой способностью не обладает: чем дольше мы будем всматриваться в какой-нибудь мелкий предмет, тем хуже будем видеть его — глаза устанут. Радиоприёмник также обладает свойством, до известной степени аналогичным свойству интегральности фотографической пластинки — вспомним роль постоянной времени регистрирующего прибора.

Однако и свойством интегральности пластинки нельзя злоупотреблять: слишком большая выдержка приведёт к тому, что пластинка окажется завуалированной. Точно так же по техническим причинам нельзя сколь угодно значительно увеличивать постоянную времени регистрирующего прибора радиотелескопа. Не исключено, однако, что в будущем чувствительность приёмников радиоизлучения удастся сделать ещё более высокой, если заставить, например, космическое радиоизлучение заряжать в течение многих часов и дней конденсатор или аккумулятор. Но пока это область фантазии.

Остаётся сказать несколько слов о применяемой в радиоастрономии методике абсолютных измерений излучения космических источников. Задача подобного рода измерений состоит в выражении падающих потоков и интенсивностей радиоизлучения в тех единицах, которые приняты в физике и технике. В качестве единицы потока излучения в технике принимают такой поток, который через площадку в 1 квадратный метр переносит мощность в 1 ватт в интервале частот, равном 1 герцу. Кратко такую единицу обозначают $\frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \cdot \text{герц}}$. Понятием интенсивности (яркости) в радиоастрономии пользуются тогда, когда источник радиоизлучения занимает на небе до-

вольно большие размеры (значительно бóльшие, чем угловые размеры главного лепестка). За единицу интенсивности принимают интенсивность такого излучения, когда через площадку в 1 квадратный метр в единичном интервале частот и в единичном телесном угле — стерadiane (равном 3280 квадратных градусов) — переносится мощность в 1 ватт. Эта единица обозначается $\frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \cdot \text{герц} \cdot \text{стерадиан}}$.

Очень часто результаты абсолютных измерений в радиоастрономии выражают в температурных единицах. Интенсивность протяжённого источника радиоизлучения, например, отдельных участков Млечного Пути, выражают в так называемой яркостной температуре T_v . Яркостная температура определяется как температура воображаемого раскалённого тела, имеющего такие же угловые размеры, как и исследуемый источник радиоизлучения, и излучающего на данной частоте в данном направлении такое же количество энергии, как и наблюдаемый источник радиоизлучения.

Поток радиоизлучения от Солнца часто характеризуется так называемой эффективной температурой $T_{\text{эфф}}$. Это — температура такого воображаемого раскалённого тела, имеющего угловые размеры Солнца, которое на данной частоте излучает такой же поток энергии, как и реальное Солнце.

Употребление температурных единиц оказывается возможным (и удобным) потому, что согласно законам физики излучение раскалённого тела легко вычисляется, если известна его температура.

Идея абсолютных измерений состоит в следующем.

Радиотелескоп принимает излучение, имеющее характер шумов, от специального генератора известной мощности (шумового генератора). Показания регистрирующего прибора дают возможность прокалибровать измерения, т. е. каждому отсчёту прибора поставить в соответствие определённую мощность излучения, выраженную в абсолютных единицах. После этого радиотелескоп направляют на источник космического радиоизлучения и отсчёт прибора переводят в абсолютные единицы.

На коротких волнах (сантиметровый и дециметровый диапазон) вместо шумового генератора используют тело, нагретое до определённой температуры. Для этого в волновод помещают вещество, обычно уголь или графит, и нагревают его током. Такое вещество будет излучать по хорошо известным из физики законам. Это излучение через волновод попадает в приёмник и отмечается регистрирующим прибором. Так как при известной температуре мощность излучения нагретого тела может быть определена теоретически, то отсчёты прибора можно прокалибровать.

Абсолютные измерения сопряжены с большими трудностями и требуют от исследователей большой тщательности и экспериментального искусства.

ГЛАВА III

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ «СПОКОЙНОГО» СОЛНЦА

В предыдущей главе мы познакомились с устройством радиотелескопов, их возможностями и методами работы. Познакомимся теперь с основными результатами, полученными радиоастрономией за последние годы. В этой главе мы коснёмся вопросов, связанных с радиоизлучением Солнца.

Впервые радиоизлучение Солнца с достоверностью было обнаружено в 1944 г. на волне 187 см. Вскоре большое число исследований подтвердило наличие солнечного радиоизлучения на всех волнах от 8 мм до 12 м, т. е. на всём радиодиапазоне.

Эти наблюдения выявили ряд замечательных особенностей солнечного радиоизлучения. Прежде всего обнаружилось, что радиоизлучение Солнца имеет весьма переменный характер. Бывают краткие периоды, когда Солнце излучает в миллионы раз сильнее, чем в «спокойные» дни. Заметим, что излучение Солнца в видимых лучах отличается большим постоянством. Если здесь и есть колебания, то они не превышают долей процента. За всю геологическую историю нашей планеты (несколько миллиардов лет) не было таких периодов, когда солнечное излучение увеличивалось либо уменьшалось хотя бы вдвое, так как в противном случае такие колебания солнечного излучения были бы обнаружены по геологическим данным.

Световые волны излучают поверхностные слои Солнца — фотосфера и «обращающий слой», состоящие, как и всё Солнце, из раскалённых газов. В обращающем слое возникают линии поглощения солнечного спектра. Над обращающим слоем находится гораздо более разреженная солнечная атмосфера, состоящая из нескольких

слоёв. Самый нижний слой солнечной атмосферы — хромосфера, непосредственно наблюдаемая лишь в течение нескольких мгновений во время полных солнечных затмений. В это время хромосфера имеет вид узкого красного ободка, окаймляющего закрытый Луной диск Солнца. Во время затмений видны также и самые внешние слои солнечной атмосферы как серебристое сияние лучистой структуры, окружающее солнечный диск. Это — солнечная корона. Внешние области короны удалены от солнечной поверхности на расстояние в несколько солнечных радиусов (радиус Солнца равен 695 000 км). Заметим для сравнения, что земная атмосфера простирается примерно на 1000 км, т. е. только на $\frac{1}{6}$ земного радиуса. Отсюда можно сделать важный вывод, что в солнечной атмосфере плотность вещества падает по мере удаления от поверхности Солнца очень медленно.

В 1946 г. советские учёные — В. Л. Гинзбург и автор этой книги — независимо друг от друга теоретически показали, что наблюдаемое радиоизлучение Солнца возникает не в фотосфере, а в атмосфере Солнца. Они доказали, что солнечная атмосфера совершенно непрозрачна для радиоволн. Если это так, то радиоизлучение Солнца никак не может попасть к нам от фотосферы, так как «по пути» оно будет поглощено солнечной атмосферой. Вычисления показали, что радиоизлучение Солнца на метровом диапазоне возникает в короне, а излучение на сантиметровых волнах в более плотной хромосфере.

В 1947 г. эти теоретические расчёты советских учёных были целиком подтверждены во время наблюдений полного солнечного затмения в Бразилии. Академия наук СССР снарядила специальную экспедицию для наблюдения этого затмения. В числе прочих приборов экспедиция располагала радиотелескопом с многодипольной антенной. Наблюдения велись на волне 1,5 м с борта советского теплохода «Грибоедов». Эти наблюдения проводились С. Э. Хайкиным и Б. М. Чихачёвым. На рис. 22 изображён теплоход «Грибоедов» с установленной на нём антенной радиотелескопа.

В те минуты, когда весь солнечный диск, а следовательно, и вся фотосфера, были закрыты Луной, интенсивность радиоизлучения Солнца не упала до нуля, как было

бы, если бы радиоволны излучала фотосфера, а лишь уменьшилась приблизительно вдвое. Эти наблюдения наглядно доказали, что источником радиоизлучения Солнца на волне 1,5 м является корона.

Все наблюдения указывают, что радиоизлучение Солнца состоит из двух частей. Первая составляющая радиоизлучения Солнца может быть названа радиоизлучением «спокойного» Солнца. Это излучение мало ме-

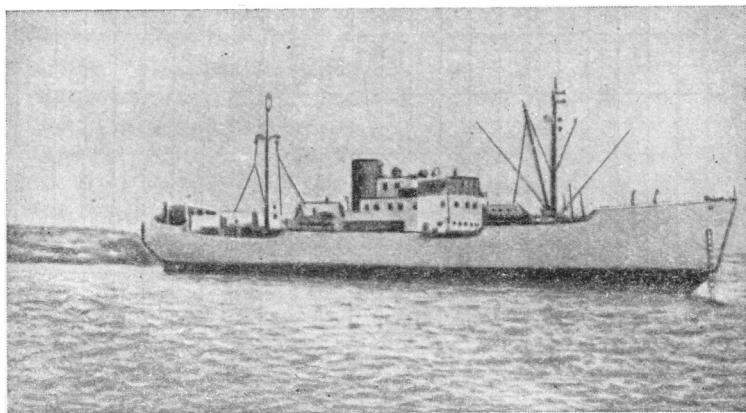


Рис. 22. Советский теплоход «Грибоедов», с борта которого проводились наблюдения радиоизлучения Солнца во время полного солнечного затмения 20 мая 1947 г. в порту Байя, в Бразилии.

няется со временем. Оно наблюдается тогда, когда на солнечной поверхности нет пятен, вызывающих возмущения в солнечной атмосфере. Когда же на Солнце имеются пятна, на излучение «спокойного» Солнца накладывается гораздо более мощное и быстро меняющееся со временем излучение «возмущённого» Солнца.

Это излучение весьма осложняет наблюдения радиоизлучения «спокойного» Солнца. Для отделения его от гораздо более мощного излучения «возмущённого» Солнца требуются многомесячные систематические наблюдения.

Существует несколько методов разделения двух составляющих солнечного радиоизлучения. При наблюдениях

на волнах сантиметрового диапазона применяют следующий метод. Согласно наблюдениям, существует тесная зависимость между потоком радиоизлучения от «возмущённого» Солнца и общей площадью пятен, видимых в данный момент на Солнце. Эта зависимость ясно видна из рис. 23. На диаграмме изображены две кривые: одна — кривая потока радиоизлучения на волне 3,18 см

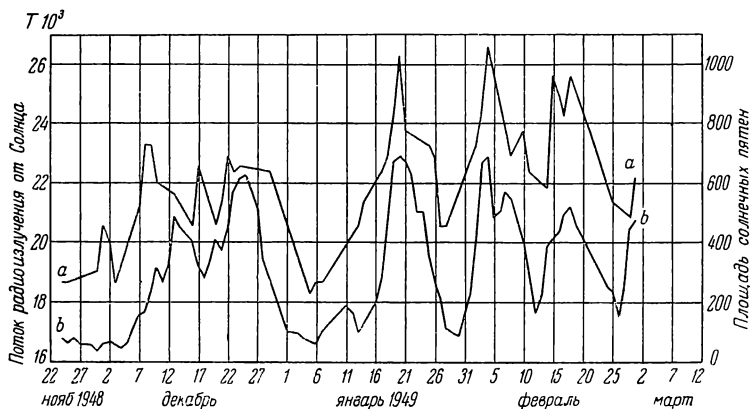


Рис. 23. Зависимость между суммарной площадью солнечных пятен (кривая *б*) и мощностью радиоизлучения Солнца на волне 3,18 см (кривая *а*).

за период с ноября 1948 г. до марта 1949 г., а другая — кривая суммарной площади солнечных пятен за то же время. Кривые очень похожи, что и указывает на существование тесной зависимости между потоком радиоизлучения и площадью солнечных пятен.

Существование такой зависимости даёт возможность уверенно определить величину потока радиоизлучения, когда площадь пятен на диске Солнца равна нулю, т. е. потока, соответствующего радиоизлучению «спокойного» Солнца. Рис. 24 поясняет сказанное. На этом рисунке в виде точек приведены результаты длинного ряда наблюдений радиоизлучения Солнца на волне 3,18 см. По оси абсцисс отложена суммарная площадь солнечных пятен, по оси ординат — поток радиоизлучения, выражен-

ный через эффективную температуру. Из этого рисунка видно, что когда площадь пятен на Солнце равна нулю, т. е. на Солнце совсем нет пятен, поток радиоизлучения имеет определённое значение, равное потоку от «спокойного» Солнца.

Как было показано советскими учёными, радиоизлучение «спокойного» Солнца объясняется тепловым излучением солнечной атмосферы. На метровых волнах, для которых солнечная корона непрозрачна, мы наблюдаем тепловое излучение короны. Мощность этого радиоизлучения определяется температурой корональных газов. Если эта температура известна, то мощность излучения можно вычислить как и для всякого раскалённого тела. И, наоборот, измерив наблюдаемую мощность теплового радиоизлучения Солнца на метровых волнах, можно вычислить температуру короны.

Результаты подобного рода вычислений на первый взгляд поразительны: температура короны близка к миллиону градусов! Вспомним, что температура солнечной поверхности близка к 6000° . Возникает простой вопрос: а как же солнечная корона, нагретая до такой чудовищно высокой температуры, не испепелит всё живое на Земле, да и саму Землю?

Чтобы дать ответ на этот вопрос, прежде всего установим, что мы понимаем под температурой короны. Оказывается, что наблюдения радиоизлучения дают возможность найти так называемую кинетическую температуру,

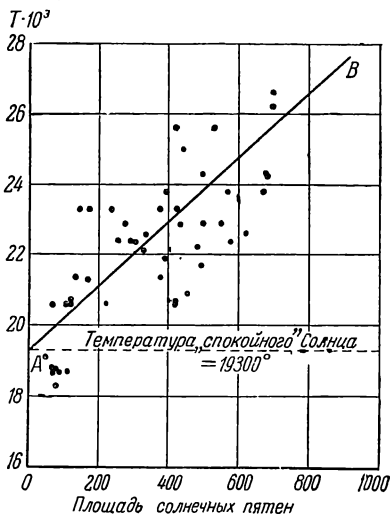


Рис. 24. Зависимость между площадью пятен и мощностью радиоизлучения Солнца на волне 3,18 см, позволяющая определить мощность радиоизлучения от «спокойного» Солнца.

определяемую средней скоростью теплового движения частиц, из которых состоит корона. Температура короны в миллион градусов означает, что средняя тепловая скорость движения атомов водорода в короне превышает 150 км/сек (на Земле тепловая скорость таких атомов была бы только около 3 км/сек).

Но корона — это исключительно разреженный газ. Количество частиц в единице объёма там в сотни миллиардов раз меньше, чем в земной атмосфере. Масса всей короны, несмотря на её громадный объём, в 1000 раз меньше массы земной атмосферы. При такой разреженности корона в видимых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучах совершенно прозрачна и полностью пропускает излучение солнечной поверхности — фотосферы. Собственное излучение короны в оптических лучах вследствие её крайней разреженности очень мало и «тонет» в излучении фотосферы. Только в том случае, если бы корона была несравненно плотнее, чем в действительности, она поглощала бы энергию, излучаемую фотосферой, и излучала бы в оптических лучах очень сильно, соответственно своей высокой кинетической температуре. В области радиоволн условия уже другие: коль скоро корона для этих волн непрозрачна, она будет излучать в соответствии со своей кинетической температурой.

Оптическая астрономия ещё до развития радиоастрономии установила факт существования высокой кинетической температуры в короне. Радиоастрономия полностью это подтвердила. Однако радиоастрономические методы исследования солнечной атмосферы обладают рядом преимуществ по сравнению с оптическими. Мы уже говорили о наблюдениях солнечной атмосферы — хромосферы и короны — во время полных солнечных затмений. Раньше это был единственный метод изучения природы этих интересных оболочек Солнца. Так как из-за большой разреженности солнечной атмосферы её собственное излучение очень слабо, то ослепительный свет, идущий от солнечной поверхности, очень затрудняет оптические наблюдения. Именно поэтому астрономам приходится использовать редкие минуты солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной и потому не «за-

бывает» излучение атмосферы Солнца. После 1930 г. были сконструированы специальные оптические приборы, позволяющие, например, наблюдать корону вне затмений. При помощи этих приборов удалось получить ряд интересных сведений о физических условиях в солнечной короне.

Радиоастрономия дала весьма эффективный и в то же время простой метод наблюдений солнечной атмосферы вне затмения. Меняя длину волны, на которой принимается солнечное радиоизлучение, мы исследуем солнечную атмосферу по глубине, от самых внешних частей короны при длине волны около 10 м, до хромосферы, если длина волны 0,8—3 см. Это возможно потому, что непрозрачность солнечной атмосферы меняется при изменении длины волны. Например, на волне 10 м корона настолько непрозрачна, что к нам приходит излучение только от внешних её слоёв, причём мощность этого излучения будет зависеть только от «местных условий» в короне, а на волне 1,25 см корона совершенно прозрачна, и наблюдаемое излучение будет зависеть только от условий в хромосфере.

Как показывают расчёты, на волне около 1 см наблюдаются слои хромосферы, находящиеся на высоте 2000—3000 км от фотосферы. По измеренной мощности излучения, наблюдаемого на этой волне, можно сделать вывод, что кинетическая температура этих слоёв около 7000°. Между тем, у основания хромосферы, откуда радиоволны к нам не доходят из-за поглощения в вышележащих слоях, по оптическим наблюдениям кинетическая температура не превышает 5000°. Таким образом, радиоастрономия доказывает постепенный рост кинетической температуры хромосферы с высотой. Следует заметить, что оптические методы пока вообще не позволяют скольконибудь уверенно определить кинетическую температуру верхних слоёв хромосферы.

Интересен и важен вопрос о распределении по диску яркости Солнца в радиолучах. По оптическим наблюдениям, яркость больше всего в центре солнечного диска и плавно убывает к его краям. В синих лучах убывание яркости от центра солнечного диска к его краю больше, чем в красных. На рис. 25 приведено распределение

яркости по солнечному диску в разных лучах. По оси абсцисс отложено расстояние от центра солнечного диска, выраженное в долях солнечного радиуса, по оси ординат — яркость в относительных единицах.

Очень трудно получить непосредственно из наблюдений распределение яркости по диску Солнца в радиолучах. Это объясняется низкой разрешающей способностью радиотелескопов. Приходится использовать солнечные затмения. Измеряя поток радиоизлучения в разные моменты затмения и зная при этом относительные положения лунного и солнечного дисков, в принципе можно найти распределение «радиояркости» по диску Солнца. Практически эта задача весьма осложняется

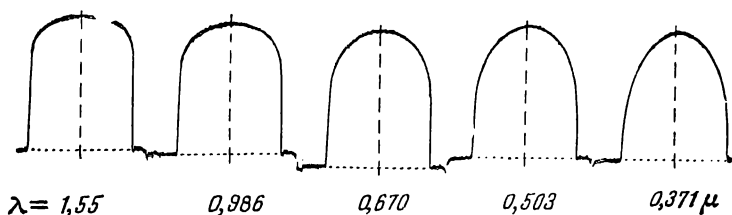


Рис. 25. Распределение яркости по диску Солнца для оптического излучения с различной длиной волны. Длины волн 1,55 и 0,986 μ соответствуют инфракрасным лучам, 0,670 μ — красным, 0,503 μ — синим, 0,371 μ — ультрафиолетовым.

неправильной формой солнечной короны, а также наличием отдельных источников излучения, связанного с пятнами. Вне затмений для этой цели применяют наблюдения с помощью радиоинтерферометров.

Распределение яркости по диску Солнца для разных длин волн может быть вычислено теоретически. Обычно для этого задаются некоторой моделью солнечной короны, имеющей распределение плотности и температуры, подобное реальной короне, но не обладающей её структурой. В реальной короне наблюдаются, например, лучи, а модель предполагается сферически симметричной. Это делается для упрощения вычислений. Хотя такая модель и схематична, но она безусловно является отражением действительности.

На рис. 26 приводится теоретическое распределение яркости по диску Солнца для разных длин волн. Обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, на длинных волнах на краю солнечного диска ($R=1$) яркость не падает до нуля, как для оптических лучей (см. рис. 25), а довольно значительна. За пределами диска она плавно убывает с расстоянием. Такое распределение яркости объясняется тем, что на этих волнах излучает солнечная корона, простирающаяся далеко за пределами диска Солнца.

Наблюдения, в основном, подтверждают теоретические расчёты. Кроме того, они позволяют получить важные

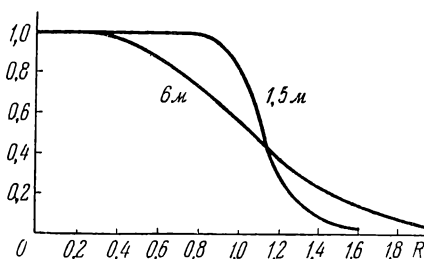


Рис. 26. Вычисленное распределение яркости по диску Солнца для радиоионизлучения с длиной волны 6 м и 1,5 м.

сведения о распределении плотности и температуры в короне.

Мы сейчас опишем некоторые важные результаты интерферометрических наблюдений распределения яркости радиоионизлучения Солнца.

Как мы видели в предыдущей главе, при помощи радиоинтерферометра можно определить не только координаты источника радиоионизлучения, но и его угловые размеры. Более того, применяя интерферометр с изменяющейся длиной базиса, можно определить также распределение яркости излучения в области, занимаемой источником. По мере увеличения длины базиса амплитуда записи (типа изображённой на рис. 14) будет уменьшаться. Это легко понять: если угловые размеры лепестков диаграммы направленности интерферометра будут

значительно больше угловых размеров источника радиоизлучения (в нашем случае — Солнца), последний будет полностью «проваливаться» в минимумы между двумя лепестками (см. рис. 13) и, следовательно, амплитуда записи или, как говорят, «глубина модуляции» будет наибольшей. Но бо́льшая ширина лепестков будет при малом базисе! Наоборот, когда угловые размеры лепестка диаграммы направленности интерферометра будут много меньше угловых размеров источника, последний будет сразу «заполнять» несколько лепестков. При движении

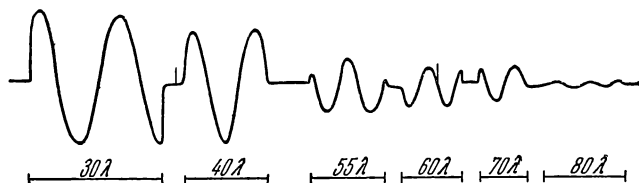


Рис. 27. Записи радиоизлучения Солнца на волне 1,4 м, полученные с разными базисами.

источника относительно лепестков (см. главу II) в этом случае принимаемая мощность будет почти постоянной, т. е. «глубина модуляции» будет весьма незначительной. Но очень узкие лепестки бывают при достаточно большом базисе. На рис. 27 приведены записи радиоизлучения Солнца, полученные при помощи интерферометра с разными базисами. Этот рисунок поясняет сказанное.

Если теперь начертить график, дающий зависимость «глубины модуляции» от величины базиса интерферометра (рис. 28), то при помощи вычислений из него можно найти распределение яркости источника радиоизлучения. Это вполне понятно: ведь «глубина модуляции» зависит только от искомого распределения яркости и длины базиса. Оказалось, что распределение яркости вдоль какого-нибудь радиуса солнечного диска зависит от того, куда этот радиус направлен. В направлении солнечного экватора яркость убывает гораздо медленнее, чем в направлении полюсов. Это значит, что кривые равной яркости («изофоты») имеют эллиптическую форму. На рис. 29 приводится наблюдав-

шееся распределение яркости вдоль разных радиусов на волне 1,4 м. По осям отложены экваториальные и полярные радиусы, выраженные в единицах радиуса солнечного диска. В то время как в экваториальном направлении корону можно проследить на 2 радиуса солнечного диска (считая от центра Солнца!), в полярном направлении она прослеживается только на полтора радиуса.

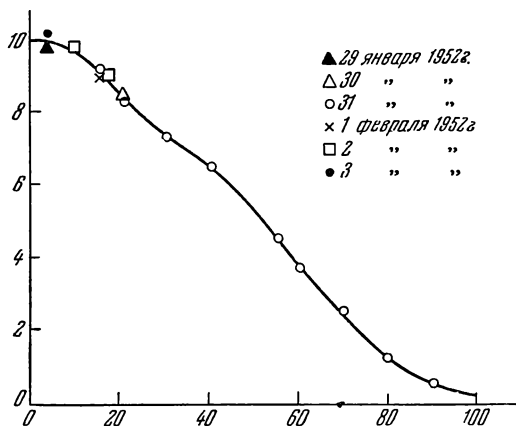


Рис. 28. Зависимость «глубины модуляции» радиоизлучения Солнца от базиса радиоинтерферометра для волны 1,4 м. По оси абсцисс отложены значения базиса, выраженные в длинах волн, по оси ординат — «глубина модуляции».

Нужно заметить, что описанные наблюдения велись во время последнего минимума солнечной активности. То обстоятельство, что корона, которая является источником радиоизлучения на метровых волнах, во время минимума солнечной активности имеет вытянутую форму, было установлено свыше полувека тому назад известным русским астрономом А. П. Ганским. Когда на Солнце бывает много пятен (максимум солнечной активности), корона имеет округлую форму. На рис. 30 приведены фотографии «минимальной» и «максимальной» корон.

На рис. 31 приводятся усреднённые по разным радиусам распределения яркости радиоизлучения на разных волнах, полученные интерференционным методом. По оси

абсцисс отложено расстояние от центра солнечного диска, выраженное в радиусах последнего, по оси ординат — яркостные температуры (в миллионах градусов). Чем больше длина волны, тем бóльшая часть радиоизлучения приходит к нам из области за пределами солнечного диска. Интересно ещё отметить, что яркостная температура

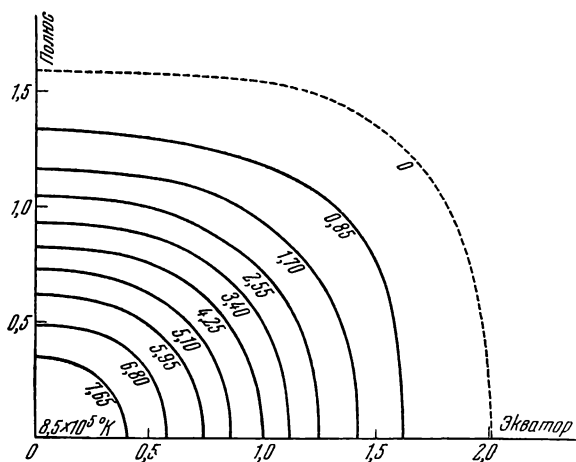


Рис. 29. Распределение яркости радиоизлучения «спокойного» Солнца на волне 1,4 м вдоль разных радиусов.

в центре диска на длинных волнах гораздо меньше, чем на волне 1,4 м. Повидимому, это связано с уменьшением корональной температуры с высотой. Ведь радиоизлучение с длиной волны 6—7 м приходит к нам из внешних слоёв короны, где кинетическая температура может быть уже значительно ниже, чем в более глубоких корональных слоях, откуда к нам приходит излучение с длиной волны 1,4 м.

Сравнение теоретических (см. рис. 26) и наблюдаемых кривых говорит о том, что при большом их сходстве имеются определённые отличия. Например, теоретическая кривая для 1,5 м даёт заметно более крутое падение яркости, чем наблюдаемая кривая на близкой волне 1,4 м.

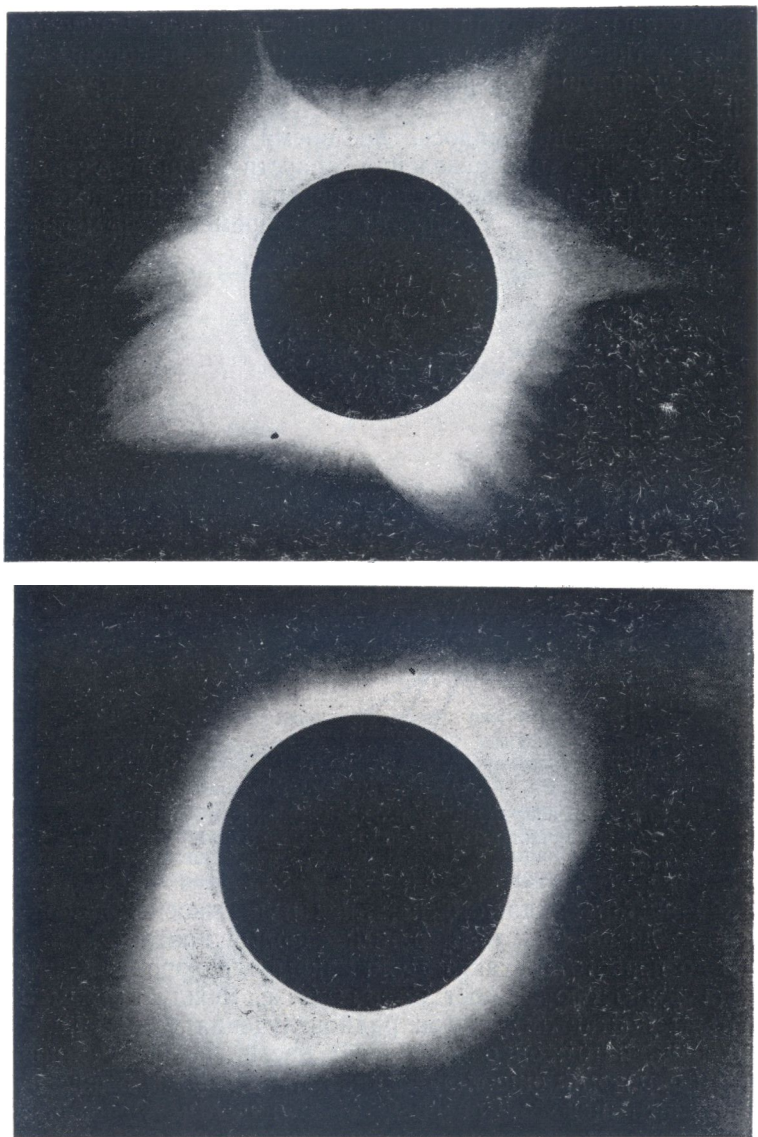


Рис. 30. «Максимальная» (сверху) и «минимальная» короны.

Здесь сказывается отличие применявшейся для вычислений теоретической «модели» идеализированной короны от реальной короны с её изменчивостью и богатой структурой.

Как уже упоминалось, во время затмений также можно изучать распределение яркости радиоизлучения Солнца. Для этого ведётся непрерывная запись потока радиоизлучения в течение всего времени затмения.

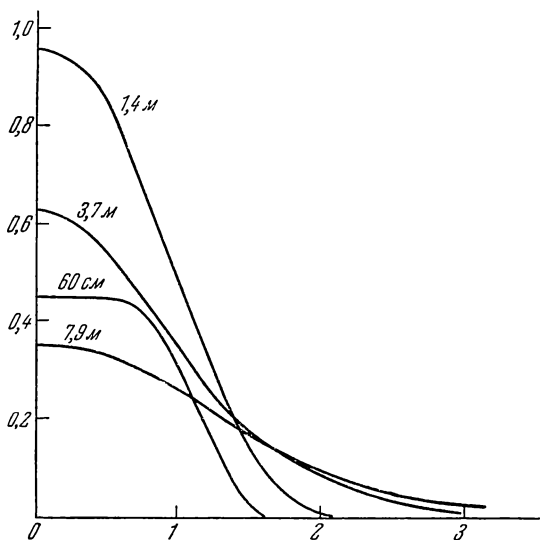


Рис. 31. Распределение по диску яркости радиоизлучения Солнца на разных волнах.

Запись начинают до того, как диск Луны «коснётся» солнечного диска (так называемый «первый контакт»), ибо ещё до первого контакта Луна закрывала корону. Когда Луна полностью закроет Солнце (т. е. между вторым и третьим контактом), поток радиоизлучения будет минимальным, потом он опять начнёт расти. Из полученной таким образом «кривой затмения» можно путём вычисления найти искомое распределение яркости. Ясно, что характер «кривой затмения» зависит от распределения яркости солнечного радиоизлучения.

На рис. 32 и 33 приведено несколько «кривых затмений» (пунктирные линии), полученных в результате наблюдений. Сплошные линии — это вычисленные «кривые затмений», полученные из распределения яркости радиоизлучения по диску. Последнее было получено из интерференционных наблюдений на близких волнах. Стрелки отмечают моменты оптических контактов. Согласие на-

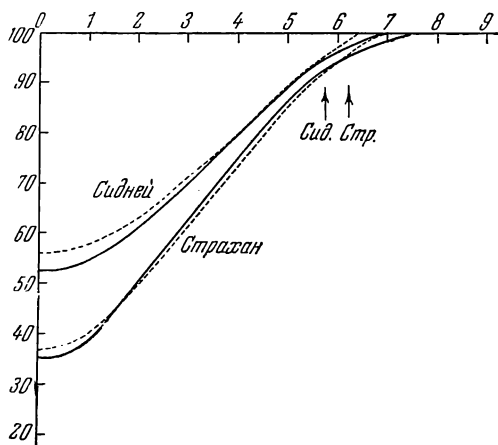


Рис. 32. Кривые затмений для волны 50 см (пунктир). Сплошные кривые получались путём вычислений из внезатменных интерференционных наблюдений на волне 60 см. По оси абсцисс отложено время в произвольных единицах, по оси ординат — наблюдаемый во время затмения поток радиоизлучения, выраженный в процентах по отношению к внезатменному значению потока.

блюдаемых и вычисленных кривых можно считать удовлетворительным, хотя имеются и заметные отклонения.

Очень интересно распределение яркости по диску на волне около 10 см (рис. 34). Здесь яркость резко увеличивается на краю диска, а затем довольно быстро падает, так что в радиолучах наблюдается яркое кольцо, окружающее солнечный диск.

Причина такого странного распределения яркости состоит в том, что на этих волнах значительная часть излу-

чения возникает в короне, которая для сантиметровых волн почти прозрачна. Солнце закрывает часть короны.

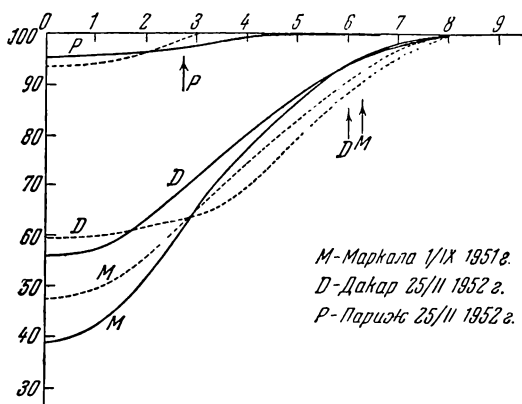


Рис. 33. Наблюдаемые кривые затмения для волны 1,78 м (пунктир) и вычисленные по интерференционным внезатменным наблюдениям на волне 1,4 м кривые затмения (сплошные линии).

которая находится позади него (по отношению к наблюдателю на Земле). Поэтому на диске мы видим только

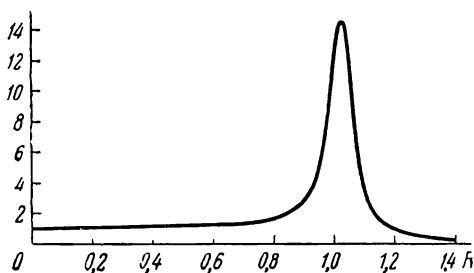


Рис. 34. Вычисленное распределение яркости по диску Солнца для радиоизлучения с длиной волны 10 см.

излучение от обращённых к нам частей короны (луч 1 на рис. 35). Но уже на очень небольшом расстоянии от диска мы можем наблюдать излучение как от «передней»,

так и от «задней» частей короны, ибо корона (ещё раз подчеркнём это) почти прозрачна для излучения с длиной волны порядка 10 см. Это значит, что яркость на краю диска будет значительно больше, чем в центре (луч 2 на рис. 35). На больших расстояниях от края яркость будет падать, так как луч 3 на рис. 35 будет проходить через весьма разреженные, а потому и мало излучающие области внешней короны.

В то время как на метровых волнах согласие наблюдаемого распределения яркости по диску с теоретическим оказалось вполне удовлетворительным, на волнах дециметрового диапазона наблюдения долго не могли обнаружить яркого кольца на солнечном диске, существование которого предсказывалось теорией. Лишь недавно наличие этого кольца было надёжно установлено при помощи многозеркального интерферометра, а также из затменных наблюдений.

Изучая распространение в солнечной короне радиоволн метрового диапазона, необходимо учитывать следующее обстоятельство. Ионизованный газ, из которого состоит корона, довольно сильно преломляет радиолучи. Показатель преломления ионизованного газа для радиоволн меньше единицы. Следовательно, для радиоволн эта среда является оптически менее плотной, чем пустота.

Для оптических лучей дело обстоит как раз наоборот — показатель преломления воздуха для оптических лучей немного больше единицы. Из-за преломления в земной атмосфере луч света от какой-нибудь звезды отклоняется. Это отклонение, называемое *рефракцией*, невелико и тем больше, чем ближе светило к горизонту. У горизонта рефракция достигает примерно 35'. Рефракция как бы приподымает светила над горизонтом. Из-за этого явления, например, продолжительность дня увеличивается на несколько минут — мы видим Солнце вечером, когда оно уже зашло за горизонт, и утром, когда оно ещё не поднялось из-за горизонта. При возвышении светила над горизонтом рефракция уменьшается, но её всегда принимают в расчёт при точных вычислениях положений звёзд на небе. На рис. 36 показано явление рефракции в земной атмосфере (на рисунке рефракция сильно преувеличена).

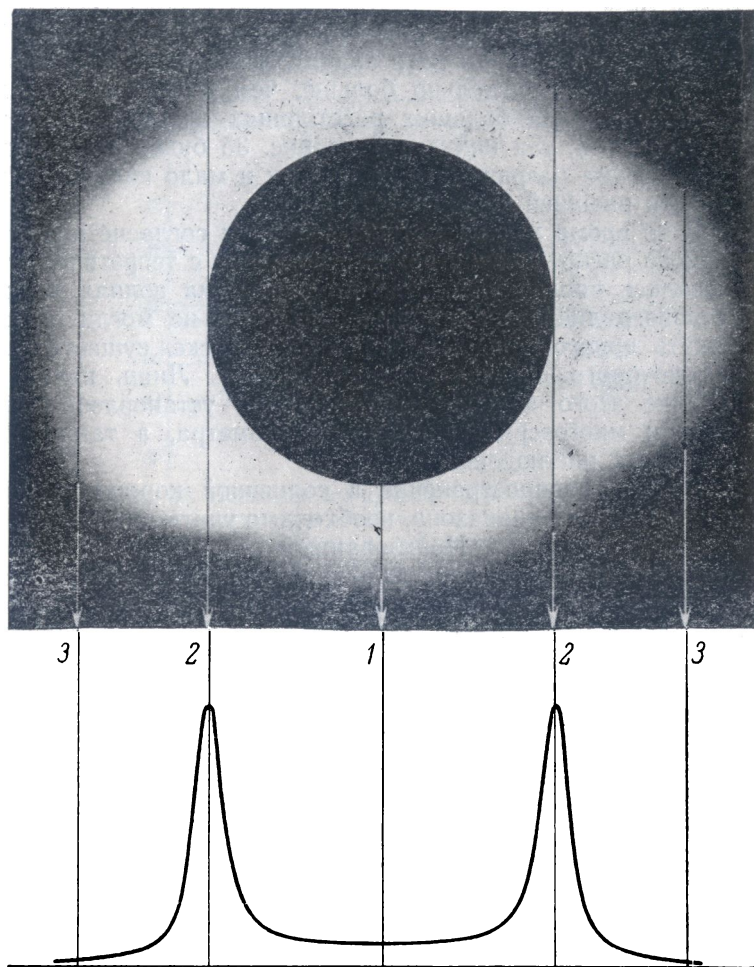


Рис. 35. Схема, иллюстрирующая образование яркого кольца вокруг Солнца на коротких волнах.

Явление рефракции имеет место и для радиолучей, преломляющихся в атмосфере Солнца. Для радиоволн

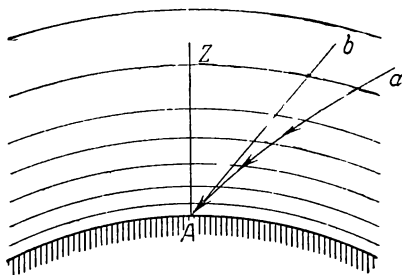


Рис. 36. Рефракция оптических лучей в земной атмосфере.

метрового диапазона рефракция в солнечной короне может достигать больших значений. Показатель преломле-

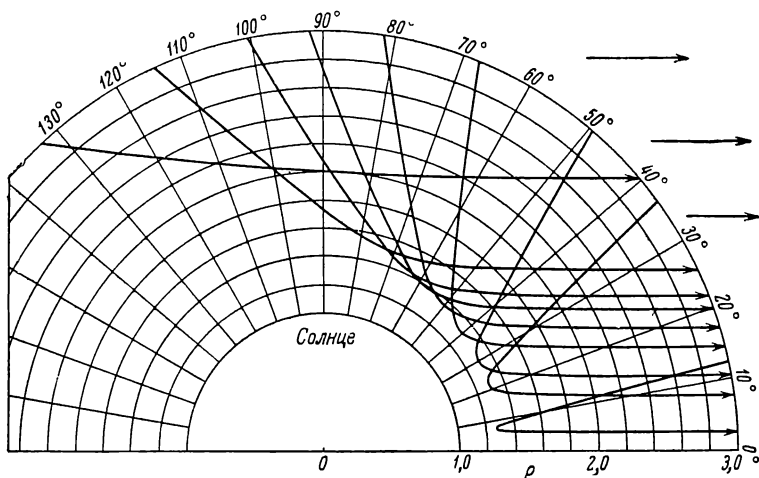


Рис. 37. Вычисленные траектории радиолучей в солнечной короне. Стрелки указывают направление на наблюдателя.

ния короны зависит от электронной плотности в короне и от длины волны. Чем больше длина волны и электронная

плотность, тем сильнее показатель преломления отличается от единицы. Для волн метрового диапазона в короне могут найтись такие слои, где показатель преломления обращается в нуль. При этом будет иметь место явление полного внутреннего отражения. Это значит, что радиолуч, попадающий в солнечную атмосферу извне, полностью отразится от слоя, где показатель преломления обращается в нуль, и выйдет обратно.

Отсюда можно сделать вывод, что к нам доходит излучение только тех слоёв солнечной атмосферы, которые расположены над этим «критическим» слоем. Лучи при этом значительно искривляются и притом в обратную сторону по сравнению с земной атмосферой, т. е. траектории лучей выпуклы по отношению к солнечной поверхности. Различие в траекториях радиолучей и оптических лучей в солнечной и земной атмосфере объясняется тем, что в солнечной атмосфере показатель преломления для радиоволн меньше единицы, а в земной — для оптических лучей — больше единицы, хотя и не намного.

Рис. 37 представляет собой схему траекторий радиолучей в солнечной короне. Рефракция радиоволн в короне приводит к тому, что наблюдаемое положение отдельной радиоизлучающей области не будет совпадать с действительным. Разница кажущегося и истинного положений на длинных волнах может быть значительна.

Важным преимуществом радиоастрономических наблюдений является их слабая зависимость от условий погоды. Хорошо известно, что плохая погода — это бич астрономов. Часто случалось, что многомесячная подготовительная работа по наблюдению полного солнечного затмения пропадала полностью из-за тучи, внезапно закрывшей Солнце в момент затмения.

Однако было бы ошибкой думать, что новые радиоастрономические методы наблюдений Солнца сделали ненужными оптические методы. Существует ряд проблем, которые могут быть решены только оптическими методами. Таким образом, радиометоды исследования Солнца являются ценным дополнением к оптическим методам, но никоим образом их не заменяют.

ГЛАВА IV

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ «ВОЗМУЩЁННОГО» СОЛНЦА

На тепловое радиоизлучение короны и хромосферы накладывается излучение «возмущённого» Солнца. Обычно, когда на Солнце много пятен, интенсивность солнечного радиоизлучения очень сильно возрастает. В сущно-

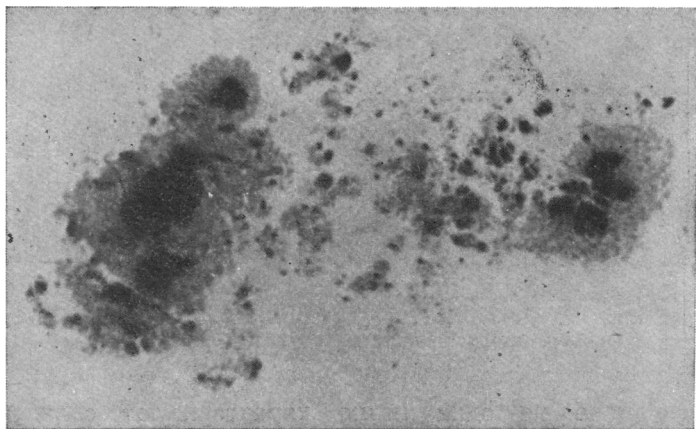


Рис. 38. Фотография группы солнечных пятен.

сти, Солнце почти всегда в большей или меньшей степени «возмущено». «Возмущённость», или «активность», Солнца характеризуется количеством и размерами пятен на его поверхности. На рис. 38 приведена фотография группы солнечных пятен.

Уже давно была замечена периодичность в пятнообразовательной деятельности Солнца. Бывают такие

годы, когда на Солнце очень много пятен. Это — так называемые периоды максимальной активности Солнца. Иногда на Солнце в течение нескольких месяцев нельзя обнаружить ни одного пятна. Это — периоды минимума солнечной активности. Промежуток времени от одного минимума солнечной активности до следующего приблизительно равен 11 годам.

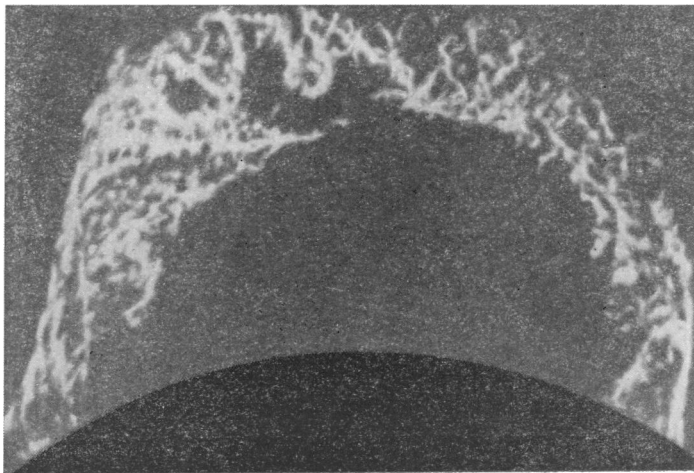


Рис. 39. Фотография протуберанца, полученная через фильтр, пропускающий красную водородную линию.

Однако не одни пятна характеризуют солнечную активность. На солнечной фотосфере пятна бывают окружены довольно обширными площадями, более яркими чем фотосфера. Это — так называемые факельные поля. В хромосфере наблюдаются простирающиеся иногда на большие высоты выступы светящихся газов — протуберанцы (рис. 39). Часто протуберанцы движутся с огромными скоростями, за несколько часов и даже минут резко меняя свою форму. Большие протуберанцы, поднимаясь высоко над поверхностью Солнца, проникают в область солнечной короны.

Видимо, явление протуберанцев связано с какими-то грандиозными физическими процессами типа разрядов, происходящими в солнечной атмосфере. На образование и особенно движение протуберанцев большое влияние оказывают электромагнитные поля. Часто движения протуберанцев нельзя объяснить иначе, как движения по силовым линиям магнитного поля. Как показывают наблюдения, в областях солнечных пятен существуют очень сильные магнитные поля, достигающие 3000—4000 гауссов *).

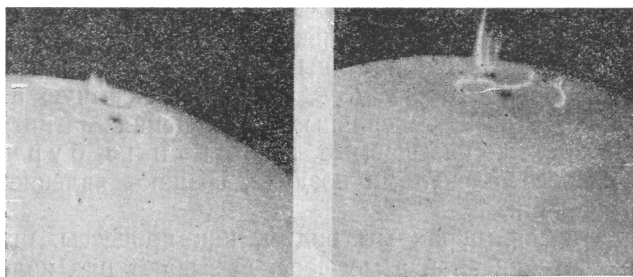


Рис. 40. Фотографии вспышки и связанного с ней протуберанца, полученные при помощи фильтра, пропускающего красную водородную линию.

Иногда около больших и быстро меняющих свои размеры и форму пятен наблюдаются так называемые вспышки. Вспышки излучают только определённые спектральные линии, поэтому в непрерывном солнечном спектре они, за редчайшими исключениями, не наблюдаются. В лучах линий водорода вспышки представляют собой очень яркое образование сравнительно небольших угловых размеров. На рис. 40 приведены фотографии вспышки и связанного с ней протуберанца, полученные на Крымской астрофизической обсерватории А. Б. Северным. Повидимому, вследствие благоприятного расположения имеющихся в области большого пятна электриче-

*) Это в несколько тысяч раз больше напряжённости магнитного поля Земли.

ского и магнитного полей возникает местное уплотнение хромосферы, что и приводит к резкому увеличению излучения в отдельных спектральных линиях. В процессе такого уплотнения излучается большое количество ультрафиолетовых лучей. Иногда одна небольшая по своим размерам вспышка может дать бóльший поток ультрафиолетового излучения, чем всё Солнце. Это излучение, попадая в земную атмосферу, вызывает повышение ионизации её высоких слоёв (ионосферы), что влечёт за собой сильные нарушения радиосвязи на коротких волнах.

Вспышки и факельные поля, кроме ультрафиолетовых лучей, испускают электрически заряженные частицы, главным образом, положительно заряженные ионы кальция и водорода. Эти частицы движутся от Солнца со скоростью около 1500 км/сек . Попадая в земную атмосферу, они вызывают сильные возмущения магнитного поля Земли, так называемые магнитные бури, и, соударяясь с молекулами воздуха, создают явление полярных сияний.

На этих примерах мы видим, как процессы, происходящие в солнечной атмосфере, вызывают ряд явлений на Земле. Так как частицам, выброшенным из Солнца, требуется примерно сутки, чтобы долететь до Земли, то, наблюдая явление вспышки, можно предсказать наступление на Земле магнитной бури и возмущений ионосферы, что имеет практическое значение.

Поэтому на большом числе обсерваторий при помощи разнообразных приборов непрерывно наблюдают Солнце и его атмосферу. Солнце постоянно находится в поле зрения наблюдателей-астрономов либо восточного, либо западного полушарий Земли. Регулярные наблюдения Солнца, обработка и прогнозы возмущений на Земле составляют Службу Солнца.

В настоящее время астрономия собрала огромный материал о различных проявлениях солнечной активности, обработка которого позволила установить, что многие проявления солнечной активности находятся в тесной взаимосвязи.

Одним из проявлений солнечной активности является аномально мощное и меняющееся со временем радиоизлучение, связанное с солнечными пятнами. Это излучение

бывает в сотни и тысячи раз более мощным, чем излучение «спокойного» Солнца. Оно наблюдается на волнах метрового диапазона и имеет довольно резко выраженный направленный характер. Когда пятно, являющееся источником аномально мощного радиоизлучения, находится около центра солнечного диска, излучение имеет максимальную мощность. Но Солнце вращается вокруг своей оси, причём не как твёрдое тело: экваториальные области совершают полный оборот приблизительно за 25 дней, а полярные — за 32 дня. Вследствие вращения Солнца пятно будет перемещаться по диску Солнца к западу приблизительно на 13° в сутки. Спустя 2—3 дня после того как пятно отойдёт от центральной части диска, мощность связанного с ним радиоизлучения значительно уменьшится. Такая же незначительная мощность излучения будет наблюдаться за 2—3 дня до того, как пятно попадёт в центральную часть диска Солнца.

На верхней половине рис. 41, *а* приведены средние ежедневные значения потока радиоизлучения Солнца в зависимости от дней наблюдений. На нижней половине того же рисунка для тех же дней наблюдений приведены расстояния группы пятен от центра солнечного диска, выраженные в долях его радиуса. Когда это расстояние равно —1, группа пятен появляется на восточном краю диска Солнца, когда оно равно нулю — группа пересекает центр солнечного диска, а когда оно равно +1 — пятна скрываются за западным краем диска.

Из этого рисунка отчётливо видно, что поток радиоизлучения Солнца имеет наибольшее значение тогда, когда группа пятен пересекает центральную часть диска Солнца.

На рис. 41, *б* такая же диаграмма построена для случая, когда за десятидневный период наблюдений на солнечном диске были замечены две большие группы пятен. В этом случае наблюдалось небольшое запаздывание максимума радиоизлучения по отношению ко времени прохождения пятен через центральную часть солнечного диска.

Из указанных особенностей радиоизлучения, связанного с пятнами, следует, что наибольшая мощность излучается в направлении, перпендикулярном к солнечной поверхности, а вдоль солнечной поверхности радиоизлучение от пятен не распространяется.

Как показали наблюдения, направленность излучения, связанного с пятнами, тем больше, чем больше длина волны. Например, поток излучения с длиной волны 3,75 м ослабевает вдвое через 12 часов после того, как группа пятен будет на наименьшем расстоянии от центра

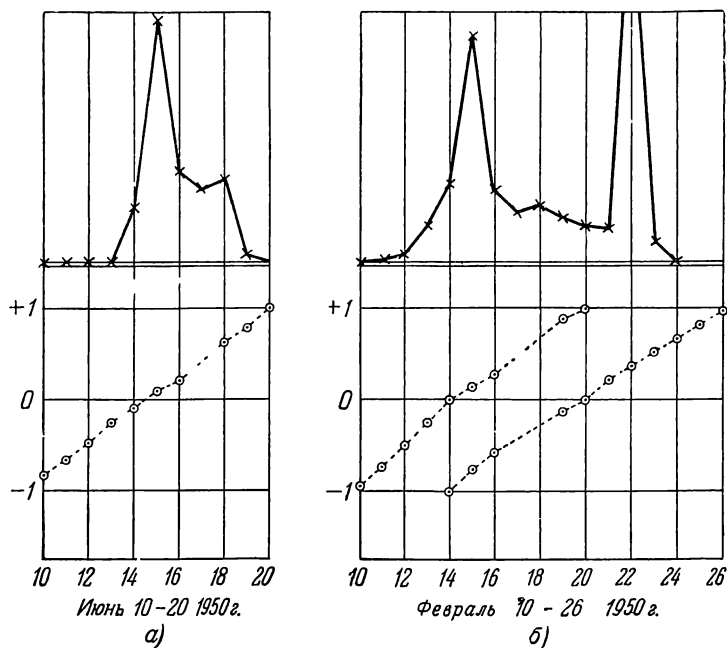


Рис. 41. Зависимость мощности радиоизлучения Солнца, связанного с пятнами, от положения группы пятен на диске Солнца.

солнечного диска, а ослабление потока излучения с длиной волны 1,70 м вдвое произойдёт через 1,5 суток.

На рис. 42 приведена зависимость потока радиоизлучения от положения группы пятен по отношению к центральному меридиану солнечного диска для нескольких длин волн. По оси абсцисс отложено время после или до прохождения группы пятен через центральный меридиан. Этот рисунок является иллюстрацией сказанного выше.

Как уже указывалось, радиоизлучение, связанное с пятнами, меняется со временем. Оно состоит из сравнительно слабо меняющегося фона и отдельных кратковременных резких увеличений мощности радиоизлучения, которые получили название выбросов. На рис. 43 (внизу) приведена непрерывная запись излучения от «возмущённого» Солнца, а для сравнения на рис. 43

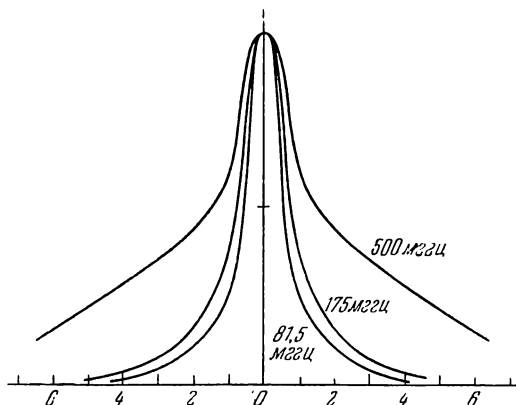


Рис. 42. Диаграмма, показывающая направленность радиоизлучения солнечных пятен для разных частот. По оси абсцисс отложено время (в днях) до или после прохождения центрального меридиана солнечного диска излучающей группой пятен, по оси ординат — поток радиоизлучения.

сверху приведена такая же запись излучения «спокойного» Солнца.

Длительность каждого выброса — около одной секунды. На рис. 44 приводится распределение выбросов по их времени существования. По оси абсцисс отложено время существования выбросов; по оси ординат — количество наблюдавшихся выбросов.

Для исследования выбросов и других быстро меняющихся со временем вспышек радиоизлучения Солнца был построен специальный радиотелескоп, получивший название спектрального анализатора. Сравни-

тельно узкая полоса пропускания приёмника могла быть центрирована на любую частоту, пробегаая интервал частот 70—130 мегагерц за небольшую долю секунды. Следовательно, постоянная времени этого приёмника очень мала, что сильно понижает его чувствительность (см. главу II). Но так как поток излучения от возмущённого Солнца достаточно велик, то высокой чувствительности и не требуется. Зато этот радиотелескоп может давать

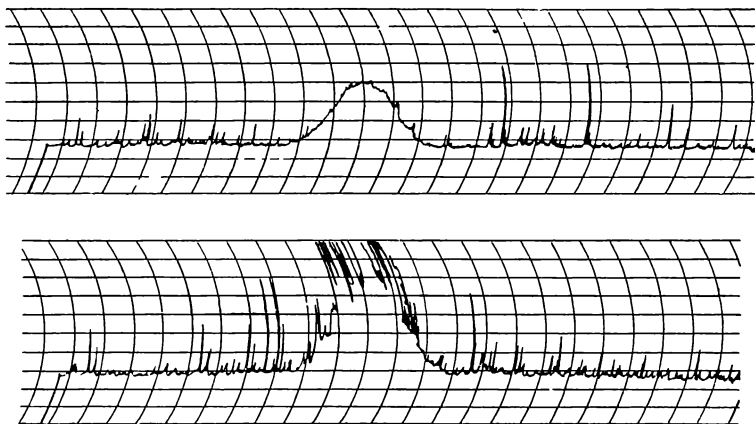


Рис. 43. Верхний рисунок — запись радиоизлучения от «спокойного» Солнца; нижний — запись радиоизлучения от «возмущённого» Солнца. Обе записи получены при неподвижном радиотелескопе при прохождении Солнца через главный лепесток диаграммы направленности антенны.

ценные сведения о спектральном составе кратковременных вспышек радиоизлучения от возмущённого Солнца и непрерывно следить за спектром «радиовспышки» в течение развития процесса.

Изучая при помощи спектрального анализатора выбросы излучения, связанного с пятнами, удалось обнаружить очень интересное явление. Оказывается, поток излучения данного выброса отличен от нуля только в пределах узкого интервала частот в 4—5 мегагерц. Интенсивность излучения быстро падает по обе стороны от

этого интервала частот. У разных выбросов частоты, на которые падает максимум излучения, могут быть разными. За время существования данного выброса частота, на которую падает максимум его излучения, заметным образом не меняется.

На рис. 45 приводится распределение выбросов по ширинам спектральных областей, в которых они наблюдаются. По оси абсцисс отложена ширина спектральной полосы в мегагерцах, в пределах которой наблюдается выброс, по оси ординат — число наблюдавшихся выбросов.

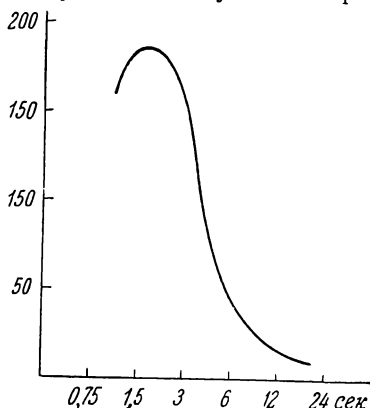


Рис. 44. Распределение выбросов радиоизлучения Солнца по времени их существования.

Систематические наблюдения показали, что чем меньше интенсивность выбросов, тем чаще они наблюдаются.

Возникает вопрос: нельзя ли фон радиоизлучения, связанного с пятнами, считать наложением большого количества слабых выбросов?

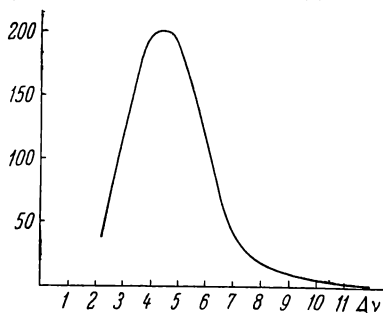


Рис. 45. Распределение выбросов по ширинам спектральной области, в которой они наблюдаются.

На этот вопрос пока нельзя дать определённый ответ. Существуют доводы как за, так и против такой возможности. Серьёзным аргументом в пользу такого предположения является то, что излучение как фона, так и отдельных выбросов поляризовано по кругу, причём направления вращения электрического вектора у фона и выбросов, как правило, одинаковы.

Аргументом против предположения, что фон радиоизлучения — это наложение большого числа выбросов, является различие спектра фона и суммарного спектра выбросов. Мы говорим о суммарном спектре выбросов, так как каждый выброс охватывает только узкий спектральный интервал. Кроме того, часто наблюдается, и притом довольно длительное время, сравнительно спокойный фон без выбросов. Бывают и выбросы без сколько-нибудь заметного фона. Таким образом, вопрос о том, является ли фон радиоизлучения, связанного с пятнами, результатом наложения большого числа выбросов или же фон и выбросы — два разных явления, связанных с пятнами, пока остаётся открытым.

То обстоятельство, что радиоизлучение, связанное с пятнами, поляризовано по кругу, объясняется тем, что оно возникает в области сильных магнитных полей, окружающих пятна, а магнитное поле сильно влияет на распространение радиоволн. Неполяризованную электромагнитную волну можно представить как сумму двух поляризованных по кругу волн с противоположными направлениями вращения. В магнитном поле обе эти волны распространяются по-разному. Может случиться, что одна из таких волн, скажем, с левым вращением, по тем или иным причинам не выйдет из солнечной атмосферы (например, она может быть поглощена). Тогда останется только волна с правым вращением. А это означает, что неполяризованная вначале волна, пройдя через среду, в которой имеется магнитное поле, может стать поляризованной по кругу. Таким образом, исследование круговой поляризации радиоизлучения Солнца может дать ценные сведения о солнечных магнитных полях.

Наряду с магнитными полями, окружающими пятна, на Солнце имеется ещё и общее магнитное поле, подобное тому, которое имеется на Земле. Это поле гораздо слабее поля пятен. Оптическими методами изучать это поле очень трудно. Раньше считали, что напряжённость общего магнитного поля Солнца у его магнитных полюсов около 50 гауссов. Сейчас имеются данные, что величина этого поля во всяком случае меньше 5 гауссов. По-видимому, оно переменное и зависит от солнечной активности.

Оказывается, что слабое общее магнитное поле Солнца должно привести к тому, что некоторая часть теплового радиоизлучения Солнца будет поляризована по кругу. Направления вращения электрического вектора поляризованной волны в северном и южном магнитных полушариях будут противоположны. Это означает, что если принимать радиоизлучение от всего солнечного диска, то круговой поляризации обнаружить не удастся. Но во время солнечных затмений, когда часть Солнца бывает закрыта Луной, можно было бы обнаружить частичную поляризацию солнечного радиоизлучения, вызванную общим магнитным полем Солнца.

Во время затмения были проделаны специальные наблюдения с целью обнаружить следы круговой поляризации в радиоизлучении «спокойного» Солнца. Результаты оказались отрицательными; таким образом, если и есть некоторая доля поляризованного по кругу солнечного радиоизлучения, то она не превышает 3%. Отсюда можно сделать вывод, что напряжение общего магнитного поля Солнца не превышает 18 гауссов. Дальнейшее увеличение точности поляризационных наблюдений несомненно позволит уточнить величину напряжённости общего магнитного поля Солнца.

Источники радиоизлучения, связанного с пятнами, занимают на диске Солнца сравнительно небольшие области. Это доказывается наблюдениями, произведёнными при помощи радиоинтерферометров. Характерная волнистая запись получается при угловых размерах лепестков порядка 5—10'. Подобная запись радиоизлучения от пятен приведена на рис. 46.

Важные результаты были получены при помощи многозеркального радиоинтерферометра, изображённого на рис. 16 (стр. 36). Этот интерферометр неподвижен, и Солнце при суточном движении проходит через его диаграмму направленности. Так как угловой диаметр Солнца около 32', а ширина лепестка интерферометра — около 3', то в каждый момент, когда Солнце пересекает лепесток, наблюдается излучение от узкой полоски шириною в $\frac{1}{10}$ солнечного диаметра, пересекающей весь диск (рис. 47). Таким образом, можно получить представление о распределении яркости по диску Солнца. Именно

так и удалось наблюдать яркое кольцо вокруг диска Солнца, существование которого следует из теории радио-

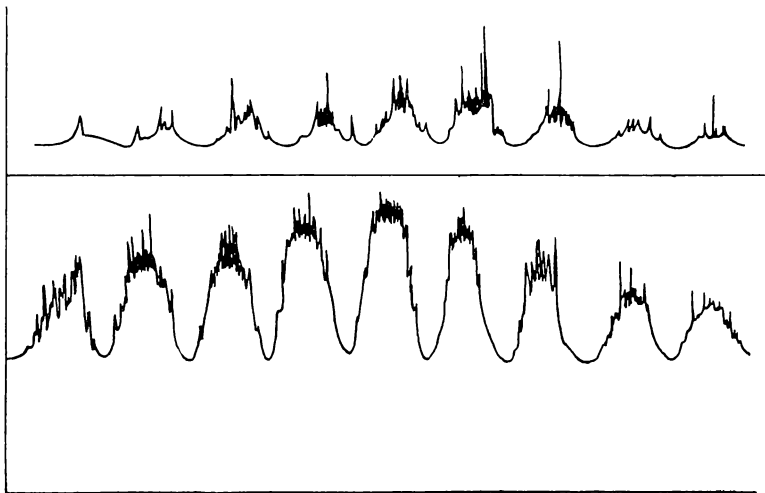


Рис. 46. Запись излучения, связанного с пятнами, полученная радиоинтерферометром.

излучения «спокойного» Солнца, и доказать, что радиоизлучающие области окружают группы солнечных пятен.

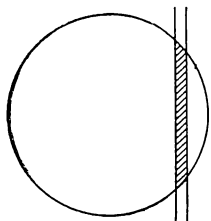


Рис. 47. Схема радионаблюдений Солнца 32-зеркальным радиointерферометром.

На рис. 48 приводятся две записи излучения Солнца при прохождении его через лепесток интерферометра, разделённые промежутком времени в семь дней. По изменению положения максимума на кривых отчётливо видно, как появившаяся на восточном краю солнечного диска область радиоизлучения, связанная с группой пятен, переместилась к западу в соответствии с вращением Солнца вокруг оси.

Природа аномально высокого радиоизлучения, связанного с пятнами, пока ещё не совсем ясна. Было высказано несколько гипотез, но все они оказались несостоятельными. Недавно советские учёные — В. Л. Гинз-

бург и Г. Г. Гетманцев — выдвинули очень интересную гипотезу о причине этого излучения. Они предположили, что в солнечной короне над пятнами находятся электроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, и поэтому обладающие кинетической энергией, в десятки тысяч раз большей, чем энергия тепловых движений обычных электронов короны. Подобные электроны, двигаясь в магнитном поле пятен в направлениях, близких к направлениям магнитных силовых линий, будут излучать электромагнитные волны, поляризованные по кругу,

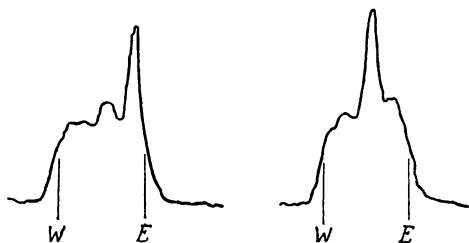


Рис. 48. Запись радиоизлучения Солнца, полученная 32-зеркальным радиоинтерферометром на волне 21 см.

с длиной волны примерно в 1 м. Расчёты показывают, что для того, чтобы область короны над группой пятен излучала наблюдаемое количество энергии, надо, чтобы в одном кубическом сантиметре короны было всего около ста таких электронов, т. е. около одной миллионной доли от электронов, движущихся в этой же области с тепловыми скоростями. Согласно теории такое излучение будет направленным и поляризованным по кругу.

Эта гипотеза при всех своих положительных качествах наталкивается на серьёзные трудности. Например, трудно понять, как вообще в солнечной атмосфере могут возникать электроны с такими огромными энергиями. Трудно также объяснить замечательные особенности спектров выбросов излучения, связанного с пятнами. Для объяснения этого излучения необходимы дальнейшие исследования как теоретического, так и наблюдательного характера.

До сих пор мы говорили о радиоизлучении, связанном с пятнами и наблюдаемом на метровом и на дециметровом диапазонах. Но наряду с этим излучением области короны, окружающие пятна, дают излучение повышенной интенсивности и на волнах сантиметрового диапазона. Однако это излучение имеет некоторые особенности, резко отличающие его от излучения на метровых волнах.

Во-первых, оно не обнаруживает характерного для метровых волн явления направленности. Во-вторых, во всех случаях поток излучения сравнительно невелик, — он не превосходит потока излучения от «спокойного» Солнца больше чем в 2—3 раза. Вспомним, что излучение метрового диапазона, связанное с пятнами, может в тысячи раз превосходить излучение от «спокойного» Солнца. Наконец, только 10—15% излучения на сантиметровом диапазоне, связанного с пятнами, поляризовано по кругу, в то время как для метровых волн наблюдается полная круговая поляризация.

Природа этого излучения объясняется следующим образом. Как показывают оптические наблюдения, солнечная корона над пятнами уплотняется, образуя так называемые корональные конденсации. В этих уплотнённых областях, простирающихся на десятки тысяч километров, электронная плотность раз в десять больше, чем в обычных областях короны. На рис. 49 приведена схема распределения электронной плотности в типичной корональной конденсации. Когда корона сильно уплотняется, она начинает излучать значительное количество энергии на сантиметровом диапазоне. «Невозмущённая» корона на этом диапазоне почти прозрачна и поэтому излучает очень мало. На метровых волнах, где «невозмущённая» корона излучает как раскалённое тело с температурой около миллиона градусов, излучение конденсаций почти ничего добавить не может.

Таким образом, излучение сантиметровых волн, связанное с пятнами, есть просто тепловое излучение корональных конденсаций, расположенных над пятнами.

Даже в отсутствии пятен, когда нет фона излучения «возмущённого» Солнца повышенной интенсивности,

наблюдаются отдельные или, как говорят, изолированные выбросы радиоизлучения длительностью в секунды и доли секунды, с интенсивностью, в тысячи раз превышающей интенсивность излучения «спокойного» Солнца. Выбросы такого типа исследовались спектральным анализатором. Их излучение сильно отличается от излучения выбросов, связанных с пятнами. Оно не поляризовано и наблюдается одновременно в широком интервале частот, тогда как каждый выброс, связанный с пятнами, наблюдается только в очень узком интервале частот.

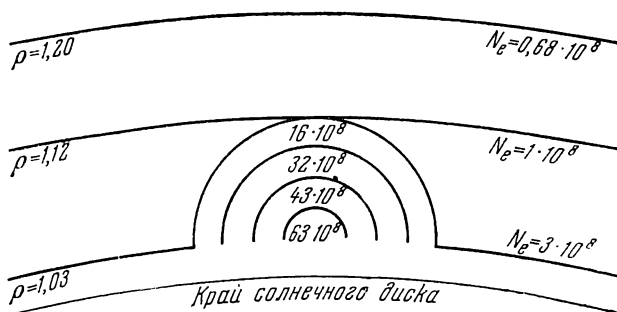


Рис. 49. Модель корональной конденсации, на которой проведены кривые равной плотности; ρ — расстояние от центра солнечного диска, выраженное в долях солнечного радиуса, N_e — число электронов в 1 см^3 .

Спектры различных изолированных выбросов резко отличаются один от другого. Обычно спустя долю минуты после того, как появился такой изолированный выброс, появляется второй, имеющий всегда меньшую мощность и сходный спектр. Повидимому, мы здесь наблюдаем любопытное явление радиоэха в солнечной атмосфере. Источник радиоизлучения в короне посылает во все стороны кратковременный сигнал, который будет наблюдаться на Земле как изолированный выброс. Но часть энергии сигнала будет распространяться в более глубокие слои солнечной атмосферы и, дойдя до уровня, где показатель преломления обращается в нуль, отразится

обратно и придёт на Землю с некоторым запозданием. Так как луч эха пройдёт значительный путь в сравнительно плотных слоях короны, то он будет частично поглощён. Поэтому мощность второго выброса (эхо) будет всегда меньше, чем первого, прямого сигнала. Запись радиоизлучения Солнца, показывающего изолированный выброс и его «эхо», приведена на рис. 50.

Самым грандиозным проявлением солнечной активности являются так называемые большие всплески радиоизлучения. Во время всплесков

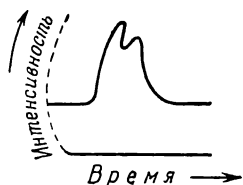


Рис. 50. Запись радиоизлучения изолированного выброса.

поток радиоизлучения от Солнца увеличивается в миллионы раз! Это явление обычно длится несколько минут. Большие всплески радиоизлучения наблюдаются в то время, когда на Солнце возникают вспышки. Если вспышка появилась на краю солнечного диска, то ей также будет сопутствовать большой всплеск. Это показывает, что радиоизлучение больших всплесков в от-

личие от излучения на метровом диапазоне, связанного с пятнами, не направлено. Отсутствует также и поляризация этого излучения.

Несомненно, что в этом случае мы наблюдаем явление, отличное по своей природе от излучения повышенной интенсивности, связанного с пятнами. Спектр радиоизлучения больших всплесков, как правило, ограничен со стороны низких частот. С течением времени эта «граничная» частота уменьшается.

Обычно на длинных волнах начало всплеска наблюдается позже, чем на коротких. Это запаздывание ясно видно из рис. 51, где дана запись интенсивности солнечного радиоизлучения во время гигантского всплеска 8 марта 1947 г. на разных волнах. Всплеск на волне 3 м начался на 2 минуты позже, чем на волне 1,5 м, а на волне 5 м — на 6 минут позже.

Примерно через сутки после большого всплеска радиоизлучения на Земле наблюдаются магнитные бури и полярные сияния. Это означает, что всплески связаны

с потоками заряженных частиц, проходящих через солнечную корону, межпланетное пространство и попадающих в верхние слои земной атмосферы.

В чём причина такого мощного радиоизлучения больших всплесков?

Существует несколько гипотез, объясняющих это грандиозное явление, разыгрывающееся в солнечной атмосфере. Наибольшим распространением пользуется ги-

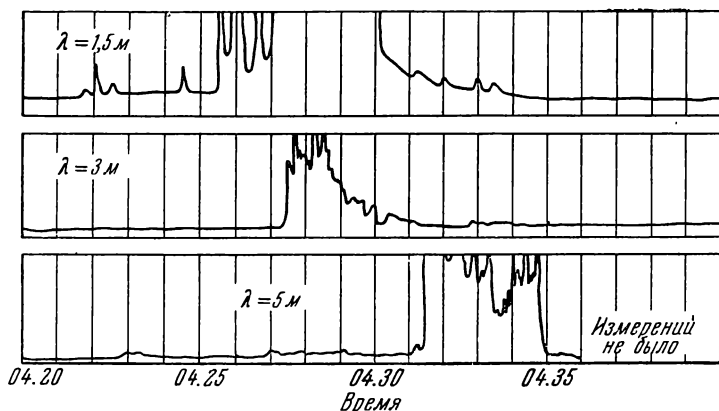


Рис. 51. Запись от большого всплеска радиоизлучения Солнца на разных волнах.

потеза, впервые высказанная в 1946 г. автором этой книги.

Солнечная атмосфера, и в особенности её самые наружные разреженные слои — корона, состоит в основном из заряженных частиц: электронов и положительно заряженных ионов. Электроны и ионы перемешаны, так что в любом объёме содержится в среднем одинаковое количество отрицательного и положительного электричества *). Все эти частицы находятся в состоянии беспорядочного теплового движения. Быстрее всего движутся самые лёгкие частицы — электроны.

*) Такой ионизованный газ в физике называется «плазмой».

Допустим, что по какой-нибудь причине в некотором малом объёме солнечной короны возникло случайное уплотнение электронов. Тогда в окружающем пространстве будет недостаток электронов, т. е. избыток положительного заряда (полное количество отрицательного и положительного электричества должно быть в среднем одинаково). На электронное уплотнение будет действовать электростатическая сила, которая заставит электроны покинуть область, где возникло уплотнение. Но по инерции электронов уйдёт слишком много, и спустя короткое время в том же самом малом объёме возникнет недостаток электронов, в то время как в соседнем пространстве будет избыток их. Снова возникнет электростатическая сила, но уже противоположного направления. Она вызовет обратное движение электронов к тому же малому объёму. По инерции их туда «набежит» слишком много, и процесс будет повторяться. Таким образом, уплотнение, возникшее в газе, состоящем из заряженных частиц, неизбежно вызывает колебательное движение электронов, так называемые «плазменные колебания».

Из теории электричества известно, что колеблющийся электрон при определённых условиях будет излучать электромагнитные волны, частота которых близка к частоте собственных колебаний электрона. Частота таких колебаний зависит только от плотности газа: чем больше плотность, тем больше частота. Плотность газа в короне такова, что такие электроны излучают электромагнитные волны длины порядка нескольких метров.

Однако сами по себе колебания электронов достаточной величины в короне возникнуть не могут. Для этого необходима какая-то внешняя причина, которая служила бы источником энергии для подобных колебаний. Что же это за причина? Скорее всего, это потоки электрически заряженных частиц, вылетающих из некоторых областей солнечной поверхности, в частности, из областей, окружающих вспышки.

Повидимому, вспышки и выбросы заряженных частиц тесно связаны друг с другом. Пролетая через протяжённую солнечную корону, потоки частиц возбуждают колебания электронов и тратят на это некоторую часть своей энергии. Каждая область короны, пересекаемая

заряженными частицами, становится источником радиоизлучения, длина волны которого зависит только от плотности газа в этой области. Поскольку потоку частиц требуется несколько минут, чтобы пройти через корону, то в начале всплеска должно наблюдаться излучение от более глубоких и более плотных слоёв солнечной короны. Так как в этих областях образуются колебания больших частот, то в начале всплеска должно наблюдаться сравнительно коротковолновое излучение. По мере удаления потока частиц от поверхности Солнца длина волны радиоизлучения будет увеличиваться в соответствии с уменьшением скорости потока частиц и плотности газа в короне.

Многочисленные результаты наблюдений радиоизлучения всплесков подтверждают этот вывод теории. При помощи радиоинтерферометра удалось наблюдать быстрое движение источника радиоизлучения от большого всплеска. Например, в одном случае источник излучения появился на диске Солнца и за полчаса сместился в область короны, находящуюся на расстоянии полутора солнечных радиусов от центра диска.

Недавно были получены новые исключительно ценные наблюдательные данные, подтверждающие правильность развитых выше соображений о возбуждении потоками заряженных частиц плазменных колебаний в короне. Австралийские радиоастрономы усовершенствовали свой спектральный анализатор. Если раньше он работал в диапазоне частот 70—130 мегагерц, то после переделки можно было исследовать спектральную область от 38 до 220 мегагерц. Такое расширение спектральной области позволило выявить качественно новые особенности радиоизлучения больших всплесков, раньше ускользавшие от наблюдений. Во время большого всплеска радиоизлучения, который произошёл 21 ноября 1952 г., каждые 0,5 секунды получалось распределение интенсивности радиоизлучения всплеска по спектру. Наблюдения велись в течение 15 минут. В итоге оказалось возможным построить «динамический спектр» большого всплеска, приведённый на рис. 52. По оси ординат отложены моменты наблюдений, по оси абсцисс — частоты. Густота штриховки соответствует интенсивности радиоизлучения.

Изучая рис. 52, мы видим, что для данного момента времени интенсивность в основном сосредоточена в двух сравнительно узких спектральных полосах, далеко отстоя-

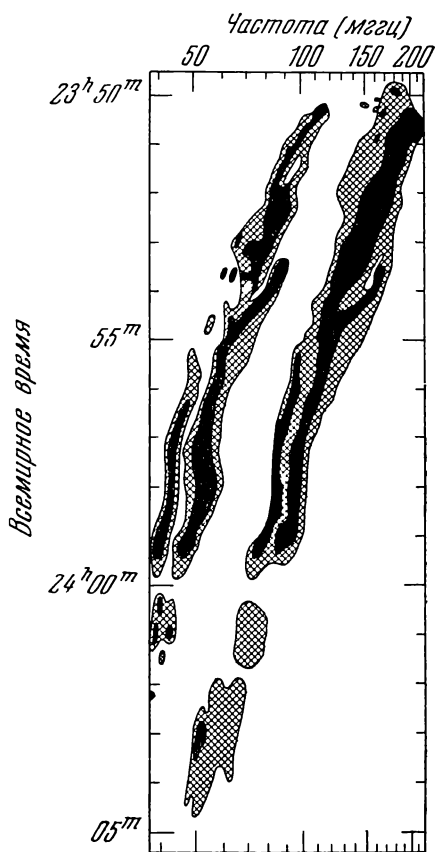


Рис. 52. Изменения со временем спектра большого всплеска радиоизлучения.

щих одна от другой. С течением времени «центры тяжести» этих полос перемещаются от высоких частот к низким. Каждая из полос обладает совершенно определённой «структурой», причём можно констатировать замечательное подобие в структуре обеих полос (например, раздвоения и разветвления у них идут совершенно параллельно). Отношение частот характерных деталей в обеих полосах (для данного момента времени!) очень близко к двум. Пожалуй, это является наиболее важным результатом этих наблюдений.

Такое поведение обеих полос, естественно, наводит на мысль, что они тесно связаны. Не подлежит сомнению, что возбуждение излучения в обеих полосах обусловлено одним и тем же агентом. То, что отношение частот отдельных деталей

в обеих полосах очень близко к двум, означает, что мы наблюдаем некий колебательный процесс и его первый обертона. Основное колебание — это «низкочастот-

ная» (левая) полоса, первый обертон — это излучение от второй полосы. Известно, что колебательные процессы с некоторой частотой сопровождаются обертонами, т. е. колебаниями с удвоенной, утроенной и вообще кратной частотой. Обычно интенсивность колебания обертонов непрерывно и довольно быстро уменьшается с ростом номера обертона (или, как говорят, «гармоники»). В нашем случае интенсивности обеих полос (соответствующих основному колебанию и его первой «гармонике») почти одинакова, между тем как других гармоник, повидимому, нет.

Это можно объяснить большим поглощением в короне радиоизлучения основного колебания, между тем как первый обертон почти не поглощается в короне (ибо его частота слишком высока), а второй обертон, хотя и не поглощается, но вообще имеет малую интенсивность. Поглощение короной радиоизлучения «основной» полосы означает, что излучение возникает на таком уровне короны, где частота плазменных колебаний (см. стр. 92) очень близка к частоте излучения основной «полосы». Тот факт, что обе полосы непрерывно движутся в сторону низких частот, означает, что излучающая область непрерывно перемещается в более высокие, разреженные слои короны, где частота плазменных колебаний будет ниже.

Зная распределение электронной плотности в короне по высоте, можно вычислить частоту плазменных колебаний для каждого уровня в короне. Из динамического спектра, приведённого на рис. 52, можно найти скорость возбуждающего плазменные колебания агента. Она составляет для этого всплеска около 500 км/сек. Повидимому, этот агент — потоки заряженных частиц, пронизывающие корону и затем спустя сутки достигающие Земли (они вызывают явления полярных сияний и магнитных бурь).

Подводя итоги, можно сказать следующее. В настоящее время картина теплового радиоизлучения «спокойного» Солнца достаточно ясна. Накоплен огромный материал о радиоизлучении «возмущённого» Солнца. Намечаются пути теоретического объяснения результатов наблюдений. Однако, хотя мы ещё пока мало знаем

о природе радиоизлучения «возмущённого» Солнца, наблюдения этого излучения стали неотъемлемой частью программы Службы Солнца.

Радиоизлучение «возмущённого» Солнца является важнейшей характеристикой солнечной активности; его всестороннее изучение помогает выяснению тех влияний, которые процессы на Солнце оказывают на многие явления, происходящие на Земле.

ГЛАВА V

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЛУНЫ

В 1946 г. на волне 1,25 см было обнаружено радиоизлучение Луны. В самом этом факте нет ничего удивительного. Луна, известная как холодное несамосветящееся тело, не вполне холодна и всё же излучает некоторое количество энергии. Теплота поверхности Луны обусловлена поглощением её поверхностью солнечных лучей. Однако температура поверхности Луны, конечно, очень низка по сравнению с температурой поверхностных слоёв Солнца, и поэтому Луна почти не будет излучать видимых лучей. Больше всего Луна должна излучать инфракрасные лучи с длиной волны 7—8 микронов; некоторое количество энергии будет излучаться и в области коротких радиоволн.

Инфракрасное излучение Луны было изучено сравнительно давно. Исследования установили, что на Луне «днём» (имеется в виду лунный «день») температура поверхности достигает $+130^{\circ}\text{Ц}$, в то время как «ночью» она опускается до -150°Ц . Столь резкие колебания температуры объясняются тем, что Луна лишена атмосферы, которая на Земле выравнивает дневную и ночную температуры. Кроме того, «день» на Луне длится очень долго — две недели, и лунная поверхность за это время сильно накаляется, а длинная двухнедельная «ночь» приводит к сильнейшему остыванию лунной поверхности.

Очень интересно, что температура Луны, определённая по её тепловому радиоизлучению, меняется за лунные сутки значительно меньше. На волне 1,25 см температура «днём» около $+30^{\circ}$, а «ночью» около -75°Ц . Изменения лунной температуры, определённые по радио-

излучению, не совпадают с изменениями фаз Луны (в отличие от температуры, полученной из наблюдений в инфракрасных лучах), а отстают от них приблизительно на $\frac{1}{3}$ периода. Наивысшая температура в некотором определённом месте Луны будет не в то время, когда Солнце над лунным горизонтом стоит выше всего и когда, следовательно, оно посылает на лунную поверхность наибольшее количество греющих её лучей, а спустя примерно $3\frac{1}{2}$ земных суток.

Повидимому, радиоизлучение Луны на волне около 3 см уже совершенно не зависит от её фазы. Температура Луны, определённая по излучению с этой длиной волны, будет одинакова для «ночной» и «дневной» половины спутника нашей планеты *).

Странное постоянство лунной температуры, определённой по радиоизлучению, объясняется следующим образом. Задолго до открытия радиоизлучения Луны акад. В. Г. Фесенков доказал, что лунная почва имеет малую теплопроводность. Это удалось сделать так.

Во время полных лунных затмений Луна на несколько часов погружается в земную тень. При этом было обнаружено, что температура лунной поверхности падает очень быстро. За немногие часы затмения она опускается почти до «ночного» значения. Если бы лунная почва обладала большей теплопроводностью, то от более глубоких слоёв на остывшую поверхность непрерывно поступал бы поток тепла, и остывание было бы очень медленным.

В. Г. Фесенков подсчитал, что теплопроводность лунной почвы примерно в тысячу раз меньше, чем у таких пород, как гранит и базальт. Такую ничтожную теплопроводность может иметь только мелко раздроблённая пыль. Поверхность соприкосновения соседних пылинок очень мала по сравнению с полной поверхностью каждой пы-

* Недавно В. С. Троицкий, а также М. Т. Турусбеков и С. Э. Хайкин провели интересные исследования радиоизлучения Луны на волне 3,2 см. Оказалось, что радиоизлучение Луны совершенно не зависит от её фазы. Температура излучающих слоёв Луны около — 100° Ц. Повидимому, зарубежные исследования радиоизлучения Луны содержат многочисленные ошибки.

линки, передача тепла происходит только путём лучеиспускания от одной частицы к другой, и это приводит к ничтожной теплопроводности.

В чём же причина такого своеобразия лунной поверхности? В. Г. Фесенков связывает характер лунной почвы с отсутствием атмосферы на Луне.

Хорошо известно, что на Землю падают метеорные тела — небольшие пылинки, движущиеся по определённым орбитам вокруг Солнца и сталкивающиеся на своём пути с Землёй. Влетая с огромной скоростью в земную атмосферу, они в ней испаряются, что и наблюдается нами как явление метеора. Только очень редко самые крупные из метеорных тел, не успев испариться, падают на земную поверхность. Такие «небесные камни» называются метеоритами. Но подавляющая часть метеорных тел испаряется уже на высоте около 80 км от поверхности Земли. Подсчитано, что ежедневно на Землю падает несколько сот тонн метеорного вещества, причём почти всё оно распыляется в атмосфере.

Если бы на Земле не было атмосферы, оберегающей нас от небесных камней, то каждый такой «небесный снаряд», у которого скорость в несколько десятков раз больше, чем у ружейной пули, падая, взрывался бы, дробя небольшое количество почвы. За миллиарды лет существования коры Земли эта непрерывная «бомбардировка» привела бы к распылению всего поверхностного слоя почвы. Именно это и произошло на Луне, лишённой атмосферы. Ведь на Луне нет воды, которая бы смывала пыль, и нет ветров, которые бы её сдували. Пыль постепенно накапливалась, и сейчас ею покрыта вся поверхность Луны.

Это строение лунной поверхности и объясняет особенности распределения температуры, получаемой из радионаблюдений. Излучение на сантиметровых волнах приходит к нам не от поверхности Луны, как инфракрасное излучение, а от слоя, расположенного под поверхностью. Чем больше длина волны радиоизлучения, тем от более глубоких слоёв оно приходит.

Подсчитано, например, что радиоизлучение Луны на волне 1,25 см приходит к нам от слоя, лежащего на глубине в 40 см. Для того чтобы объяснить результаты на-

блюдений, достаточно принять, что толщина пылевого слоя всего лишь около 1 мм! «Шуба» Луны, защищающая её твердую поверхность как от чрезмерного охлаждения, так и от чрезмерного нагревания, необычайно тонка.

Мы убедились в мощи методов радиоастрономии: радиолуч проникает даже под поверхность планет, что для оптической астрономии совершенно невозможно.

Возникает такой любопытный вопрос. Хорошо известно, что в видимых лучах Луна светит отражённым солнечным светом. Можно ли заметить отражённое от Луны солнечное радиоизлучение? Поток солнечного радиоизлучения, отражённого от Луны и попавшего на Землю, будет примерно в миллион раз меньше, чем поток радиоизлучения, непосредственно падающий на Землю от Солнца. Именно в такое число раз поток видимого излучения от Луны (почти целиком являющийся отражённым от Луны видимым излучением Солнца) будет меньше потока видимого излучения от Солнца.

Поэтому ослабленное отражением от Луны радиоизлучение «спокойного» Солнца до сих пор ещё не удалось обнаружить. Но во время особенно больших всплесков, когда поток излучения от «возмущённого» Солнца будет в миллионы раз больше, чем от «спокойного», отражённое от Луны излучение будет иметь такую же мощность, что и излучение «спокойного» Солнца, и может быть отмечено. Чувствительность современных радиотелескопов позволяет обнаружить отражённое от Луны солнечное радиоизлучение даже в том случае, если мощность последнего лишь в 500 раз превышает мощность радиоизлучения «спокойного» Солнца. Это бывает не так уж редко. Таким образом, наблюдая в радиотелескоп ночью Луну, можно обнаружить резкие усиления радиоизлучения Солнца, например всплески. Это может иметь значение для радиослужбы Солнца.

Несомненно, что планеты также излучают радиоволны. Однако поток этого излучения очень мал из-за незначительных угловых размеров планет. Он должен

быть в несколько тысяч раз меньше, чем от Луны, что пока находится за пределами чувствительности современных радиотелескопов. Однако если будут изготовлены хорошие зеркала с диаметром свыше 15 м, то на волне 1 см можно будет обнаружить радиоизлучение от Венеры, Юпитера и Марса в эпохи, когда они находятся на наиболее близких расстояниях от Земли. Можно надеяться, что исследование радиоизлучения планет позволит получить ряд важных сведений об их природе.

ГЛАВА VI

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ГАЛАКТИКИ

В предыдущих главах мы ознакомились с основами техники и методики радиоастрономических наблюдений и с особенностями радиоизлучения Солнца и Луны. Однако самые поразительные результаты были достигнуты радиоастрономией при исследовании радиоизлучения от небесных тел, находящихся от Земли на гораздо больших расстояниях, чем Солнце. Именно здесь астрономы и физики столкнулись с такими явлениями, о которых раньше нельзя было и догадываться.

Радиоизлучение небесных тел, находящихся за пределами нашей солнечной системы, мы будем называть космическим радиоизлучением. В свою очередь, космическое радиоизлучение можно разделить на галактическое радиоизлучение и метagalактическое радиоизлучение. В первом случае излучающие объекты находятся в пределах огромной системы звёзд и других небесных тел, в которую входит наше Солнце. Эта система называется Галактикой. Во втором случае излучающие объекты находятся за пределами Галактики.

Для того чтобы понять природу космического радиоизлучения, нужно хотя бы в самых общих чертах описать строение Галактики. По понятным причинам мы не можем систематически и с достаточной полнотой изложить современные сведения о строении Галактики. Наша цель — дать только те сведения, которые необходимы для дальнейшего чтения этой книги. При этом особое внимание будет обращено на те вопросы, которые в популярной литературе обычно рассматривают недостаточно подробно.

Читатели, желающие более подробно познакомиться с современными сведениями о строении Галактики, могут обратиться к книгам: П. П. Паренаго, «Мир звёзд», изд-во АН СССР, 1951 г. и Т. А. Агекян, «Звёздная вселенная», изд-во Ленинградского ун-та, 1952 г.

Прежде чем перейти к описанию строения Галактики, необходимо кратко остановиться на системах координат, употребляемых в астрономии.

При непосредственных наблюдениях мы не можем оценить различия в расстояниях до небесных светил и относим их все как бы на одно расстояние — на внутреннюю поверхность некоторой сферы, окружающей наблюдателя. Эта воображаемая сфера произвольного радиуса называется *небесной сферой*.

При суточном вращении небесной сферы, которое является отражением вращения Земли вокруг своей оси, две её точки остаются неподвижными. Это северный и южный полюсы небесной сферы. Около северного полюса находится в настоящее время Полярная звезда. Через центр небесной сферы и полюсы проходит воображаемая ось вращения небесной сферы (ось мира), параллельная оси вращения Земли.

Для определения видимых положений каких-либо объектов на небосводе астрономы чаще всего пользуются экваториальной системой координат (рис. 53). В этой системе основной плоскостью служит плоскость, перпендикулярная к оси мира и пересекающая небесную сферу по большому кругу. Эта плоскость называется плоскостью небесного экватора, а линия пересечения её с небесной сферой — *небесным экватором*. Большие круги, перпендикулярные к экватору и пересекающиеся в полюсах мира, называются *кругами склонений*.

В экваториальной системе одной координатой служит *склонение* δ — угловое расстояние светила от экватора. Склонение считается положительным в направлении к северному полюсу и отрицательным — к южному и меняется от -90° до $+90^\circ$.

Второй координатой является *прямое восхождение* α — дуга экватора, отсчитываемая от точки

весеннего равноденствия до круга склонения светила в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы. Точка весеннего равноденствия Υ — одна из двух точек пересечения небесного экватора и эклиптики — видимого пути Солнца среди звёзд.

Прямое восхождение выражается либо в градусной мере от 0 до 360° , либо в часовой мере от 0 до 24 часов.

Для определения положения каких-либо объектов в Галактике пользуются галактической системой координат (рис. 54).

Основной плоскостью в этой системе является так называемая плоскость Галактики, которая пересекается

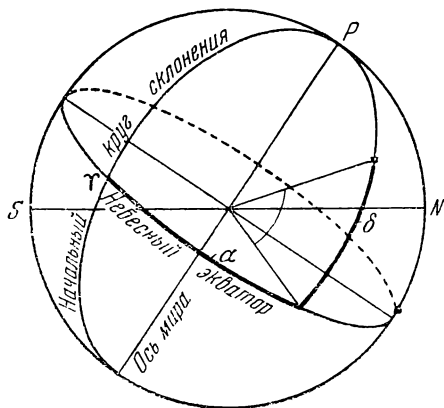


Рис. 53. Экваториальная система координат.

с небесной сферой по галактическому экватору. Галактический экватор проходит через середину полосы Млечного Пути, и его плоскость наклонена на 62° к плоскости небесного экватора.

Галактическая долгота l отсчитывается по галактическому экватору от одной из точек пересечения его с небесным экватором (на рисунке обозначена знаком Ω) и выражается в градусах от 0 до 360° . Г а л а к т и ч е с к а я ш и р о т а b отсчитывается от галактического экватора

в обе стороны до $\pm 90^\circ$ (северная и южная галактические широты).

В настоящее время строение Галактики рисуется следующим образом.

Галактика — это гигантская звёздная система, насчитывающая свыше ста миллиардов звёзд. Однако, кроме звёзд, в состав Галактики входят пылевые и газовые облака, а также межзвёздная среда, состоящая в основном из необычайно разреженного газа.

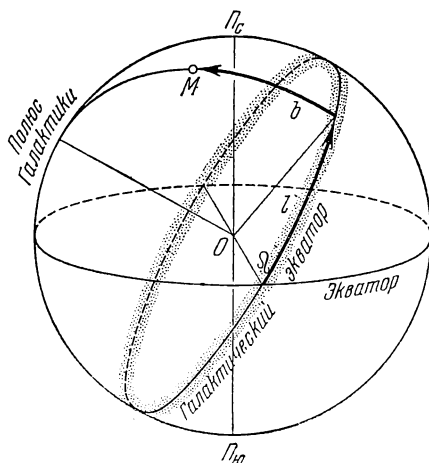


Рис. 54. Галактическая система координат.

Звёздный состав Галактики весьма разнообразен. Есть звёзды-гиганты, излучающие поток энергии, в десятки тысяч раз больший, чем Солнце, и есть карлики, излучающие в сотни тысяч раз меньше Солнца. Есть звёзды огромных размеров — их диаметр превышает диаметр орбиты Марса, т. е. около 150 солнечных диаметров, и есть «крошки», по размерам меньшие, чем наша Земля.

Интересно, что по своим массам звёзды различаются не так сильно. Почти нет звёзд с массой, в 10 раз большей, чем Солнце, или в 10 раз меньшей, и большинство звёзд имеет массы, отличающиеся лишь на 50% от массы

Солнца *). Значит, звёзды гигантских размеров должны иметь невообразимо низкую среднюю плотность — в миллионы раз меньше плотности воды, а очень маленькие массивные звёзды — так называемые «белые карлики» — имеют среднюю плотность в десятки и даже сотни тысяч раз больше плотности воды! Заметим, что плотность платины — одного из самых тяжёлых металлов — только в 20 раз больше плотности воды.

Температуры поверхностных слоёв звёзд заключены в пределах от 2000—3000 до 50—100 000°, тогда как температура поверхности Солнца около 6000°. Больше всего в нашей звёздной системе «карликовых» звёзд, к числу которых принадлежит и наше Солнце. Наиболее многочисленны «красные карлики» с температурой поверхности 3000—4000°. Эти звёзды излучают значительно слабее нашего Солнца.

Звёзды в Галактике, как правило, находятся на огромных расстояниях одна от другой. Если рассматривать нашу звёздную систему как некий газ, уподобив каждую звезду молекуле газа, то этот «газ» оказывается исключительно разреженным. Дело не в том, что расстояния между звёздами очень велики сами по себе (порядка нескольких световых лет); дело в том, что эти расстояния исключительно велики по сравнению с размерами звёзд. Если при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами воздуха всего лишь в несколько десятков раз больше диаметров самих молекул, то средние расстояния между звёздами в десятки миллионов раз больше диаметров звёзд. Продолжая сравнение между обычным газом и «звёздным», найдём, что одна молекула воздуха при нормальных условиях сталкивается с другими молекулами несколько сот миллионов раз в секунду, в то время как звезда за время своей жизни — в течение десятков миллиардов лет — ни разу не столкнётся с другой. Звёздный «газ» — это газ, где отсутствуют столкновения между частицами.

Область, окружающая центр масс нашей звёздной системы, называется галактическим центром

*) Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{33}$ г, что в 330 000 раз больше массы Земли.

или просто центром. Солнце и окружающие его планеты находятся далеко от центра — на расстоянии около 23 тысяч световых лет. В области центра находится наибольшее количество звёзд. По всем направлениям от центра звёздная плотность, т. е. число звёзд в единице объёма, уменьшается. Однако падение плотности по направлению к галактическим полюсам происходит гораздо быстрее, чем в галактической плоскости.

Для наблюдателя, находящегося на Земле, в направлениях, лежащих вблизи галактической плоскости, на луче зрения будет находиться значительное количество звёзд, и эти участки неба будут казаться сравнительно яркими. Напротив, в направлениях, составляющих значительный угол с галактической плоскостью, звёзд будет гораздо меньше, и эти участки будут значительно менее яркими. Поэтому мы наблюдаем общий свет миллиардов удалённых от нас звёзд нашей Галактики в виде светлой полосы, тянущейся через всё небо, — Млечного Пути.

В направлении на центр Галактики находится созвездие Стрельца. Разумеется, группа ярких звёзд, образующих это созвездие, расположена к нам значительно ближе центра. В направлении, противоположном направлению на центр, или, как говорят, в направлении на антицентр, находятся созвездия Тельца и Персея. Отметим ещё два направления, перпендикулярных к направлению на центр и лежащих в галактической плоскости. Это — направления на созвездие Лебедя и на созвездие Киля (это созвездие в наших северных широтах нельзя видеть).

Исследования советских учёных, главным образом Б. В. Кукаркина, показали, что различные по своим физическим признакам звёзды имеют в Галактике разное пространственное распределение. Большинство звёзд расположено в пространстве около галактической плоскости и образует некоторый эллипсоид, у которого две оси одинаковы, а третья — раз в десять меньше. Такое тело по своей форме напоминает двояковыпуклую линзу. Диаметр этого эллипсоида можно приблизительно оценить в 75 тысяч световых лет. Разумеется, само понятие «гра-

ница звёздной системы» не имеет определённого смысла, потому что по мере удаления от центра звёздная плотность падает постепенно.

Однако в нашей Галактике существуют и такие типы звёзд, которые имеют пространственное распределение, отличное от описанного выше. Например, некоторые группы звёзд почти не концентрируются к галактической плоскости, но зато обнаруживают сильную концентрацию к галактическому центру. Такие звёздные системы получили название сферических подсистем. Другие, как, например, редкий тип горячих гигантских звёзд, имеют исключительно сильную концентрацию к галактической плоскости и небольшую концентрацию к центру. Они образуют плоские подсистемы.

Звёзды в Галактике находятся в непрерывном движении. Пока мы ещё не знаем характера их движений во всех подробностях, но уже удалось выяснить существование общего движения всех звёзд в Галактике — галактического вращения.

В 1928 г. голландский астроном Оорт исследовал особенности вращения Галактики. Это вращение довольно сложно. Оно не похоже ни на вращение твёрдого тела, ни на обращение планет вокруг Солнца, а имеет промежуточный характер.

Солнце и окружающие его звёзды имеют скорости вращения вокруг галактического центра, превышающие 200 км/сек. С этой скоростью складываются направленные в разные стороны беспорядочно ориентированные скорости отдельных звёзд. Для Солнца подобная скорость составляет 19,5 км/сек; с такой скоростью движется Солнце в направлении к созвездиям Лиры и Геркулеса по отношению к группе близких звёзд.

В мощные телескопы мы наблюдаем огромное количество удалённых звёздных систем — других галактик *),

*) Наша звёздная система в астрономии называется «Галактикой» (с большой буквы), в то время как другие звёздные системы называются «галактиками» (с маленькой буквы). Совокупность всех галактик, включая и нашу Галактику, образует Метагалактику. В самый большой из существующих телескопов можно наблюдать сейчас около миллиарда галактик; наиболее далёкие из них находятся на расстоянии нескольких сот миллионов световых лет.

движущихся в беспредельных просторах вселенной. Одна из ближайших к нам звёздных систем — это туманность Андромеды, видимая простым глазом. Древние наблюдатели сравнивали туманность Андромеды со светом свечи, видимой через роговую пластинку. Она посылает к нам приблизительно столько же света, сколько слабая звёздочка пятой величины. Эта туманность удалена от нас примерно на 1,5 миллиона световых лет, и её действительные размеры примерно такие же, как и у нашей Галактики. На рис. 55 приведена фотография туманности Андромеды. На фотографии ясно видна спиральная структура внешних частей этой звёздной системы. Подобная спиральная структура встречается и у других галактик. На рис. 56 приведена фотография спиральной галактики в созвездии Гончих Псов.

Однако существуют галактики, лишённые спиральной структуры, — так называемые эллиптические и неправильные галактики. Впрочем, неправильные галактики встречаются сравнительно редко.

Наша Галактика принадлежит к типу галактик со спиральной структурой, но так как мы находимся внутри Галактики, выявить её спиральную структуру оказывается трудной задачей. В настоящее время установлено наличие ветви спирали, идущей от созвездия Лебедя к созвездию Киля. В этих направлениях средняя пространственная плотность звёзд несколько выше, чем в соседних направлениях. Повидимому, Солнце и ближайшие к нам звёзды находятся внутри этой ветви спирали, вблизи её края. Методы радиоастрономии оказались мощным средством для исследования спиральной структуры нашей Галактики. Об этом будет рассказано в главе VII.

Пространство между звёздами не является абсолютно пустым. Оно заполнено исключительно разреженной газовой и пылевой средой. Эта среда отнюдь не является однородной. Местами она сгущается, образуя гигантские облака — газовые и пылевые туманности. Такие облака имеют размеры приблизительно в 30 световых лет, движутся со скоростью около 10 км/сек и обычно имеют массы порядка солнечной. Однако даже в самых плотных из таких туманностей на один кубический сантиметр приходится всего лишь несколько тысяч атомов, в то время



Рис. 55. Туманность Андромеды.



Рис. 56. Спиральная туманность в созвездии Гончих Псов.

как в воздухе в том же объёме при нормальных условиях насчитывается $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. В среднем в межзвёздном пространстве приходится всего около одного атома на кубический сантиметр. В основном это атомы водорода и в меньшей степени атомы гелия. Хотя межзвёздный газ и исключительно разрежен, его общая масса оказывается довольно значительной.

В окрестностях Солнца масса межзвёздного газа даже немного превышает массу, сосредоточенную в звёздах, хотя во всей Галактике масса, сосредоточенная в звёздах, в несколько десятков раз больше массы межзвёздного газа. Дело в том, что облака межзвёздного газа сосредоточены около галактической плоскости, где находится и Солнце.

Межзвёздная пыль состоит из твёрдых частичек ничтожных размеров — поперечником в несколько десятых микрона. Масса межзвёздной пыли, заключённой в нашей Галактике, значительно меньше, чем масса межзвёздного газа. Однако пыль обладает способностью сильно поглощать свет, даже находясь в очень разреженном состоянии. Поэтому удалённые от нас области Галактики, находящиеся в направлениях, близких к галактической плоскости (около которой сосредоточена межзвёздная пыль), наблюдать очень трудно, а иногда и вовсе невозможно. В частности, центральная часть нашей Галактики до недавнего времени была недоступна наблюдениям. Только в 1948—1949 гг. советские учёные А. А. Калиняк, В. И. Красовский и В. Б. Никонов получили фотографии области галактического центра в инфракрасных лучах, которые значительно меньше поглощаются межзвёздной пылью, чем видимые лучи.

Фотографии галактического центра в фотографических и инфракрасных лучах приведены на рис. 57.

Радиоволны обладают замечательной особенностью — они совершенно не поглощаются космической пылью и беспрепятственно проходят через тёмные туманности. Поэтому в радиолучах мы можем свободно наблюдать не только области галактического центра, но и области Галактики «по ту сторону» центра. Это является неоценимым преимуществом радиоастрономии по сравнению с оптической астрономией.

Интересно, что температура межзвёздного газа может достигать очень высокого значения — до $10\,000^\circ$. Это бывает тогда, когда облака межзвёздного газа находятся неподалёку от горячих звёзд *). Такие звёзды являются мощными источниками ультрафиолетового излучения. Это излучение отрывает у межзвёздных водородных атомов электроны от ядер — протонов (ионизует их), и электрону сообщается довольно значительная кинетическая энергия. При столкновениях электроны передают энергию другим частицам межзвёздной среды, и беспорядочные скорости частиц межзвёздной среды, облучаемой ультрафиолетовым излучением горячих звёзд, становятся весьма значительными. Именно это обстоятельство и имеется в виду, когда говорят о высокой температуре межзвёздного газа. Как уже упоминалось, температура, определённая по скоростям беспорядочных движений частиц газа, называется кинетической температурой.

Но температуру межзвёздного пространства можно было бы определить и другими способами.

Представим себе твёрдое тело, находящееся в межзвёздном пространстве в тепловом равновесии с излучением удалённых звёзд. Это значит, что тело поглощает столько же излучения, сколько излучает само. Так как количество излучения в межзвёздном пространстве очень незначительно — в десятки миллиардов раз меньше, чем количество солнечного излучения, падающего к нам на Землю, — то каждая единица поверхности твёрдого тела будет очень мало поглощать, а следовательно, и очень мало излучать. По законам физики излучательная способность единицы поверхности твёрдого тела определяется его поверхностной температурой. Отсюда мы получим, зная количество излучения единицы поверхности тела, что температура поверхности твёрдого тела, находящегося в межзвёздном пространстве, будет близка к абсолютному нулю. И тут же «рядом» частицы газа движутся со скоростями, соответствующими температуре $10\,000^\circ$! Столь сильное различие в температуре среды, полученной двумя различными методами, означает, что

*) Разумеется, «неподалёку» в астрономическом масштабе; в данном случае около 100 световых лет.

само понятие «температура», применённое к межзвёздной среде, бессмысленно, если при этом не оговорить, что, собственно говоря, имеют в виду. Ниже мы везде будем

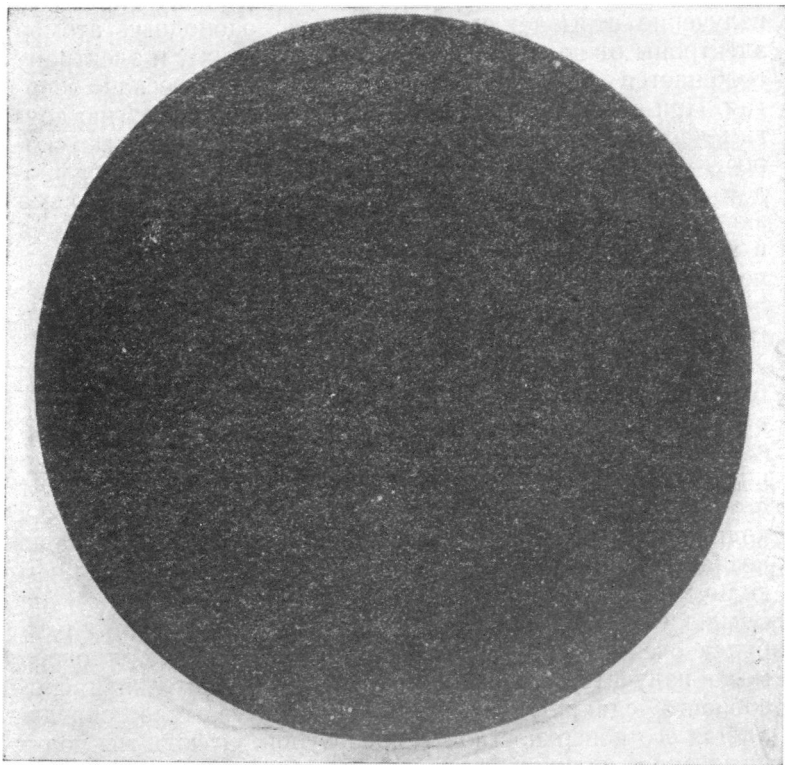


Рис. 57 (а). Фотография галактического центра в фотографических лучах.

пользоваться понятием «кинетическая температура», определённым выше.

Вычисления и наблюдения показывают, что горячие звёзды ионизуют вокруг себя межзвёздный газ, состоящий преимущественно из водорода, только на некотором

определённом расстоянии. Чем выше температура звезды и чем больше её размеры, тем на большее расстояние во все стороны она ионизует межзвёздный водород.

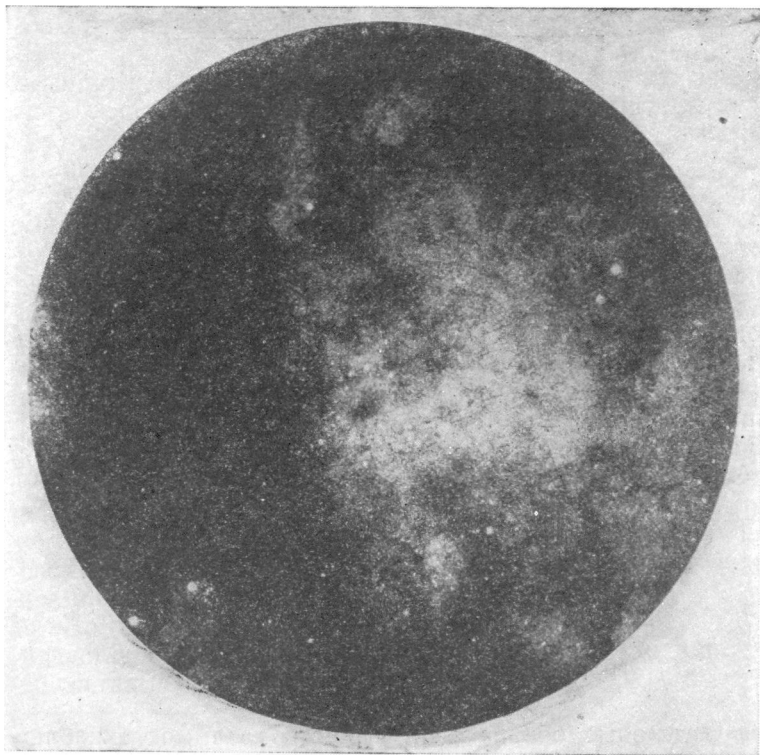


Рис. 57 (б). Фотография галактического центра в инфракрасных лучах.

С другой стороны, чем более плотен межзвёздный газ, тем на меньшем расстоянии он ионизируется горячей звездой. При средней плотности межзвёздного газа самые горячие звёзды ионизуют вокруг себя водород в области радиусом до 500 световых лет.

Однако очень горячих звёзд сравнительно мало. Поэтому большая часть межзвёздного газа очень мало ионизована. Из-за почти полного отсутствия процессов ионизации кинетическая температура межзвёздного газа в этих областях очень низка, около -200°Ц .

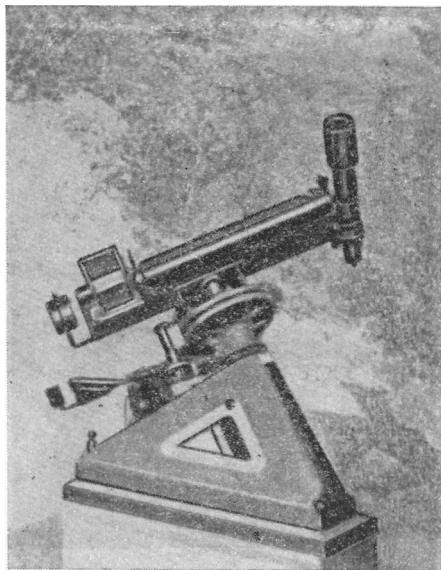


Рис. 58. Фотография небулярного спектрографа Крымской астрофизической обсерватории.

Отдельные облака межзвёздного газа могут наблюдаться методами оптической астрономии в тех случаях, когда они излучают. Это бывает только тогда, когда облака ионизованы. Спектр такого облака состоит из отдельных линий излучения. Самая яркая из этих линий — красная линия водорода. Необходимо, однако, отметить, что интенсивность излучения отдельных облаков очень незначительна. Требуется многочасовые выдержки на специальных очень светосильных приборах, например небулярных спектрографах (рис. 58), чтобы обнаружить это излучение.

В тех же случаях, когда облако межзвёздного газа не ионизовано, оно не излучает. Однако такое облако может быть обнаружено потому, что оно поглощает проходящий сквозь него свет от звёзд. Поглощение происходит не для всех длин волн одинаково, и поэтому в спектре звезды, свет от которой прошёл сквозь такое облако, наряду с линиями поглощения, образовавшимися в атмосфере самой звезды, будут присутствовать линии, возникшие при прохождении света через облако межзвёздного газа. В ряде случаев оказывается возможным разделить «звёздные» и «межзвёздные» линии в спектре звезды *).

Между облаками межзвёздного газа находится исключительно разреженная среда со средней плотностью 0,1 атома на кубический сантиметр. До последнего времени мы ничего не знали об этой среде. Однако недавно советский астрофизик С. Б. Пикельнер показал, что в отличие от облаков межзвёздного газа, которые располагаются около галактической плоскости, эта весьма разреженная среда между облаками очень слабо концентрируется к галактической плоскости. В то время как на расстояниях от галактической плоскости, превышающих 300 световых лет, облаков межзвёздного газа почти нет, разреженная межоблачная среда простирается свыше чем на 10 000 световых лет по обе стороны от галактической плоскости. Открытие С. Б. Пикельнера имеет важное значение для радиоастрономии.

На этом мы закончим краткий обзор современных представлений о нашей звёздной системе и входящих в её состав небесных тел.

*) Наиболее интенсивны «межзвёздные» линии поглощения, принадлежащие ионизованному кальцию. Чем более интенсивны эти линии, тем больше поглощённых атомов находится между нами и звездой. Это даёт возможность оценить расстояния до звёзд, в спектре которых имеются линии поглощения межзвёздного кальция.

ГЛАВА VII

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

В 1931 г. при исследовании радиопомех атмосферного происхождения на волне около 15 м был обнаружен источник радиоизлучения, интенсивность которого менялась строго периодически, через каждые 23 часа 56 минут, т. е. в точности с периодом вращения Земли вокруг своей оси *). Такая периодичность означала, что источник радиоизлучения находится за пределами Земли или земной атмосферы и даже солнечной системы. В то время направленность антенн была ещё низка, и определить точно положение источника было весьма затруднительно. Тем не менее удалось установить, что источник внеземного излучения находится в направлении созвездия Стрельца, т. е. в направлении на центр Галактики. Последующие попытки обнаружить космическое радиоизлучение на более коротких волнах оказались неудачными, во-первых, из-за низкой чувствительности радиоприёмников того времени, во-вторых, из-за того, что, как мы теперь знаем, радиоизлучение Галактики на коротких волнах менее интенсивно, чем на длинных.

Только в 1940 г. Ребер обнаружил космическое радиоизлучение на волне 185 см. Он пользовался зеркалом диаметром около 10 м и нашёл, что радиоволны излучаются не только центром нашей звёздной системы, но и всей полосой Млечного Пути, хотя радиоизлучение центра наиболее интенсивно. В 1944 г. наблюдения космического радиоизлучения были повторены с ещё более чувствительным радиотелескопом (рис. 59).

*) Относительно звёзд Земля обращается вокруг оси за 23 часа 56 минут. Этот промежуток времени называется звёздными сутками.

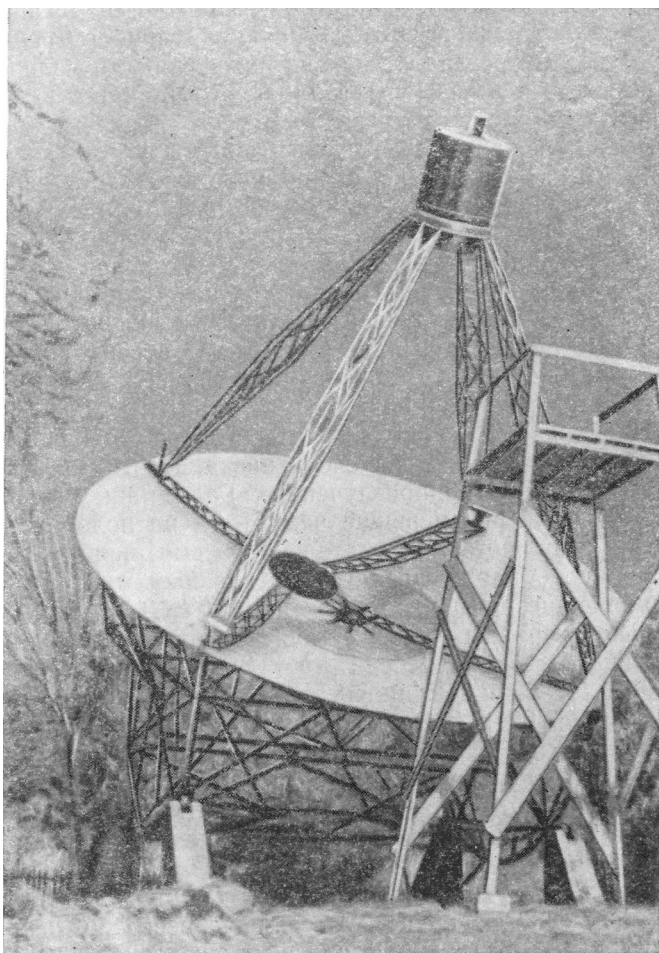


Рис. 59. Фотография радиотелескопа, при помощи которого исследовалось радиоизлучение Галактики на волне 185 см

Радиотелескоп устанавливался неподвижно. В его «поле зрения» в течение суток проходили различные участки неба, причём регистрирующий прибор (осциллограф) вёл непрерывную запись интенсивности излучения. Такие записи приведены на рис. 60. На каждую такую запись требуется много часов. В течение ряда суток радиотелескоп направлялся под разными углами к горизонту, чтобы охватить всю наблюдаемую часть неба.

Сопоставляя записи, можно составить карту, дающую распределение интенсивности радиоизлучения по небу. Соединяя линиями точки карты с одинаковой интенсивностью радиоизлучения, можно получить так называемые и з о ф ы радиоизлучения Галактики. На рис. 61 даны изофоты радиоизлучения Галактики по наблюдениям Ребера. Яркости отдельных участков неба выражены в температурных единицах.

Необходимо, однако, помнить, что разрешающая способность радиотелескопа очень низка. Поэтому детали в распределении радиоизлучения Галактики, имеющие угловые размеры, меньшие чем $6-8^\circ$, на подобных картах не выявляются. Внимательно рассматривая эту карту, можно обнаружить наряду с главным максимумом в направлении на центр Галактики ($b = 0$, $l = 330^\circ$) несколько вторичных максимумов. Они находятся в направлении созвездий Лебедя ($b = 0$, $l = 45^\circ$), Кассиопеи ($b = 0$, $l = 80^\circ$) и Единорога ($b = 0$, $l = 220^\circ$).

На рис. 62 и 63 приведены изофоты радиоизлучения Галактики на волнах 150 и 300 см. Эти изофоты были составлены австралийскими радиофизиками для южной части неба, которую нельзя наблюдать в северных широтах. Наблюдения галактического центра в Австралии производить особенно удобно, так как там он виден довольно высоко над горизонтом. В наших же широтах галактический центр находится чаще всего под горизонтом, а когда бывает над горизонтом, то очень низко, что осложняет наблюдения.

На рис. 64 приведены изофоты радиоизлучения Галактики для волны 62,5 см, а на рис. 65 — для волны 16,3 м. Ввиду низкой разрешающей способности радиотелескопов на длинных волнах изофоты рис. 65 содержат гораздо меньше деталей, чем рис. 64.

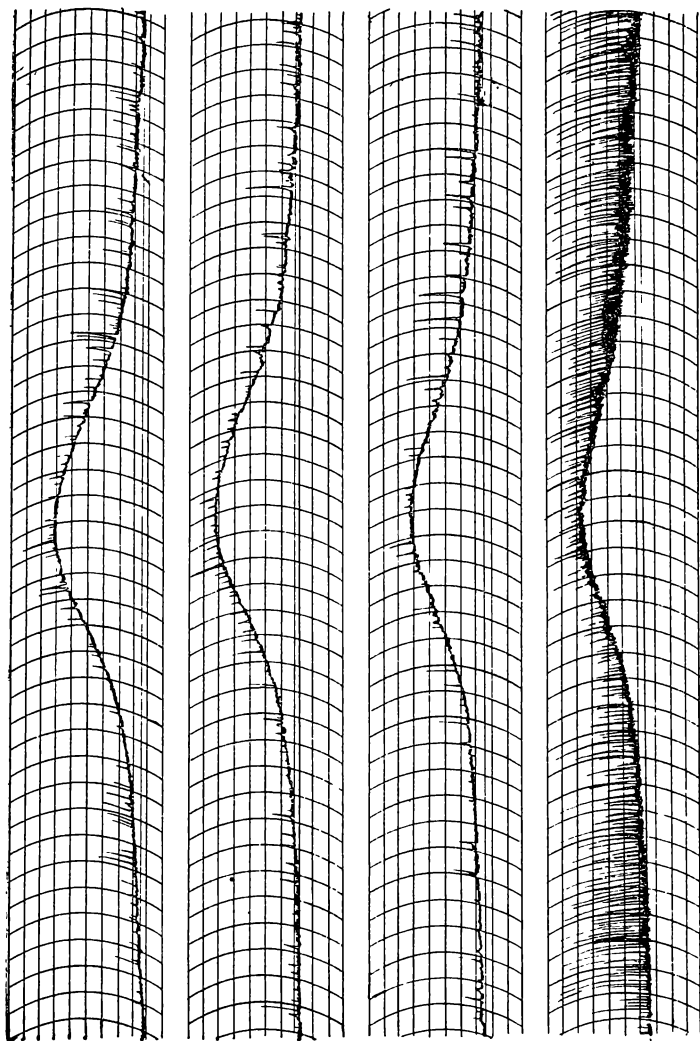


Рис. 60. Записи радиоизлучения Галактики на волне 185 см.

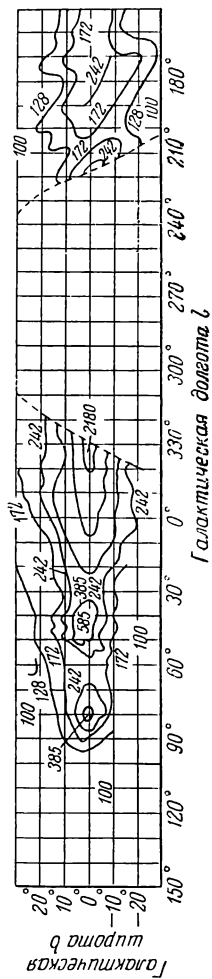


Рис. 61. Изофоты радиоизлучения Галактики на волне 185 см.

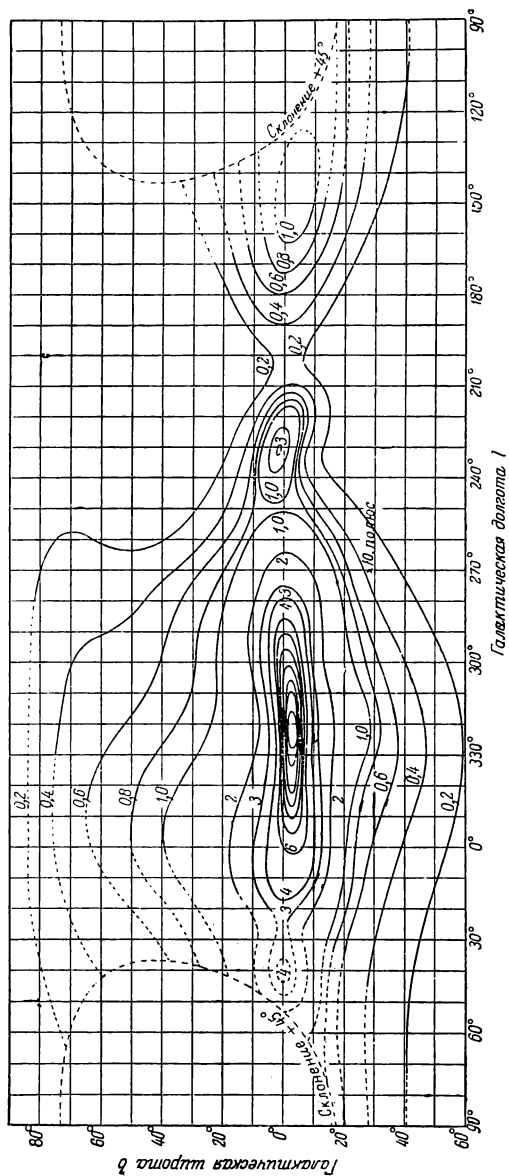
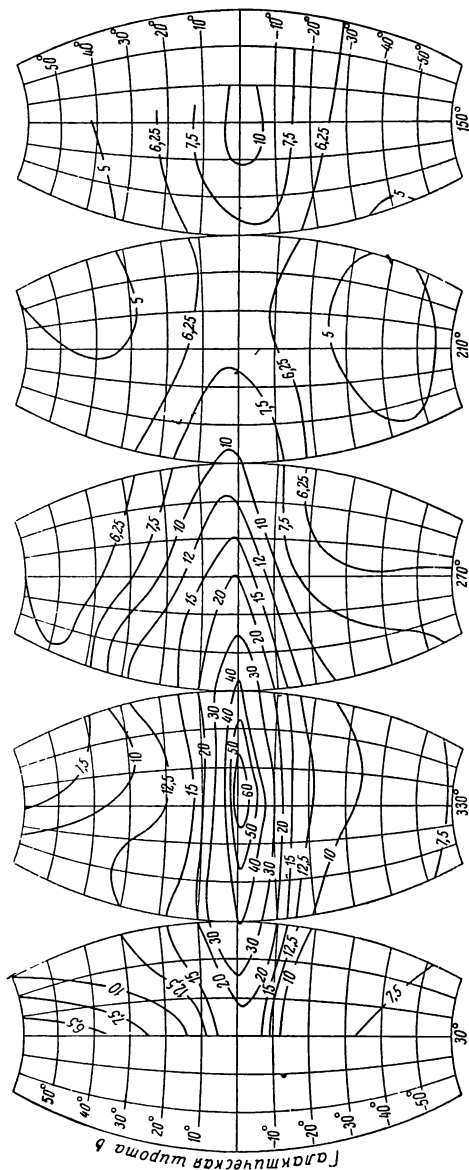


Рис. 62. Изотопы радиоизлучения Галактики на волне 150 см.



Галактическая долгота l

Рис. 63. Изофоты радиоизлучения Галактики на волне 300 см.

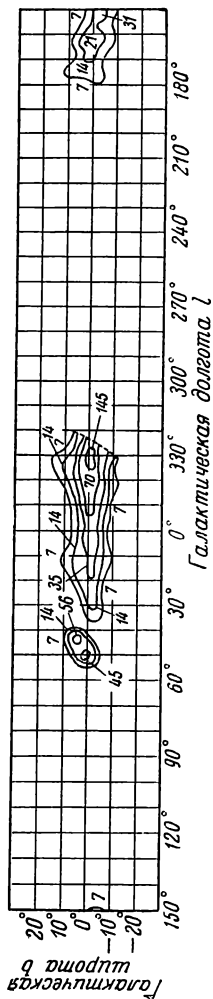


Рис. 64. Изофоты радиоизлучения Галактики на волне 62,5 см.

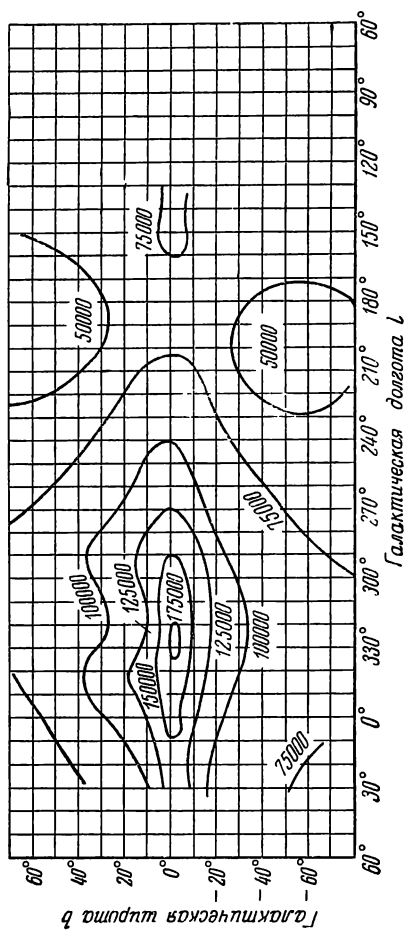


Рис. 65. Изофоты радиоизлучения Галактики на волне 16,3 м.

Но изофоты всех карт не показывают характерного раздвоения Млечного Пути, хорошо знакомого всем наблюдателям неба. Как известно, Млечный Путь в области созвездия Лебедя раздваивается и дальше тянется двумя рукавами к югу, где находится галактический центр. Раздвоение Млечного Пути объясняется наличием большого скопления межзвёздных пылевых облаков, расположенных между Солнцем и центром Галактики. Эти облака закрывают от нас центральную, наиболее яркую часть Млечного Пути. То обстоятельство, что в радиолучах это раздвоение не наблюдается, подтверждает вывод о полной прозрачности межзвёздных пылевых облаков для радиоизлучения.

В чём причина радиоизлучения Млечного Пути, иными словами, что же представляют собой источники галактического радиоизлучения? Может быть, это звёзды? Звёзды, как и всякие раскалённые тела, испускают излучение всех длин волн, а значит, и радиоволны. Однако, если считать, что звёзды излучают как раскалённые тела с температурой в несколько тысяч градусов, то окажется, что в области радиоволн поток теплового излучения звёзд должен быть неизмеримо малым по сравнению с потоком излучения в оптической области. Если бы источниками радиоизлучения Галактики были звёзды, то интенсивность радиоизлучения Млечного Пути была бы в сотни тысяч миллиардов раз меньше наблюдаемой. Кроме того, в этом случае интенсивность излучения росла бы обратно пропорционально квадрату длины волны, а на самом деле она растёт с увеличением длины волны. Значит, звёзды не могут являться источниками радиоизлучения Галактики.

Но разве звёзды обязаны излучать радиоволны как обычные раскалённые тела? Мы видели в главе IV, что ближайшая к нам звезда — Солнце — иногда излучает в миллионы раз больше, чем полагается излучать раскалённому телу с температурой 6000° . А что, если звёзды постоянно излучают так же, как Солнце в редкие минуты вспышек?

Однако, если даже принять, что звёзды излучают постоянно так, как Солнце в моменты вспышек, то и тогда интенсивность радиоизлучения Млечного Пути была бы

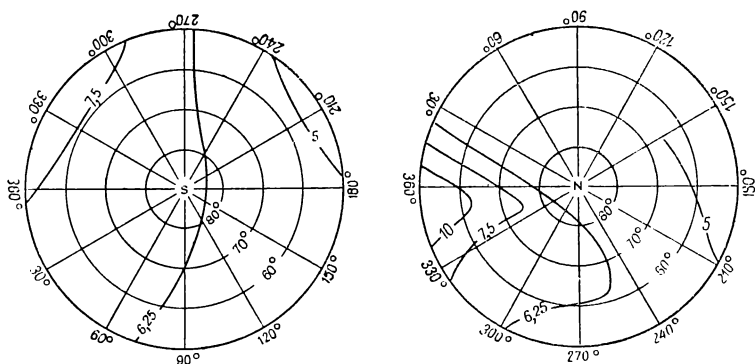
много меньше наблюдаемой. Вообще говоря, мы можем предположить, что в Галактике имеются такие тела, которые постоянно излучают ещё более мощно, чем Солнце в моменты сильнейших вспышек. Если считать, что подобных тел в Галактике очень много, то в принципе, конечно, можно объяснить наблюдаемую интенсивность радиоизлучения Галактики. Дальше мы ещё вернёмся к этому вопросу.

Ещё в 1940 г. Ребер указал на возможный источник галактического радиоизлучения. Это — межзвёздный ионизованный газ. При столкновении межзвёздных электронов с межзвёздными протонами должно возникнуть излучение, лежащее в радиодиапазоне. Дело обстоит следующим образом. Между электроном и протоном при их сближении возникают силы притяжения. Эти силы ускоряют электрон, искривляя его траекторию. Но всякий заряд, в том числе и электрон, двигаясь ускоренно, излучает электромагнитные волны. Этими столкновениями, происходящими в межзвёздном пространстве, и пытались объяснить наблюдаемое радиоизлучение Млечного Пути.

На первый взгляд может показаться, что такой источник галактического радиоизлучения имеет ничтожную мощность: столкновения между электронами и протонами в невообразимо разреженном межзвёздном газе происходят очень редко, а излучение, возникающее при каждом таком столкновении, чрезвычайно слабо. Всё это, конечно, верно. Но мы забываем о колоссальных размерах Галактики. На луче зрения, пересекающем Галактику на протяжении десятков тысяч световых лет, находится очень много сталкивающихся электронов и протонов, и хотя от каждого столкновения излучение очень малое, все столкновения, складываясь, могут дать значительную интенсивность радиоизлучения.

Расчёты показывают, что этого излучения достаточно, чтобы объяснить наблюдаемую интенсивность радиоизлучения в некоторых областях неба. Однако из этих расчётов следует, что интенсивность радиоизлучения для волн метрового и дециметрового диапазонов почти не зависит от длины волны. Из наблюдений известно, что интенсивность радиоизлучения Галактики растёт с уве-

личением длины волны. Кроме того, как видно из рис. 62—65 (стр. 122—124), радиоизлучение Галактики мало концентрируется к галактическому экватору. Особенно ясно это видно из рис. 66, на котором изображены изофоты радиоизлучения областей близ северного и южного полюсов Галактики. В области галактического центра ($l = 330^\circ$) даже на высоких галактических широтах радиоизлучение обладает значительной интенсивностью.



участков неба. В основе этого метода лежит различие в спектральном составе радиоизлучения от ионизованного межзвёздного газа и от второго, пока неизвестного источника радиоизлучения.

В результате такого разделения выяснилось, что вторичные максимумы радиоизлучения Галактики в созвездиях Лебеда, Единорога и Парусов объясняются наличием в этих направлениях облаков межзвёздного ионизованного газа (о причине вторичного максимума в Кассиопее будет рассказано позже, в главе IX). Например, вторичный максимум в созвездии Лебеда объясняется облаками межзвёздного газа, которые ионизируются скоплением горячих звёзд. Кроме того, значительная часть газового излучения в области вторичного максимума в Лебеде есть следствие спиральной структуры нашей Галактики.

В диаметрально противоположной стороне неба, в южном созвездии Парусов, австралийские учёные обнаружили вторичный максимум радиоизлучения, также имеющий газовую природу. Повидимому, — это продолжение огромного спирального рукава нашей Галактики, идущего от созвездия Лебеда к созвездиям Парусов — Киля и проходящего через Солнце.

Максимум в области созвездия Единорога, возможно, является обрывком внешнего по отношению к Солнцу витка спирали нашей Галактики. В области галактического центра значительная часть наблюдаемого радиоизлучения также обусловлена межзвёздным ионизованным газом. Вероятно, здесь мы имеем дело с внутренними по отношению к Солнцу витками спиральной структуры нашей Галактики.

На рис. 67 схематически представлено распределение масс ионизованного межзвёздного газа в плоскости нашей Галактики, как это следует из анализа наблюдений радиоизлучения Галактики. Положение Солнца отмечено знаком \odot .

Таким образом, радиоастрономия позволила с полной определённой выявить спиральную структуру нашей звёздной системы. Если раньше оптические наблюдения и позволяли высказать кое-какие суждения об одном витке спирали, проходящем от созвездия Лебеда к Килю,

то радионаблюдения отчётливо выявили спиральную структуру нашей звёздной системы. Для оптической астрономии это было бы чрезвычайно трудной задачей.

Здесь в полной мере сказалось замечательное свойство радиоволн — проходить без заметного поглощения через огромные облака космической пыли, поглощающей

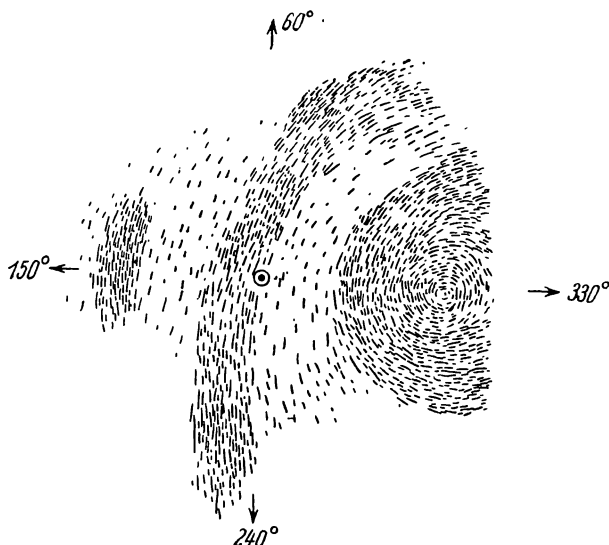


Рис. 67. Схема спирального строения Галактики, полученная из анализа её радиоизлучения. Плоскость чертежа совпадает с галактической плоскостью. Штриховка указывает на области Галактики, где концентрируется межзвёздный ионизованный газ.

видимый свет. Радионаблюдения дают хотя и грубые (из-за низкой разрешающей способности радиотелескопов), но вполне надёжные данные о структуре даже удалённых областей Галактики.

Необходимо отметить, что газовая составляющая галактического радиоизлучения, как и порождающие её облака межзвёздного газа, имеет сильную концентрацию к галактическому экватору.

На рис. 68 приведено вычисленное распределение яркости «газовой» составляющей радиоизлучения Галак-

тики в зависимости от галактической широты. Из этого рисунка видно, что тепловое радиоизлучение межзвёздного ионизованного газа сосредоточено в узкой полосе шириною около 2° . Центральная линия этой полосы совпадает с галактическим экватором. Таким образом, в радиолучах галактический экватор должен резко выделяться, в то время как в оптических лучах мы наблюдаем широкую, довольно размытую полосу Млечного Пути.

Недавно английские радиоастрономы Шейер и Райл провели специальные наблюдения с целью обнаружить эту предсказываемую теорией яркую полосу. Старые наблюдения, которые велись в главных лепестках антенн, из-за недостаточной разрешающей способности не могли обнаружить эту полосу. Ведь ширина главного лепестка диаграмм направленности использовавшихся антенн была, как правило, около 10° , в то время как ожидаемая ширина яркой «полосы», как мы видели, около 2° .

Поэтому Шейер и Райл использовали интерференционный метод. Особенность стоявшей перед ними задачи заключалась в том, что требовалась достаточно высокая разрешающая способность только по одной координате — галактической широте. Так как изменения яркости вдоль полосы (т. е. вдоль галактического экватора) сравнительно невелики, то в этом направлении разрешающая способность интерферометра может быть и низкой. Для наблюдений был использован двухантенный радиоинтерферометр с базисом переменной длины (до 60 длин волн). Наблюдения велись на волнах 3,7 и 1,5 м в моменты,

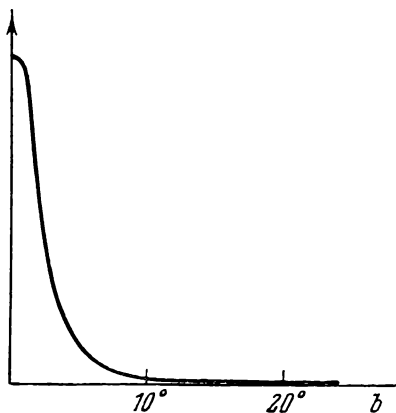


Рис. 68. Зависимость интенсивности «газовой» составляющей радиоизлучения Галактики от галактической широты при галактической долготе 330° (что соответствует направлению на центр Галактики).

когда Млечный Путь проходил через зенит. Поэтому галактический экватор был расположен по отношению к горизонту вертикально, а северный и южный галактические полюсы были на горизонте. Можно показать, что в средних широтах такое положение галактического экватора бывает два раза в сутки.

При только что описанном положении галактического экватора две антенны интерферометра можно расположить в горизонтальной плоскости, причём лепестки диаграммы направленности будут наиболее удобным образом расположены по отношению к галактическому экватору.

При разных значениях базиса получались разные амплитуды записи осциллографа (или «глубины модуляции») (аналогично рис. 27). Как мы видели в главе III, эта амплитуда тем больше, чем меньше базис (см. об этом на стр. 64). Затем, как и в случае исследований распределения яркости радиоизлучения по диску Солнца, строился график, дающий зависимость амплитуды записи от расстояния между антеннами. На рис. 69 и 70 приведены такие графики для двух длин волн, на которых велись наблюдения. На волне 3,7 м наблюдения велись для двух участков галактического экватора, галактические долготы которых $l = 353^\circ$ (кривая а) и $l = 13^\circ$ (кривая б). На волне 1,5 м наблюдения велись для $l = 338^\circ$ (кривая а), $l = 358^\circ$ (кривая б) и $l = 16^\circ$ (кривая в).

Напомним, что если бы угловые размеры излучающей области (в нашем случае — ширина яркой «полосы») были бы очень малы (т. е. значительно меньше ширины лепестков диаграммы направленности интерферометра), то амплитуда записи была бы максимальной и не зависела бы от длины базиса. Наоборот, если бы ширина полосы была достаточно велика (например, $10\text{--}20^\circ$), то амплитуда записи при базисе больше $10\text{--}20$ длин волн была бы весьма незначительной. Наличие приведённой на рис. 69 и 70 зависимости амплитуды записи от величины базиса означает, что мы здесь имеем дело с промежуточным случаем, когда угловые размеры лепестка при базисе в $20\text{--}30$ длин волн сравнимы с шириной исследуемой яркой полосы.

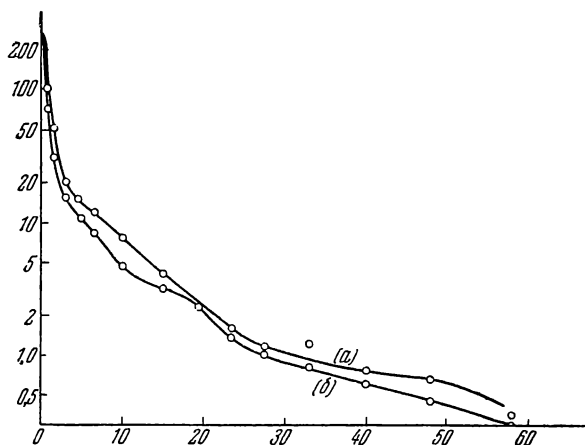


Рис. 69. Зависимость глубины модуляции от базиса радиоинтерферометра при наблюдениях области галактического экватора на волне 3,7 м. Кривая *a* соответствует галактической долготе 353°, кривая *б* — галактической долготе 13°. По оси абсцисс отложена длина базиса, выраженная в единицах длины принимаемой волны, по оси ординат — глубина модуляции в произвольных единицах.

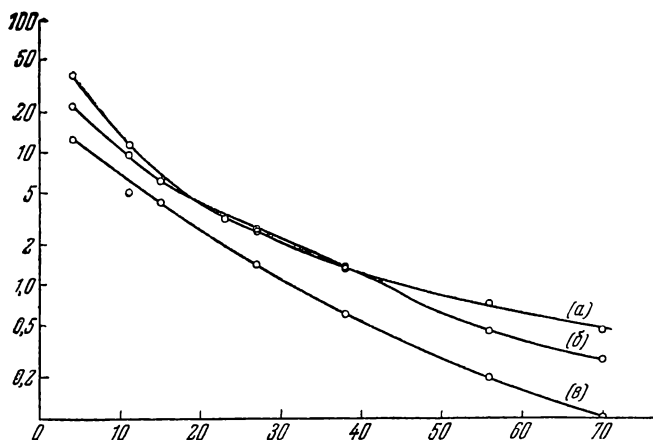


Рис. 70. Зависимость глубины модуляции от базиса при наблюдениях вблизи галактического экватора на волне 1,5 м. Кривые *a*, *б*, *в* соответствуют галактическим долготам 338, 358 и 16°.

Из приведённых на рис. 69 и 70 кривых, непосредственно выражающих результаты наблюдений, путём математических вычислений можно найти распределение яркости по галактической широте для исследованных участков галактического экватора (сравним с тем, что написано на стр. 64). Это распределение приведено

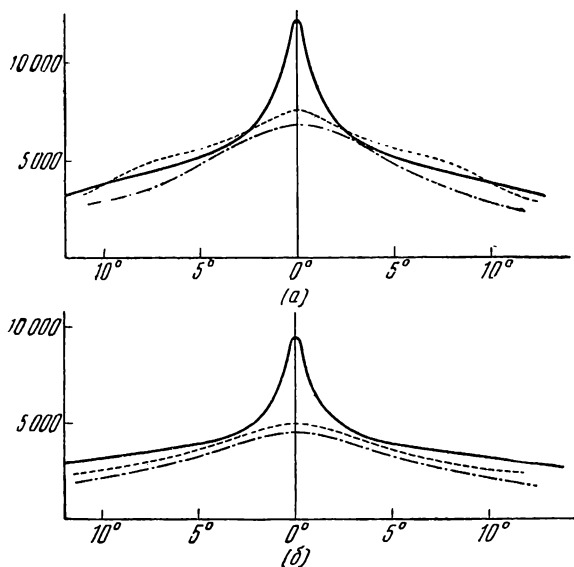


Рис. 71. Распределение яркости радиоизлучения у галактического экватора на волне 3,7 м, у галактических долгот 353° (а) и 13° (б). По оси абсцисс отложена галактическая широта, по оси ординат — яркость радиоизлучения.

на рис. 71 (длина волны 3,7 м) и рис. 72 (длина волны 1,5 м).

Эти рисунки как раз и доказывают наличие яркой «полосы», ранее предсказанной теоретически. Ширина полосы (между точками, где яркостная температура уменьшается вдвое) около 2°, как это и следовало ожидать. Пунктиром на рис. 71 обозначено распределение яркостной температуры, полученное из наблюдений на волне 3 м (см. рис. 63). В последнем случае наблюдения велись в

главном лепестке антенны с небольшой разрешающей способностью. Только интерференционные наблюдения позволили выявить такую важную деталь распределения яркости радиоизлучения Галактики, как яркая экваториальная полоса. Избыточное излучение в этой полосе, как это следует из сравнения наблюдений на двух волнах, имеет такой же спектральный состав, как и тепловое радиоизлучение ионизованного газа. При этом, однако, по-

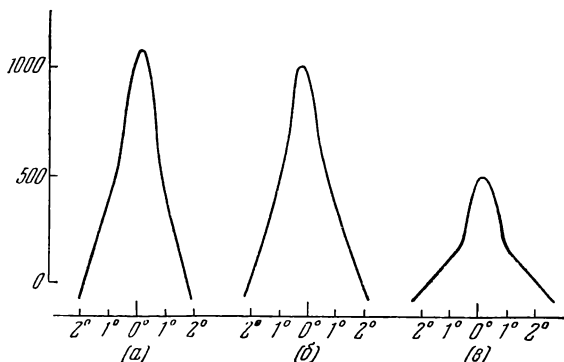


Рис. 72. Распределение яркости радиоизлучения около галактического экватора на волне 1,5 м у галактических долгот: а) 338°, б) 358°, в) 16°.

лучается, что кинетическая температура межзвёздного ионизованного газа превышает 20 000°, между тем как по оптическим данным она около 10 000° (см. главу VI). Дальнейшие наблюдения, несомненно, выяснят, кто прав — радиоастрономы или оптики.

Важным результатом описанных выше наблюдений является доказательство наличия значительной концентрации ионизованного межзвёздного газа к центру Галактики. Между тем, согласно существовавшим представлениям, такой концентрации нельзя было ожидать. На рис. 73 приведено распределение яркостной температуры радиоизлучения «полосы» по галактической долготе. Напомним, что направлению на центр Галактики соответствует галактическая долгота около 330°. Кресты дают результаты наблюдений. Кривые а и б дают вычисленные распределения яркостной температуры, основыва-

вающиеся на существовавших представлениях о пространственном распределении межзвёздного ионизованного газа. Из этого рисунка видно, что межзвёздный ионизованный газ в значительном количестве наблюдается в области ядра нашей Галактики. Это обстоятельство имеет большое значение для изучения строения и развития нашей звёздной системы.

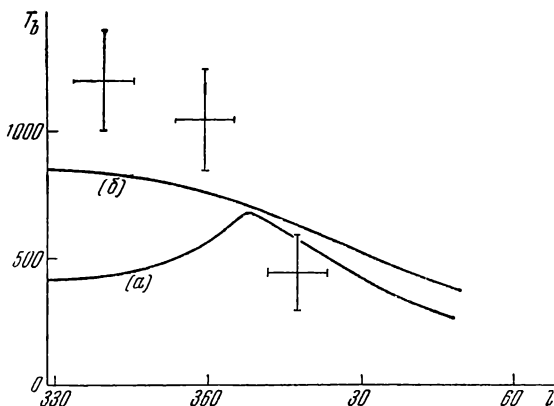


Рис. 73. Распределение яркости «газовой» составляющей радиоизлучения Галактики по галактической долготе. Кресты соответствуют результатам наблюдений. Протяжённость крестов по оси ординат соответствует возможным ошибкам наблюдений яркости радиоизлучения. Сплошные линии — распределения яркости «газовой» составляющей, полученные на основании существовавших теорий.

Теория предсказывает, что не всегда мы должны наблюдать вытянувшуюся вдоль галактического экватора яркую полосу. Для длин волн, превышающих 10—12 метров, следует ожидать «тёмную» полосу вместо наблюдаемой на более коротких волнах «яркой». Для таких длинных волн ионизованный межзвёздный газ уже является поглощающей средой. Между тем, интенсивность нетеплового радиоизлучения Галактики (см. ниже) на длинных волнах становится весьма значительной. Это излучение, распространяясь около галакти-

ческой плоскости, будет сильно поглощаться межзвёздным ионизованным газом. Поэтому около галактического экватора оно будет иметь минимальную интенсивность. Недавно австралийским радиоастрономам удалось наблюдать эту тёмную полосу на волне около 16 м *).

Как уже упоминалось выше, наряду с только что подробно описанной «газовой» составляющей радиоизлучения Галактики имеется ещё и вторая составляющая, природу которой мы пока не рассматривали. Основные особенности этой «второй составляющей» состоят в следующем. Во-первых, она имеет совершенно отличный от «газовой» составляющей спектр. В то время как для неё слишком длинных волн интенсивность «газовой» составляющей почти не зависит от частоты, интенсивность «второй составляющей» приблизительно обратно пропорциональна частоте. Поэтому, если на высоких частотах преобладает тепловое радиоизлучение межзвёздного газа, то на низких частотах решающую роль играет «вторая составляющая». Эта составляющая распределена в галактическом пространстве совсем не так, как «газовая». В то время как последняя очень сильно концентрируется к галактической плоскости, «вторая составляющая» к ней почти не концентрируется. Даже в направлении на галактические полюсы (это направление перпендикулярно к галактической плоскости) на волнах, превышающих 3 м, наблюдаемая яркость довольно велика — всего лишь в четыре раза меньше, чем в направлении на галактический центр (см. рис. 65). В средних и высоких галактических широтах наблюдаемая интенсивность радиоизлучения почти целиком сводится к излучению «второй составляющей». Таким образом, мы приходим к выводу, что источники «второй составляющей» радиоизлучения Галактики

*) Недавно были получены очень интересные данные о радиоизлучении Галактики на волне около 30 м. Наблюдения на таких длинных волнах весьма осложнены влиянием ионосферы, которая сильно поглощает космическое радиоизлучение. Яркостная температура в области галактического центра оказалась около миллиона градусов, т. е. больше чем у «спокойного» Солнца на той же волне. Это значит, что Солнце, проектирующееся на область около галактического центра, должно казаться тёмным пятном! Было бы очень интересно интерференционными наблюдениями на длинных волнах подтвердить этот парадоксальный вывод теории.

образуют «аморфную» систему почти сферической формы с незначительной концентрацией к галактической плоскости и к галактическому центру. Эта система похожа на гигантских размеров «корону», охватывающую нашу Галактику.

Эти представления о разделении радиоизлучения Галактики на две составляющие и о замечательном пространственном распределении «второй составляющей», как уже упоминалось выше, сложились в Советском Союзе. За рубежом, однако, учёные держались другой точки зрения. Они полагали, что наблюдаемая интенсивность радиоизлучения в высоких галактических широтах обусловлена не источниками, находящимися в пределах нашей звёздной системы, а источниками, находящимися далеко за пределами Галактики, в Метагалактике (см. главу VI). Интенсивность такого радиоизлучения естественно считать не зависящей от направления, т. е. «изотропной». Наложение «изотропной» составляющей радиоизлучения и «галактической» составляющей (источники которой, по мнению западноевропейских и американских астрономов, распределены в пространстве подобно обычным звёздам) определяет наблюдаемое распределение яркости космического радиоизлучения.

Какая же из этих двух совершенно противоположных точек зрения на природу космического радиоизлучения является правильной? Можно ли ожидать значительной интенсивности радиоизлучения от Метагалактики? Мы знаем, что в Метагалактике имеется огромное количество галактик, подобных нашей. Если наша Галактика является источником радиоизлучения, то, конечно, подобным же свойством должны обладать и другие галактики. Но галактики весьма удалены от нас, и поток идущего от них радиоизлучения будет сильно ослаблен. Можно подсчитать, что если бы все галактики излучали радиоволны так же, как наша Галактика, то суммарная яркость Метагалактики на волне 3 м составляла бы меньше 1% наблюдаемой вблизи галактических полюсов яркости радиоизлучения. Но могут быть и такие галактики, которые излучают радиоволны в несравненно большей степени, чем наша (об этом см. главу XII). Таким образом, эти соображения не позволяют сделать выбор между

указанными двумя точками зрения на природу космического радиоизлучения.

Такой выбор можно сделать, только основываясь на тщательном анализе результатов наблюдений. Именно анализ изофот радиоизлучения Галактики, изображённых на рис. 61—66, привёл автора этой книги к основному выводу о наличии «второй составляющей» радиоизлучения, имеющей нетепловую природу, и образующей нечто вроде «сферической короны» у нашей Галактики.

Укажем ещё, что из данных о распределении яркости космического излучения вблизи галактического экватора

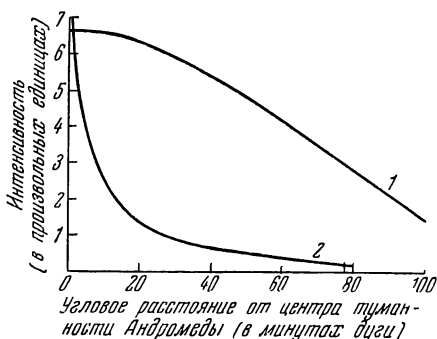


Рис. 74. Распределение яркости радиоизлучения туманности Андромеды в направлении, перпендикулярном к её плоскости симметрии (кривая 1). Кривая 2 даёт распределение яркости оптического излучения.

(см. рис. 71 и 72) следует, что «негазовая» составляющая радиоизлучения очень слабо концентрируется к галактической плоскости. В то же время видно, что яркость очень медленно убывает по обе стороны от галактического экватора. Симметрия распределения яркости по отношению к галактическому экватору доказывает, что источники радиоизлучения находятся в Галактике.

Однако решающий аргумент против «изотропно-метagalактической» теории был получен совсем недавно, летом 1954 г. Так как мы сами находимся в Галактике, то нелегко определить пространственное распределение

галактических источников радиоизлучения. Это несколько напоминает трудную задачу определения спиральной структуры нашей звёздной системы. Мы хорошо знаем спиральную структуру других галактик (см., например, рис. 56) потому, что наблюдаем их «со стороны». В то же время мы уверены, что наша галактика должна быть похожа на другие, т. е., в частности, она должна обладать спиральной структурой. То же самое примерно относится и к распределению источников радиоизлучения. Наша «близкая» соседка — туманность Андромеды (см. рис. 55) по всем признакам есть «близнец» Галактики. Обе эти гигантские звёздные системы имеют примерно одинаковые размеры, массу и структуру. Совершенно естественно считать, что и пространственное распределение источников радиоизлучения у обеих этих галактик одинаковое.

Английский радиоастроном Болдуин исследовал распределение яркости радиоизлучения в туманности Андромеды. Для этой цели он использовал радиоинтерферометр с переменным базисом. Болдуин получил распределение яркости вдоль нескольких направлений. На рис. 74 приведено распределение яркости радиоизлучения на волне $3,7$ м вдоль оси, перпендикулярной к плоскости симметрии туманности Андромеды. Там же для сравнения приведено распределение оптической яркости. Совершенно отчётливо видно, что источники радиоизлучения находятся на очень больших расстояниях от центральной плоскости туманности Андромеды, образуя «сферическую корону».

Нужно помнить, что на расстоянии туманности Андромеды одной угловой минуте соответствует расстояние около 300 световых лет. Следовательно, источники «второй составляющей» радиоизлучения туманности Андромеды поднимаются над центральной плоскостью этой галактики на расстояние свыше 30 000 световых лет. То же самое, конечно, должно быть и у нашей Галактики.

ГЛАВА VIII

ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОЛИНИИ ВОДОРОДА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 21 см

В предыдущей главе было указано, что значительная часть галактического радиоизлучения создаётся облаками межзвёздного ионизованного газа. Важно отметить, что это излучение можно наблюдать на всех частотах. Другими словами, радиоизлучение межзвёздного ионизованного газа имеет непрерывный спектр. В последнее время выяснилось, что межзвёздный газ излучает радиоволны ещё и в некотором очень узком интервале частот. По аналогии с оптикой это почти монохроматическое излучение можно назвать радиолинией.

Известно, что оптическое излучение разрядных газосветных трубок после разложения его в спектр даёт ряд ярких линий — линий излучения, — характерных для излучающего газа. Например, пары натрия излучают жёлтую линию с длиной волны 0,5876 микрона. Не следует думать, что линии эти сколь угодно узки, т. е. что излучение сосредоточено в бесконечно малом интервале длин волн. На самом деле всякая линия имеет хотя и незначительную, но всё же вполне определённую ширину. Так, например, в случае упомянутой линии натрия излучение сосредоточено около длины волны 0,5876 микрона в интервале длин волн шириною около 0,00003 микрона. Ширина линии зависит от физических условий, в которых находится излучающий газ, в частности, от его температуры и плотности.

На рис. 75 показано распределение интенсивности в спектре около какой-нибудь линии излучения. По оси

абсцисс отложены длины волн, по оси ординат — интенсивности.

Это распределение интенсивности часто называют контуром линии. Расстояние по шкале длин волн (или частот) между двумя точками контура, где интенсивность

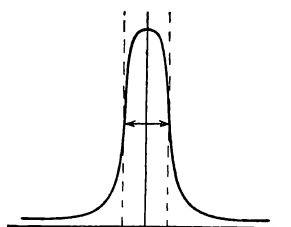


Рис. 75. Схема контура линии излучения.

составляет половину от максимального значения, достигаемого в центре линии, называется полушириной линии.

Наряду с линиями излучения наблюдаются и линии поглощения. Они возникают в простейшем случае тогда, когда между наблюдателем и раскалённым телом, излучающим непрерывный спектр, находится разреженный газ, бо-

лее холодный, чем излучающее тело. В непрерывном спектре около тех длин волн, которые соответствуют линиям излучения вышеуказанного газа, излучение будет незначительным. В этих местах спектра возникнут очень узкие (т. е. занимающие небольшой интервал длин волн) «провалы».

Эти «провалы» называются линиями поглощения. На рис. 76 схематически представлено распределение интенсивности в спектре около линии поглощения. В спектре Солнца наблюдается свыше 20 000 линий поглощения, возникающих при прохождении излучения с непрерывным спектром через солнечную атмосферу. На рис. 77 приведена фотография солнечного спектра.

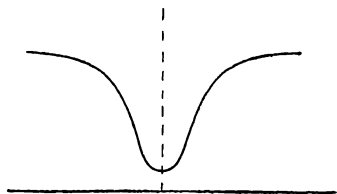


Рис. 76. Схема контура линии поглощения.

подавляющее большинство звёзд даёт спектры поглощения, причём некоторые спектры похожи на солнечный, а другие значительно от него отличаются. Газовые туманности дают в спектре линии излучения. Межзвёздный газ также даёт слабые линии излучения в спектре, но он может давать и линии поглощения.

Прежде чем говорить об излучении межзвёздной радиолинии с длиной волны 21 см, полезно напомнить некоторые сведения из теории спектров.

Как было установлено ещё 40 лет назад, всякий атом может находиться в определённых устойчивых состояниях. В каждом таком состоянии атом обладает определённой энергией. Состояние с наименьшей энергией называется основным. Если атом не подвергается внешним воздействиям, он может оставаться в основном состоянии сколь угодно долго. В межзвёздном пространстве атомы в подавляющем большинстве находятся в основном состоянии.

Под влиянием внешних воздействий атом может перейти в какое-либо состояние с большей энергией. Эти состояния являются, как правило, весьма неустойчивыми. Находясь в одном из таких возбуждённых состояний, атом даже без всяких внешних воздействий, самопроизвольно, переходит либо в основное состояние, либо в одно из возбуждённых состояний, энергия которого меньше, чем энергия исходного состояния. При этом атом испускает некоторое совершенно определённое количество лучистой энергии, причём длина волны этого излучения определится только разностью энергии начального и конечного состояний. Атом может также поглощать лучистую энергию совершенно определённой длины волны и при этом переходить в состояние с большей энергией, например, переходить из основного состояния в возбуждённое. Затем он опять перейдёт в основное состояние, излучив порцию лучистой энергии обычно той же длины волны, которая была поглощена.

Подобного рода процессы в конечном итоге приводят к образованию линий излучения и поглощения в спектрах космических тел. Если излучение имеет длину волны видимого света, то, как правило, атом в возбуждённом состоянии может находиться лишь ничтожный промежуток времени — около стомиллионной доли секунды. Этот промежуток времени называется продолжительностью жизни атома в возбуждённом состоянии.

Совокупность возможных состояний атома часто наглядно представляют в виде диаграммы энергетических уровней.

На рис. 78, *а* приведена такая диаграмма для атома водорода. Горизонтальные чёрточки символизируют состояния атома. Следует отметить, что полная энергия атома отрицательна. Она складывается из всегда положительной кинетической энергии движения электронов вокруг ядра и из отрицательной потенциальной энергии электростатического притяжения электронов и ядра *).

Тот факт, что полная энергия атома отрицательна, означает, что притяжение частиц в атоме не позволяет частицам разбежаться. Разумеется, наше объяснение является очень грубым. На рис. 78, *а* уровни энергии (чёрточки) по мере увеличения энергии становятся всё теснее, сходясь к некоторому пределу, когда энергия атома обращается в нуль. Ну-

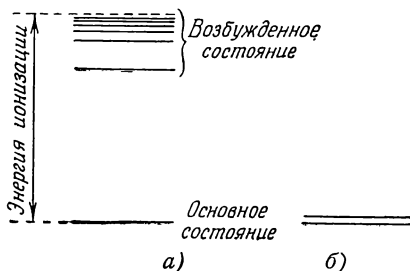


Рис. 78. Схема уровней энергии атома водорода (*а*) и схема сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода (*б*).

левая энергия соответствует такому состоянию атома, когда электрон уже оторван от атома, т. е. когда атом ионизуется. Если при отрыве электрону ещё сообщается кинетическая энергия, то энергия атома, точнее, энергия системы «ион + электрон», будет положительной.

Диаграмма на рис. 78, *а* не является точной. На самом деле многие из энергетических уровней расщепляются на несколько близких подуровней. Это значит, что существуют различные состояния атома с очень близкими по величине значениями энергии. В частности, основное состояние атома водорода (первый снизу уровень на рис. 78, *а*) распадается на два очень близких по

*) Если принять, что потенциальная энергия системы двух тел при удалении тел на бесконечное расстояние друг от друга равна нулю, то при сближении тел потенциальная энергия системы будет положительной, когда между телами действуют силы отталкивания, и отрицательной — когда действуют силы притяжения.

энергии состояния. Причиной расщепления является магнитное взаимодействие электрона и ядра — протона.

Согласно представлениям современной физики, прекрасно оправдывающимся на опыте, электрон — носитель элементарного отрицательного заряда — можно уподобить волчку. Грубо говоря, мы должны представить заряженный шарик, вращающийся вокруг своей оси. Такой электрон-волчок будет подобен небольшому магнетику. Теми же свойствами обладает и протон, но только у него намагниченность гораздо меньше, чем у электрона. Таким образом, система электрон — протон, помимо энергии электростатического взаимодействия, обладает ещё и энергией магнитного взаимодействия. В зависимости от «направления вращения» электрона магнитная энергия будет либо прибавляться к электростатической, либо вычитаться. Вместо одного основного состояния мы получим два близких по энергиям состояния, так как магнитная энергия взаимодействия частиц гораздо меньше электростатической. Такое расщепление энергетических уровней (не только основных, но и возбуждённых) носит название *сверхтонкой структуры*. Нас, однако, будет интересовать только сверхтонкая структура основного состояния, так как подавляющее большинство межзвёздных атомов находится именно в этом состоянии.

На рис. 78, б схематически показано расщепление основного состояния атома водорода. Масштаб не соответствует действительности: на самом деле расстояние между двумя расщеплёнными уровнями основного состояния примерно в 15 миллионов раз меньше, чем между основным и ближайшим (вторым снизу) уровнями на рис. 78, а.

Выше указывалось, что атом может переходить из одного состояния в другое с меньшей энергией, испуская при этом некоторое количество лучистой энергии. Длина волны излучения, возникающего при таком переходе, обратно пропорциональна разности энергии обоих состояний. Отсюда следует, что если мы вообразим себе переход между верхним и нижним уровнями сверхтонкой структуры атома водорода, то при этом должно возникать излучение с длиной волны приблизительно в три миллиона раз большей, чем при переходе между третьим

и вторым снизу уровнями на рис. 78, а. Последний переход даёт хорошо известную красную линию водорода с длиной волны 0,6563 микрона. Таким образом, переход между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода дал бы линию с длиной волны около 21 см. Такое излучение лежит уже в радиодиапазоне, поэтому эту линию мы будем называть радиолнией.

В 1945 г. голландский астрофизик ван де Холст высказал предположение, что атомы водорода, находящиеся в межзвёздном пространстве, могут излучать радиолинию с длиной волны в 21 см. В 1948 г. автор настоящей книги подробно исследовал этот вопрос. Прежде всего необходимо было вычислить, как часто в атоме водорода происходят такие переходы между составляющими сверхтонкой структуры, при которых излучается эта радиолиния. Результаты вычислений поразительны: оказалось, что атом водорода будет находиться на верхнем подуровне сверхтонкой структуры около 10 миллионов лет, после чего самопроизвольно перейдёт на нижний подуровень сверхтонкой структуры, излучив радиолинию. Для сравнения напомним, что при излучении оптических линий атом находится в возбуждённом состоянии около одной стомиллионной доли секунды!

10 миллионов лет — это даже для астрономических масштабов весьма солидный срок. 10 миллионов лет назад лик нашей планеты был совершенно другой — в то время был третичный период. За 10 миллионов лет могут существенно измениться некоторые звёзды, но атом водорода всё ещё будет находиться в возбуждённом состоянии.

Впрочем, мы допустили здесь неточность. Наши рассуждения о длительности пребывания атома водорода в верхнем (возбуждённом) состоянии сверхтонкой структуры были бы совершенно правильны, если бы атом не подвергался никаким внешним воздействиям. На самом деле это не так. Даже в неимоверно разреженном межзвёздном газе будут происходить столкновения атомов водорода друг с другом. Можно подсчитать, что каждый атом будет сталкиваться с другими атомами в среднем один раз в несколько сот лет. При каждом таком столк-

новении для него велика вероятность перехода в нижнее состояние сверхтонкой структуры без испускания радиолонии 21 см. Такие процессы хорошо известны в физике и астрофизике; они носят название ударов второго рода. Наряду с этим, если атом до столкновения был на нижнем уровне сверхтонкой структуры, то после столкновения он может оказаться на верхнем, возбуждённом уровне этой структуры. Такие удары называются ударами первого рода.

Как показывают вычисления, в среднем число ударов первого рода будет равно числу ударов второго рода, т. е. будет иметь место своеобразное динамическое равновесие, при котором на верхнем уровне сверхтонкой структуры окажется в три раза больше атомов водорода, чем на нижнем. Но всё равно в среднем один раз за 10 миллионов лет атом водорода будет переходить из верхнего в нижнее состояние сверхтонкой структуры, испустив излучение с длиной волны 21 см. Другими словами, приблизительно на каждые 100 тысяч переходов из верхнего уровня на нижний без излучения под воздействием ударов второго рода будет происходить один самопроизвольный переход с излучением радиолонии 21 см.

Казалось бы, это явление происходит так редко, что представляет собой астрономический курьёз. Однако расчёты показали, что такое заключение явилось бы чересчур поспешным. Конечно, один атом водорода излучает неимоверно редко, но в нашей Галактике атомов водорода очень много. Интенсивность излучения, идущего к нам в некотором направлении из глубин вселенной, определяется числом излучающих атомов, находящихся на луче зрения. А это число очень велико, несмотря на ничтожную плотность межзвёздного газа — так велики размеры Галактики. Тщательные расчёты показали, что излучение радиолонии 21 см атомами водорода, находящимися на луче зрения, пронизывающем всю нашу Галактику, накапливаясь, становится довольно значительным и вполне может быть обнаружено современными радиотелескопами. Перед радиоастрономией была поставлена благодарная задача: изготовить специальный приёмник, особо чувствительный к излучению с длиной волны

в 21 см, и обнаружить этот совершенно новый вид космического радиоизлучения.

При изготовлении такого приёмника надо было учитывать специфику наблюдений именно радиолинии, а не непрерывного радиоспектра. Ведь в случае наблюдений радиолинии интенсивность излучения отлична от нуля только в очень узком интервале частот, определяемом полушириной линии. Чем же должна определяться полуширина межзвёздной радиолинии 21 см?

В астрономии широчайшее применение находит принцип Допплера, заключающийся в следующем. Если атом, излучающий какую-либо спектральную линию, движется по направлению к наблюдателю, то длина волны излучения, которую измерит наблюдатель, будет меньше, чем в том случае, когда излучающий атом неподвижен по отношению к наблюдателю, а когда атом движется от наблюдателя, длина волны будет больше, чем у неподвижного. В обоих случаях разность длин волн будет пропорциональна скорости относительного движения. Ещё раз подчеркнём, что речь идёт о движении вдоль прямой, соединяющей атом и наблюдателя. Если скорость направлена перпендикулярно к прямой, соединяющей излучающий атом и наблюдателя, то изменения длины волны почти не будет.

В общем случае, когда относительная скорость направлена под произвольным углом к прямой атом — наблюдатель, её можно разложить на две составляющие по правилу параллелограмма и учитывать только ту составляющую, которая направлена вдоль указанной прямой.

Так как на луче зрения будут находиться атомы водорода, имеющие самые различные скорости, то вследствие эффекта Допплера вместо исключительно узкой линии будет линия конечной, хотя и небольшой ширины. Измеряя ширину радиолинии, можно было бы получить важные сведения о характере движения межзвёздного газа.

Совершенно естественно, что радиофизики и астрономы очень заинтересовались возможностью обнаружить излучение радиолинии 21 см. Возникла заманчивая возможность исследования физических свойств межзвёздной среды при помощи совершенно нового метода. Оптиче-

ские методы не позволяют с желательной полнотой исследовать межзвёздный газ — эту важнейшую часть Галактики. Поэтому неудивительно, что практически одновременно в разных частях земного шара началась интенсивная работа по изготовлению специальных радиотелескопов.

Усилия исследователей увенчались полным успехом. Радиолиния водорода была обнаружена весной и летом 1951 г. независимо наблюдателями трёх континентов земного шара.

Это было одним из величайших успехов радиоастрономии. Напомним, что эта радиолиния была открыта буквально «на кончике пера». Это открытие имеет выдающееся философское значение. Блестяще было продемонстрировано единство материальной вселенной, универсальность действующих в ней закономерностей, их познаваемость. То, что вчера могло казаться фантастической мечтой, сегодня стало научной действительностью.

Опишем методику и первые результаты наблюдений радиолинии водорода, опираясь на работу австралийских исследователей Христиансена и Хиндмана.

Был изготовлен приёмник специальной конструкции с очень узкой полосой пропускания, всего 0,05 мегагерца, в то время как в радиоастрономии обычно используются приёмники с шириной полосы пропускания в 2—3 мегагерца. Ширина полосы пропускания этого приёмника значительно меньше, чем ширина межзвёздной радиолинии водорода, что необходимо для получения контура этой линии. Особое приспособление позволяло скачком смещать центр полосы пропускания на 0,16 мегагерца, а потом приводить его в первоначальное положение, причём за одну секунду делалось 25 таких переключений. В приёмнике имелся усилитель низкой частоты, усиливающий колебания с частотой 25 герц (частота переключений полосы пропускания приёмника).

Если интенсивность радиоизлучения Галактики в двух близких спектральных участках, на которые попеременно попадает центр полосы пропускания приёмника, неодинакова, то усилитель низкой частоты выделит избыточное радиоизлучение от одного спектрального участка. Выходной прибор приёмника это излучение регистрирует.

Если же интенсивность радиоизлучения Галактики в этих спектральных интервалах одинакова, то никаких изменений колебаний с периодом в 25 герц не будет, и выходной прибор будет показывать нуль.

Этот метод, иногда называемый методом частотной модуляции, был впервые предложен советским учёным В. В. Виткевичем.

Центр узкой полосы пропускания приёмника, помимо того, что он 25 раз в секунду переходит от одной частоты к другой, медленно движется в пределах спектрального интервала в один мегагерц, внутри которого находится исследуемая радиолиния водорода. Когда обе частоты, на которые центрируется полоса пропускания приёмника, находятся вдали от радиолинии водорода, на вход приёмника будет падать только радиоизлучение Галактики с непрерывным спектром. Так как эти частоты очень близки (расстояние между ними всего 0,16 мегагерца), то мощность радиоизлучения Галактики с непрерывным спектром, падающая на вход приёмника при обоих положениях полосы пропускания, будет одинакова. Поэтому никакого радиоизлучения на выходе приёмника не будет зарегистрировано.

Когда «головная» полоса пропускания приёмника вступит в область частот, в которой происходит излучение радиолинии, в полосе, следующей за «головной» на расстоянии 0,16 мегагерца, будет падать на вход приёмника только излучение Галактики с непрерывным спектром, значительно менее интенсивное. Поэтому в приёмнике возникнут колебания с частотой в 25 герц, и на выходе приёмника будет зарегистрировано радиоизлучение.

Так как ширина полосы пропускания (0,05 мегагерца) значительно меньше ширины радиолинии, то при медленном движении полосы пропускания показания регистрирующего прибора позволяют получить контур радиолинии. Обычно на выходе приёмника стоит осциллограф, в котором лента движется с известной и постоянной скоростью по отношению к скорости движения полосы пропускания по спектру. Следовательно, запись осциллографа можно рассматривать как зависимость интенсивности от частоты.

Когда «головная» полоса пройдёт через область спектра, где излучается радиолиния, идущая сзади полоса вступит в эту область. При этом на выходе приёмника опять будет зарегистрировано радиоизлучение. Однако в этом случае фаза колебаний с периодом в 25 герц будет уже противоположной той, которая была при прохождении через радиолинию «головной» полосы. Стрелка выходного прибора отклонится в противоположную сторону. На рис. 79 схематически изображены положения полос пропускания приёмника по отношению к контуру радиолинии и соответствующая запись пера самописца.

На рис. 80 дана запись регистрирующего прибора, доказывающая наличие излучения радиолинии водорода с длиной волны в 21 см. На рис. 81 приведены аналогичные записи, полученные при наведении радиотелескопа на разные участки неба.

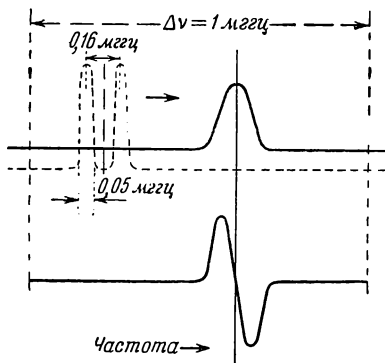


Рис. 79. Схема, поясняющая методику наблюдений радиолинии водорода.

Вообще говоря, можно было бы пользоваться одной, медленно перемещающейся по спектру полосой пропускания. Запись излучения, дающая контур линии, была бы более простой — можно было бы непосредственно получать контур водородной линии, который прочерчивался бы пером самописца на ленте. Однако, так как мощность излучения космической радиолинии водорода в сотни раз меньше мощности собственных шумов приёмника, необходимо значительно увеличить чувствительность приёмника. Это и достигается применением особой разновидности модуляционного метода, только что описанной.

Из полученной записи типа той, которая приведена на рис. 80, можно получить путём вычисления контур линии водорода. На рис. 82 приведены схематически три

записи и соответствующие им контуры водородной радиолинии.

При наблюдениях использовался радиотелескоп, фотография которого приведена на рис. 83. Антенна представляет собой часть параболического зеркала площадью в 25 м^2 . Ширина главного лепестка — около 2° . Установка параллактическая, что весьма облегчает наблюдения. За-

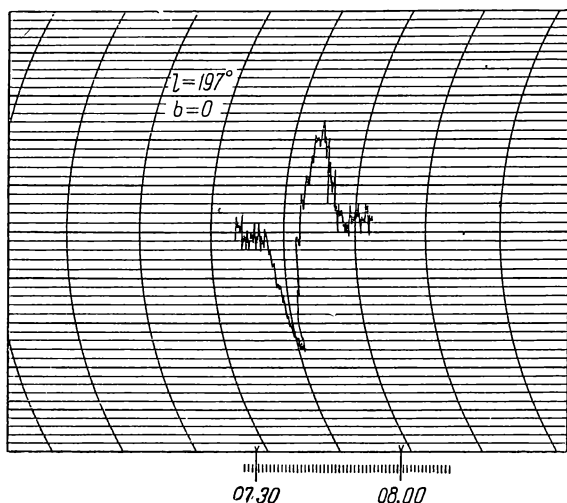


Рис. 80. Запись радиоизлучения Галактики на волне 21 см, доказывающая наличие радиолинии.

писи, дающие одновременно и контур радиолинии, и её интенсивность, подобные изображённым на рис. 80, делались для всех доступных наблюдениям точек неба через 5° по прямому восхождению и через $1-2^\circ$ по склонению. В результате таких систематических наблюдений можно было построить изофоты радиоизлучения Галактики на волне 21 см. Эти изофоты приведены на рис. 84.

В ряде областей неба записи имели характерный вид, изображённый на рис. 85, где приведён также соответствующий этой записи контур. Этот рисунок указывает на важный факт раздвоения линии. Причина этого раздвоения будет объяснена ниже.

Сравнение изофот радиоизлучения Галактики в области водородной линии 21 см (рис. 84) и в непрерыв-

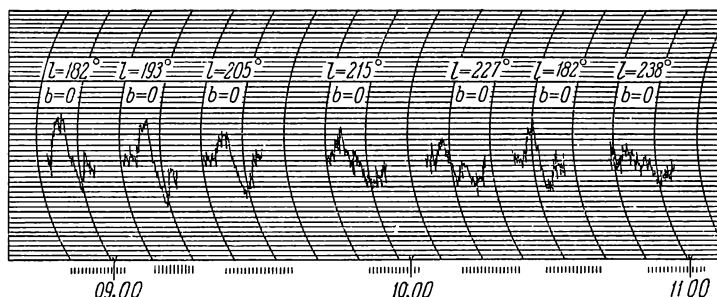


Рис. 81. Записи радиолнии водорода для различных областей Млечного Пути; l — галактическая долгота, b — галактическая широта.

ном спектре (рис. 62—66) показывает существенное различие в распределении по небу обоих видов радиоизлуче-

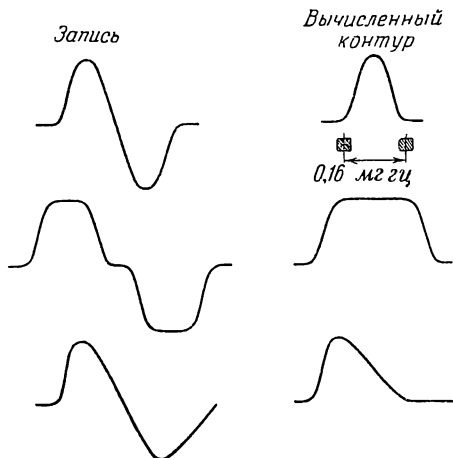


Рис. 82. Типичные записи и соответствующие им контуры радиолнии.

ния Галактики. Прежде всего интенсивность излучения на волне 21 см в области галактического центра



Рис. 83. Радиотелескоп, при помощи которого наблюдалось излучение радиолинии 21 см.

примерно такая же, как в областях созвездий Лебедя и Киля, удалённых от центра на 90° , и несколько меньше, чем в области антицентра. Между тем радиоизлучение в непрерывном спектре концентрируется к центру Галактики. Радиоизлучение Галактики на волне 21 см значительно меньше концентрируется к галактической плоскости, чем радиоизлучение в непрерывном спектре в области сравнительно коротких волн.

Такое различие в распределении интенсивности обоих видов радиоизлучения Галактики объясняется следующим образом. Радиоизлучение Галактики в непрерывном спектре для длин волн примерно меньше 3 м не поглощается в межзвёздном пространстве. Оно к нам доходит беспрепятственно даже от удалённых областей центра Галактики. Так как в направлении на галактический центр на луче зрения находится гораздо больше источников излучения (например, облаков

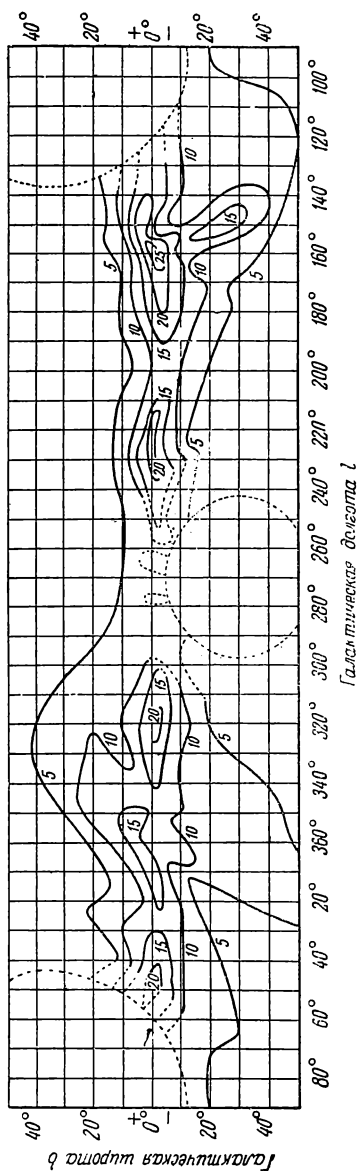


Рис. 84. Изофоты радиоизлучения Галактики на волне 21 см.

межзвёздного ионизованного газа), чем в других направлениях, то самой яркой областью неба будет область галактического центра.

Между тем излучение с длиной волны 21 см довольно сильно поглощается в межзвёздном пространстве находящимися там атомами нейтрального водорода. Как показывают вычисления, при кинетической температуре межзвёздного газа в 100° абсолютной шкалы *), при условии, что на кубический сантиметр межзвёздного про-

странства приходится 1 атом водорода (что следует из оптических наблюдений), излучение с длиной волны 21 см, пройдя путь в 6000 световых лет, уменьшит свою интенсивность из-за поглощения почти в 2,5 раза.

Это значит, что излучение от облаков межзвёздного газа, удалённых от нас более чем на 15 000 световых лет, до нас практически не дойдёт, тогда как расстояние до центра Галактики около 23 000 световых лет **).

При такой непрозрачности межзвёздного газа для излучения с длиной волны 21 см интенсивность этого излучения должна быть равна интенсивности излучения от тела, нагретого до температуры, равной кинетической температуре межзвёздного газа. Таким образом, измерив интенсивность радиоизлучения Галактики на волне 21 см, можно определить кинетическую температуру межзвёздного газа. Она оказалась близкой к 100° абсолютной шкалы.

Не противоречит ли этот результат тому, что говорилось в главе VI? Там мы исходили из представления,

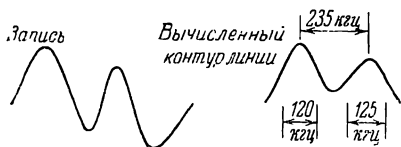


Рис. 85. Запись, показывающая раздвоение радиолнии 21 см.

*) В абсолютной шкале температура отсчитывается от абсолютного нуля, соответствующего температуре $-273,16^\circ \text{Ц}$. Абсолютную шкалу иногда называют шкалой Кельвина.

**) Однако из-за вращения Галактики оказывается возможным наблюдать весьма удалённые облака межзвёздного водорода (см ниже),

что кинетическая температура межзвёздного газа около $10\,000^\circ$.

Никакого противоречия, однако, здесь нет. Дело в том, что облака межзвёздного газа, о которых речь шла в главе VI, — это не те облака межзвёздного газа, которые излучают радиолинию 21 см и температура которых, как показывают наблюдения интенсивности водородной радиолинии, так низка. В облаках, описанных в главе VI, межзвёздный газ ионизован. Эти облака находятся близко от очень горячих звёзд и за счёт поглощения части ультрафиолетового излучения поддерживают свою кинетическую температуру на очень высоком уровне — около $10\,000^\circ$.

Облака межзвёздного газа, о которых речь идёт в этой главе, состоят в основном из нейтральных, неионизованных атомов водорода. Только нейтральные атомы водорода могут излучать радиолинию 21 см . Если от атома водорода оторвать электрон (т. е. ионизовать его), то он никаких линий излучать не будет. Эти облака межзвёздного водорода, с небольшой примесью других элементов, находятся достаточно далеко от горячих звёзд, ультрафиолетовое излучение которых ионизует атомы межзвёздного водорода. Поэтому их кинетическая температура так низка.

Таким образом, области межзвёздной среды, которые являются источниками газового или, как мы его будем называть дальше, теплового радиоизлучения Галактики, не совпадают с теми областями, где излучается радиолиния водорода 21 см . Подсчитано, что в Галактике значительное большинство облаков межзвёздного газа состоит из нейтральных атомов водорода.

Вывод о том, что кинетическая температура большей части межзвёздного газа очень низка, имеет огромное значение для космогонии — науки о происхождении и развитии небесных тел. Только при такой низкой температуре возможна конденсация межзвёздных атомов сначала в молекулы, а затем в твёрдые частицы — пылинки. Из такой среды, возможно, образуются звёзды. Подчеркнём, что вывод о низкой кинетической температуре межзвёздной среды можно получить с уверенностью только из радиоастрономических наблюдений.

При измерении полуширины радиолинии 21 см для различных направлений Галактики оказалось, что для направлений на центр и на антицентр Галактики полуширины линий почти одинаковы и соответствуют беспорядочным движениям излучающих водородных атомов со скоростями около 8 км/сек. Являются ли эти скорости следствием теплового движения водородных атомов? Оказывается, нет, так как при температуре 100° абсолютной шкалы тепловые скорости атомов водорода будут меньше 1 км/сек, а в указанных направлениях наблюдаемые скорости соответствуют просто беспорядочным движениям облаков межзвёздного газа.

Существует ещё одна причина, приводящая к расширению и смещению длины волны радиолинии вследствие эффекта Допплера. Наша Галактика вращается, причём это вращение непохоже на вращение твёрдого тела (см. гл. VI). Поэтому два каких-либо тела, находящиеся одно от другого на некотором расстоянии, будут двигаться друг относительно друга с некоторой скоростью, имеющей составляющую в направлении прямой, соединяющей эти тела.

Легко понять, что если два таких тела находятся на прямой, проходящей через центр Галактики, то относительного радиального движения у этих тел не будет, так как скорости, обусловленные галактическим вращением, направлены перпендикулярно к этой прямой. Вообразим теперь, что одно тело — это Земля с находящимся на ней наблюдателем, а второе — облако межзвёздного газа, излучающего радиолинию. Тогда в направлении на центр Галактики и на антицентр относительного радиального движения облака и Земли не будет, ибо в этом случае прямая Земля — облако проходит через центр вращающейся Галактики. Заметим, что и в перпендикулярном направлении в плоскости Галактики, т. е. в направлении на созвездия Лебедя и Киля, относительного радиального движения облака и наблюдателя тоже не будет. Это видно из рис. 86, где схематически изображено влияние галактического вращения на скорости космических объектов (по лучу зрения) по отношению к Земле. Для всех других направлений галактическое вращение вызывает появление относительных скоростей по лучу зрения. Эти

скорости будут тем больше, чем дальше находится от нас космическое тело (в данном случае — облако межзвёздного газа).

Например, если облако находится от нас на расстоянии 3000 световых лет, то относительная скорость для некоторых направлений в Галактике может достигать до 20 км/сек. Если же облако удалено на расстояние

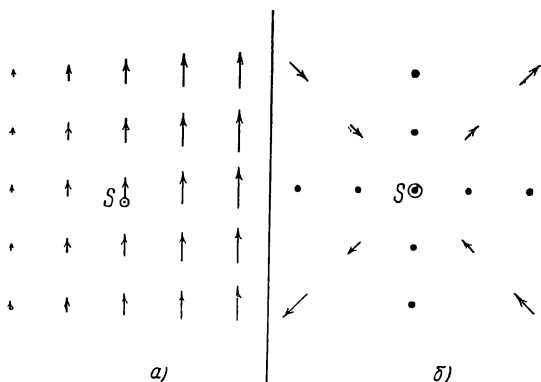


Рис. 86. Схема, иллюстрирующая влияние вращения Галактики на относительные лучевые скорости. Слева изображена часть галактической плоскости. Стрелки указывают величину и направление скоростей вращения. Знак \odot обозначает Солнце. Стрелки справа указывают на величину и направление лучевых скоростей по отношению к Солнцу. Галактический центр находится справа, антицентр — слева.

30 000 световых лет, — скорость может достигнуть огромной величины 150—200 км/сек, что намного превышает скорости, вызванные беспорядочными движениями. Именно эти скорости будут причиной наблюдаемого уширения радиолинии 21 см. Из рис. 86 видно, что в данном направлении относительные скорости по лучу зрения направлены либо к нам, либо от нас. Это значит, что радиолиния 21 см будет не только сильно расширена, но и смещена либо в сторону коротких длин волн, либо

длинных в зависимости от области неба, где ведутся наблюдения.

На рис. 87 приведены вычисленные с учётом влияния вращения Галактики контуры радиолинии водорода для четырёх направлений. Вычисления находятся в хорошем согласии с результатами наблюдений. Действительно, уже первые наблюдения показали, что для некоторых направлений в Галактике контур радиолинии 21 см имеет

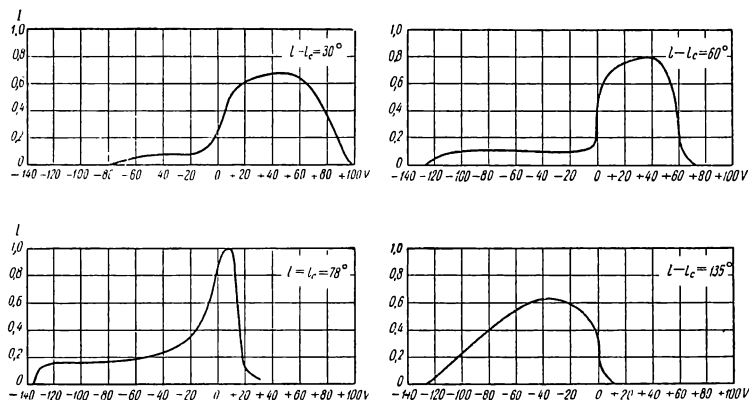


Рис. 87. Вычисленные теоретические контуры радиолинии межзвёздного водорода, обусловленные вращением Галактики. Вычисления проводились для определённых участков Млечного Пути с галактической долготой l ; $l_c = 325^\circ$ — галактическая долгота центра. По оси ординат отложены интенсивности, выраженные в относительных единицах, по оси абсцисс — лучевые скорости, соответствующие наблюдаемой частоте.

значительную ширину и смещён в сторону. На рис. 88 показаны результаты подобных наблюдений.

Верхние рисунки дают зависимость зарегистрированной мощности радиоизлучения от времени, в течение которого велись наблюдения (наблюдения велись непрерывно). При этом частота полосы пропускания приёмника не смещена. При неподвижном радиотелескопе из-за вращения Земли через главный лепесток антенны проходят различные участки неба. Когда главный лепесток пересекает Млечный Путь, мощность принимаемого

радиоизлучения возрастает. Так как излучение радиолитии довольно слабо концентрируется к галактическому экватору (ибо оно обусловлено сравнительно близкими облаками межзвёздного газа), то максимумы на верхних частях рис. 88 сравнительно пологи.

Нижний рисунок 88 — это такая же запись радиоизлучения Галактики, но только при смещённой частоте полосы пропускания приёмника. Отчётливо видно, что максимум, возникающий при прохождении Млечного Пути через главный лепесток радиотелескопа, стал гораздо более резким. Это объясняется тем, что излучающие облака водорода находятся от нас очень далеко — на расстоянии около 30 000 световых лет — и поэтому видны под малым углом. Таким образом, последняя запись на рис. 88 показывает, что отдалённые облака межзвёздного газа из-за вращения Галактики движутся по отношению к нам с большими скоростями по лучу зрения.

Выше мы говорили, что межзвёздный газ непрозрачен для радиолитии 21 см. Вращение Галактики как бы просветляет его для этого излучения в целом ряде направлений. Из-за эффекта Доплера излучение более отдалённых облаков будет иметь несколько другую частоту, чем более близких, и послед-

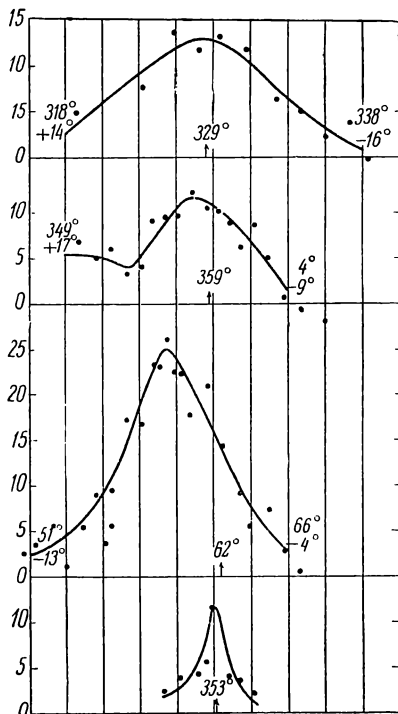


Рис. 88. Результаты наблюдения интенсивности межзвёздной радиолитии водорода при нормальном и смещённом положении полосы пропускания.

ние не будут значительно поглощать излучение более удалённых облаков.

Исследование контура радиолинии 21 см в разных направлениях стало мощным средством изучения деталей вращения Галактики. При решении этой проблемы радиометоды имеют решающее преимущество перед оптическими методами, так как позволяют видеть Галактику «насквозь», тогда как поглощение света не позволяет наблюдать оптическими методами области Галактики, находящиеся за её центром.

Как уже упоминалось, в некоторых направлениях межзвёздная радиолиния раздваивается (см. рис. 85). В этих случаях мы наблюдаем спиральную структуру нашей Галактики. Луч зрения проходит через две ветви спирали Галактики. Одна ветвь довольно близка к нам (возможно, в ней находится наша солнечная система), а вторая ветвь находится от нас на расстоянии 10—12 тысяч световых лет. Так как облака межзвёздного газа второй ветви вследствие галактического вращения имеют довольно значительную скорость по лучу зрения относительно Земли, то из-за эффекта Доплера линия сместится. Это и объясняет удвоение линии.

Недавно голландские исследователи Оорт, ван де Холст и Мюллер провели подробное и весьма тщательное исследование водородного радиоизлучения Галактики на волне 21 см. Приёмник и метод исследования (частотная модуляция) у них были такие же, что и у австралийцев. Преимущественно изучалась область неба около галактического экватора. С этой целью делались записи контуров водородной линии (типа приведённых на рис. 80) для 54 точек галактического экватора, удалённых одна от другой на 5° . Нужно иметь в виду, что получение каждой добротной записи требует затраты немалого труда. Из этих записей находили путём вычислений контуры водородной линии для разных точек галактического экватора (ср. рис. 82). Результаты этой работы изображены на рис. 89, где для разных галактических долгот приведены контуры водородной линии. Внизу этого рисунка приведены две шкалы. Нижняя шкала даёт частоты (выраженные в килогерцах).

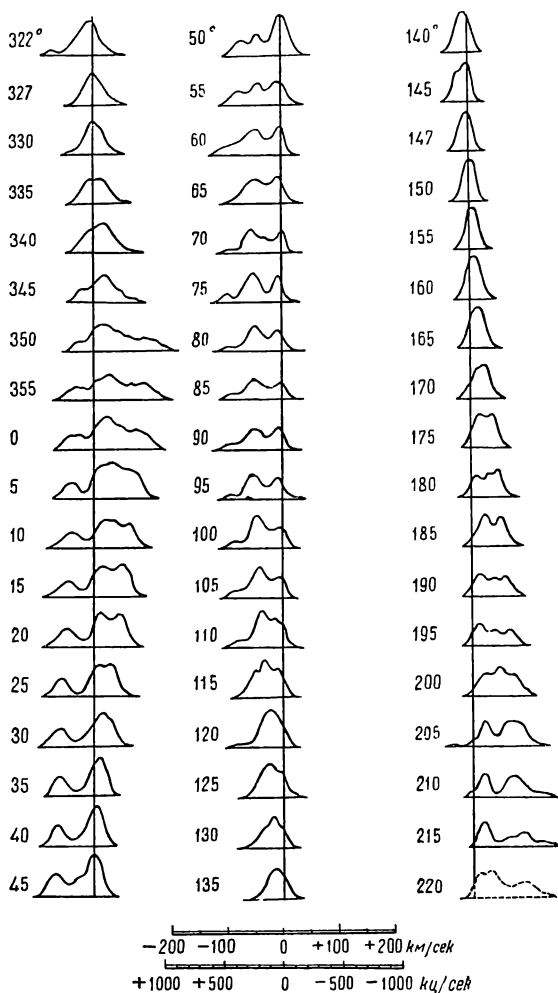


Рис. 89. Контуры водородной линии 21 см на разных галактических долготах.

Она непосредственно позволяет получить смещение частоты какого-либо «участка» линии по отношению к «центральной частоте» линии 21 см, определяемой на всех этих рисунках вертикальными прямыми. Каждому такому смещению частоты, как мы знаем, соответствует совершенно определённая скорость приближения или удаления источника излучения (эффект Допплера!). Верхняя шкала даёт сразу же эти скорости. Положительные скорости означают удаление источника излучения, отрицательные — приближение.

Интересно проследить, как постепенно меняется контур водородной линии по мере изменения галактической долготы. Изучение этих изменений даёт возможность получить представление о некоторых деталях спиральной структуры нашей звёздной системы. Обратим, например, внимание на то обстоятельство, что между 40 и 115° галактической долготы наблюдается явно выраженный максимум вблизи центра линии, там, где скорости по лучу зрения близки к нулю. Это означает, что излучающий межзвёздный водород находится сравнительно близко от нас (иначе из-за галактического вращения максимум излучения был бы смещён по отношению к центру линии). При этом плотность межзвёздного водорода достаточно велика, ибо максимум довольно высок. Между долготами 170 и 220° картина совсем другая: здесь в центре линии нет максимума излучения. Первый максимум наблюдается на таком расстоянии от центра линии, которое соответствует скорости удаления излучающих водородных облаков, равной 25 км/сек. Это означает, что, во-первых, в указанных направлениях около Солнца очень мало межзвёздного водорода (ибо в противном случае в центре линии был бы максимум!). Во-вторых, наблюдается концентрация межзвёздного водорода на расстоянии около 3000 световых лет, где обусловленная галактическим вращением относительная скорость удаления как раз равна 25 км/сек. Всё это означает, что наше Солнце находится на внутренней границе спирального «рукава».

Подобного рода анализ позволил дать приближённое распределение межзвёздных водородных облаков в галактической плоскости. На рис. 90 приводится это

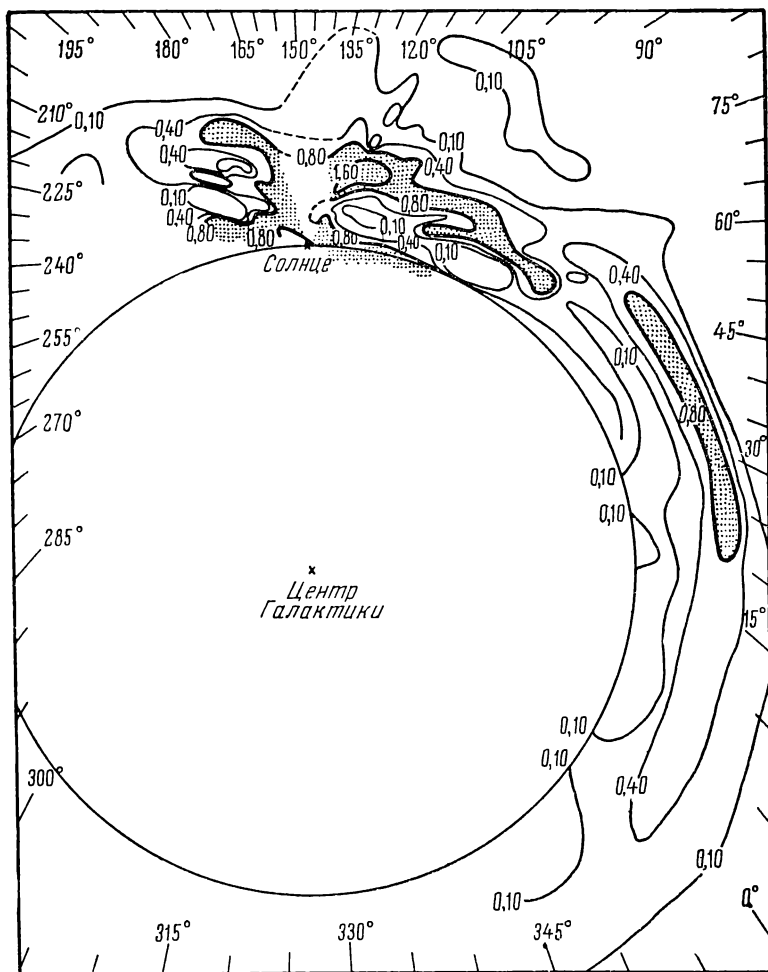


Рис. 90. Распределение плотности межзвёздного водорода в галактической плоскости.

распределение плотности межзвёздного водорода. Цифры у кривых, очерчивающих область с одинаковой плотностью, дают среднее количество водородных атомов в кубическом сантиметре.

Обращаем внимание на то, что внутренние области Галактики, более близкие к её центру, чем Солнце, являются пока «белым пятном». Они ещё не исследованы новым методом. Эта довольно трудная задача будет решена в ближайшее время. Интересно ещё обратить внимание на «мёртвый конус» — такое же «белое пятно» около галактической долготы 145° . Мы знаем, что это — направление на «антицентр», где нет обусловленных галактическим вращением относительных скоростей по лучу зрения (см. рис. 86). Поэтому в направлениях, близких к направлению на антицентр, мы «далеко не видим», ибо только галактическое вращение «просветляет» Галактику для излучения 21 см. Следовательно, пока ничего нельзя сказать о распределении межзвёздного водорода в этом направлении. На рис. 91 то же распределение водорода приведено в более крупном масштабе. Сторона квадрата на рис. 91 соответствует 18 000 световых лет.

Рис. 90 явно показывает спиральную структуру нашей звёздной системы. Эта спиральная структура довольно сложна. Отдельные «рукава» спирали имеют меняющуюся толщину и плотность межзвёздного водорода. Иногда они разветвляются, иногда как бы прерываются. Мы опишем основные рукава спирали, как они выявляются радиоастрономическими наблюдениями на волне 21 см.

Во-первых, на рис. 90 виден спиральный рукав, проходящий через наше Солнце. О нём уже шла речь выше. Недавно этот рукав получил название «Орионова рукава». Более внешний рукав спирали, с которым «Орионов рукав», по видимому, соединяется, был назван «рукавом Персея».

На рис. 90 между долготами 70 — 115° можно видеть ещё более удалённый от центра Галактики довольно разреженный, пока безымянный рукав. Пожалуй, самой замечательной деталью спиральной структуры нашей звёздной системы является «наружный рукав», простираю-

щийся от 55° галактической долготы до 345° . Он, повидимому, тянется ещё дальше, в южную, ещё специально не наблюдавшуюся часть неба. Этот «наружный рукав» тянется на огромное расстояние, огибая Га-

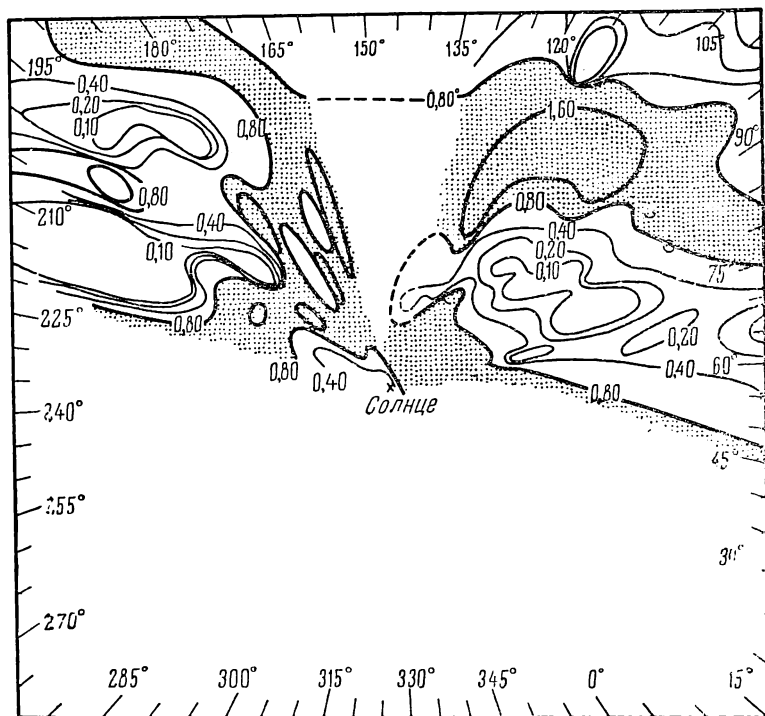


Рис. 91. Распределение межзвёздного водорода в окрестностях Солнца.

лактику со стороны, противоположной центру. У галактической долготы 345° мы имеем единственную в своём роде возможность наблюдать наиболее удалённые от нас части Галактики. Расстояние до облаков межзвёздного газа, образующих «наружный рукав» (у галактической долготы 345°), составляет около 50 000 световых лет! Никакие оптические методы не дают возможности наблюдать

эти самые удалённые от нас части Млечного Пути, так как мешает космическая пыль, сосредоточенная около галактической плоскости. Важно подчеркнуть, что, как видно из рис. 90 и 91, в пространстве между «рукавами» спирали плотность межзвёздного газа по крайней мере в 10 раз меньше, чем в «рукавах». Таким образом, облака межзвёздного газа не сосредоточиваются более или менее равномерно около галактической плоскости, а группируются только вдоль ветвей спиралей. Пространство между ветвями, разумеется, не является пустым: оно заполнено весьма разреженным «межоблачным» межзвёздным газом (см. главу VI).

В предыдущей главе были приведены некоторые соображения о спиральной структуре Галактики, как она выявляется из анализа её «теплового» радиоизлучения с непрерывным спектром (см. рис. 67). Метод анализа теплового радиоизлучения для выявления спиральной структуры Галактики является весьма грубым по сравнению с «методом водородной радиолнии», тем не менее, можно усмотреть определённое согласие между основными деталями спиральной структуры нашей звёздной системы, полученными этими двумя методами. Сравнивая рис. 67 и 90, мы видим, что в обоих случаях Солнце находится на внутренней границе проходящей через него спирали. И тут и там «нащупывается» внешний виток спирали. Разумеется, такого богатства деталей, как на рис. 90, рис. 67 показать не может.

В самое последнее время методами оптической астрономии были получены первые надёжные указания на наличие спиральной структуры Галактики. Так, например, американский астроном Морган по распределению на небе диффузных ионизованных туманностей, излучающих оптические линии водорода, нашёл спиральную структуру, похожую на изображённую на рис. 90. Проф. Б. А. Воронцов-Вельяминов, исследуя распределение звёзд высокой светимости, также получил определённые указания на спиральную структуру Галактики.

Нужно, однако, иметь в виду ограниченный «радиус зрения» оптической астрономии: космическая пыль не позволяет хорошо наблюдать удалённые галактические объекты.

В близком будущем, вероятно, можно будет наблюдать отдельные облака межзвёздного неионизованного газа. Радиотелескоп должен быть направлен под небольшим углом к плоскости Галактики. В этом направлении на луче зрения будет находиться несколько облаков. Каждое такое облако движется со своей скоростью, и излучаемые ими радиолинии будут иметь несколько различные частоты, т. е. будет наблюдаться столько близких по частоте радиолиний, сколько облаков межзвёздного неионизованного газа будет пересекаться лучом зрения, что и позволит изучить каждое облако в отдельности.

Такие наблюдения позволят определить кинетическую температуру каждого облака и количество водородных атомов в них, что имеет большое значение. Кроме того, можно будет точно определить скорости движения отдельных облаков.

Уже сейчас оказывается возможным оценить полное количество атомов нейтрального водорода в нашей Галактике из анализа интенсивности радиолиний. Оказывается, что в воображаемом цилиндре с площадью основания в один квадратный сантиметр, ось которого, проходящая через Солнце и центр Галактики, пересекает всю Галактику, будет находиться около 10^{23} атомов нейтрального водорода. Это число в 250 раз меньше, чем число молекул атмосферы над квадратным сантиметром поверхности Земли. Если бы земная атмосфера состояла из атомов водорода, то излучение этих атомов в радиолинии 21 см было бы во много раз мощнее, чем такое же галактическое радиоизлучение, и наблюдения последнего были бы весьма затруднены. Однако в действительности над квадратным сантиметром земной поверхности находится очень незначительное количество водородных атомов, около 10^{15} , и их излучение неизмеримо мало.

Среднее количество атомов газа в кубическом сантиметре межзвёздного пространства вблизи галактической плоскости *) получается близким к единице в согласии с результатами оптических наблюдений. Однако в этом случае оптические данные менее надёжны, чем данные радионаблюдений. При истолковании результатов

*) В области, занимаемой «рукавами» спирали.

оптических наблюдений приходится для вычисления плотности межзвёздного газа делать предположения, которые непосредственно из наблюдений не следуют. Кроме того, из-за поглощения света межзвёздной пылью наблюдениям доступны только сравнительно близкие окрестности Солнца.

Сама по себе возможность, невзирая на погоду, в дневных условиях буквально сосчитать число межзвёздных атомов водорода в нашей звёздной системе ещё вчера могла бы показаться совершенно фантастической. Оптические наблюдения межзвёздного газа принадлежат к числу труднейших. Например, для получения межзвёздных линий водорода используются очень светосильные приборы (небулярные спектрографы), а экспозиции достигают 6 часов. При этом необходимы идеальные атмосферные условия (отсутствие облаков, высокая прозрачность атмосферы). Подобные наблюдения могут вестись только в безлунные ночи.

Можно ли обнаружить в галактическом радиоизлучении радиолинии, излучённые атомами других элементов? В межзвёздном пространстве вторым по обилию элементом после водорода является гелий. На каждые четыре или пять атомов водорода приходится один атом гелия. Однако уровни атома гелия не имеют сверхтонкой структуры, и поэтому гелий не излучает радиолиний. Другие распространённые элементы — кислород и углерод — тоже не имеют сверхтонкой структуры, да и встречаются в тысячи раз реже, чем водород. Что же касается прочих элементов, то количество их атомов в межзвёздном пространстве так мало, что радиоизлучение от них не может быть обнаружено.

Однако у водорода имеется изотоп, так называемый тяжёлый водород, или дейтерий, ядро которого вдвое более массивно, чем ядро атома водорода, и состоит из протона и нейтрона. Спектр дейтерия почти такой же, как и у водорода, однако расщепление основного состояния гораздо меньше, примерно в 4,5 раза. Это означает, что радиолиния излучения дейтерия должна иметь длину волны около 91,5 см.

На Земле на каждые 5000 атомов водорода приходится один атом его изотопа — дейтерия. Будет ли это

отношение таким же для межзвёздного газа? У разных космических тел изотопный состав может быть различен. Например, акад. Г. А. Шайн доказал, что относительные количества изотопов углерода и азота меняются для различных сравнительно холодных гигантских звёзд в очень широких пределах. Этот важный вывод был получен из анализа весьма сложных спектров этих звёзд.

Определение изотопного состава звёзд и межзвёздного газа имеет важное значение для решения проблем эволюции и внутреннего строения звёзд.

Источниками энергии Солнца и большинства звёзд являются ядерные реакции, происходящие в их недрах. Наиболее эффективными являются так называемая протон-протонная и углеродно-азотная реакции. Первая состоит в том, что два протона превращаются в ядро дейтерия; при этом выделяется значительное количество энергии. Вторая реакция состоит в последовательном превращении четырёх протонов в одно ядро гелия. Для такого превращения необходимы промежуточные ядерные реакции протонов с различными изотопами углерода и азота. Последние элементы являются как бы катализаторами этой реакции *). В процессе таких реакций может установиться определённый изотопный состав у водорода, азота, углерода. Этот состав, в принципе, может быть предсказан теоретически.

В настоящее время имеются серьёзные основания утверждать, что межзвёздный газ и газовые туманности генетически связаны со звёздами. Возможно, значительная часть межзвёздной газовой среды была выброшена из звёзд. Такой точки зрения держится, например, известный советский астрофизик Б. А. Воронцов-Вельяминов. Известно, что некоторые звёзды непрерывно испускают потоки атомов. В небольшой степени этой способностью обладает и такая «заурядная» звезда, как наше Солнце. Эти атомы непрерывно пополняют количество межзвёздного газа.

*) Подробнее об этом см. в брошюре А. Г. Масевич «Источник энергии Солнца и звёзд», 1950.

С другой стороны, можно предположить, что межзвёздный газ и газовые туманности являются той средой, из которой образуются звёзды.

Напрашивается мысль, что существует динамическое равновесие между межзвёздной средой и звёздами. Если это так, то изотопный состав межзвёздной среды должен быть похожим на изотопный состав звёзд. Но, быть может, набросанная выше картина динамического равновесия является слишком грубой? Может быть, например, что изотопный состав водорода вовсе не определяется ядерными реакциями. Не исключено, что изотопный состав элементов различен в разных частях Галактики.

Для решения этих вопросов необходимо определить изотопный состав межзвёздного газа, в особенности водорода. Для этого важно было бы наблюдать радиолинию дейтерия. Расчёты показывают, что у атома дейтерия переходы электрона между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния, сопровождающиеся излучением с длиной волны $91,5\text{ см}$, будут происходить в 100 раз реже, чем у атома водорода. Один переход за миллиард лет, т. е. почти за всю геологическую историю Земли! Но мы уже знаем, что и такие невообразимо редкие процессы излучения, накапливаясь в просторах межзвёздного пространства, могут создать измеримый эффект.

Радиолиния $91,5\text{ см}$ должна быть линией поглощения. Попробуем объяснить, почему это происходит. Галактическое радиоизлучение с непрерывным спектром около 21 см имеет очень незначительную интенсивность, что и позволяет наблюдать радиолинию водорода как линию излучения. Но интенсивность радиоизлучения непрерывного спектра Галактики в области $91,5\text{ см}$ довольно значительна. Мы знаем, что если на пути излучения встретится холодный газ, то возникнут линии поглощения. Именно этот случай и имеет место для радиолинии $91,5\text{ см}$. Однако эта линия будет очень слабо выделяться на фоне непрерывного радиоспектра Галактики. Как показывают расчёты, если в межзвёздном пространстве на каждые 1000 атомов водорода приходится один атом дейтерия, то около длины волны $91,5\text{ см}$ интенсивность непрерывного спектра радиоизлучения Галактики уменьшится только на $1/250$. Но даже такое ничтожное умень-

шение интенсивности слабого радиоизлучения может быть обнаружено лучшими современными радиотелескопами на пределе чувствительности.

Вполне может случиться, что в межзвёздном пространстве дейтерия гораздо больше, чем мы считали. Даже отрицательный результат попытки наблюдения радиолиний 91,5 см при гарантированной высокой чувствительности приёмника имел бы очень большое научное значение. Это было бы серьёзным аргументом в пользу одинаковости изотопного состава Земли и межзвёздного газа. Заметим, что изотопный состав водорода на Солнце, как недавно было доказано оптическими наблюдениями, такой же, как и на Земле. Не подлежит сомнению, что в ближайшем будущем учёные попытаются обнаружить радиолинию дейтерия 91,5 см. Пожелаем им удачи *).

В межзвёздном пространстве находятся некоторые простейшие двухатомные молекулы: CN, CH. Оказывается, что этих межзвёздных молекул приблизительно в десятки миллионов раз меньше, чем межзвёздных атомов водорода. У некоторых из них, например CH, основное состояние тоже расщепляется на два близких уровня (хотя природа этого расщепления совершенно отлична от природы сверхтонкой структуры у атомов). Между этими близкими уровнями могут происходить переходы, приводящие к излучению радиолиний, в сотни тысяч раз чаще, чем между уровнями сверхтонкой структуры атома водорода. Поэтому, несмотря на то, что количество этих молекул в межзвёздном пространстве совершенно ничтожно, они могут излучать радиолинии измеримой интенсивности. Недавно автор этой книги вычислил точные значения длин волн радиолиний межзвёздных молекул CH и OH. Последняя молекула методами оптической астрономии в межзвёздной среде пока ещё не обнаружена. Для молекул OH длина волны оказалась около 18,3 см, а для молекулы CH — 945 см. Попытки обнаружения этих линий в радиоспектре Галактики следует рассматривать как задачу первоочередной важности.

*) Недавно Г. Г. Гетманцев и В. С. Троицкий, повидимому, обнаружили в направлении на центр Галактики слабую линию поглощения у длины волны 91,5 см. Необходимы, однако, дальнейшие тщательные наблюдения, чтобы подтвердить это выдающееся открытие.

Могут быть молекулы с различными изотопами входящих в них атомов. Например, наряду с $C^{12}H$ могут быть молекулы $C^{13}H$, где C^{12} и C^{13} — два изотопа атома углерода. Частоты радиоизлучения от таких молекул будут заметно различаться. Следовательно, открывается заманчивая перспектива подробного изучения изотопного состава межзвёздного газа. Эта проблема ещё ждёт исследователей.

Мы убедились, что возникла новая ветвь радиоастрономии, которую можно назвать радиоспектроскопией Галактики. Анализ радиолинии водорода 21 см позволил получить важные результаты, касающиеся природы межзвёздной среды и динамики нашей звёздной системы. Радиоспектроскопия Галактики связывает такие, казалось бы, далёкие проблемы науки, как проблему источников звёздной энергии и эволюции звёзд, с одной стороны, и проблему космического радиоизлучения — с другой.

Можно ли наблюдать радиолинию 21 см не только от облаков межзвёздного газа, но и от других небесных тел? Конечно, Солнце излучает радиолинию 21 см , но это излучение, как показывают расчёты, будет полностью поглощаться в солнечной атмосфере. Были предприняты специальные наблюдения с целью обнаружить изменения в радиоспектре Солнца на волне около 21 см . Никаких изменений, как это и следовало ожидать, обнаружено не было.

Если зеркало радиотелескопа будет иметь в диаметре несколько сот метров, можно будет обнаружить излучение радиолинии 21 см от больших планет — Юпитера и Сатурна, атмосферы которых содержат большое количество водорода. Это дало бы ценные сведения о природе этих планет.

Наконец, радиолинию 21 см можно наблюдать в излучении ближайших к нам звёздных систем — например туманности Андромеды. Этот вопрос уже связан с проблемой радиоизлучения Метагалактики. Об этом будет подробно рассказано в главе XII.

ГЛАВА IX

ОТКРЫТИЕ «РАДИОЗВЁЗД»

В 1946 г., исследуя радиоизлучение Галактики на волне 4,7 м, английские радиофизики Хей, Филлипс и Парсонс обнаружили в созвездии Лебедя мощный источник радиоизлучения, имеющий сравнительно небольшие угловые размеры. Поток радиоизлучения от этого источника быстро и беспорядочно менялся. По первым наблюдениям можно было только сделать вывод, что угловые размеры этого источника меньше 2°.

Низкая разрешающая способность применявшегося радиотелескопа не позволила более точно определить ни положение источника на небе, ни его угловые размеры. Поток радиоизлучения от этого источника оказался всего лишь в два раза меньше, чем поток радиоизлучения от «невозмущённого» Солнца на метровом диапазоне.

Открытие такого источника было полной неожиданностью. В то время большинство исследователей считало, что единственным источником радиоизлучения в Галактике является тепловое излучение межзвёздного ионизованного газа. Такое излучение возникает в очень больших объёмах пространства, и поэтому угловые размеры излучающих областей на небе должны быть велики. Кроме того, нельзя было ожидать, что излучение, возникающее в пространствах Галактики, может быстро изменяться со временем.

Вскоре были предприняты поиски подобных источников в других частях неба. Для этих исследований применялся интерференционный метод, позволяющий обнаружить источники радиоизлучения сравнительно небольших угловых размеров и с довольно большой точностью

находить их положение на небе. Применялись как двух-антенные, так и «морские» радиоинтерферометры.

В результате было найдено значительное количество источников радиоизлучения, подобных источнику в Лебеде. Эти источники получили чисто техническое название «точечных» источников. Этот термин не должен вводить в заблуждение. В действительности, конечно, излучение исходит не от «точек», т. е. источники излучения не имеют исчезающе малых угловых размеров. Из интерференционных наблюдений можно было только сделать вывод, что угловые размеры источников радиоизлучения меньше некоторой величины, определяемой разрешающей способностью радиоинтерферометра. В случае наблюдения сравнительно мощных точечных источников с самыми лучшими радиоинтерферометрами можно было сделать вывод, что угловые размеры этих источников меньше $5'$, что составляет около $1/6$ углового диаметра Солнца.

Самый мощный из подобных точечных источников был обнаружен в созвездии Кассиопеи. Поток излучения от него оказался примерно таким же, как от «невозмущённого» Солнца на метровом диапазоне.

На рис. 92 приведена запись излучения от мощных источников в созвездиях Лебеда и Кассиопеи, полученная

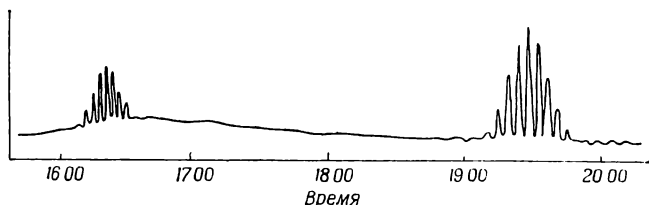


Рис. 92. Запись радиоизлучения от источников в созвездиях Лебеда (левая запись) и Кассиопеи (правая запись). По оси абсцисс отложено время наблюдения.

при помощи двухантенного радиоинтерферометра. Другие источники оказались гораздо более слабыми. В созвездии Центавра (в наших северных широтах не наблюдаемом) был обнаружен источник, посылающий к нам поток радиоизлучения, в семь раз меньший, чем источник

в Лебеде. Замечательный точечный источник радиоизлучения был обнаружен в созвездии Тельца. Поток излучения от него приблизительно такой же, как от источника в Центавре. Источник несколько меньшей мощности был обнаружен в созвездии Девы.

Известные в настоящее время самые слабые из обнаруженных точечных источников дают поток радиоизлучения, приблизительно в 5000 раз меньший, чем от самого мощного источника в Кассиопее. К 1955 г. на всём небе обнаружено уже около двух тысяч точечных источников. Дальнейшее усовершенствование аппаратуры и улучшение методов наблюдения, несомненно, приведут к открытию ещё большего числа точечных источников радиоизлучения.

Как уже указывалось, поток радиоизлучения от самого мощного из точечных источников в созвездии Кассиопеи почти такой же, как и от «спокойного» Солнца, а от источника в созвездии Лебеда — лишь вдвое слабее. Если вообразить себе живое существо, у которого глаза чувствительны к радиоизлучению, то это существо видело бы на небе три Солнца! *). Заметим для сравнения, что самая яркая звезда неба — Сириус — посылает на Землю поток света, в десять миллиардов раз меньший, чем Солнце.

Исследования дали возможность построить радиоспектры точечных источников. Распределение энергии в радиоспектре для различных точечных источников различно, но в общем поток излучения растёт с увеличением длины волны. Подобная картина имеет место для второй составляющей радиоизлучения Галактики. Замечательным исключением является точечный источник в созвездии Тельца: его поток излучения сравнительно мало зависит от длины волны. Радиоспектры самых мощных точечных источников приведены на рис. 93.

На рис. 94 (а и б) изображено распределение наиболее мощных источников радиоизлучения на северном и южном полушариях неба.

*) Заметим, однако, что у этого воображаемого существа диаметр зрачка глаза должен быть равен по крайней мере 10—12 м (т. е. нескольким длинам волн). В противном случае на сетчатке его глаза не могло бы образоваться изображение источника радиоизлучения.

Бросается в глаза, что точечные источники более или менее равномерно разбросаны по небу и не обнаружи-

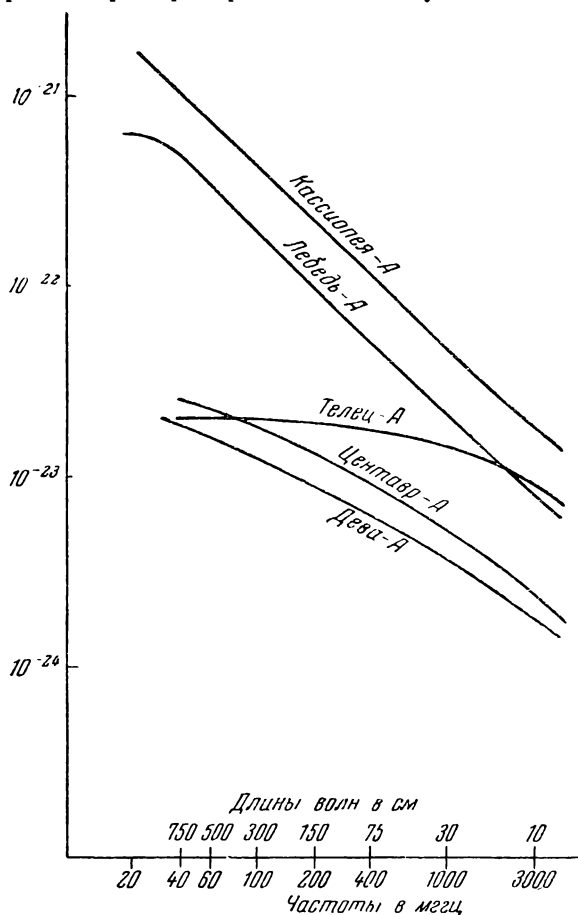


Рис. 93. Спектры наиболее мощных источников радиоизлучения (по оси ординат отложен поток радиоизлучения в единицах $\frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \text{ герц}}$).

вают тенденции концентрироваться к Млечному Пути, хотя значительная часть наиболее мощных источников,

в том числе и самые мощные в созвездиях Лебедя и Кассиопеи, находится в Млечном Пути.

Распределение звёзд на небосводе совершенно иное. Яркие звёзды довольно беспорядочно разбросаны по небу, не обнаруживая значительной концентрации к Млечному Пути, в то время как наиболее слабые звёзды сильно концентрируются к Млечному Пути. Это объясняется следующим образом. Более яркие звёзды в среднем находятся от нас ближе, чем слабые. Большинство наблюдаемых звёзд находится на сравнительно небольших расстояниях (меньше, чем, скажем, 700 световых лет) от галактической плоскости. Поэтому яркие и, следовательно, в среднем близкие к нам звёзды будут наблюдаться в направлениях, составляющих достаточно большой угол с галактической плоскостью, т. е. далеко от Млечного Пути. Но направления на очень слабые, а следовательно, в среднем очень удалённые звёзды, находящиеся от нас на расстоянии, значительно большем, чем 700 световых лет (условная полутолщина нашей звёздной системы), будут образовывать небольшие углы с галактической плоскостью. Поэтому большинство слабых звёзд будет наблюдаться в Млечном Пути.

Координаты мощных точечных источников радиоизлучения известны в настоящее время с точностью около $1'$. Что же касается слабых источников, то их положения известны с гораздо меньшей точностью — иногда с ошибкой до 5° .

Открытию точечных источников помогло одно их замечательное свойство. Поток их излучения быстро и неправильно меняется. Период колебаний величины потока порядка секунд и минут. Уже первые наблюдения показали, что в то время, как поток излучения от одних источников колеблется в значительных пределах, поток излучения от других остаётся почти постоянным. На рис. 95 приведена запись потока радиоизлучения от источника в Кассиопее. Внешний вид записи радиоизлучения от точечных источников напоминает запись радиоизлучения от «возмущённого» Солнца.

Если бы подобное излучение возникало в областях межзвёздного пространства очень большого объёма, то оно не могло быть таким переменным, ибо колебания

интенсивности излучения в отдельных небольших областях сглаживались бы вдоль луча зрения. Тот факт, что отдельные всплески потока излучения длятся 5—10 секунд,

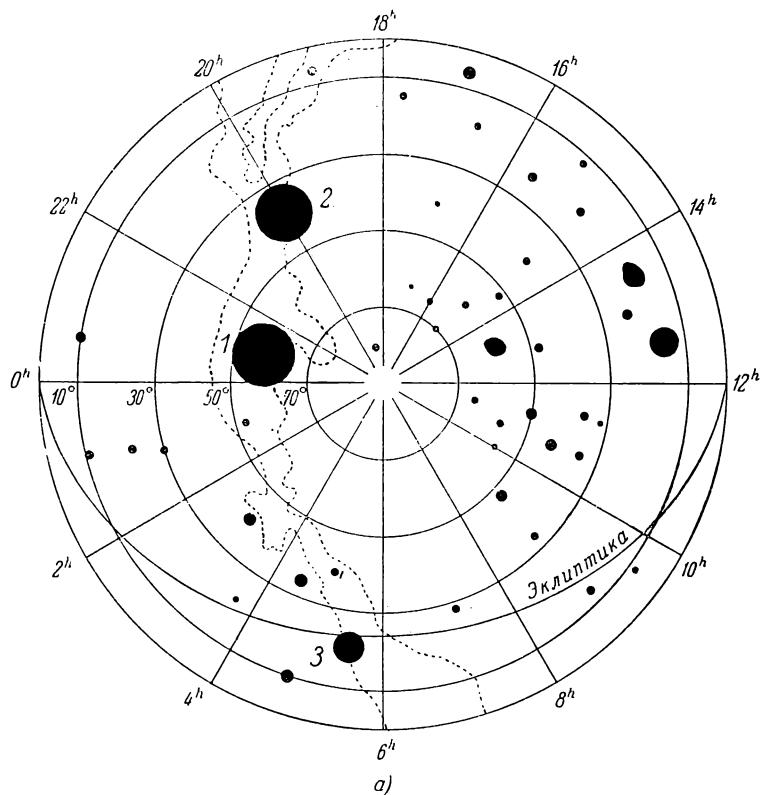
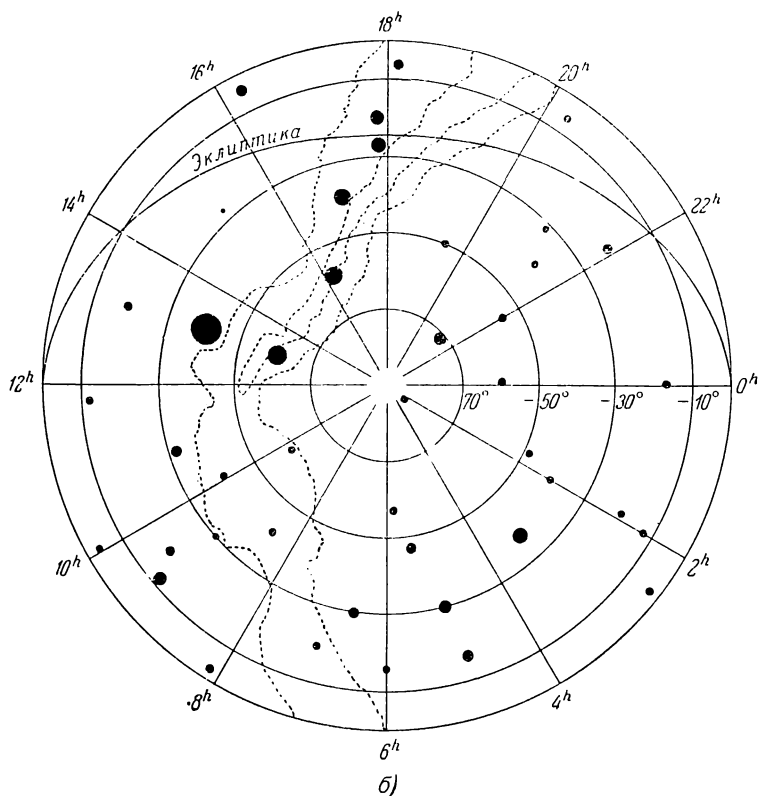


Рис. 94. Карты распределения по небу точечных источников радио-
ужного. Размеры чёрных кружков приблизительно соответствуют
Млечного Пути. Цифра 1 отмечает точечный источник в созвездии

мог означать, что линейные размеры источников не превышают 5—10 световых секунд, т. е. не превышают расстояния, проходимого светом за это время. В таком случае линейные размеры источников радиоизлучения не

должны превышать 1—2 миллионов километров, т. е. среднего размера звезды (напомним, что поперечник Солнца 1 400 000 км, или 4,6 световой секунды). Если бы



излучения: а) для северного полушария небесной сферы, б) для мощности источников радиоизлучения. Пунктир очерчивает границы Кассиопеи, 2 — в созвездии Лебедя, 3 — в созвездии Тельца.

излучающие области имели большие размеры, то всплески радиоизлучения от различных частей области приходили бы к нам не одновременно, а с запаздыванием, которое определялось бы размерами источника,

выраженными в световых секундах. Создавалось впечатление, что точечные источники — это космические тела, размеры которых не превышают размеров звёзд.

Но, может быть, точечные источники находятся от нас на расстояниях, значительно более близких, чем звёзды? Быть может, они даже члены нашей солнечной системы и находятся на её далёкой периферии, подобно многим

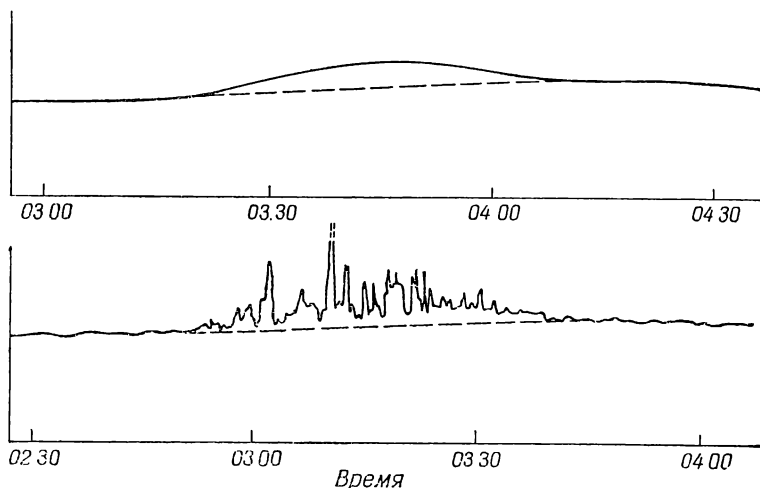


Рис. 95. Две записи радиоизлучения от источника в созвездии Кассиопеи. Верхняя запись, не показывающая колебаний интенсивности, получена днём, а нижняя — ночью.

кометам? Такие гипотезы высказывались отдельными учёными.

Чтобы решить этот вопрос, необходимо было оценить расстояние до них. Обычный метод определения расстояний до звёзд состоит в следующем. Если пронаблюдать звезду в данный момент и спустя полгода, когда Земля будет находиться в диаметрально-противоположной точке своей орбиты, то положения звезды на небе окажутся различными — звезда видимым образом сместится на небе на некоторое угловое расстояние. Чем ближе звезда, тем больше это смещение. На рис. 96 видно, что этот угол смещения в два раза превышает тот угол, под которым со

звезды видна большая полуось земной орбиты, равная 149,5 миллиона километров. Этот угол называется годичным параллаксом звезды. Даже для самых близких звёзд годичный параллакс меньше $1''$, так что расстояние до этих звёзд более чем в 200 000 раз превышает расстояние от Земли до Солнца.

Попытки обнаружить годичный параллакс у мощных точечных источников в созвездиях Кассиопеи и Лебедя дали отрицательный результат. Конечно, точность измерения малых углов в радиоастрономии намного меньше, чем в оптической астрономии, и поэтому можно лишь утверждать, что годичный параллакс точечных источников меньше $1'$. Это означает, что расстояние до них по крайней мере в 2000 раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Несомненно, оно гораздо больше, но во всяком случае точечные источники находятся далеко за пределами солнечной системы.

Точечные источники находятся либо в пределах нашей звёздной системы, либо ещё дальше от нас, в Метагалактике. Естественнее было считать, что точечные источники находятся в Галактике, так как в противном случае пришлось бы принять для них чудовищно большую радиоизлучательную способность.

Так в науке возникло представление о «радиозвёздах». Этот новый термин заменил старый термин «точечные» источники. Считалось, что «радиозвёзды» — это космические объекты звёздной природы, т. е. сравнительно плотные газообразные горячие тела сферической формы, исключительно сильно излучающие в радиодиапазоне. На месте подавляющего большинства «радиозвёзд» никаких сколько-нибудь примечательных оптических объектов обнаружить не удалось. Однако координаты «радиозвёзд» известны весьма неточно, так что «радиозвёзды»,

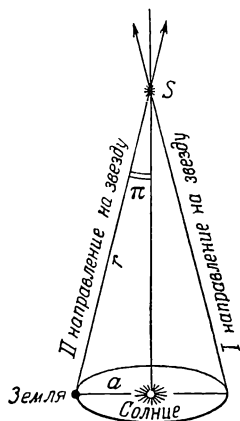


Рис. 96. Схема определения годичного параллакса звезды.

за небольшими исключениями, нельзя было отождествить с какими-либо оптическими объектами.

Нужно, однако, иметь в виду следующее обстоятельство. Даже для таких мощных и сравнительно хорошо изученных «радиозвёзд», как в Лебедь (эта «радиозвезда» называется Лебедь — А) и в Кассиопее (Кассиопея — А), координаты определены с точностью до 1'. Но в кружке радиуса в 1' на небосводе всегда найдётся достаточное количество малопримечательных слабых звёзд. Однако «внешность» бывает обманчива. В отношении «радиозвёзд» Лебедь — А и Кассиопея — А можно было только сказать, что в том месте, где они находятся, нет ни одной звезды ярче 14-й звёздной величины. Для остальных источников радиоизлучения, координаты которых известны с ещё меньшей точностью, можно лишь утверждать, что ни одна из них не отождествляется с какой-либо звездой ярче 8-й величины.

Необходимо отметить, что сразу же после открытия три мощные «радиозвезды» были отождествлены с тремя туманностями. «Радиозвезда» в Тельце (Телец — А) была отождествлена со знаменитой Крабовидной туманностью, «радиозвёзды» в созвездиях Девы и Центавра были также отождествлены с замечательными туманностями. Несколько очень слабых «радиозвёзд» было отождествлено с ближайшими к нам звёздными системами, похожими на нашу Галактику, — спиральными туманностями в созвездиях Андромеды, Треугольника и др. Мы уже знаем, что наша звёздная система — Галактика — является источником радиоизлучения. Естественно ожидать, что свойством излучать радиоволны обладают и другие звёздные системы, похожие на нашу Галактику. Расчёты показывают, что если бы нашу Галактику удалить на расстояние туманности Андромеды, то она послала бы к нам приблизительно такой же поток радиоизлучения, как и слабая «радиозвезда», отождествлённая с туманностью Андромеды.

Однако подавляющее большинство «радиозвёзд» ни с какими оптическими объектами не отождествлялось. Это дало основание считать «радиозвёзды» особой категорией небесных тел, имеющих ничтожную излучательную способность в оптических лучах и огромную радио-

излучательную способность. Ряд исследователей обращал внимание на тот факт, что даже такая «заурядная» звезда, как наше Солнце, временами излучает громадное количество энергии в радиодиапазоне, в миллионы раз превышающее излучение раскалённого тела, размеры и температура поверхности которого были бы такие же, как и у Солнца. Можно было бы предположить, что в нашей Галактике существуют такие звёзды, у которых эта особенность — исключительно сильное радиоизлучение — выражена в ещё большей степени. Правда, на Солнце столь большие всплески происходят довольно редко и длятся немногие минуты, в то время как «радиозвёзды» излучают непрерывно. Но некоторые исследователи полагали, что причина мощного излучения Солнца и «радиозвёзд» — одна и та же, только у «радиозвёзд» это явление выражено в гораздо большей степени.

Отличительной особенностью радиоизлучения «возмущённого» Солнца является его переменность. Быстрые колебания потока излучения от «радиозвёзд», казалось бы, говорили в пользу представления об одинаковой природе их излучения и излучения «возмущённого» Солнца. Немецкий астрофизик Унзольд вообще считал, что практически всё радиоизлучение Галактики имеет своей причиной излучение «радиозвёзд». Он полагал, что это такие звёзды, которые обладают по сравнению с Солнцем огромной «активностью». Под «активностью» Унзольд понимал мощное развитие пятнообразовательной деятельности, наличие значительных переменных магнитных полей, а также повышенную способность испускать космические лучи. Хотя, как выяснилось недавно, представления Унзольда являются ошибочными, сама по себе идея связи радиоизлучения и космических лучей, высказанная Унзольдом, была очень ценной.

Детальное изучение характера колебаний потока радиоизлучения от отдельных «радиозвёзд» дало очень важные результаты. При наблюдении колебаний потока на двух одинаковых радиотелескопах, одновременно работающих на одной и той же волне, выяснилось следующее. Пока радиотелескопы находятся близко один от другого, на расстоянии нескольких километров, записи потока радиоизлучения одинаковы. Но если удалить

радиотелескопы один от другого на расстояние больше 20 км, то характер записи на разных радиотелескопах ничего общего иметь не будет: когда один радиотелескоп фиксирует максимум потока излучения от «радиозвезды», другой от той же «радиозвезды» фиксирует минимум и наоборот.

Это может означать только одно: колебания величины потока излучения от «радиозвёзд» — явление, обусловленное земной атмосферой. Это явление подобно мерцанию обычных звёзд. Мерцание звёзд объясняется тем, что струи и потоки воздуха в земной атмосфере вызывают небольшие и быстро меняющиеся колебания преломления лучей в земной атмосфере. В случае радиолучей, идущих к нам от «радиозвёзд», роль струек воздуха играют неоднородности ионосферы.

Таким образом, беспорядочные изменения потока излучения от «радиозвёзд» есть только их «мерцание». На самом деле поток излучения «радиозвёзд» постоянен. Между прочим, это объясняет, почему поток радиоизлучения от одних «радиозвёзд» беспорядочно и сильно менялся, а от других нет. Оказывается, неоднородности в ионосфере сильнее всего проявляют себя ночью, а днём ионосфера относительно спокойна. «Радиозвёзды», которые наблюдались днём, давали почти постоянный поток излучения. Но когда эти же «радиозвёзды» стали наблюдаться ночью, поток излучения от них стал быстро и беспорядочно колебаться со временем. На рис. 95 приводятся две записи излучения от точечного источника в созвездии Кассиопеи. На одной видны сильные колебания, на другой — нет. Исследование «мерцаний» «радиозвёзд» является эффективным методом изучения неоднородностей ионосферы, что имеет большое значение для радиосвязи на коротких волнах.

Наблюдения показали, что если не считать «мерцаний», поток излучения «радиозвёзд» постоянен. Это не имеет ничего общего с быстро и неправильно меняющимся со временем излучением «возмущённого» Солнца. Следовательно, причины излучения «возмущённого» Солнца и «радиозвёзд» должны быть различны. Исключительное постоянство излучения «радиозвёзд» представляется удивительным. В течение шести месяцев наблюдений поток

излучения не изменялся даже на 5% своей величины, тогда как переменность блеска широко распространена среди оптических звёзд. Даже наше Солнце, строго говоря, является переменной звездой. Это лишний раз говорит о том, что «радиозвёзды» — объекты, весьма непохожие на обычные звёзды.

Выше мы упомянули, что немецкий астрофизик Унзольд считал почти всё наблюдаемое радиоизлучение Галактики вызванным «радиозвёздами». Такой же точки зрения придерживались и другие учёные. Впрочем, некоторые из них считали, что часть галактического радиоизлучения объясняется межзвёздным газом. Чёткое разделение наблюдаемого радиоизлучения Галактики на газовую и вторую составляющую было сделано сравнительно недавно автором этой книги (см. стр. 127).

Если считать вторую составляющую радиоизлучения Галактики образованной «радиозвёздами» точно так же, как свечение Млечного Пути образовано свечением миллиардов звёзд нашей Галактики, то возможно оценить полное число «радиозвёзд» в нашей звёздной системе. Допустим, что все «радиозвёзды» испускают одинаковое количество радиоизлучения. Так как поток излучения от источника обратно пропорционален квадрату расстояния до него, то при этом предположении наиболее мощные источники будут наиболее близкими. Тогда отношение потока излучения от самой мощной, а следовательно, самой близкой «радиозвезды» к потоку излучения от всех «радиозвёзд», т. е. к полному радиоизлучению всей Галактики, будет зависеть от среднего расстояния между соседними «радиозвёздами». Чем больше это отношение, тем больше расстояния между «радиозвёздами» и тем реже встречаются они в нашей звёздной системе.

Для пояснения сказанного приведём такой пример.

Допустим, что в нашей Галактике имеется всего лишь каких-нибудь пять «радиозвёзд» с одинаковой радиоизлучательной способностью. Пусть они расположены в Галактике самым беспорядочным образом. Тогда та из них, которая будет к нам случайно ближе других, будет посылать к нам поток радиоизлучения, сравнимый с потоком от всех остальных четырёх «радиозвёзд», вместе взятых. Но если в нашей звёздной системе будет очень

много одинаковых «радиозвёзд», то самая близкая из них будет, очевидно, посылать поток излучения, во много раз меньший, чем совокупность всех остальных «радиозвёзд». По этой же причине самые яркие оптические звёзды в Галактике посылают к нам поток излучения, в несколько сот раз меньший, чем Млечный Путь, и это несмотря на то, что поток от далёких слабых звёзд значительно ослаблен межзвёздным поглощением света.

Эта идея позволила оценить число «радиозвёзд» в нашей Галактике при сделанных выше предположениях. Результаты оказались поразительными: число «радиозвёзд» должно быть в нашей звёздной системе огромным, раз в 10 бóльшим, чем число обычных оптических звёзд. Если же принять, что излучательная способность у разных «радиозвёзд» неодинакова, то их должно быть ещё больше. Эти многочисленные объекты в нашей Галактике странным образом никак не проявляют себя в оптических лучах, но зато мощно излучают в области радиоволн.

Масса всей Галактики, включая сюда и её невидимую часть *), может быть определена из особенностей галактического вращения. Оказывается, почти вся масса Галактики равна суммарной массе входящих в её состав звёзд. Разделив оставшуюся часть массы Галактики на число «радиозвёзд», можно найти, что в среднем на долю одной «радиозвезды» приходится меньше $\frac{1}{100}$ массы Солнца! Напомним, что масса Юпитера составляет $\frac{1}{1000}$ массы Солнца. Таким образом можно было прийти к выводу, что «радиозвёзды» — космические тела с массами, близкими к массам больших планет типа Юпитера, с низкой температурой поверхности (иначе они наблюдались бы в видимых лучах) и почему-то излучающие непомерно большое количество энергии в виде радиоизлучения.

Количество испускаемого каждой «радиозвездой» излучения, как показывают расчёты, должно быть огромно. Если считать, что размеры «радиозвёзд» такие же, как и размеры Солнца, то они должны непрерывно излучать энергию в сотни раз интенсивнее, чем «возмущённое» Солнце во время самого большого из наблюдаемых

*) Например, тёмные туманности, не освещённые звёздами, звёзды, излучающие преимущественно в инфракрасных лучах, и т. д.

всплесков, или в десять миллиардов раз интенсивнее, чем «спокойное» Солнце. Очень трудно, если не невозможно, найти причину такого мощного и непрерывного излучения, особенно если мы вспомним, что поверхность «радиозвёзд» должна иметь сравнительно низкую температуру, во всяком случае, ниже 3000° . Было предложено несколько гипотез, пытавшихся объяснить причину столь мощного радиоизлучения. Все они, однако, либо приводили к противоречиям с основными законами физики, либо с самого начала были весьма неправдоподобными, беспочвенно фантастическими.

Таким образом, постепенно выяснялось, что свойства «радиозвёзд», если считать, что они порождают если не всё, то по крайней мере значительную часть наблюдаемого радиоизлучения Галактики, становятся всё менее и менее реальными. Такие положения в истории науки бывали неоднократно. Вспомним историю развития наших представлений об эфире. Развитие оптики, необходимость объяснить всё большее и большее число наблюдаемых фактов заставляли исследователей приписывать эфиру всё более и более фантастические свойства, к тому же находившиеся в разительном противоречии друг с другом. Развитие науки опрокинуло и сдало в архив представление об эфире как о механической системе, наделённой совершенно нереальными свойствами. Такого эфира в природе не существует.

Точно так же получилось и с «радиозвёздной» теорией галактического радиоизлучения. Фантастичность полученных из этой теории свойств «радиозвёзд» сама по себе могла означать, что предпосылки, являющиеся основой этой теории, неправильны.

Но ещё в то время, когда эта теория занимала господствующее положение в науке, было указано на совершенно другую возможность объяснения радиоизлучения Галактики, точнее говоря, её второй составляющей. Первые шаги новой теории были робки. Однако в последнее время открыты новые факты, которые полностью уничтожают «радиозвёздную» теорию радиоизлучения Галактики. При этом выяснилось, что «радиозвёзды» в нашей Галактике вовсе не образуют какую-то многочисленную категорию совершенно особых объектов. Оказалось, что

большинство так называемых «радиозвёзд» находится далеко за пределами нашей звёздной системы, в Метагалактике, а некоторые «радиозвёзды» надёжно отождествляются с особыми объектами в пределах нашей Галактики. Новые взгляды на природу галактического радиоизлучения нашли себе неожиданную, но решительную поддержку со стороны оптической астрономии. Об этой новой теории будет рассказано в следующей главе. Эта теория тесно связана с современными представлениями о природе космических лучей, и поэтому целесообразно в первой части следующей главы рассказать о природе и происхождении космических лучей.

ГЛАВА X

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ВТОРАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

Свыше сорока лет назад было установлено, что в атмосферу нашей Земли из глубин мирового пространства постоянно проникают частицы, обладающие огромной энергией. В результате многолетней работы учёных выяснилось, что те частицы, которые наблюдаются на поверхности Земли, на некоторой глубине под землёй и на небольших высотах, имеют вторичное происхождение. Первичные космические частицы попадают из глубин мирового пространства в верхние слои земной атмосферы. Они врываются в неё, имея огромную кинетическую энергию, в сотни миллиардов раз большую, чем энергия атомов и молекул земной атмосферы, которые движутся с тепловыми скоростями.

Скорость движения первичных частиц близка к скорости света. Такая скорость даёт им возможность проникать до сравнительно плотных слоёв земной атмосферы, расположенных на высоте около 30 км над уровнем моря. Здесь они испытывают столкновения с ядрами атомов, входящих в молекулы земной атмосферы. Подобные столкновения ведут к потере значительной части энергии первичных частиц и к появлению новых, вторичных частиц — электронов, позитронов, фотонов и мезонов. Именно эти вторичные частицы и достигают поверхности Земли, а некоторые из них даже проникают под землю и наблюдаются в глубоких шахтах.

Через каждый квадратный сантиметр поверхности, расположенный на границе земной атмосферы, за одну секунду проходит приблизительно одна первичная космическая частица. Это — очень маленькая величина. Число

световых квантов — фотонов, попадающих в земную атмосферу от всех звёзд нашей Галактики, в несколько миллиардов раз больше, но зато каждая первичная космическая частица обладает энергией, в миллиарды раз большей, чем средний квант света. Поэтому первичные космические лучи приносят с собой примерно такое же количество энергии, как и свет, приходящий к нам от всех звёзд Галактики.

Большинство первичных космических частиц имеет положительный электрический заряд. Магнитное поле Земли, искривляя путь движения частиц, производит сортировку первичных положительно заряженных космических частиц. Только частицы с очень большой энергией могут попадать одинаково часто и в экваториальные, и в полярные области Земли. Частицы с меньшей энергией попадают только в те области земного шара, которые окружают магнитные полюсы (магнитные полюсы хотя и близки к географическим, но не совпадают с ними).

Долгое время физики сосредоточивали своё внимание на изучении вторичных космических лучей. Это объясняется, с одной стороны, трудностями, связанными с подъёмом регистрирующих приборов на большие высоты, а с другой стороны, — недостаточным совершенством самих приборов.

Изучая вторичную составляющую космических лучей, физики добились больших успехов. Для них вторичные космические лучи были единственной в своём роде лабораторией, позволяющей изучать свойства элементарных частиц, обладающих огромными энергиями. Только в настоящее время построены сверхмощные лабораторные установки, которые дают возможность получать элементарные частицы, обладающие такими же энергиями, как и первичные космические частицы. Исследуя вторичные космические лучи, физики открыли новые элементарные частицы: позитроны и мезоны. Можно сказать, что до сравнительно недавнего времени изучение космических лучей было проблемой чисто физической, а не астрономической.

Подойти к основному вопросу, связанному с проблемой космических лучей, к вопросу об их происхождении, оказалось возможным только тогда, когда была выяснена

природа первичной составляющей этих лучей. В последние годы в этом направлении были достигнуты значительные успехи благодаря введению новой методики наблюдений, разработанной советскими физиками, в особенности А. П. Ждановым. Изготавливались особые фотографические пластинки, покрытые гораздо более толстым, чем у обыкновенных пластинок, слоем эмульсии. Космические частицы, попадая в чувствительный слой пластинки, взаимодействуют с частицами эмульсии. После обработки пластинок можно в их эмульсиях видеть следы каждой частицы. По этим следам определяют заряд, массу и энергию каждой космической частицы, а также характер их взаимодействия с ядрами атомов, входящих в эмульсию.

Подымая такие пластинки на большие высоты (например, на аэростатах), удалось изучить состав первичных космических частиц. Оказалось, что большинство их — это ядра атомов водорода — протоны. Кроме того, были обнаружены ядра гелия, углерода, кислорода и многих других элементов. Как правило, относительные количества ядер различных элементов в первичных космических лучах примерно такие же, как и на Солнце, в звёздных атмосферах и в межзвёздном газе. Однако имеются и важные исключения. Например, в составе первичных космических лучей сравнительно много ядер лёгких элементов — лития, бериллия и бора, а на Земле и Солнце, а также в звёздных атмосферах и межзвёздном газе этих элементов почти нет.

Наблюдения показывают, что космические лучи равномерно приходят к нам со всех сторон неба. В отличие от звёзд они совершенно не концентрируются к Млечному Пути. На первый взгляд кажется, что этот факт можно объяснить только двумя взаимно исключающими друг друга предположениями:

а) Космические лучи равномерно заполняют всю Метагалактику. Большая часть наблюдаемых космических лучей образуется не в нашей звёздной системе, а далеко за её пределами, в глубинах мирового пространства. Однако при таком предположении возникает значительная трудность. Пришлось бы принять, что во всей Метагалактике энергия космических лучей в десятки тысяч

раз превышает энергию излучения звёзд. Этот вывод представляется неприемлемым.

б) Космические лучи заполняют сравнительно небольшой объём, окружающий Солнце. Радиус сферы, заполненной космическими лучами, хотя и велик по сравнению с размерами солнечной системы, но мал по сравнению с расстояниями до ближайших звёзд, поэтому никакой концентрации к Млечному Пути космические лучи обнаруживать не будут. Согласно этой теории источником космических лучей является само Солнце. Для такого предположения имеются серьёзные основания.

Когда на Солнце возникают мощные вспышки, интенсивность первичных космических лучей повышается примерно на 20%. Видимо, во время вспышек Солнце испускает частицы с энергией, сравнимой с энергией частиц первичных космических лучей. С течением времени эти частицы могут окружить Солнце в виде облака, если какая-нибудь причина мешает выброшенным частицам уйти достаточно далеко от Солнца.

Такую причину можно указать — это магнитное поле, связанное с Солнцем. При движении заряженных частиц в магнитных полях частицы не могут сколь угодно далеко уйти от магнитных силовых линий. Траектория движения

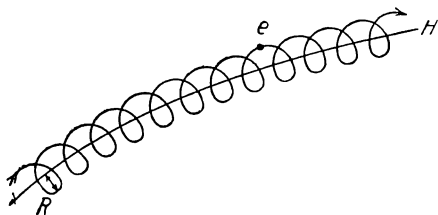


Рис. 97. Траектория заряда в магнитном поле.

заряженной частицы — спираль, навивающаяся на магнитную силовую линию (рис. 97). Радиус такой спирали R прямо пропорционален энергии частицы и обратно пропорционален напряжённости магнитного поля. Если, например, напряжённость такого магнитного поля в 100 000 раз меньше напряжённости магнитного поля

Земли, то радиус спирали для протона с энергией 10^9 электрон-вольт *) будет около $3 \cdot 10^{11}$ см.

Однако, несмотря на свою привлекательность и, казалось бы, хорошее согласие с наблюдаемыми фактами, эта теория не выдерживает критики. Согласно этой теории первичные космические частицы, испущенные Солнцем, длительно движутся вокруг Солнца по сложным траекториям вдоль хаотически ориентированных силовых линий магнитного поля, связанного с Солнцем.

Но частицы не могут двигаться сколь угодно долго. Часть из них будет захвачена Землёй и другими планетами. Кроме того, и это главное, частицы рано или поздно будут сталкиваться с ядрами атомов газа, находящимися в межпланетном пространстве. В результате таких столкновений, вполне подобных тем, которые происходят в высоких слоях земной атмосферы, первичные частицы будут терять почти всю свою энергию, и это приведёт к непрерывному уменьшению количества космических частиц, движущихся в пространстве около Солнца.

С другой стороны, нам известно, сколько в среднем космических частиц испускает Солнце за одну вспышку и как часто такие вспышки происходят. Оказывается, что излучение Солнца никоим образом не восполняет непрерывную убыль космических частиц из-за столкновений с ядрами атомов в межпланетном пространстве. Это означает, что вокруг Солнца никак не может образоваться облако космических частиц.

Значит, космические лучи не являются метагалактическим образованием и заведомо не являются солнечным образованием. Где же они могут возникать? Ответ может быть только один — источники космических лучей находятся в нашей звёздной системе. Но почему тогда эти лучи не обнаруживают концентрации к Млечному Пути, подобно всем другим телам нашей звёздной системы?

Это объясняется наличием слабых межзвёздных магнитных полей, которые искривляют движение заряженных космических частиц. Если бы космические частицы

*) Электрон-вольт — это такая энергия, которую приобретёт частица с зарядом, равным по величине заряду электрона, пройдя разность потенциалов в 1 вольт.

двигались прямолинейно, подобно свету, тогда действительно из области галактического центра их приходило бы больше всего, и почти совсем не наблюдались бы космические частицы, летящие под значительным углом к галактической плоскости. При напряжённости межзвёздных магнитных полей, в несколько сот тысяч раз меньшей напряжённости магнитного поля на Земле, радиус кривизны спирали, описываемой космическими протонами средней энергии, будет около $3 \cdot 10^{12}$ см, т. е. в 5 раз меньше расстояния от Земли до Солнца.

Направления силовых линий межзвёздных магнитных полей совершенно хаотичны. В таких полях траектории первичных космических частиц становятся весьма запутанными. Если, например, космическая частица возникла в области галактического центра, то, двигаясь по сложной траектории, она может попасть к нам со стороны антицентра. В силу такой особенности движения космических частиц в любом месте нашей звёздной системы, в том числе и в окрестностях Солнца, интенсивность космических лучей, идущих из разных направлений, будет почти одинаковой.

Не то будет со световыми лучами, которые совершенно не отклоняются магнитным полем. Мы будем наблюдать свет, например, идущий к нам от звёзд, только в тех направлениях, откуда он был испущен.

Межзвёздные магнитные поля невероятно запутывают траектории движения космических частиц и практически не выпускают их из пределов Галактики, так сказать, «удерживают» их. Иная судьба у световых квантов, или фотонов, испущенных звёздами, туманностями и межзвёздным газом. Только небольшая их часть будет поглощена межзвёздными твёрдыми частицами — космической пылью, а большая часть навсегда покинет пределы Галактики. При всех условиях квант света, испущенный какой-либо звездой, находится в пределах нашей звёздной системы никак не больше 100 000 лет. Именно столько времени ему надо, чтобы пробежать, двигаясь прямолинейно и равномерно со скоростью 300 000 км/сек, всю нашу Галактику. А заряженные космические частицы, двигаясь по сложным, причудливо искривлённым межзвёздными магнитными полями траекториям, могут блу-

ждать в пределах нашей Галактики сотни миллионов лет. Предел их странствованиям кладут столкновения с ядрами межзвёздных атомов, приводящие к почти полной потере энергии. О таких столкновениях, происходящих в земной атмосфере, речь была выше. Но в невообразимо разреженном межзвёздном газе такие процессы очень редки. Одна космическая частица испытывает подобные столкновения один раз в несколько сот миллионов лет, что и определяет среднюю длительность её блуждания в межзвёздном пространстве.

Что было бы, если бы подобных столкновений не было совсем?

Предположим, что в нашей звёздной системе имеются какие-то источники космических частиц. Тогда, даже если этих источников очень мало и они имеют незначительную мощность, они, действуя достаточно долго, наполнили бы нашу Галактику значительным количеством космических частиц. Ведь последние никуда не будут уходить из Галактики, а будут в ней непрерывно накапливаться. То обстоятельство, что из-за столкновений с ядрами межзвёздных атомов космические частицы в какой-то мере поглощаются, приводит к динамическому равновесию, когда число исчезающих (поглощённых) частиц равно числу по каким-то причинам возникающих космических частиц. При таком динамическом равновесии должна установиться определённая плотность космических частиц. Согласно наблюдениям эта плотность такова, что на каждые десять миллиардов межзвёздных атомов водорода, движущихся со сравнительно небольшими тепловыми скоростями, приходится приблизительно одна космическая частица (чаще всего это протон), движущаяся со скоростью, близкой к скорости света, и обладающая огромной энергией.

Итак, межзвёздные магнитные поля играют решающую роль для всей проблемы происхождения первичных космических частиц. Что может сказать астрофизик об этих полях? Какова их природа, можно ли их измерить?

Проблема межзвёздных магнитных полей очень молодая. Она встала перед современной астрофизикой буквально в последние годы. Хотя в настоящее время эти очень слабые поля непосредственно (как, например,

сильные магнитные поля солнечных пятен) не наблюдаются, имеются серьёзные основания считать, что они существуют. Мы укажем на два наблюдаемых явления, косвенно говорящих о наличии межзвёздных магнитных полей.

На рис. 98 приведены фотографии газовых туманностей, полученные Г. А. Шайном в Крымской астрофизической обсерватории. Тонкая волокнистая структура этих туманностей, состоящих из ионизованных атомов, может быть объяснена наличием слабых магнитных полей. Потоки заряженных частиц как бы растекаются вдоль силовых линий магнитного поля; каждая из частиц движется по спирали, навивающейся на силовую линию. Подобная картина, наблюдаемая в солнечных протуберанцах (см. рис. 39 на стр. 76), объясняется наличием магнитных полей в солнечной атмосфере.

Второе явление заключается в следующем. Недавно было обнаружено, что свет от удалённых звёзд, проходящий через облака космической пыли, частично поляризован. Это объясняют частичной ориентацией пылевых частиц вытянутой формы в межзвёздных магнитных полях. Необходимая для такой ориентации напряжённость магнитного поля должна быть примерно в сто тысяч раз меньше напряжённости магнитного поля Земли.

Имеются и теоретические исследования, доказывающие существование межзвёздных магнитных полей и выясняющие их интересные особенности. В последние годы развилась новая отрасль теоретической астрофизики — космическая электродинамика. Эта наука изучает электрические и магнитные поля различных космических тел, в том числе и межзвёздного газа.

Структура магнитных полей облаков межзвёздного газа представляется такой. Облака межзвёздного газа являются хорошими проводниками электричества. Это объясняется тем, что излучение звёзд ионизует газовые облака либо полностью, либо частично. Магнитные силовые линии как бы «вморожены» в ионизованный газ, т. е. каждая силовая линия магнитного поля связана с частицами газа. Движение облаков приводит к перемещению и деформации силовых линий межзвёздных магнитных

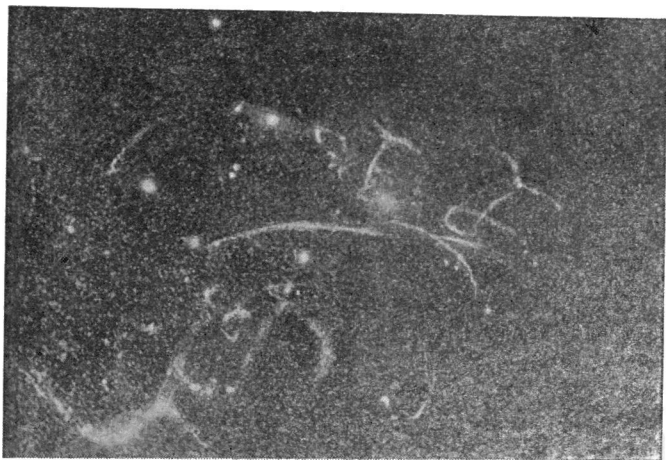


Рис. 98. Фотографии тонковолокнистых туманностей, полученные акад. Г. А. Шайном в лучах красной линии водорода.

полей, т. е. к запутыванию силовых магнитных линий в межзвёздном пространстве.

С другой стороны, межзвёздные магнитные поля действуют на межзвёздную среду. Изменение напряжённости магнитного поля ведёт к изменению плотности и скорости движения межзвёздного газа. Межзвёздные газовые облака и магнитные поля теснейшим образом связаны, как бы взаимно проникая друг в друга. При этом устанавливается равенство между плотностью магнитной энергии и плотностью кинетической энергии *). Это равенство запишется так:

$$\frac{1}{8\pi} H^2 = \frac{1}{2} \rho v^2,$$

где H — напряжённость магнитного поля, ρ — плотность межзвёздного газа, v — скорость его движения.

Как вообще могут возникнуть межзвёздные магнитные поля? Очень слабые межзвёздные магнитные поля, в сотни тысяч раз более слабые, чем сейчас, могли образоваться, например, так.

Горячие звёзды, ионизирующие межзвёздный газ, распределены в нашей звёздной системе очень неравномерно. Поэтому плотность свободных электронов, образовавшихся в межзвёздном пространстве, будет различной в разных местах Галактики. Это может привести к образованию слабых токов благодаря диффузии электронов в области Галактики с меньшей электронной плотностью, а слабые токи будут порождать слабые магнитные поля. Так как поле очень слабо, его силовые линии будут очень редки.

Однако, как уже отмечалось выше, каждая силовая линия как бы «вморожена» в проводящие электричество облака межзвёздного газа. Движение облаков приведёт к сильным деформациям магнитных силовых линий. Они начнут «наматываться» на облака межзвёздного газа. С течением времени через какую-либо площадку будет проходить всё большее и большее количество силовых линий, и, следовательно, напряжённость магнитного поля будет с течением времени расти.

*) Плотность энергии — это количество энергии в единице объёма.

Энергия возникающего межзвёздного магнитного поля будет черпаться за счёт кинетической энергии движения облаков межзвёздного газа. Процесс усиления поля будет продолжаться до тех пор, пока энергия магнитного поля не станет равной кинетической энергии облаков межзвёздного газа, после чего установится равновесное состояние. Равновесное значение магнитного поля можно определить из приведённого выше условия равенства плотностей кинетической и магнитной энергий. Если предположить, что средняя скорость облаков 5 км/сек и что в одном кубическом сантиметре облака находится 10 атомов (это соответствует плотности в $2 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3$), то получится, что напряжённость межзвёздных полей будет около $1/100\,000$ напряжённости магнитного поля Земли. В пределах каждого облака межзвёздного газа протяжённостью в несколько десятков световых лет магнитное поле можно считать более или менее однородным, однако в различных облаках магнитные поля расположены самым хаотическим образом.

Важнейший вопрос теории происхождения космических лучей — это причина их огромной энергии. Для объяснения этого было предложено немало гипотез, но почти все они оказались несостоятельными. В настоящее время большинство учёных считает, что космические частицы разгоняются до таких больших значений энергии электромагнитными полями, имеющимися в некоторых космических телах.

Попадая в межзвёздное пространство, эти частицы будут взаимодействовать с магнитными полями, «вмороженными» в облака межзвёздного газа. Итальянский физик Ферми показал, что при столкновениях быстрых заряженных частиц с такими «блуждающими» магнитными полями частицы могут иногда терять, иногда приобретать некоторое (очень небольшое) количество энергии.

Но оказывается, что столкновения, сопровождающиеся ростом энергии космической частицы, будут происходить чаще.

Поясним это простым примером. Вообразим сосуд, наполненный смесью двух газов, причём каждая молекула одного газа по какой-нибудь причине имеет очень

незначительную кинетическую энергию, а каждая молекула другого газа обладает большой энергией. При столкновениях молекул будет иметь место тенденция к выравниванию энергии молекул обоих газов. Значит, молекулы первого газа в среднем при каждом столкновении будут увеличивать свою кинетическую энергию.

В межзвёздном пространстве намагниченные облака межзвёздного газа мы можем уподобить молекулам. Кинетическая энергия такой «молекулы» из-за её колоссальной массы будет во много раз больше, чем энергия одной космической частицы. Поэтому при рассмотренных выше столкновениях энергия будет переходить от намагниченных облаков («блуждающих» магнитных полей) к частице. Следовательно, с течением времени космическая частица будет непрерывно ускоряться, и за сотни миллионов лет её энергия может вырасти в тысячи раз.

Но не все частицы будут ускоряться. В промежутках между столкновениями с намагниченными облаками частицы будут испытывать взаимодействия с атомами межзвёздного газа, сопровождающиеся потерей энергии. Очевидно, что если потери энергии за время между двумя последующими столкновениями больше, чем выигрыш энергии при одном столкновении с намагниченным облаком, частица вообще не будет ускоряться, а будет с течением времени только тормозиться. Оказывается, только при условии, что энергия космической частицы превышает некоторое критическое значение, потери энергии будут меньше, чем выигрыш, и, следовательно, частица будет ускоряться. Это критическое значение энергии различно для различных сортов космических частиц. Например, для протонов оно значительно меньше, чем для тяжёлых ядер. Если протоны будут иметь начальную энергию, в сотни раз меньшую, чем та, которая наблюдается у большинства первичных космических протонов, то они будут ускоряться при столкновениях с намагниченными облаками межзвёздного газа.

Среди первичных космических частиц иногда наблюдаются такие, у которых энергия в миллионы раз больше, чем у средних частиц. Теория Ферми хорошо объясняет как само наличие таких частиц, так и их относительное количество. Это — просто те космические частицы, кото-

рые значительно дольше блуждали в нашей Галактике, чем средние частицы *). Следовательно, они испытали значительно большее число столкновений с блуждающими магнитными полями и поэтому смогли накопить такое большое количество энергии.

Таким образом, теория Ферми остроумно объяснила ряд наблюдаемых особенностей космических лучей. Однако эта теория всё-таки не решает основного вопроса об источниках космических лучей. Она даёт лишь эффективный механизм ускорения космических протонов, но, оказывается, необходимо, чтобы в межзвёздное пространство непрерывно поступали порции космических частиц сравнительно больших энергий, которые дальше будут ускоряться механизмом Ферми.

В настоящее время благодаря успехам радиоастрономии намечаются принципиально новые пути решения проблемы происхождения космических лучей. Об этом будет рассказано в следующей главе.

Советский астрофизик С. Б. Пикельнер значительно развил наши представления о межзвёздных магнитных полях. До работ С. Б. Пикельнера предполагали, что межзвёздные магнитные поля имеются только в облаках межзвёздного газа. Но эти облака сосредоточены в нашей Галактике в виде тонкого слоя около галактической плоскости. Если межзвёздные магнитные поля сосредоточены только в этих облаках, то космические лучи не будут удержаны в Галактике; стоит только космической частице в результате столкновения с облаком получить скорость, направленную под значительным углом к галактической плоскости, и она навсегда покинет пределы нашей звёздной системы. Чтобы космические частицы были удержаны в Галактике, магнитные поля должны существовать и в пространстве между облаками межзвёздного газа.

В пространстве между облаками находится весьма разреженный газ с плотностью примерно в сто раз

*) Выше мы говорили, что средний срок «жизни» космической частицы — около ста миллионов лет — определяется столкновениями с ядрами межзвёздных атомов. Но это — средний срок жизни; по случайным причинам некоторые частицы могут и дольше существовать, не сталкиваясь с ядрами.

меньшей, чем в облаках. Воспользуемся соотношением между плотностью кинетической и магнитной энергий, приведённым на стр. 200. Так как плотность газа между облаками мала, то для того, чтобы плотность кинетической энергии в этой среде была такая же, как и в облаках, необходимо, чтобы скорость движения была большой. Если облака межзвёздного газа движутся со средней скоростью около 5 км/сек , то разреженная среда между облаками находится в состоянии беспорядочного движения со скоростями порядка 50 км/сек . Такие большие скорости позволяют этой среде подниматься очень высоко над галактической плоскостью, — по крайней мере на 20—30 тысяч световых лет, между тем как медленно движущиеся более плотные облака межзвёздного газа поднимаются всего лишь на 200—300 световых лет. Магнитные поля, заключённые в разреженной межоблачной среде, поднимаются вместе с нею на значительную высоту. Таким образом, «блуждающие» магнитные поля образуют в нашей звёздной системе сферическую систему. Бросается в глаза поразительное сходство этого распределения с пространственным распределением второй составляющей радиоизлучения Галактики. Это сходство оказывается не случайным.

До сих пор мы говорили только о положительно заряженных ядрах, имеющих в составе первичных космических частиц. Имеются ли среди этих частиц отрицательно заряженные частицы — электроны?

Для обнаружения в составе первичных космических частиц электронов были поставлены специальные опыты. Они дали отрицательный результат. Если среди наблюдавшихся первичных космических частиц и имеются электроны, то они составляют не больше чем $1/500$ от космических протонов.

Но значит ли это, что в межзвёздном пространстве вообще нет первичных космических электронов? Оказывается, нет. В самом деле, если заряженные частицы космических лучей пробретают свою энергию за счёт ускорения в космических электромагнитных полях, то любой источник космических лучей должен поставлять в межзвёздное пространство одинаковое количество электронов и протонов. Если бы от источника уходило в меж-

звёздное пространство больше протонов, чем электронов, то у источника возник бы отрицательный заряд, который препятствовал бы дальнейшему выходу протонов, и наоборот, способствовал бы усиленному выходу электронов. Очень быстро наступило бы равновесие, при котором число вылетающих электронов и протонов было бы одинаково. Следовательно, источник космических протонов должен одновременно быть и источником космических электронов.

Но в межзвёздном пространстве судьба электронов и протонов будет различна. Протоны, энергия которых превышает некоторое критическое значение, будут при столкновениях с «блуждающими» магнитными полями постепенно ускоряться до очень больших значений энергий, а электроны при подобного рода столкновениях, оказывается, практически ускоряться не будут. Дело в том, что потери энергии у электронов в промежутках времени между столкновениями с межзвёздными магнитными полями будут гораздо больше, чем у протонов, и поэтому они будут непрерывно тормозиться.

По каким же причинам космические электроны теряют так много энергии? Выяснилось, что наряду с потерями, вызванными ионизацией межзвёздных атомов путём столкновения (что вызывает потери энергии у протонов), имеются ещё два типа потерь, характерных только для электронов. Во-первых, для космических электронов «опасны» столкновения с обыкновенными квантами видимого света, испущенными звёздами и заполняющими Галактику. Во-вторых, двигаясь в слабых межзвёздных полях, электроны будут излучать электромагнитные волны и тем самым уменьшать свою энергию. При таких условиях космические электроны будут испускать излучение всех длин волн, т. е. непрерывный спектр. Но больше всего они будут излучать около определённой длины волны, зависящей от кинетической энергии электрона и от напряжённости межзвёздного магнитного поля.

Оказывается, что если кинетическая энергия электрона раз в десять меньше, чем кинетическая энергия большинства наблюдаемых на Земле первичных космических частиц, а напряжённость магнитного поля — такая,

какую следует ожидать в межзвёздном пространстве, то космический электрон больше всего будет излучать в области метровых волн.

В 1950 г. шведские учёные Альфвен и Герлофсон высказали гипотезу, что излучение космических электронов в межзвёздных магнитных полях есть причина радиоизлучения Галактики. При этом они не разделяли наблюдаемое радиоизлучение Галактики на две составляющие. Немного позже независимо от них ту же гипотезу высказал немецкий астрофизик Кипенхойер.

Однако указанные работы содержали ряд ошибок и неточностей. В 1951 г. советский физик В. Л. Гинзбург выполнил правильный расчёт. При этом он опирался на работы советских физиков, в особенности — В. В. Владимирского. В. Л. Гинзбург показал, что если принять количество космических электронов таким же, как и количество космических протонов, наблюдаемых около Земли, а напряжённость межзвёздных магнитных полей в сотни тысяч раз меньшей напряжённости магнитного поля Земли, то их радиоизлучение будет примерно равно наблюдаемому радиоизлучению Галактики.

Почему же на Земле до сих пор не удавалось наблюдать электроны в первичных космических лучах? Как мы уже отмечали, потери энергии у космических электронов в межзвёздном пространстве гораздо больше, чем у протонов, а ускоряться при столкновениях с «блуждающими» магнитными полями космические электроны в отличие от протонов не будут. Поэтому энергия космических электронов будет значительно меньше, чем у космических протонов. Но магнитное поле Земли мешает попадать на Землю заряженным космическим частицам, если их энергия недостаточно велика. Однако в районы магнитных полюсов Земли могут попадать космические частицы и со сравнительно малой энергией. Эти области Земли трудно доступны, но не подлежит сомнению, что там будут поставлены специальные опыты с целью обнаружить космические электроны, которые, по разным данным, должны находиться в составе первичных космических частиц.

Так радиоастрономия направляет исследования такой, казалось бы, далёкой от неё области науки, как физика космических лучей.

Молодой советский учёный Г. Г. Гетманцев показал, что спектральный состав излучения космических электронов в слабых межзвёздных магнитных полях такой же, кака и у наблюдаемого радиоизлучения Галактики. Важнейшее значение для отождествления излучения космических электронов в межзвёздных полях со второй составляющей радиоизлучения Галактики имеют исследования С. Б. Пикельнера, касающиеся пространственного распределения межзвёздных магнитных полей в нашей звёздной системе. Это распределение, как мы уже указывали, тождественно пространственному распределению источников второй составляющей радиоизлучения.

Таким образом, значительная часть радиоизлучения Галактики тесно связана с космическими лучами. Вторая составляющая радиоизлучения Галактики является «побочным продуктом» космических лучей, точнее говоря, результатом торможения космических электронов в межзвёздных магнитных полях. Открывается возможность изучения космических лучей не вблизи Земли, а в глубинах Галактики — по испускаемым ими радиоволнам.

Более того, как мы увидим в следующей главе, радиоастрономия указала на те небесные тела, где образуются первичные космические лучи, которые затем попадают в межзвёздное пространство. Радиоастрономия позволила как бы «увидеть» космические лучи там, где они рождаются!

До сравнительно недавнего времени проблема космических лучей была проблемой чисто физической, но теперь она становится проблемой астрономической. Не подлежит сомнению, что наши знания об этом удивительном явлении природы в скором времени значительно пополнятся.

ГЛАВА XI

РАДИОТУМАННОСТИ

Итак, как установлено в VII и X главах этой книги, как первая (газовая), так и вторая составляющие радиоизлучения Галактики возникают в межзвёздной среде. Представления о том, что вторая составляющая галактического радиоизлучения создаётся «радиозвёздами» — совершенно особым и притом весьма многочисленным классом звездообразных космических объектов, исключительно мощно излучающих в радиодиапазоне и не отождествляемых ни с какими оптическими объектами — привели к неприемлемым выводам.

На каких наблюдательных фактах основывалось предположение, что «радиозвёзды» — это космические тела, обладающие размерами, сравнимыми с размерами обычных звёзд?

Во-первых, изменения со временем наблюдаемой величины потока излучения от «радиозвёзд» приписывались их действительной переменности. Отсюда следовал вывод о сравнительной незначительности линейных размеров «радиозвёзд». Но когда выяснилось, что изменения потока излучения — это мерцание «радиозвёзд» в земной ионосфере, этот аргумент полностью отпал.

Во-вторых, представления о звёздной природе «радиозвёзд» опирались на невозможность определить их угловые размеры. Создавалось впечатление, что они исчезающе малы, как это имеет место у звёзд. Однако из-за ограниченной разрешающей способности радиоинтерферометров можно было лишь утверждать, что угловые размеры «радиозвёзд» меньше $5'$, тогда как даже у самых больших и близких оптических звёзд угловые размеры несравненно меньше — около $0'',01$. Из наблюдаемого

факта, что угловые размеры «радиозвёзд» меньше $5'$, было весьма преждевременным делать вывод, что это — объекты звёздных размеров. Как мы только что видели, угловые размеры звёзд, по крайней мере, в десятки тысяч раз меньше!

Окончательный удар по гипотезе «радиозвёзд» нанесло измерение их угловых размеров, выполненное в 1952 г. Выяснилось, что угловые размеры нескольких «радиозвёзд» — около $5'$, т. е. значительно больше, чем это можно было предполагать. Это объясняется тем, что обычные радиоинтерферометры, описанные в главе II, непригодны для измерения источников радиоизлучения малых угловых размеров. Например, то обстоятельство, что у двухантенного радиоинтерферометра обе антенны неизбежно имеют несколько различные свойства, мешает измерению угловых размеров точечных источников, хотя этими же интерферометрами довольно хорошо определяются их координаты.

Для определения угловых размеров самых мощных «радиозвёзд» в созвездиях Лебеда и Кассиопеи английские исследователи изготовили специальный интерферометр, в котором расстояние между антеннами во время наблюдений непрерывно меняется, что устраняет ошибки, возникающие из-за неодинаковости антенн радиоинтерферометра.

На рис. 99 изображены результаты измерений размеров источников радиоизлучения в созвездиях Лебеда и Кассиопеи. Оказалось, что эти источники имеют различную форму. Угловой диаметр «радиозвезды» в созвездии Лебеда меняется от $35''$ до $2'10''$, так что он имеет вытянутую форму *), тогда как источник в созвездии Кассиопеи (самый мощный) имеет почти круглую форму с диаметром около $4'$.

Подобные измерения были проведены и в отношении других источников. Угловой диаметр источника в созвездии Тельца оказался равным $4'$, а источника в созвездии Девы — $5'$. Интересные результаты были получены для мощного источника в Центавре. У этого источ-

*) Дальнейшие наблюдения позволили уточнить форму этого источника (см. ниже).

ника имеется яркое ядро диаметром около $6'$. Яркость источника значительно уменьшается по мере удаления от его центра, но радиоизлучение можно проследить на расстоянии до 1° от центра источника. Таким образом, этот источник занимает на небе площадь, по крайней мере в 16 раз бóльшую, чем Солнце. Хороша «радиозвезда»! Интересный источник радиоизлучения в южном созвездии Печи имеет угловой диаметр около $15'$.

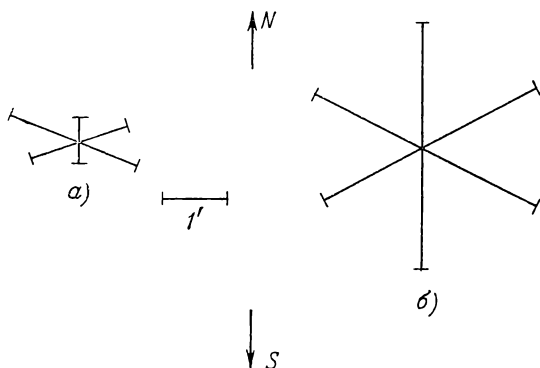


Рис. 99. Результаты измерений угловых размеров точечных источников радиоизлучения в созвездиях Лебедя (а) и Кассиопеи (б). Отрезок $1'$ указывает масштаб рисунка.

На небе он занимает площадь, только в четыре раза меньшую, чем Солнце.

Таким образом, все мощные «радиозвёзды» имеют значительные угловые размеры. У более слабых «радиозвёзд» угловые размеры пока измерить нельзя по техническим причинам, но не приходится сомневаться, что и у них угловые размеры порядка $1'$.

Недавно были предприняты новые успешные попытки определения из наблюдений «формы» нескольких источников радиоизлучения. Уже из рис. 99 видно, что распределение яркости по излучающей области для различных источников весьма различно. Исключительно интересным оказалось распределение яркости у источника Лебедь — А. Сравнительно грубые наблюдения позво-

лили сделать вывод, что этот источник довольно вытянут (см. рис. 99). Более точные наблюдения позволили разделить (или, как говорят в астрономии, «разрешить») этот мощный источник на два очень близких источника. На рис. 100 схематически представлены результаты этих наблюдений. Заштрихованные прямоугольники означают области, откуда к нам приходит мощное радиоизлучение от этого источника. Разумеется, эти области не имеют такой правильной геометрической формы, какая изображена на рис. 100, являющемся схемой. Интересно отметить, что поверхностная яркость этого «двойного» источника очень велика: поток излучения от него, как уже говорилось в главе IX, всего лишь в два раза меньше, чем от «спокойного» Солнца, между тем как его «площадь» примерно в 1000 раз меньше солнечного диска. Следовательно, поверхностная яркость этого источника раз в 500 больше поверхностной яркости «спокойного» Солнца! Образно выражаясь, этот источник в радиолучах «ослепительно ярк».

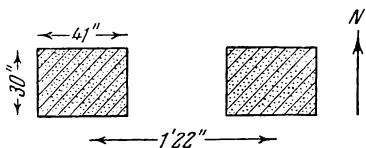


Рис. 100. Форма источника радиоизлучения Лебедь — А.

Рассматривая рис. 100, поражаешься грандиозным успехам радиоастрономии. Ведь ещё в 1946 г., когда был случайно обнаружен источник радиоизлучения Лебедь — А, можно было сделать только вывод, что его угловые размеры меньше 2° . Через пару лет уже можно было сделать вывод, что угловые размеры этого источника меньше $5'$, через шесть лет после открытия был оценён порядок величины его углового диаметра, а ещё через год изучены тонкие детали распределения «яркости» в нём, причём размеры этих деталей около половины минуты дуги!

Новые наблюдения подтвердили, что источник Кассиопеи — А в радиолучах представляет собой круглый диск диаметром около $5'$. Источники Телец — А и Дева — А, как выяснилось, имеют вытянутую форму; излучающие области у них ограничены эллипсами. В своё время невозможность отождествить бóльшую часть «радиозвёзд» с какими-либо оптическими объектами

считалась веским аргументом в пользу представления о многочисленном классе небесных тел — «радиозвёзд». Но три мощных точечных источника были сразу же отождествлены с замечательными туманностями, а четыре слабых — с внегалактическими туманностями.

Однако серьёзного значения этому отождествлению в то время не придавали. В настоящее время несомненно,

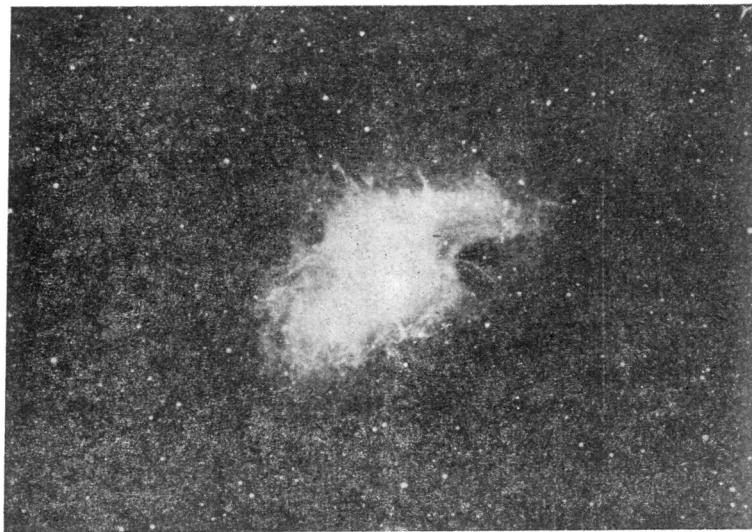


Рис. 101. Фотография Крабоподобной туманности.

что это отождествление имеет решающее значение для всей проблемы «радиозвёзд», оказавшихся радиотуманностями. Поэтому важно остановиться на природе туманностей, с которыми отождествляются точечные источники.

Едва ли не самой замечательной туманностью на небе является знаменитая Крабоподобная туманность, отождествляемая с мощным точечным источником Телец — А. На рис. 101 приведена фотография этой туманности, полученная при помощи телескопа с диаметром зеркала в 250 см. Своё название туманность получила из-за свое-

образной формы. Эта туманность замечательна тем, что она появилась на небе сравнительно недавно.

Как установлено по древним китайским и японским хроникам, в 1054 г. вспыхнула необыкновенно яркая, до тех пор никогда не наблюдавшаяся звезда. По своей яркости она превосходила Венеру — третье по яркости светило на небе после Солнца и Луны. Эта звезда была настолько яркой, что была видна даже днём! Она светила на небе около полугода, а потом постепенно угасла. Древние наблюдатели не могли не отметить такое удивительное явление и прилежно занесли в летописи все обстоятельства вспышки «звезды-гостыи», а также её положение на небе. Тогда ещё не было никаких оптических приборов, и положение необыкновенной звезды было указано на небе довольно грубо. Оно очень близко совпадает с видимой в настоящее время Крабовидной туманностью.

Наблюдения показали, что Крабовидная туманность расширяется. Это можно доказать, сравнивая две фотографии туманности, разделённые промежутком времени в 20—30 лет. Угловое перемещение волокон туманности ничтожно мало, но это потому, что туманность удалена от нас на расстояние в 5000 световых лет. Если мы это учтём, то окажется, что туманность расширяется с огромной скоростью — свыше 1000 км/сек — во все стороны от центра. Зная скорость расширения, легко подсчитать, что около тысячи лет назад эта туманность должна была иметь ничтожные размеры. Но ведь как раз тогда и вспыхнула на месте Крабовидной туманности замечательная звезда, отмеченная китайскими и японскими летописцами!

Таким образом, Крабовидная туманность — это остатки грандиозной космической катастрофы, имевшей место 5900 лет назад в этой части неба (вспомним, что свет идёт от Крабовидной туманности до Земли 5000 лет).

Крабовидная туманность обладает рядом таких свойств, которые делают её совершенно непохожей на другие газовые туманности в нашей Галактике. Никакая другая туманность не обладает такими огромными скоростями движения газовых масс (за одним исключением, о котором речь будет дальше). Обычно в туманностях

скорости движения газов не превышают десятка километров в секунду.

Крабовидная туманность состоит как бы из двух взаимопроникающих частей: сплошной аморфной массы и сети отдельных волокон, причём расширяется именно сеть волокон. Сеть волокон расположена во внешних частях туманности и как бы охватывает её в виде ажурной

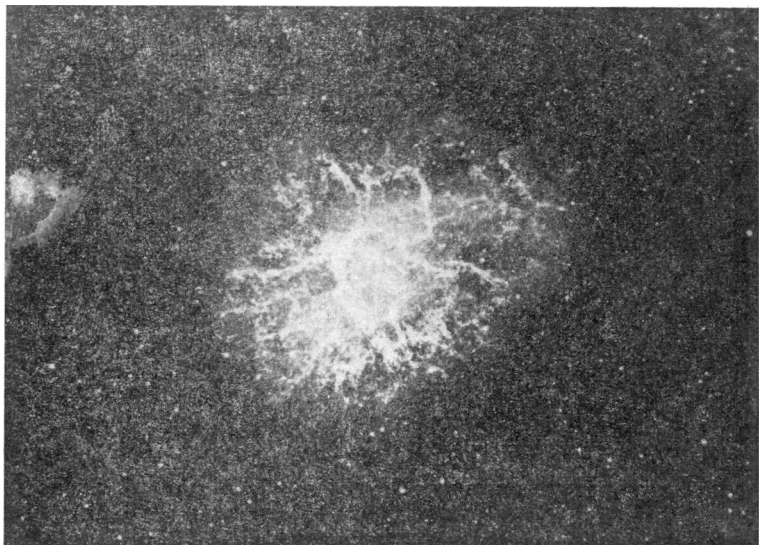


Рис. 102. Фотография Крабовидной туманности, полученная с фильмом, пропускающим излучение волокон.

расширяющейся оболочки. Спектры волокон и сплошной диффузной части туманности совершенно различны. Если спектр волокон состоит из одних линий излучения и мало отличается от спектра других газовых туманностей в нашей Галактике, то диффузная масса туманности излучает непрерывный спектр без всяких следов линий излучения или поглощения. Приблизительно 95% света от туманности падает на долю непрерывного спектра её диффузной части. Обычно у газовых туманностей непрерывный спектр очень слаб.

На рис. 102 и 103 приводятся две фотографии Крабовидной туманности, снятые через фильтры. Фотография на рис. 102 получена с фильтром, пропускающим линии излучения волокон. Эта фотография гораздо лучше выявляет сеть волокон Крабовидной туманности, чем фотография на рис. 101, снятая без фильтра. На рис. 103 приведена фотография Крабовидной туманности, снятая



Рис. 103. Фотография Крабовидной туманности, полученная с фильтром, пропускающим только излучение диффузной части.

через фильтр, пропускающий спектральную область, где нет никаких линий, излучаемых волокнами. Фотография эта совершенно отлична от приведённой на рис. 102. Никаких волокон на этой фотографии нет. Мы видим только аморфную массу, излучающую непрерывный спектр. Эта масса не является тонкой оболочкой, подобно сетке волокон, а занимает весь объём туманности.

До самого последнего времени считалось, что свечение Крабовидной туманности — это свечение очень горячего газа, возбуждаемого ещё более горячей звездой,

находящейся в центре туманности, — там действительно есть две очень слабые звёздочки 16-й величины. Можно предположить, что одна из этих звёзд — та самая, которая 5900 лет назад так ярко вспыхнула. Однако при этом получаются совершенно удивительные выводы о природе как самой туманности, так и находящейся в её центре звезды.

Согласно этим выводам необходимо принять, что кинетическая температура газов в самой туманности исключительно велика — $150\,000^\circ$ и даже больше. У других туманностей кинетическая температура меньше по крайней мере в десять раз. Далее, получалось, что температура поверхности звезды, расположенной внутри туманности, около $500\,000^\circ$ — величина непомерно большая. Для того чтобы объяснить, почему такая раскалённая звезда еле видна даже в хорошие телескопы, принимали, что она очень маленькая — немногим больше земного шара. Это допущение приводит к чудовищно большой средней плотности этой звезды, в сотни тысяч раз большей плотности воды. Считалось, что масса Крабовидной туманности в 15 раз больше массы Солнца.

При первой же попытке осмыслить эти свойства Крабовидной туманности мы сталкиваемся с противоречиями. Укажем, например, на следующее. Судя по спектру, кинетическая температура волокон — не выше $10\,000^\circ$, а плотность их очень низка, меньше, чем плотность диффузной массы. Представляется совершенно непонятным, как разреженный холодный газ вот уже 1000 лет движется через более плотный, очень горячий газ — диффузную массу туманности. Есть и другие, не менее серьёзные трудности. Дальше мы ещё вернёмся к этому вопросу.

Что же за катастрофа произошла 5900 лет назад в той области неба, где сейчас находится Крабовидная туманность? Астрономам такие катастрофы известны. Это — вспышки сверхновых звёзд. В нашей звёздной системе за последние 1000 лет наблюдались три такие вспышки: в 1054, 1572 и 1604 гг. Это явление сравнительно редкое. Гораздо чаще вспыхивают обычные новые звёзды — до 100 раз в год.

Вспышка обычной новой звезды — весьма грандиозное явление природы. По каким-то причинам оболочки звёзд некоторых типов начинают вдруг раздуваться, их поверхность увеличивается в сотни тысяч раз и примерно во столько же раз увеличиваются потоки излучения, испускаемого звёздами. Через некоторое время оболочки рассеиваются в пространстве, и блеск звезды резко падает. Масса, выброшенная таким образом новой звездой, составляет примерно $1/100\ 000$ массы Солнца.

Грозит ли подобная катастрофа нашему Солнцу? Нет! Как выяснилось, способностью вспыхивать обладают не все звёзды, а только особая, сравнительно немногочисленная группа очень ярких звёзд, к которой наше Солнце заведомо не принадлежит. Каждая из таких звёзд на протяжении своей эволюции вспыхивает много раз. Промежутки времени между вспышками — приблизительно несколько тысяч лет.

Явление вспышки сверхновой звезды несравненно более грандиозно, чем вспышка обычной новой звезды. Во время максимума блеска сверхновые испускают света в десятки тысяч раз больше, чем обычные новые. Большинство сведений о вспышках сверхновых почерпнуто из наблюдений над другими звёздными системами, подобными нашей. Последняя вспышка сверхновой в нашей Галактике произошла в 1604 г., когда почти никакими инструментами астрономы не располагали, да и уровень науки был очень низок. В 1883 г. в ближайшей к нам звёздной системе — туманности Андромеды — вспыхнула сверхновая, которая на пределе видимости могла наблюдаться невооружённым человеческим глазом. Это значит, что одна звезда испускала света почти столько же, сколько десятки миллиардов обычных звёзд, входящих в состав туманности Андромеды. Не будет преувеличением сказать, что мы пока не знаем более величественных явлений природы, чем вспышки сверхновых звёзд.

Пока мы ещё далеки от понимания причин вспышек сверхновых звёзд. Но то обстоятельство, что на месте сверхновой звезды оказался довольно мощный источник радиоизлучения, весьма многозначительно.

Совершенно другой природы оказались туманности в Центавре и Деве, отождествляемые с мощными

источниками радиоизлучения. Они называются порядковым номером хорошо известного в астрономии каталога туманностей NGC. Туманность в созвездии Центавра—это NGC 5128, а в созвездии Девы — NGC 4486. Эти туманности в отличие от Крабовидной расположены далеко за пределами нашей звёздной системы — Галактики. Поэтому они называются «внегалактическими туманностями» или галактиками (см. главу VI). Однако это не «обыкновенные» галактики (например, типа туманности Андромеды, нашей Галактики и т. д.), а особые, по каким-то причинам исключительно сильно излучающие в радиодиапазоне. Их «радиосветимость» в сотни и тысячи раз больше, чем у обыкновенных галактик*). Можно с полным правом назвать их «радиогалактиками». В настоящее время выяснилось, что большинство слабых источников радиоизлучения, особенно расположенных вдали от полосы Млечного Пути, является радиогалактиками. О радиогалактиках будет подробно рассказано в следующей главе. В этой главе речь будет идти только об источниках, расположенных в нашей звёздной системе.

Итак, три мощных точечных источника радиоизлучения, отождествляемые с тремя туманностями, позволили выявить два типа оптических объектов, которые могут быть источником радиоизлучения. Это, во-первых, остатки сверхновых звёзд, находящиеся в нашей Галактике, а во-вторых — особые внегалактические туманности типа NGC 5128 и NGC 4486, которые можно назвать радиогалактиками. Возникают естественные вопросы: можно ли отождествить другие точечные источники радиоизлучения с остатками сверхновых звёзд в нашей Галактике? С чем отождествить два самых мощных точечных источника в созвездиях Лебедя и Кассиопеи? Могут ли быть точечные источники, отличные как от остатков сверхновых звёзд, так и от радиогалактик?

Как уже упоминалось, за последние 1000 лет, кроме сверхновой 1054 г., вспыхнули ещё две сверхновые: в 1572 г. и 1604 г. В 1952 г. после тщательных поисков на месте

*) Под «радиосветимостью» какого-либо источника мы будем понимать количество энергии, излучённой этим источником по всем направлениям за одну секунду в радиодиапазоне.

сверхновой 1572 г. был обнаружен точечный источник радиоизлучения, в 10 раз менее мощный, чем Телец — А, отождествляемый с Крабовидной туманностью. Интересно заметить, что на месте сверхновой 1572 г. (это место известно очень точно, так как сверхновая наблюдалась знаменитым датским астрономом, весьма искусным наблюдателем — Тихо Браге) никакой сколько-нибудь яркой туманности не найдено. Блеск сверхновой 1572 г. был в 10 раз меньше, чем сверхновой 1054 г., т. е. во столько же раз, во сколько поток радиоизлучения от остатка этой сверхновой меньше потока радиоизлучения от Тельца — А. Сверхновая 1604 г., наблюдавшаяся Кеплером, вспыхнула в южной части неба, которая пока ещё с достаточной тщательностью не исследовалась.

В конце 1951 г. американские астрофизики Бааде и Минковский с помощью величайшего в мире оптического телескопа — рефлектора обсерватории Паломар (диаметр зеркала у этого телескопа 5 м) сфотографировали область неба, где находятся самые мощные источники радиоизлучения Лебедь — А и Кассиопея — А (см. стр. 176). На месте источника Лебедь — А они обнаружили две очень близко расположенные галактики 16—17-й величины, обладающие замечательными особенностями (подробнее см. гл. XII).

На месте источника Кассиопея — А при фотографировании на пластинках, чувствительных к синим лучам, было обнаружено небольших размеров (около 3 минут дуги) волокно туманности, имеющее форму арки.

Недавно было получено новое убедительное доказательство того, что источник Лебедь — А находится за пределами нашей Галактики, в то время как источник Кассиопея — А находится в её пределах и притом сравнительно близко от Солнца.

Как мы видели в главе VIII, анализ радиоизлучения водородной линии позволил, между прочим, выявить спиральную структуру нашей Галактики. В частности, в направлениях, близких к направлению на источники Лебедь — А ($l \approx 40^\circ$) и Кассиопея — А ($l \approx 80^\circ$), были получены контуры водородной радиолинии, приведённые на рис. 89. Из этого рисунка видно, что в обоих этих направлениях луч зрения пересекает две спиральные ветви.

После этого исследовалось излучение от двух вышеуказанных мощных источников в области 21 см. Следовало ожидать, что стоящие на пути распространения радиоволн от источников облака межзвёздного водорода произведут значительное поглощение.

Действительно, в случае источника Лебедь — А поглощение наблюдалось в двух спектральных областях, соответствующих двух указанным на рис. 89 максимумам контура, т. е. двум ветвям спирали. Это означает, что источник радиоизлучения находится дальше, чем вторая, более удалённая ветвь спирали. Следовательно, он находится за пределами нашей звёздной системы, ибо в этом направлении у нашей Галактики больше спиральных ветвей нет.

Совершенно иная картина наблюдалась в случае источника Кассиопея — А. Здесь поглощение имело место только в одной спектральной области, соответствующей ближайшей к нам ветви спирали. Следовательно, источник радиоизлучения находится либо между первой и второй ветвями спирали, либо даже внутри первой ветви. Поэтому расстояние до него не превышает нескольких тысяч световых лет.

Этот метод оценки расстояния до дискретных источников радиоизлучения, несомненно, будет играть в дальнейшем значительную роль.

В оптической астрономии применяются аналогичные методы определения расстояния до звёзд по имеющимся в их спектре линиям межзвёздного кальция (см. главу VI). Принципиально радиоастрономический метод совпадает с оптическим.

Фотографирование области неба, где находится источник Кассиопея — А на пластинках, чувствительных к красным лучам, позволило обнаружить многочисленные «клочья» и «обрывки» туманности, имеющие очень небольшие угловые размеры. Некоторые из них имеют вид вытянутых полосок длиной в 25", размеры других — всего лишь доли секунды дуги (т. е. почти такие же, какие имеют звёзды на фотографиях). Яркость «обрывков» также меняется в весьма широких пределах — слабейшие из них едва заметны. Интересно, что «обрывки» видны только в красных лучах. Эти своеобразные «обрывки» туманности расположены внутри окружности

с диаметром $6',3$. Центр этой окружности идеально совпадает с центром самого мощного источника радиоизлучения Кассиопея — А. Угловой диаметр источника радиоизлучения — около $5'$ — весьма близок к угловому диаметру области, занятой описанными выше «обрывками» туманности. Не оставляет никаких сомнений правильность отождествления источника радиоизлучения Кассиопеи — А с этой замечательной группой «обрывков» туманности. На рис. 104 приведена их фотография, снятая в красных лучах.

Были получены спектры трёх «обрывков» туманности (на рис. 104 они помечены стрелками). Эти спектры оказались единственными в своём роде (см. рис. 105, на котором приведена фотография спектра самого большого волокна туманности). Обращает на себя внимание очень размытый характер линий и их весьма большая ширина, вызванная явлением Допплера (см. главу VIII) и указывающая на огромные, беспорядочные скорости движения излучающих газов (до 4000 км/сек). Интересно, что спектры «обрывков», наблюдаемых при помощи чувствительных к красным лучам пластинок, совсем не похожи на спектр этого волокна. На рис. 106 приведена фотография спектра такого «обрывка». На ней видны три линии: в центре красная водородная линия, а по бокам — две линии, принадлежащие ионизованному азоту. В спектре волокна водородных линий нет. Ширина этих линий гораздо меньше, чем в спектре волокна, и указывает на скорости внутренних движений газовых масс около 400 км/сек . В то время как скорости внутренних движений газов в волокне и в «обрывках» туманности очень велики, скорость расширения всей системы «клочков» туманности не больше, чем 100 км/сек . Заметим, что у Крабовидной туманности скорость расширения 1000 км/сек и больше чем в три раза превосходит скорость внутренних движений.

В конце 1953 г. снимки были повторены. Хотя со времени предшествующего фотографирования прошло всего два года, отдельные «узлы», образующие описанное выше «аркообразное» волокно, изменили свой вид. Это указывает на сравнительную близость туманности к Земле. Если при скорости 3000 км/сек какой-нибудь

узел в волокне за год сместится на $0''5$ дуги, то, как следует из простых геометрических соображений, расстояние до него будет около 1200 световых лет, т. е. в 3—4 раза меньше, чем до Крабовидной туманности.

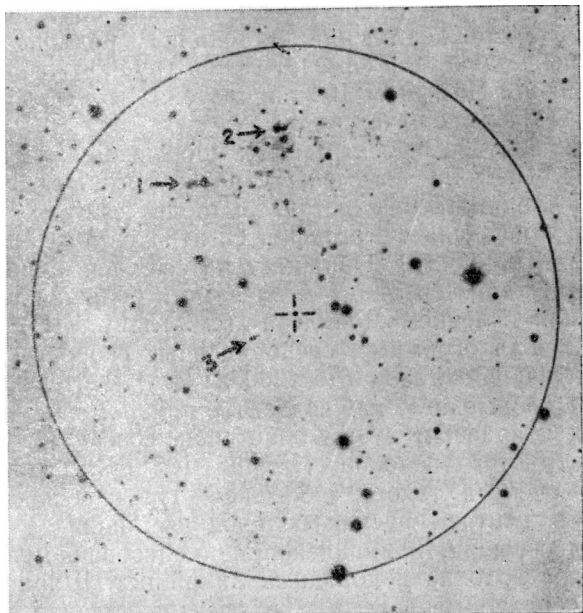


Рис. 104. Фотография радиотуманности Кассиопея — А. «Волокно» и «обрывки» туманности заполняют область неба, ограниченную окружностью. Стрелка «2» даёт положение самого большого и яркого волокна, спектр которого приведён на рис. 105. Стрелки «1» и «3» дают положения «обрывков» туманности. Фотография спектра «обрывка» «1» приведена на рис. 106. Любопытно, что точно в центре радиотуманности находится звёздочка 18-й величины.

Что же за картину мы наблюдаем в этой части неба? Американские астрофизики, открывшие эту туманность, считают, что она является совершенно исключительным объектом и ни с чем подобным астрономы не встречались.

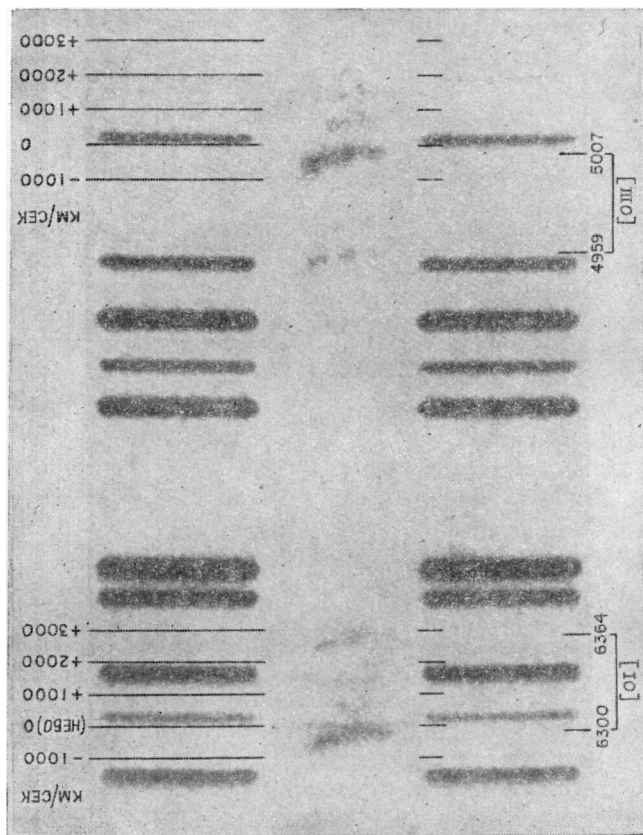


Рис. 105. Фотография спектра волокна радиотуманности Кассиопея — А (в середине). Слева две линии кислорода, справа — две линии дважды ионизованного кислорода, которые наблюдаются обычно в спектрах газовых туманностей. Вверху фотографии приведена шкала, позволяющая непосредственно переводить ширины линий в скорости удаления (+) или приближения (—) излучающих газовых масс.

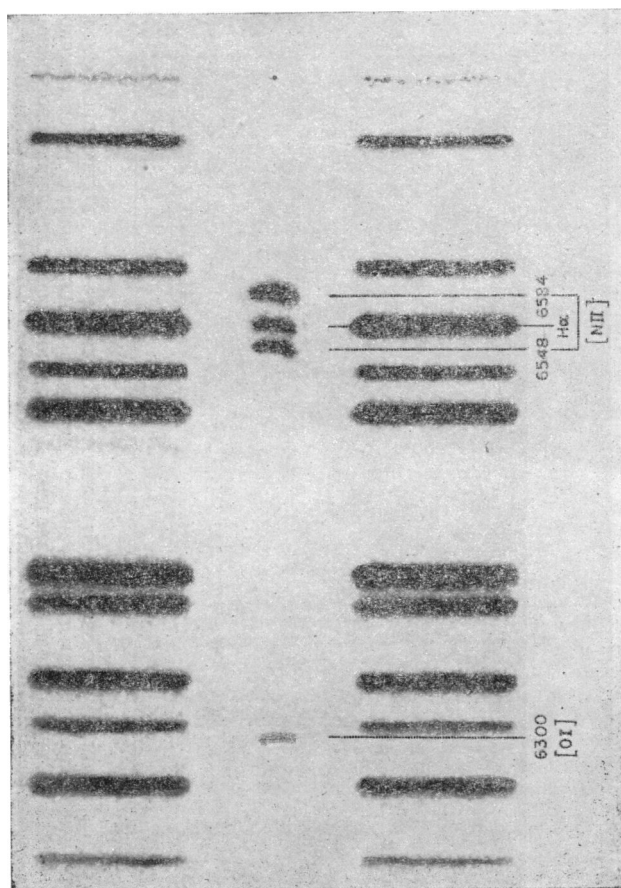


Рис. 106. Фотография спектра «обрывка» радиотуманности Кассиопея — А (в середине). Сверху и снизу приведены фотографии так называемого «спектра сравнения», полученного от земного источника света. Длины волн линий спектра сравнения хорошо известны, что позволяет путём сравнения найти длины волн туманности. Три яркие линии в правой части спектра «обрывка» принадлежат ионизованному азоту и водороду. Слева видна слабая линия кислорода.

То обстоятельство, что скорость расширения «кусков» туманности много меньше скорости беспорядочных движений газовых масс, по их мнению, исключает возможность считать этот объект остатком вспышки сверхновой звезды. Ведь в Крабовидной туманности (несомненно, являющейся остатком вспышки сверхновой) мы наблюдаем полностью противоположную картину: там скорость расширения значительно больше скоростей внутренних движений!

Автор этой книги, однако, не согласен с таким выводом. Уже само положение «обрывков» туманности внутри почти правильной окружности наводит на мысль, что они каким-то образом произошли при центральном взрыве. Смущающее Бааде и Минковского обстоятельство — малость скорости расширения по сравнению со скоростью внутренних движений — можно объяснить торможением разлетающейся при вспышке сверхновой туманной оболочки межзвёздной средой. Повидимому, эта среда в области, где вспыхнула сверхновая Кассиопея—А, была гораздо более плотной, чем в окрестностях сверхновой 1054 г., остатком вспышки которой является Крабовидная туманность. Таким образом, мы полагаем, что туманность, наблюдаемая на месте мощного источника Кассиопея—А, как и Крабовидная туманность, является остатком вспышки сверхновой звезды. Но судьба выброшенных при этих вспышках оболочек была различна: оболочка Кассиопея—А почти затормозилась, хотя скорости внутренних движений остались очень большими, в то время как Крабовидная туманность — оболочка сверхновой 1054 г. — только едва начинает тормозиться.

Недавно было обнаружено ещё несколько источников радиоизлучения, которые были отождествлены с замечательными туманностями, — несомненно, остатками вспышек сверхновых звёзд. На рис. 107 приведена фотография туманности, носящей название IC 443. Собственно говоря, так называлась небольшая яркая часть туманности. Слабая часть туманности замечательной формы, вместе с яркой частью образующая почти правильное кольцо, была выявлена совсем недавно

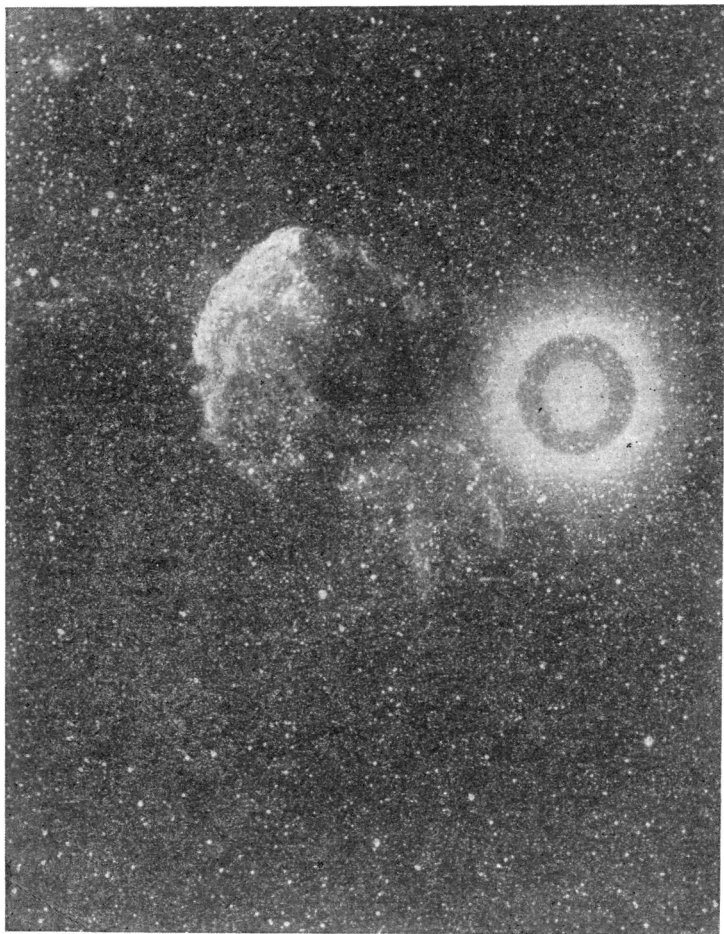


Рис. 107. Радиотуманность IC 443 + S 40. Справа виден очень яркий ореол от звезды η Близнецов, находящейся вблизи туманности.

благодаря исследованиям советских учёных — акад. Г. А. Шайна и В. Ф. Газе.

Полностью вся туманность называется «IC 443 + S 40» («S 40» означает, что эта туманность входит в Симеизский каталог туманностей под номером 40). Угловой диаметр кольца туманности — около $35'$. Такой же по размерам источник радиоизлучения совпадает по своему положению с этой туманностью. Поток радиоизлучения от этой туманности раз в пять меньше, чем от Крабовидной туманности. Так как угловой диаметр последней в шесть раз меньше, чем у IC 443 + S 40, то поверхностная яркость новой радиотуманности очень низка — раз в 200 меньше, чем у Крабовидной туманности.

Туманность IC 443 + S 40 имеет характерную тонковолокнистую структуру, как это ясно видно из рис. 107. Такую же структуру имеет и Крабовидная туманность. Был получен спектр этой туманности, позволивший выявить скорости внутренних движений излучающих газов, достигающие 100 км/сек. Расширения туманности обнаружено не было. Мы видим, что большие скорости внутренних движений являются характерной особенностью радиоизлучающих туманностей. Почти правильная кольцеобразная форма туманности в сочетании с её тонковолокнистой структурой говорит о том, что туманность возникла при центральном взрыве. Это может быть только вспышка сверхновой или новой звезды.

В созвездии Водолея был недавно обнаружен слабый, довольно протяжённый (угловые размеры около $1\frac{1}{2}^\circ$) источник радиоизлучения, после чего эта область специально была сфотографирована. При этом была обнаружена слабая кольцеобразная туманность таких же размеров, что и источник радиоизлучения.

Автор этой книги отождествил интересную туманность NGC 6357 с источником радиоизлучения, наблюдавшимся на волнах 3 м и 75 см. На рис. 108 приведена фотография этой туманности в красных лучах, полученная акад. В. Г. Фесенковым и Д. А. Рожковским на Алма-Атинской обсерватории. Угловой диаметр этой туманности $35'$. Она имеет характерную кольцеобразную форму, причём состоит из отдельных переплетающихся волокон. Замечательно, что в самом центре туманности



Рис. 108. Радиотуманность NGC 6357.

находится очень горячая звезда редкого типа. Повидимому, эта довольно яркая туманность — также остаток вспышки сверхновой. Не является ли находящаяся в центре кольца туманности NGC 6357 горячая звезда «бывшей сверхновой»? Этот интересный вопрос необходимо специально исследовать.

Таким образом, в настоящее время известен уже целый ряд источников радиоизлучения, расположенных в полосе Млечного Пути, которые можно отождествить с особыми туманностями — остатками вспышек сверхновых звёзд. На небе известно несколько очень слабых, тонковолокнистых туманностей, которые пока ещё не отождествлены с источниками радиоизлучения. Фотография на рис. 109 изображает известную группу волокнистых туманностей в созвездии Лебедя. Они также расположены вдоль некоторого кольца диаметром в 3° . Туманности эти расширяются со скоростью 75 км/сек .

Повидимому, это остаток некогда вспыхнувшей сверхновой звезды. Внутри кольца должен быть протяжённый источник радиоизлучения очень малой поверхностной яркости, что затрудняет его обнаружение (тем более, что в этой части неба яркость «газового» радиоизлучения галактики довольно велика).

Важно отметить, что радиотуманности — остатки вспышек сверхновых звёзд — являются сравнительно недолговечными образованиями. Расширяющиеся туманности постепенно тормозятся межзвёздной газовой средой и в конце концов рассеиваются в ней. При этом размеры радиотуманности растут, но ещё в большей степени уменьшается их поверхностная яркость. Спустя несколько тысяч лет (или десятков тысяч лет) радиотуманность «расплывается» настолько, что её поверхностная яркость уже почти неотличима от поверхностной яркости окружающего «фона» — общего радиоизлучения Галактики. Таким образом, радиотуманности — остатки вспышек сверхновых звёзд — в начале своего образования имеют сравнительно небольшие размеры и являются очень яркими объектами. Типичными представителями таких сравнительно «молодых» радиотуманностей являются Крабовидная туманность и Кассиопея—А. В конце своей эволюции — это протяжённые, слабые источники.

Возможно, что таким источником является радиотуманность в Водолее, о которой речь шла выше. Наконец, волокнистые туманности в Лебеде (см. рис. 109) яв-



Рис. 109. Тонковолокнистые туманности в созвездии Лебедя, — по-видимому, остатки некогда вспыхнувшей сверхновой звезды.

ляются примером уже почти совсем «расплывшейся», «старой» радиотуманности. Породившая их вспышка сверхновой звезды произошла, повидимому, около 20 000 лет назад. Среднее «время жизни» таких радио-

туманностей — несколько тысяч лет — в сотни тысяч и миллионы раз меньше возраста нашей звёздной системы. Коль скоро возраст радиотуманностей сравнительно невелик, можно было попытаться отождествить некоторые радиотуманности со сверхновыми звёздами, вспыхнувшими в давние времена и когда-то наблюдававшимися людьми. Мы уже говорили, что старые китайские и японские летописи содержат ряд сведений о вспышке замечательной сверхновой звезды в 1054 г. нашей эры. Скупые тексты этих хроник позволили нашим современникам сделать исключительно важное открытие — отождествление Крабовидной туманности со сверхновой 1054 г.

Автор этой книги совместно с проф. П. П. Паренаго сделал попытку отождествить самую мощную радиотуманность Кассиопея — А со сверхновой звездой, некогда вспыхнувшей на небе. По тем признакам, о которых речь шла выше, радиотуманность Кассиопея — А должна быть молодой. В пользу этого говорят её сравнительно небольшие размеры (следовательно, она ещё не успела «расползтись»), огромная поверхностная яркость и большая скорость внутренних движений. Анализируя известные сведения о старинных вспышках сверхновых звёзд, мы нашли то, что искали, в древних китайских летописях.

Общеизвестен высокий уровень древней 5000-летней культуры великого китайского народа. За тысячелетие до нашей эры китайцы уже очень хорошо знали небо и были первоклассными наблюдателями. Во всех летописях, дающих истории сменявших друг друга династий, содержатся астрономические приложения, в которых кратко упоминается о всех замечательных явлениях, имевших место на небе в царствования тех или иных императоров. Систематические астрономические наблюдения в древнем Китае носили характер государственной службы. Хорошо известна, например, печальная история двух древних китайских астрономов Хи и Хо, которым разгневанный император повелел отрубить головы за то, что они не предсказали наступившего солнечного затмения. Мы теперь хорошо знаем, что точное предсказание затмения — очень сложная задача, требующая даже в

наши дни высококвалифицированной трудоёмкой работы. Повелитель Небесной Империи слишком много требовал от бедных Хи и Хо...

Содержащиеся в китайских летописях астрономические хроники обладают высокой степенью достоверности. Так, например, хорошо известно, что знаменитая комета Галлея раз в 75 лет подходит близко к Солнцу, и тогда её можно наблюдать невооружённым глазом. Эта комета очень яркая, с огромным хвостом. Последний раз она наблюдалась в 1910 г., когда Земля прошла через её хвост (при этом решительно ничего не произошло!); следующее её появление будет около 1985 г. Оказывается, что все без исключения появления кометы Галлея за последние 2000 лет зарегистрированы в китайских хрониках! Это является лучшим доказательством достоверности китайских астрономических записей. Однако и к ним необходимо относиться критически, тщательно анализируя и сопоставляя факты.

Древние китайские астрономы знали о явлениях новых звёзд. Такие звёзды у них очень метко назывались «звёзды-гости». В летописях Китая содержится ряд важных упоминаний о «звёздах-гостях». Эти сведения частично уже более 100 лет известны европейцам. Однако, как это ни странно, до самого последнего времени астрономы не обращали внимания на эти очень важные записи. Исключение составляет сверхновая 1054 г., на месте вспышки которой сейчас находится Крабовидная туманность. Развитие радиоастрономии заставило обратить внимание на древние упоминания о вспышках необыкновенных звёзд.

Значительная часть астрономических хроник ещё в XIII веке была собрана знаменитым китайским учёным Ма Туан-Лином, составившим огромную энциклопедию, отражавшую состояние науки того времени. Эти хроники включены в 294-й (!) том энциклопедии Ма Туан-Лиана.

В числе прочих там имеется такая запись:

«В период Тай-Хэ, в четвёртый год, во вторую луну была видна необыкновенная звезда возле западной стены Синего Дворца. В седьмую луну она исчезла». Вот и вся запись. Не правда ли, слишком кратко? Казалось бы, никаких выводов отсюда сделать нельзя! И вот здесь

труд учёного смело можно уподобить искусству Шерлока Холмса... Прежде всего, можно точно сказать, когда эта необыкновенная звезда вспыхнула. Существуют отлично разработанные таблицы китайской хронологии. В древнем Китае не было сплошного счёта лет от какой-либо определённой эры. Счёт лет начинался с воцарения «очередного» императора. Из текста летописи следует, что звезда вспыхнула в четвёртый год царствования императора Тай-Хэ, во вторую «луну» этого года. Из хронологических таблиц отсюда непосредственно следует, что звезда вспыхнула в марте 369 г. нашей эры, т. е. без малого 1600 лет назад!

Труднее найти, в какой части неба вспыхнула эта необыкновенная звезда. У древних китайцев небо подразделялось на созвездия совсем не так, как у нас. Оказывается, что таинственный «Синий Дворец» — это просто круг на небе, центр которого находится в полюсе мира. Этот круг, в нижней своей части касающийся горизонта, отделяет незаходящие звёзды от остальных. Ясно, что на разных широтах этот круг будет располагаться по-разному. Например, на Северном полюсе он будет совпадать с горизонтом. Там все звёзды северной половины неба не заходят. По мере продвижения на юг полюс мира будет располагаться всё ниже и ниже над горизонтом, а размеры «Синего Дворца» будут уменьшаться. Наконец, на экваторе он вырождается в точку, совпадающую с северной точкой горизонта. Легко понять, что все звёзды, расположенные на круге «Синего Дворца», имеют одинаковое склонение (см. гл. VI), равное $90^\circ - \varphi$, где φ — широта места наблюдения. Так как эти наблюдения велись в древней столице Китая — Пекине, широта которого 34° , то сразу же можно сделать вывод, что склонение «звезды-гостьи» было немного больше $+56^\circ$. Вторую координату, прямое восхождение, можно определить, если обратить внимание, что звезда вспыхнула в марте, т. е. во время года, близкое к весеннему равноденствию, когда прямое восхождение Солнца было около 0^h (см. рис. 53). Учитывая, что яркая «звезда-гостья» должна была быть замечена вскоре после захода Солнца и что она наблюдалась «возле западной стены Синего Дворца», т. е. в западной части круга незаходящих звёзд, найдём, что

её прямое восхождение должно быть приблизительно таким же, что у Солнца, т. е. 0^h .

Положение радиотуманности Кассиопея — А такое: склонение $\delta = +58^\circ 32'$, прямое восхождение $\alpha = 23^h 21^m$. Расхождение между координатами источника радиоизлучения и определённым выше положением «звезды-гостии» 369 г. составляет всего лишь 5° , таким образом, совпадение следует признать очень хорошим.

Недавно мы обратились к Китайской Академии наук с просьбой исследовать древние китайские летописи с целью обнаружения указаний на вспышки новых звёзд. Китайские товарищи любезно откликнулись на нашу просьбу. Работа только началась, и мы пока имеем первые результаты. Китайский астроном Си Цзэ-цун, специально занимающийся этой проблемой, прислал нам недавно ряд важных древних текстов хроник. Среди них имеется и такая запись, содержащаяся в старинной китайской книге «Тун-Чжи»: «В феврале 4-го года Тай-Хэ из династии Цзинь звезда-гостья наблюдалась в западном созвездии Цзы-Вэй, к июню она угасла». Созвездие Цзы-Вэй — это Кассиопея. Приведённый независимый текст является ещё одним, очень важным аргументом в пользу достоверности вспышки звезды, которая уже прямо называется «звездой-гостьей», и правильной оценки её координат. Заметим ещё, что за последние 2000 лет в этой части неба другие «звёзды-гостии» не вспыхивали. Поэтому можно считать достаточно обоснованным, что радиотуманность Кассиопея — А — остаток вспышки сверхновой звезды 369 г. нашей эры.

Мы остановились так подробно на этом отождествлении для того, чтобы читатель сам почувствовал детали этого увлекательного исследования.

Недавно мы отождествили ещё несколько довольно мощных радиотуманностей — остатков некогда вспыхнувших сверхновых звёзд. Очень мощный источник радиоизлучения находится в созвездии Центавра; его координаты: склонение $\delta = -60^\circ$, прямое восхождение $\alpha = 13^h 35^m$. В энциклопедии Ма Туан-Лина и в летописи «Ранняя Хань» имеется следующий текст: «В период Чжун-Пин, во второй год, в десятую луну, в день Гуй-Хай появилась звезда-гостья посредине Нан-Мана. Она

была величиной с бамбуковую циновку и последовательно показывала пять цветов. Постепенно она слабела и к шестой луне следующего года угасла».

Эта очень красочная запись относится к событию почти 2000-летней давности: как можно установить из хронологических таблиц, «звезда-гостья» вспыхнула 7 декабря 185 года нашей эры! Нан-Ман — это группа звёзд между яркими звёздами α и β созвездия Центавра. Приблизжённые координаты центра этой группы: склонение $\delta = -60^\circ$, прямое восхождение $\alpha = 14^h$, что только на $3-4^\circ$ отличается от положения радиотуманности. Странное сравнение с циновкой и указания на «пять цветов», которые последовательно показывала «звезда-гостья», станут несколько более понятными, если учесть, что из-за её очень большого южного склонения «звезда-гостья» могла наблюдаться только очень низко — почти у горизонта. Она, повидимому, была необыкновенной яркости. Возникавшие при таком низком положении очень яркой звезды атмосферно-оптические явления (окрашивание, сильное мерцание) могут объяснить эти детали описания. Нужно помнить, что это было в ту эпоху, когда в древнем Риме ещё царствовали императоры династии Антонинов, а большая часть Европы была покрыта непроходимыми лесами... Впрочем, в Риме эту звезду не могли наблюдать — она слишком южная и на европейском небе никогда не восходила. Эта звезда перестала быть видимой только в июле 186 г. нашей эры, следовательно, она наблюдалась почти 8 месяцев.

Особый интерес представляет сверхновая 1006 г. Интересно проследить, как вспышка этой необыкновенно яркой звезды наблюдалась в разных странах мира.

В летописях немецкого монаха Эпидануса, жившего в XI веке, имеется следующее указание: «...на южном небе, в 1012 г. с конца мая в течение 3-х месяцев наблюдалась звезда необыкновенной величины и такого блеска, который слепил глаза...». В другой европейской летописи приводится иная, как сейчас установлено, правильная дата вспышки звезды: 1006 г. В сирийской хронике Баргебрауса написано: «...В году 396 появилась подобная Венере по величине и яркости звезда. Её лучи двигались и она светила как Луна. Она светила четыре месяца,

потом исчезла...». В мусульманских странах, как известно, начальная эра, от которой ведётся счёт годов (так называемая «Эра Хиджры»), есть год 632, когда, по преданию, Магомет бежал от преследования своих врагов из Мекки в Медину. 396 год Хиджры — это 1006 г. нашей эры. В более древней сирийской хронике Ибн-Иль-Атира есть такой текст: «В 396 г. первого шабана появилась большая, необыкновенной яркости звезда слева от Иракской Киблы. Она посылала лучи на землю подобно Луне и наблюдалась до 15-го Дсул-Када, когда погасла». Отсюда следует дата первого наблюдения: 3 мая (1-го шабана); звезда перестала быть видимой 13 августа. Повидимому, дальнейшим наблюдениям мешало Солнце. Очень грубо положение звезды на небе можно определить из указания, что она наблюдалась «слева от Иракской Киблы». Иракская Кибла — это направление из Багдада в Мекку. Учитывая ещё время года, когда вспыхнула звезда, можно сделать вывод, что вспышка могла произойти в южной части созвездия Скорпиона.

В древнем Китае также наблюдали эту новую звезду. Запись в энциклопедии Ма Туан-Лина гласит: «...В период Цзинь-Дэ в 3-й год в 3-ю луну, в день И-ссе появилась звезда-гостья на юго-востоке...». Отсюда следует, что первое китайское наблюдение этой необыкновенной звезды было на месяц раньше сирийского.

В стране Восходящего Солнца — Японии — также наблюдали звезду-гостью. В 1230 г. самурай Садао Фуйивара наблюдал вспыхнувшую новую звезду. Это навело его на мысль собрать все известные сведения о вспышках новых звёзд, память о которых ещё была жива в народе. В своих сохранившихся до нашего времени дневниках («Мэй-Гетцуки») он приводит сведения о некоторых из таких звёзд. Наиболее яркие из них вспыхивали в 1054 г. и в 1006 г. Остаток первой вспышки мы наблюдаем сейчас как Крабовидную туманность. О звезде 1006 г. в «Мэй-Гетцуки» сказано, что она вспыхнула в конце апреля и была так ярка, что «...народ мог её видеть без всякого труда. Она была подобна (по блеску) Луне в четверти». Интересно, что Фуйивара сравнивал блеск «звезды-гости» 1054 г. с Юпитером. Следовательно, блеск звезды 1006 г. был совершенно исключительным.

Японский астроном Шигеру Канда нашёл в старинных китайских хрониках указания на то, что эта звезда наблюдалась в Китае в течение 10 лет после вспышки!

В этой области неба, охватывающей южную часть созвездия Скорпиона и созвездие Волка, имеется три довольно мощных источника радиоизлучения, которые можно отождествить со сверхновой 1006 г. В частности, к числу таких источников принадлежит и радиотуманность NGC 6357 (см. рис. 108). На вопрос, какой из трёх источников связан со сверхновой 1006 г., ответят ближайшие радиоастрономические, астрофизические и исторические исследования. Особенно большую помощь могут оказать китайские астрономы.

Мы значительно уклонились от основного предмета нашей книги — радиоастрономии — в сторону исторических изысканий. Но это не вредно. Полезно подумать, какая связь существует между событиями и фактами, казалось бы, такими далёкими друг от друга. Успехи новейшей науки — радиоастрономии, опирающейся на «сверхсовременные» достижения радиопизики, электроники, теоретической физики и астрофизики, оказываются связанными с текстами хроник, написанных древними астрономами великого Китая! Труд этих людей спустя тысячелетия ожил и как драгоценное сокровище вошёл в фонд науки середины XX века! Мы жадно впитываем каждое слово скупых строк хроники, которые полны для нас глубокого и важного смысла. Какая прекрасная перекличка эпох и народов, разделённых веками...

Указав места, где вспыхивали на небе сверхновые звёзды, радиоастрономия изменила существовавшие до последнего времени представления о частоте их вспышек в нашей Галактике. Раньше считали, что в нашей Галактике сверхновые звёзды вспыхивают один раз в 200—300 лет. Если бы это было так, мы не наблюдали бы такого большого количества сверхновых, вспыхивавших сравнительно близко от нас за последние 2000 лет. За это время вспыхивали по крайней мере шесть сверхновых звёзд, которые были от нас удалены на расстояние не свыше 7000 световых лет. Но ведь гораздо большее количество их должно вспыхивать на большем расстоянии! Если это учесть, то окажется, что сверхновые звёзды вспыхивают

в нашей Галактике не так уж редко — один раз каждые 20—30 лет. Из-за поглощающей свет межзвёздной пылевой среды сверхновую, вспыхнувшую на расстоянии 20 000 световых лет, уже нельзя будет видеть невооружённым глазом.

Почему же туманности — остатки вспышек сверхновых звёзд — являются мощными источниками радиоизлучения? Повидимому, нельзя предложить для объяснения этого замечательного явления ничего другого, кроме космических электронов, движущихся в магнитных полях. Следовательно, причина излучения здесь та же, что и в случае «второй составляющей» общего радиоизлучения Галактики. Таким образом, необходимо допустить, что в расширяющихся, охваченных бурными движениями газовых туманностях — остатках вспышек сверхновых звёзд — каким-то образом возникают космические электроны и магнитные поля. Объяснить возникновение последних очень просто: быстрые беспорядочные движения газов приводят к «запутыванию» силовых линий первоначального, очень слабого магнитного поля. Такой процесс «запутывания» приводит, как мы видели в главе X, к усилению магнитного поля до тех пор, пока плотность магнитной энергии не станет равна плотности кинетической энергии движущихся с большой скоростью газов. Магнитное поле в такой туманности будет в десятки и даже сотни раз больше, чем в межзвёздной среде.

А как могут при таких условиях образоваться космические электроны? В. Л. Гинзбург недавно разработал теорию ускорения заряженных частиц (например, электронов, протонов) в «радиотуманностях». Согласно этой теории причина ускорения — та же самая, что и в межзвёздной среде: «столкновения» заряженной частицы с движущимися магнитными полями. Так как скорости движения таких «блуждающих» магнитных полей очень велики и «столкновения» происходят достаточно часто, то заряженная частица за сравнительно небольшой срок (несколько десятков или сотен лет) будет ускоряться и приобретёт энергию, сравнимую с энергией космических лучей.

При этом ускоряться будут частицы, у которых первоначальная кинетическая энергия сравнительно невелика — лишь в несколько раз больше, чем энергия тепловых

движений. Между тем в межзвёздном пространстве при таких «столкновениях» будут ускоряться только частицы с очень большой энергией (см. главу X).

Таким образом, свою огромную кинетическую энергию космические электроны приобретают за счёт кинетической энергии выброшенных при взрыве сверхновой звезды газовых масс. Из теории следует, что доля первоначальной кинетической энергии, переходящая в энергию космических частиц, довольно велика.

Зная наблюдаемый поток радиоизлучения от радиотуманностей и расстояние до них, можно вычислить количество содержащихся в них космических электронов. Оказывается, что их в сотни тысяч раз меньше, чем «обычных» электронов, движущихся с тепловыми скоростями в радиотуманности. Скорость движения космических электронов почти равна скорости света. Почему же они остаются в пределах сравнительно небольшой туманности? Причина здесь та же, по которой космические лучи удерживаются в Галактике: большая «запутанность» магнитных полей. Космические электроны беспорядочно движутся по исключительно причудливым, переплетающимся траекториям и остаются в пределах туманности. Тем временем сама туманность расширяется, а вместе с ней расширяется и область, заполненная космическими частицами. Наконец, туманность рассеивается в окружающем межзвёздном пространстве. Ещё задолго до этого радиоизлучение от такой радиотуманности станет настолько незначительным, что его нельзя уже будет обнаружить (см. стр. 229). Что же произойдёт с космическими электронами, образовавшимися в радиотуманности? Может быть, они успеют за эти несколько тысяч лет затормозиться, потеряв значительную часть своей энергии, хотя бы вследствие того, что они несколько тысяч лет излучали? Оказывается, нет! Электроны, как показывают расчёты, почти не уменьшат своей энергии. Они просто вместе с самой радиотуманностью рассеются в межзвёздном пространстве. Затем они будут сотни миллионов лет блуждать в межзвёздной среде, «сталкиваясь» с намагниченными облаками межзвёздного газа.

До сих пор речь шла о космических электронах, возникающих в радиотуманностях и являющихся причиной

их наблюдаемого радиоизлучения. Но те же причины, которые приводят к образованию в радиотуманностях космических электронов, приведут к образованию космических протонов и других тяжелых ядер. Только находящиеся в радиотуманностях космические электроны можно наблюдать (из-за обусловленного ими радиоизлучения), а космические протоны наблюдать нельзя (радиоизлучение от них в тысячи раз меньше, чем от космических электронов). Количество образующихся в радиотуманности космических протонов будет приблизительно таким же, как и количество космических электронов.

Вместе с космическими электронами космические протоны рассеиваются в межзвёздной среде. Таким образом решается основной вопрос происхождения первичных космических лучей (см. предыдущую главу).

Космические протоны, сталкиваясь с межзвёздными «блуждающими» полями, будут за сотни миллионов лет ещё больше ускоряться. Как мы уже указывали в предыдущей главе, предел странствованиям космических протонов и других ядер кладут столкновения с атомами межзвёздной среды, приводящие к значительной, если не полной, потере энергии космической частицы. Такие столкновения, происходящие с каждой космической частицей в среднем раз в 300—400 миллионов лет, приводят к тому, что состав первичных космических лучей за это время должен как бы «обновляться».

Для того чтобы проверить нашу теорию с количественной стороны, нужно решить следующую задачу: зная, как часто (в среднем, конечно) вспыхивают в Галактике сверхновые звёзды, зная, сколько, в среднем образуется космических частиц за одну вспышку, требуется рассчитать, сколько космических частиц образуется за 400 миллионов лет в результате всех вспышек сверхновых звёзд. Оказывается, что за это время образуется как раз столько космических частиц, сколько их наблюдают. Заметим, что основные данные, входящие в такой расчёт, взяты из совершенно независимых астрофизических и физических наблюдений и опытов. Тем более убедителен результат такого расчёта: он-то и доказывает, что вспышки сверхновых звёзд являются основным «поставщиком» космических частиц в нашей звездной системе.

Что касается образовавшихся в радиотуманностях и рассеивающихся в пространстве космических электронов, то они не могут в межзвёздной среде ускоряться до ещё больших энергий (см. гл. X). Блуждая в межзвёздных магнитных полях, они будут излучать радиоволны, которые мы наблюдаем как «вторую составляющую» общего радиоизлучения Галактики. Мы видим, что вспышки сверхновых звёзд являются первопричиной как первичных космических частиц, так и значительной части общего радиоизлучения Галактики.

Таким образом, радиоастрономия позволила «увидеть» те места нашей звёздной системы, где происходит или в недавнем времени происходил процесс «рождения» первичных космических лучей. Ещё вчера сама возможность таких наблюдений могла казаться фантастической... Одним из величайших достижений радиоастрономии является то, что науку о происхождении космических лучей она в значительной степени превратила в ветвь наблюдательной астрономии и указала на туманности — остатки вспышек сверхновых звёзд — как на места, где возникают первичные космические частицы.

Коль скоро физические процессы в расширяющихся оболочках обычных новых звёзд примерно такие же, как и в оболочках сверхновых (разница только в масштабе явления), следует ожидать, что на месте вспыхивавших новых звёзд должны быть источники радиоизлучения. Скорости газов в оболочках новых звёзд примерно такие же, что и в оболочках сверхновых (т. е. около 1000 км/сек), но массы оболочек у первых в тысячи раз меньше, чем у вторых. Поэтому оболочки новых будут тормозиться гораздо быстрее, чем у сверхновых (примерно за несколько сот лет). Следовательно, радиотуманности — остатки вспышек обычных новых звёзд — будут иметь гораздо меньшую «продолжительность жизни», чем радиотуманности — остатки вспышек сверхновых. Далее, так как из-за сравнительной малости выброшенной при вспышке новой звезды оболочки её кинетическая энергия невелика, то количество образовавшихся космических электронов будет в сотни и тысячи раз меньше, чем у сверхновых. Поэтому такой источник радиоизлучения будет в сотни и тысячи раз более слабым, чем остаток

вспышки сверхновой, и можно надеяться обнаружить радиоизлучение только от сравнительно близких остатков вспышек новых звёзд.

Исходя из этих соображений, советские учёные предсказали, что должно быть обнаружено радиоизлучение вполне измеримой мощности от новой звезды, вспыхнувшей в 1918 г. в созвездии Орла. Вскоре такое радиоизлучение действительно было обнаружено австралийскими радиоастрономами. Эта новая звезда находится от нас на расстоянии, немного большем, чем 1000 световых лет. Открытие источника радиоизлучения на месте вспышки Новой Орла имеет большое значение. В частности, доказывается, что для возникновения в радиотуманности значительного количества космических электронов достаточно нескольких десятков лет.

Судьба этих космических частиц будет такая же, как и в случае вспышек сверхновых — они рассеются в межзвёздном пространстве, пополняя количество имеющихся там космических частиц. Следовательно, наряду со вспышками сверхновых звёзд вспышки новых также являются «поставщиками» космических частиц в нашей Галактике. Количество образовавшихся при каждой вспышке новой звезды космических частиц в тысячи раз меньше, чем при вспышке сверхновой, но первые вспыхивают в несколько тысяч раз чаще.

Так как вспышки сверхновых звёзд имеют исключительное значение для всей проблемы радиоизлучения Галактики и происхождения космических лучей, мы сейчас остановимся ещё раз на свойствах туманностей, образовавшихся вследствие таких вспышек. Лучшее всего изучена самая яркая из подобных туманностей — Крабовидная туманность. Выше мы уже описали эту туманность и особое внимание обратили на её спектр.

Существующее истолкование непрерывного спектра Крабовидной туманности в оптических лучах приводит к большим трудностям. Автор этой книги считает его ошибочным. Это истолкование возникло 15 лет назад, когда ничего не было известно о радиоизлучении Крабовидной туманности, и другого объяснения непрерывному спектру диффузной части этой туманности тогда нельзя было дать.

Теперь положение коренным образом изменилось.

В главе IX мы обратили внимание на особенности радиоспектра источника в Тельце, отождествлённого с Крабовидной туманностью. Для огромного диапазона длин волн — от 7,5 м до 3,2 см — поток радиоизлучения, рассчитанный на единичный интервал частот, почти не зависит от длины волны (или от частоты). Поток излучения от Крабовидной туманности, рассчитанный на единичный интервал частот, в оптических лучах почти в 1000 раз меньше, чем в области радиочастот *).

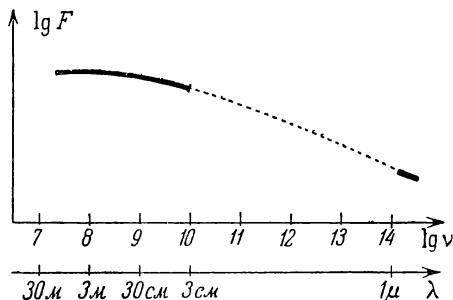


Рис. 110. Схема свечения Крабовидной туманности в непрерывном спектре.

Конечно, Крабовидная туманность излучает радиоволны и более короткие, чем 10 см, но по техническим причинам пока это излучение наблюдать нельзя. Судя по тому, что внутри огромного интервала частот интенсивность радиоизлучения от Крабовидной туманности почти не меняется, интенсивность радиоизлучения на более высоких частотах будет с ростом частоты уменьшаться довольно медленно. Это схематически изображено на рис. 110, где по оси абсцисс отложены логарифмы частоты и длины волн, а по оси ординат — логарифмы потока

*) Во избежание недоразумений укажем, что полный поток излучения Крабовидной туманности во всех частотах оптической части спектра в 500 раз больше, чем полный поток от этой туманности в области длин волн от 7,5 м до 10 см. Дело в том, что в оптической части спектра содержится $5 \cdot 10^{14}$ единичных интервалов частоты (герц), а в указанной радиообласти — всего только $3 \cdot 10^9$ герц.

излучения от Крабовидной туманности, рассчитанные на единичный интервал частот. Поэтому естественно считать оптическое излучение Крабовидной туманности продолжением её радиоизлучения. Можно думать, что в Крабовидной туманности одна и та же причина вызывает как оптическое излучение с непрерывным спектром, так и радиоизлучение.

Если причиной радиоизлучения Крабовидной туманности является торможение быстрых космических электронов в слабых магнитных полях, то для излучения радиоволн энергия электронов должна быть около миллиарда электрон-вольт, а для излучения в оптической части спектра энергия их должна быть равна сотням миллиардов электрон-вольт. При этом электронов с большей энергией должно быть в несколько сот раз меньше, чем с малой. Общая масса всех космических частиц в Крабовидной туманности в десятки раз меньше массы Земли — величина по астрономическим масштабам ничтожная...

Образно выражаясь, Крабовидная туманность похожа на мыльный пузырь. Масса её, по видимому, в десятки раз меньше массы Солнца, а раньше считалось, что она в 15 раз больше солнечной. Все трудности, о которых говорилось раньше, отпадают. Так мы видим, что радиоастрономия помогает решить одну из сложнейших проблем астрономии.

Крабовидная туманность как источник радиоизлучения обладает ещё одной интересной особенностью. Это — единственный из мощных точечных источников радиоизлучения, находящийся вблизи эклиптики (см. рис. 94).

На это обстоятельство обратил внимание В. В. Виткевич, предложивший оригинальный метод исследования солнечной короны. Идея этого метода состоит в следующем. Солнце видимым образом движется по эклиптике, совершая полный оборот за один год. Раз в год, 14 июня, Солнце подходит очень близко к Крабовидной туманности — на расстояние всего в $1^{\circ},5$ и солнечная корона будет проектироваться на Крабовидную туманность. Произойдёт своеобразное «затмение» Крабовидной туманности. Радиоволны, идущие от Крабовидной туманности,

будут испытывать в короне поглощение и преломление. Изучение изменений, которые произойдут с радиоизлучением Крабовидной туманности во время затмения, позволит определить физические условия в верхних частях солнечной короны, трудно доступных оптическим наблюдениям. Методы радиоастрономии позволяют изучать корону «на просвет». В 1952 г. в Англии, а в 1954 г. в СССР В. В. Виткевичем были предприняты первые успешные попытки наблюдений короны этим методом, давшие очень интересные результаты.

Если предлагаемое новое объяснение оптического излучения Крабовидной туманности является правильным, то, как указали независимо И. М. Гордон и В. Л. Гинзбург, следует ожидать некоторой поляризации этого излучения. Причина этого была указана в главе X. Если бы магнитное поле в Крабовидной туманности имело постоянное направление, излучение было бы полностью поляризованным. Гораздо более вероятно, однако, что поле в разных местах туманности ориентировано различно. Только в небольших объёмах туманности, протяжённость которых в десятки раз меньше размеров туманности, магнитное поле будет приблизительно постоянным. В этом случае следует ожидать сравнительно небольшой степени поляризации излучения, причём направление поляризации должно беспорядочно меняться от одного участка туманности к другому.

С целью проверки этих выводов теории были поставлены специальные наблюдения поляризации излучения Крабовидной туманности. Первым провёл такое исследование Домбровский. Он измерял интенсивность излучения отдельных частей Крабовидной туманности, пропускавая это излучение через поляроид. Поляроид представляет собой плёнку, пропускающую только излучение с определённым направлением колебаний светового вектора. Если на такой поляроид падает естественный, неполяризованный свет, то через него пройдёт лишь половина светового потока. Вторая половина, соответствующая колебаниям, перпендикулярным к направлению, пропускаемому поляроидом, будет поглощена. Излучение, прошедшее через поляроид, будет уже полностью линейно-поляризовано,

Если же на поляроид падает полностью или частично поляризованное излучение, то при вращении поляроида вокруг перпендикулярной к его плоскости оси величина прошедшего через поляроид потока излучения будет меняться. Если бы излучение от Крабовидной туманности было совсем не поляризовано, то вращение поляроида не привело бы к каким-нибудь изменениям интенсивности исследуемого излучения. В действительности интенсивность излучения меняется при поворотах поляроида. Домбровский нашёл, что степень поляризации отдельных участков Крабовидной туманности достигает 10—15%. Интересно, что характер поляризации довольно однороден для всей туманности. Преимущественное направление колебаний светового вектора определяется «осью» туманности, в направлении которой она вытянута (см. рис. 103). Повидимому, это можно объяснить тем, что в Крабовидной туманности на беспорядочно ориентированное магнитное поле накладывается постоянное или, лучше сказать, почти постоянное поле, раз в 10 более слабое, чем беспорядочное поле.

Можно было бы ожидать, что и радиоизлучение от Крабовидной туманности должно быть также частично поляризованным. В. В. Виткевич выполнил специальные наблюдения, однако поляризации измеримой величины он не обнаружил. Впрочем, это не было неожиданным. Оказывается, что из-за наличия магнитных полей плоскость поляризации проходящего через ионизованный газ радиоизлучения будет сильно повернута. Это вращение плоскости поляризации для разных элементов туманности будет различно, и в результате никакой поляризации радиоизлучения обнаружено не будет. Для оптических лучей вращение плоскости поляризации в Крабовидной туманности весьма невелико.

Обнаружение поляризации оптического излучения является решающим подтверждением двух основных выводов, к которым мы пришли раньше. Во-первых, это доказывает, что причиной радиоизлучения Крабовидной туманности (а следовательно, и всех радиотуманностей) является излучение космических электронов в магнитных полях. Во-вторых, это доказывает, что оптическое излучение Крабовидной туманности с непрерывным спектром

обусловлено также космическими электронами. Ибо, как можно показать, никаким другим способом нельзя объяснить поляризацию оптического излучения у этой туманности.

Могут ли быть в нашей Галактике ещё и другие тела, которые явились бы источниками радиоизлучения? Такие тела, действительно, имеются. Это—обычные туманности, состоящие из ионизованного газа. Причина их излучения та же, что и у газовой составляющей общего радиоизлучения Галактики (см. главу VII). По своему характеру это излучение является тепловым. Таким образом, следует ожидать, что некоторая часть слабых источников радиоизлучения, расположенных в полосе Млечного Пути, — это просто наиболее яркие газовые туманности. Эти туманности, состоящие главным образом из ионизованного водорода, в оптических лучах излучают, между прочим, и водородные линии. Из теоретических соображений следует, что интенсивность теплового радиоизлучения такой туманности должна быть строго пропорциональна интенсивности оптического излучения в линиях водорода. Нужно, однако, иметь в виду, что оптическое излучение довольно сильно поглощается межзвёздной космической пылью, в то время как радиоволны проходят через межзвёздное пространство.

Было вычислено, что наиболее протяжённые и яркие в оптических лучах газовые туманности, например, туманность Ориона (рис. 111), «Лагуна», «Трёхраздельная» (рис. 112), должны быть источниками радиоизлучения вполне измеримой мощности, причём выгоднее всего наблюдать эти туманности на волнах дециметрового и сантиметрового диапазонов. При помощи 15-метрового лигтового зеркала (рис. 113) осенью 1953 г. было обнаружено (на волне 9,4 см) радиоизлучение от ряда наиболее ярких туманностей. Потоки радиоизлучения от этих туманностей оказались примерно такими, как следовало ожидать из теоретических расчётов. Таким образом, в этом случае теория направляла наблюдения, чего нельзя было сказать о первых исследованиях «радиозвёзд». Интересно заметить, что на волне 9,4 см газовые туманности типа изображённых на рис. 111, 112, 114 и 115 принадлежат к числу наиболее мощных. Так, например, поток радио-



Рис. 111. Туманность Ориона.

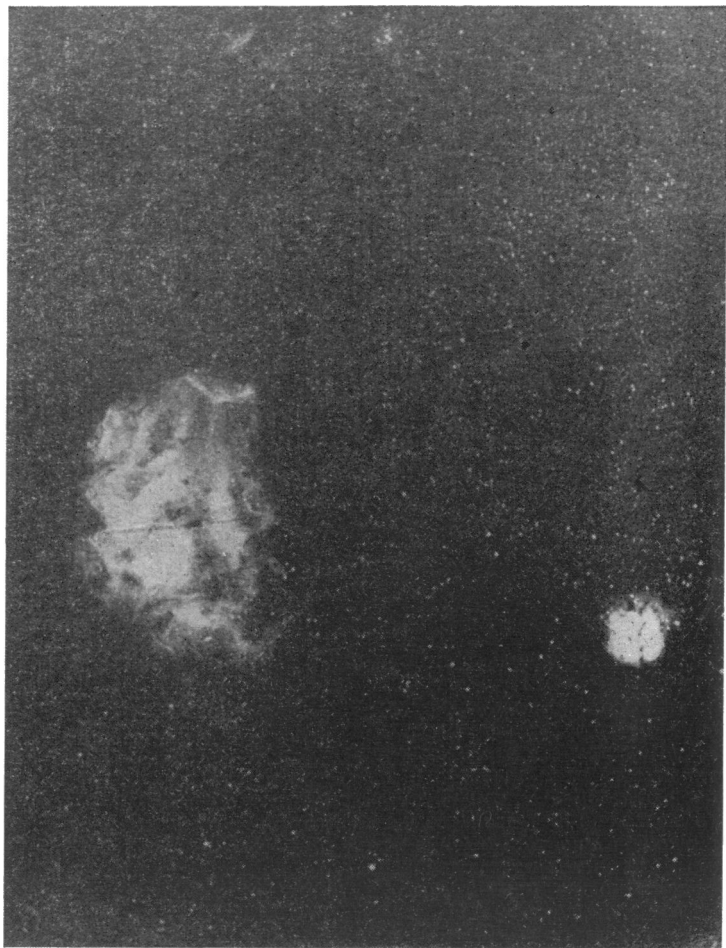


Рис. 112. Диффузные газовые туманности «Трёхраздельная» (справа) и «Лагуна» (слева) — источники теплового радиоизлучения.

излучения от Крабовидной туманности на этой волне только немногим больше, чем от туманности «Лагуна», хотя на волнах метрового диапазона вторую нельзя даже обнаружить. Это объясняется тем, что интенсивность

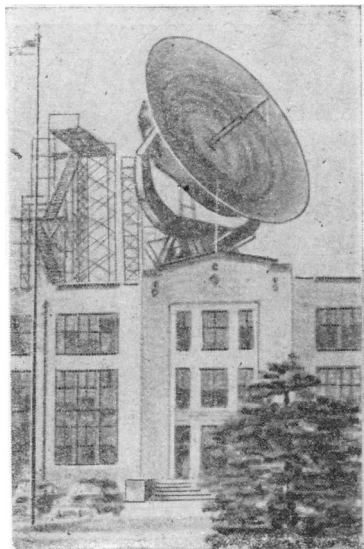


Рис. 113. 15-метровое литое зеркало, с помощью которого было обнаружено тепловое радионизлучение от диффузных туманностей. Поверхность этого зеркала отклоняется от идеального параболоида не больше, чем на 1 мм, что позволяет вести наблюдения источников радионизлучения на самых коротких волнах (зеркало установлено на крыше дома в г. Вашингтоне).

излучения радиотуманностей с увеличением частоты довольно быстро убывает, между тем как тепловое излучение газовой туманности с увеличением частоты растёт, а при ещё больших частотах остаётся постоянным.

Дальнейшее детальное изучение теплового радионизлучения газовых туманностей позволит путём сравнения с оптическим водородным излучением этих же туманностей изучить поглощение света (см. выше).

Недавно были обнаружены весьма протяжённые ($5-10^\circ$), но мало интенсивные источники радионизлучения, расположенные, как правило, в полосе Млечного Пути. Акад. Г. А. Шайн совместно с автором этой книги отождествил несколько таких источников со скоплениями газовых туманностей. Так, вся область, окружающая туманностями, интенсивность оптического излучения которых довольно низка. На этом месте обнаружен слабый, но весьма протяжённый источник радионизлучения. Строго говоря, такие протяжённые источники являются деталями распределения

манность Ориона, покрыта

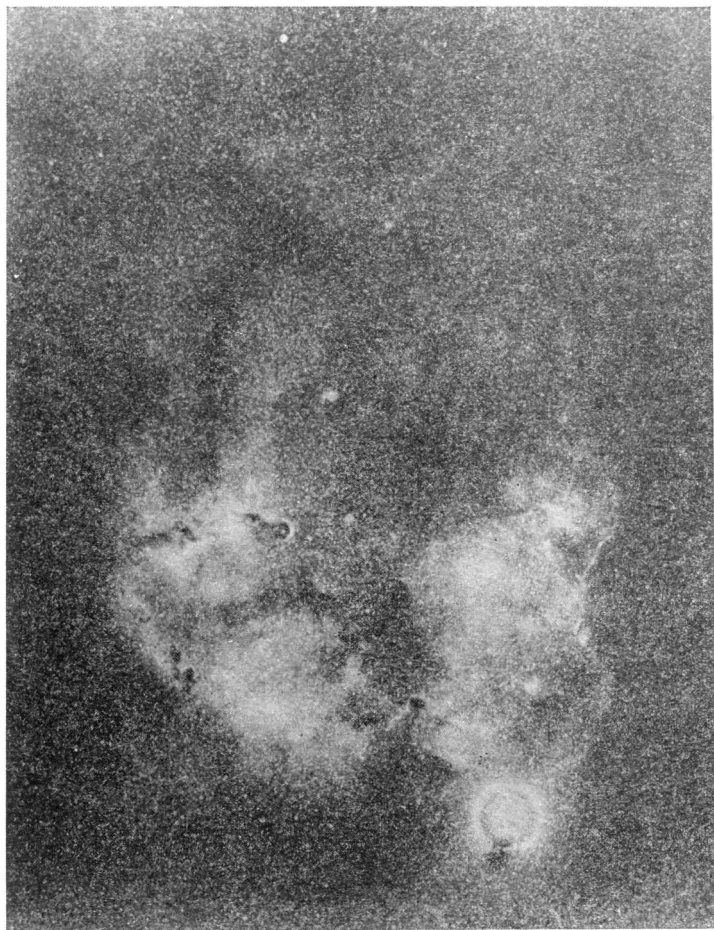


Рис. 114. Большая диффузная туманность в созвездии Цефея IC 1396 — источник слабого теплового радиоизлучения.



Рис. 115. Диффузная газовая туманность NGC 6618 — источник теплового радиоизлучения.

«газовой» составляющей радиоизлучения Галактики, о которой говорилось в VII главе. Межзвёздный ионизованный газ имеет весьма «клочковатую» структуру: он состоит из отдельных облаков и туманностей. Некоторые из них мы и наблюдаем в виде протяжённых источников радиоизлучения.

В заключение этой главы подчеркнём ещё раз, что до сих пор радиоизлучение ни от одной звезды не обнаружено. В принципе можно ожидать, что на некоторых звёздах могут происходить очень мощные вспышки радиоизлучения. «Радиозвёздная» теория космического радиоизлучения оказалась неправильной, но это не значит, что среди слабейших источников радиоизлучения в дальнейшем нельзя будет обнаружить несколько звёзд.

Акад. В. А. Амбарцумян и И. М. Гордон независимо обратили внимание на интересные звёзды-карлики типа Т Тельца и UV Кита. Излучение этих звёзд часто увеличивается в несколько раз за время в несколько минут: происходит как бы «вспышка». Спустя некоторое время блеск звезды опять падает. Спектральные наблюдения показали, что избыточное излучение имеет строго непрерывный спектр. В. А. Амбарцумян и И. М. Гордон высказали предположение, что это излучение вызвано появлением значительного количества космических электронов, так же как и в случае оптического излучения Крабовидной туманности. Если это предположение справедливо, то можно ожидать измеримого радиоизлучения от этих звёзд.

ГЛАВА XII

РАДИОГАЛАКТИКИ И ПРОБЛЕМА РАДИО- ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАГАЛАКТИКИ

В предыдущей главе было показано, что многие источники радиоизлучения, расположенные в полосе Млечного Пути, отождествляются либо с особыми туманностями — остатками вспышек сверхновых и, повидимому, новых звёзд, либо с обычными диффузными газовыми туманностями, например, туманностью Ориона и пр. Однако громадное большинство источников радиоизлучения находится далеко за пределами нашей звёздной системы — Галактики. В главе XI уже говорилось об источниках, отождествляемых с особыми галактиками NGC 4486 и NGC 5128. Такие галактики, особенно сильно излучающие в радиодиапазоне, мы называли «радиогалактиками».

Наряду с «радиогалактиками» обнаружено радиоизлучение и обычных спиральных галактик, подобных нашей звёздной системе (см. стр. 218). Радиоизлучательная способность у этих галактик приблизительно такая же, как и у нашей Галактики. Это значит, например, что если бы мы наблюдали радиотелескопом нашу Галактику, находясь в туманности Андромеды, то мы зарегистрировали бы довольно слабый источник, приблизительно такой же мощности, как туманность Андромеды, наблюдаемая с нашей Галактики.

Для таких «обычных» спиральных галактик поток радиоизлучения (на всех частотах метрового диапазона) приблизительно в миллион раз меньше потока их оптического излучения. Самый слабый поток радиоизлучения, который ещё можно зарегистрировать при современной чувствительности радиотелескопов, составляет

около $4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \text{ герц}}$ (на волне около 3 м), что в 5000 раз меньше, чем излучение самого мощного источника — Кассиопея — А. Поток радиоизлучения от спиральной галактики десятой видимой звёздной величины как раз равен $4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \text{ герц}}$. Такая галактика удалена от нас на расстояние около 10 миллионов световых лет, т. е. находится раз в шесть дальше, чем туманность Андромеды — наша близкая «соседка». В мире галактик расстояние в 10 миллионов световых лет — малое расстояние. Самые слабые галактики, которые на пределе ещё может обнаружить величайший из существующих оптических телескопов — 5-метровый рефлектор Паломарской обсерватории — имеют звёздную величину 23. Это значит, что световой поток от них почти в 10 миллионов раз меньше, чем от самой слабой звезды, которую ещё можно видеть невооружённым глазом. Некоторые из этих слабейших объектов должны быть удалены от нас на расстояние больше миллиарда световых лет! *). Это чудовищное расстояние в десятки тысяч раз больше размеров всей нашей звёздной системы.

Гигантскую систему космических тел, включающую в себя все наблюдаемые нами галактики, называют «Метагалактикой». С помощью 5-метрового оптического рефлектора на всём небе можно наблюдать несколько миллиардов галактик 22—23-й величины! Не забывайте, что каждое такое ничтожное пятнышко света — это сложная звёздная система, подобная нашей. Каждая из таких галактик состоит из многих миллиардов звёзд, очень большого количества газовых туманностей, космической пыли.

Учитывая невообразимо большие размеры Метагалактики, расстояние в 10 миллионов световых лет — это наши ближайшие «окрестности». Не так уж много на небе галактик ярче 10-й величины — всего около 15.

*) Нужно иметь в виду, что и среди галактик встречаются «гиганты» и «карлики». Наша Галактика принадлежит к числу гигантских, но есть и «карлики», которые излучают в сотни и тысячи раз меньше нашей. Ясно, что галактика-гигант с видимой звёздной величиной 23 удалена от нас на расстояние, в несколько десятков раз большее, чем галактика-карлик. Приведённое в тексте расстояние относится в галактикам-гигантам.

Многие из этих наших «метagalактических соседей» оказались источниками слабых потоков радиоизлучения. Природа радиоизлучения таких галактик, очевидно, такая же, как и у нашей Галактики (см. главы VII и X).

Самым большим из существующих радиоинтерферометров можно наблюдать около 2000 источников, поток от которых на волне 3 м будет больше или равен

$$4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{ватт}}{\text{м}^2 \text{ герц}}.$$

Несомненно, что большинство этих слабых источников (особенно тех, которые расположены вдали от полосы Млечного Пути) является галактиками. Но только едва ли больше чем 1% из них является спиральными системами, подобными нашей Галактике. Большинство слабых источников — это особый класс очень сильно излучающих в радиодиапазоне галактик — «радиогалактик», не похожих на обычные спирали. Таких «радиогалактик» в Метагалактике гораздо меньше, чем «обычных» галактик, но из-за своей огромной радиоизлучательной способности они как бы «видны издалека». Для иллюстрации сказанного приведём такой пример. Большинство наблюдаемых самых ярких звёзд на небе (например, звёзд 1-й величины) — это гигантские звёзды, излучающие очень большое количество света. Гораздо более многочисленные карликовые звёзды, хотя и расположены значительно ближе к нам (по сравнению со звёздами-гигантами), почти отсутствуют среди наблюдаемых ярких звёзд. Мощные прожекторы видны издалека, а свечу и на сравнительно скромном расстоянии не всегда можно заметить...

Таким образом, большинство слабых источников радиоизлучения — это «радиогалактики». Как уже указывалось, радиоизлучательная способность у этих редких космических объектов в сотни, тысячи, а иногда даже в миллионы раз больше, чем у обычных спиральных галактик. Не следует думать, что радиогалактики по своим свойствам подобны друг другу. Повидимому, в действительности имеет место большое разнообразие свойств различных радиогалактик. Уже сейчас радиогалактики можно разделить по крайней мере на три различные группы. Первая группа — это сталкивающиеся галактики.

Как мы уже говорили в главе IX, долгое время мощный источник Лебедь — А не мог быть отождествлён ни

с каким оптически наблюдаемым объектом ярче 14-й величины. Однако в конце 1951 г. американские астрофизики при помощи 5-метрового телескопа сфотографировали область неба, где находится источник радиоизлучения. Эта фотография приведена на рис. 116. В центре поля зрения, среди слабых галактик, самая яркая из которых имеет всего лишь 17-ю величину, видны два почти слившихся пятнышка. Этот единственный в своём роде объект — две столкнувшиеся «лицом к лицу» галактики — и есть мощнейший источник радиоизлучения Лебедь — А. Видимая звёздная величина столкнувшихся галактик около 17. Угловые размеры центральных ярких частей $5'' \times 3''$. Эти яркие ядра окружены эллиптической областью размерами $30'' \times 18''$, где поверхностная яркость значительно меньше. В действительности эти две столкнувшиеся галактики имеют гигантские размеры, подобные размерам нашей Галактики, но только удалены они от нас на чудовищно большое расстояние в 200 миллионов световых лет. Это следует из анализа спектров этих галактик, также полученных при помощи 5-метрового телескопа-гиганта. На фотографии спектра, приведённой на рис. 117, видны отдельные яркие линии излучения на слабом непрерывном фоне (эта фотография — негатив!). Можно отождествить линии излучения ионизованного и нейтрального кислорода, ионизованных азота и неона. Длины волн этих линий смещены по отношению к своему нормальному положению, что указывает на скорость удаления,

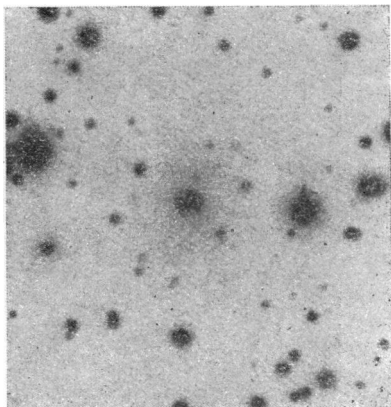


Рис. 116. Источник радиоизлучения Лебедь — А — сталкивающиеся галактики (в центре фотографии). На фотографии видно большое количество звёзд. Все они находятся в пределах нашей Галактики, т. е. сравнительно близко.

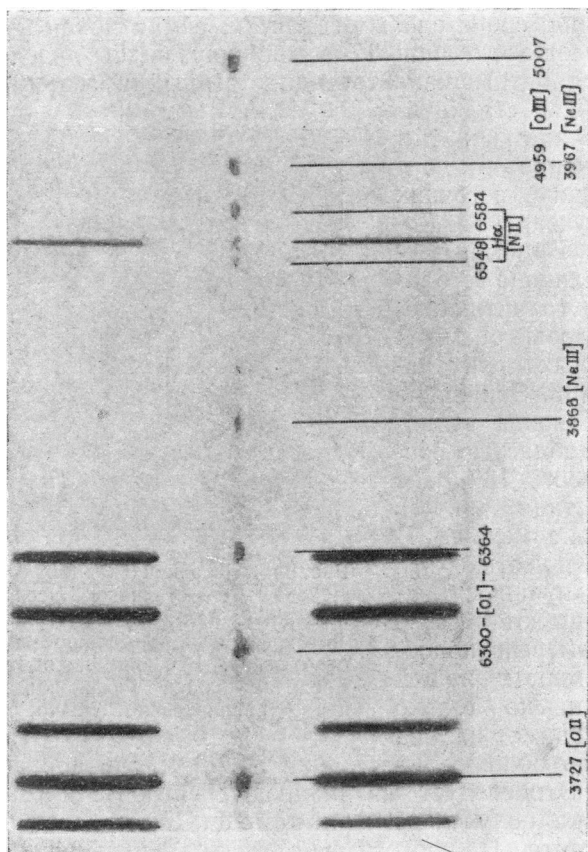


Рис. 117. Спектр сталкивающихся галактик (посредине) — источника радиоизлучения Лебедь — А. Вверх и внизу — спектры сравнения.

равную $16\,500$ км/сек. Такие громадные скорости удаления бывают у галактик, находящихся от нас на расстоянии 200 миллионов световых лет. Само явление удаления от нас галактик со скоростью, пропорциональной расстоянию, носит название «красного смещения» (см. об этом ниже).

Больше половины оптического излучения столкнувшихся галактик сосредоточено в отдельных линиях. У обычных галактик почти нет линий излучения — их спектр непрерывный, с тёмными линиями поглощения, примерно такой же, как спектр Солнца. Это и понятно: свечение галактик в основном обусловлено свечением входящих в их состав звёзд, большинство которых сходно с Солнцем. Само появление ярких линий излучения можно объяснить столкновением галактик. Эти линии излучаются не звёздами, а межзвёздной газовой средой. Довольно значительная ширина линий указывает на очень большие беспорядочные скорости движения излучающих газовых масс, достигающие до 400 км/сек. Как мы видели в случае радиоизлучения Крабовидной туманности и Кассиопеи — А, большие скорости внутренних движений газовых масс являются характерной особенностью мощных источников радиоизлучения. В этом отношении источник Лебедь — А не является исключением.

Что же за грандиозная катастрофа произошла в глубинах вселенной, последствия которой привели к образованию мощнейшего источника радиоизлучения? Часто ли могут происходить столкновения галактик и что при этом должно произойти?

Как мы выяснили в главе VI, звёзды практически никогда не сталкиваются, ибо расстояния между звёздами несравненно больше размеров звёзд. Другое дело галактики: расстояния между галактиками всего лишь в 10—20 раз больше размеров галактик. Им «тесно» в межгалактическом пространстве... Подсчитано, что в местах, где особенно много галактик (в так называемых «скоплениях галактик», см. ниже), почти каждая галактика за миллиард лет успеет хоть раз столкнуться со своей соседкой. Из каждого миллиона наблюдаемых галактик две находятся в процессе столкновения. Однако в подавляющем большинстве случаев это будут «косые удары»,

когда галактики, фигурально выражаясь, «столкнутся боком», слегка задев друг друга. Такой случай «удара в лоб», как в Лебеде — А, — очень большая редкость. Что же будет происходить при столкновении двух галактик? Прежде всего следует подчеркнуть, что звёзды сталкиваться не будут. Ничтожно малая вероятность столкновения между звёздами хотя и увеличится раза в 2—3, но всё же останется ничтожно малой. Если бы галактики состояли только из одних звёзд, то при столкновении они прошли бы одна сквозь другую, не испытав особых изменений в своей структуре и форме. Никаких сколько-нибудь примечательных явлений при этом не было бы.

Но, кроме звёзд, в состав галактик входит ещё межзвёздный газ. Как ни разрежен этот газ, его всё же следует рассматривать как непрерывную сплошную среду. Из-за крайней разреженности межзвёздной среды атом может пролететь, не сталкиваясь, несколько сотых светового года, в то время как в земной атмосфере этот путь (так называемая «длина свободного пробега») — всего лишь несколько тысячных миллиметра. Но всё же размеры галактики в несколько тысяч раз больше длины свободного пробега межзвёздных атомов. А это как раз и означает, что подобно земной атмосфере межзвёздный газ следует рассматривать как сплошную среду.

Что же произойдёт, если два гигантских облака межзвёздного газа (представляющего сплошную среду!) столкнутся «в лоб» со скоростью около 1000 км/сек? Легко понять, что столкнувшиеся массы материи нагреются до очень высокой температуры, в них возникнут мощные вихревые движения с очень большой скоростью. Чудовищных размеров волна сжатия прокатится через каждую из столкнувшихся «в лоб» галактик. Эта волна называется «ударной». Современная аэродинамика сверхзвуковых скоростей сталкивается с этим явлением, хотя и в неизмеримо более скромном масштабе. Для того чтобы пройти через всю галактику, волне, движущейся со скоростью, превышающей 1000 км/сек, потребуется более 10 миллионов лет! Это определяет длительность самого процесса столкновения.

В области, через которую прошла ударная волна, возникнут быстрые беспорядочные движения очень нагрет-

тых газовых масс. Эти движения усилят межзвёздное магнитное поле (см. главу IX), создадут условия, благоприятные для ускорения части электронов до приобретения ими энергий космических лучей. Космические электроны, таким образом возникшие, двигаясь в межзвёздных магнитных полях, будут излучать радиоволны. Здесь мы, по существу, имеем дело с тем же явлением, что и при выбросе газовых масс во время вспышки сверхновой звезды (см. главу XI). Но, в то время как в случае вспышек сверхновых излучающая область по своим размерам не превышает десятка световых лет, а само явление радиоизлучения длится, постепенно затухая, несколько тысяч лет, здесь излучающая область охватывает обе галактики (т. е. имеет протяжённость около 100 000 световых лет), и явление длится 10—20 миллионов лет.

Заметим, что такого рода удар двух сплошных газовых масс будет частично упругим, что объясняется огромной скоростью столкновения. Это значит, что газовые массы не «слипнутся» друг с другом (как было бы в случае малой скорости столкновения), а после взаимного сжатия разойдутся в противоположные стороны. Указанное обстоятельство позволяет понять замечательное явление «раздвоения» источника радиоизлучения Лебедь — А (см. рис. 100).

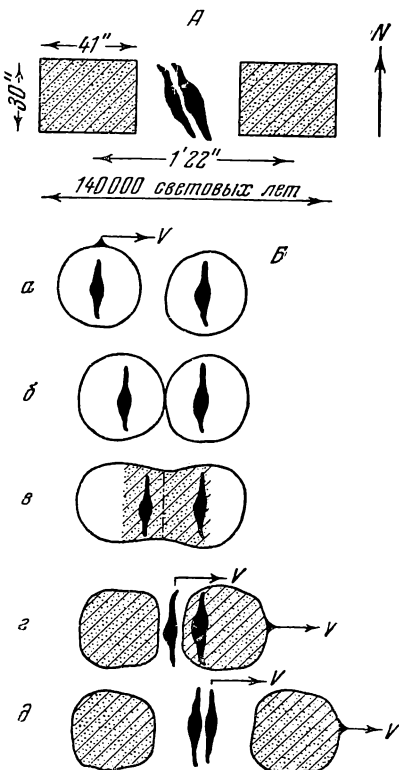


Рис. 118. Относительное положение сталкивающихся галактик для различных моментов времени.

На рис. 118, А приведено относительное положение радиоизлучающих и оптически излучающих областей (т. е. сталкивающихся галактик). Обращает внимание отсутствие совпадений этих областей: радиоволны излучаются из тех мест, откуда оптическое излучение не идёт, и наоборот. Кроме того, очень интересно, что в оптических лучах сталкивающиеся галактики находятся между двумя радиоизлучающими площадями. Это, в принципе, можно понять, если схематически рассматривать отдельные этапы столкновения между галактиками, изображённые на рис. 118, Б. Рис. 118, б даёт положение галактик в начальный момент столкновения, когда они только коснулись своими газовыми коронами. На рис. 118, в показан следующий этап столкновения, когда через газовые короны галактик стала проходить ударная волна (на рис. 118, в заштрихована). В это время газовые короны, сжимая друг друга, как бы остановились, но звёзды (чёрные полосы на рис. 118) продолжали двигаться независимо от межзвёздной среды, ибо последняя слишком разрежена, чтобы оказать сопротивление движению звёзд. На рис. 118, г показано, что газовые короны, после того как через них прошла ударная волна, стали расходиться, в то время как звёздный состав сталкивающихся галактик продолжал сближаться и в конце концов звёзды одной галактики прошли через вторую галактику. А весьма разреженные «короны», нагретые прошедшей ударной волной и ставшие благодаря образовавшимся в них космическим электронам мощными источниками радиоизлучения, продолжали расходиться... Сравнение рис. 118, г с наблюдаемой картиной (см. рис. 118, А) устанавливает их полное сходство.

Наша теория, которую мы здесь изложили в наглядном виде, полностью обосновывается математическими расчётами.

Итак, можно понять, почему при «лобовом столкновении» двух галактик возникает мощное радиоизлучение. Это излучение будет длиться в течение 10—20 миллионов лет. Источники излучения — космические тела совершенно новой природы: это оторвавшиеся от звёзд газовые «короны» галактик, нагретые при столкновении до очень высокой температуры и весьма разреженные (поэтому

они не могут наблюдаться в оптических лучах). Источником энергии радиоизлучения является кинетическая энергия столкнувшихся галактик. Значительная часть этой кинетической энергии (до 10%) выделяется в течение 10—20 миллионов лет в виде радиоизлучения. Интересно отметить, что абсолютное значение энергии радиоизлучения источника Лебедь — А на всех длинах волн раз в 10 больше оптического излучения столкнувшихся галактик! Это — единственный в своём роде случай. Излучательная способность нашей Галактики или туманности Андромеды в области радиоволн в сотни тысяч раз меньше, чем в оптических волнах.

Отношение количества энергии, излучённой какой-нибудь галактикой в области радиоволн, к количеству энергии, излучённой в области оптических волн, можно назвать «относительной радиоизлучательной способностью» данной галактики. Мы видим, что «относительная радиоизлучательная способность» источника Лебедь — А в миллионы раз больше, чем у обычных галактик. Бааде и Минковский отождествили с источником радиоизлучения ещё одну пару сталкивающихся галактик NGC 1275, наблюдаемых в направлении созвездия Персея. В этом случае столкновение галактик не является «лобовым», поэтому «радиосветимость» их значительно меньше, чем у источника Лебедь — А, хотя раз в 300 больше, чем у «нормальной» галактики.

Радиогалактикой совершенно другого типа является NGC 4486. Эта довольно яркая (10-й величины) сферической формы галактика является одним из наиболее ярких членов скопления галактик в созвездиях Девы и Волос Вероники. Фотография этой галактики, полученная 5-метровым рефлектором Паломарской обсерватории, приведена на рис. 119.

На первый взгляд эта галактика не представляет особого интереса. Спектральные наблюдения, однако, позволяют выявить ряд интересных особенностей. Обычно спектр галактик довольно похож на спектр Солнца (т. е. тёмные линии поглощения на фоне непрерывного спектра, см. рис. 77). Но в центральной части галактики NGC 4486 обнаружена довольно яркая ультрафиолетовая линия излучения, принадлежащая ионизованному

кислороду. Эта линия очень характерна для спектра газовых туманностей. Длина волны её заметно отличается от длины волны такой же линии в спектрах обычных туманностей, что объясняется движением излучающих газов с весьма большими скоростями (принцип Доплера!). Часть этого движения объясняется движением всей галактики в целом. Кроме того, оказывается, что газовые массы в её ядре движутся по отношению к самой галактике со скоростью около 300 км/сек.

Как мы уже выяснили на примере радиотуманностей — остатков вспышек сверхновых, а также столкни-

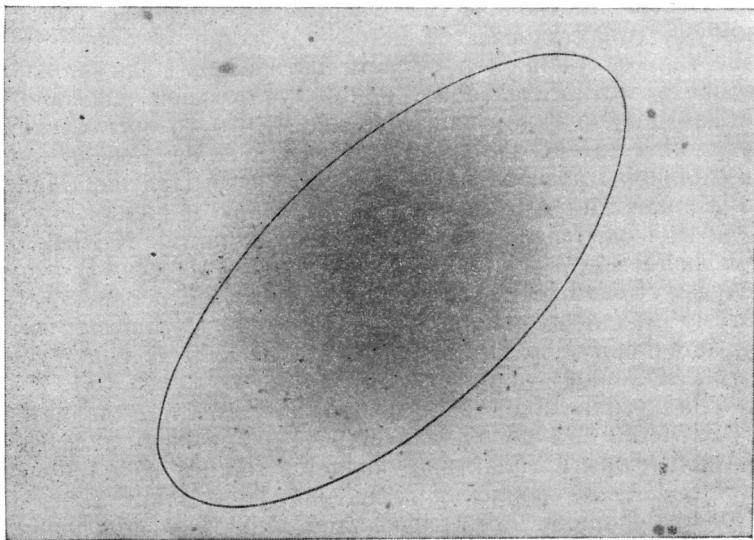


Рис. 119. Радиогалактика NGC 4486 (негатив, центральная часть сильно передержана). Эллипс представляет «радиоформу» этой галактики.

вающихся галактик, большие скорости внутренних движений газовых масс способствуют возникновению мощного радиоизлучения.

Самой удивительной особенностью радиогалактики NGC 4486 является наличие в её центральной части

замечательного «выброса». Эта особенность галактики NGC 4486 известна уже свыше 35 лет. На рис. 120 приведена фотография центральной части радиогалактики NGC 4486, где этот «выброс» очень хорошо виден. Протяжённость «выброса» в длину около $20''$ (т. е. около $\frac{1}{15}$ размера радиогалактики), в ширину всего лишь около $2''$. Форма этого «выброса» напоминает разбившуюся струю жидкости.

На рис. 119 изображена «форма» галактики NGC 4486, наблюдаемой в радиолучах. Обращает внимание значи-

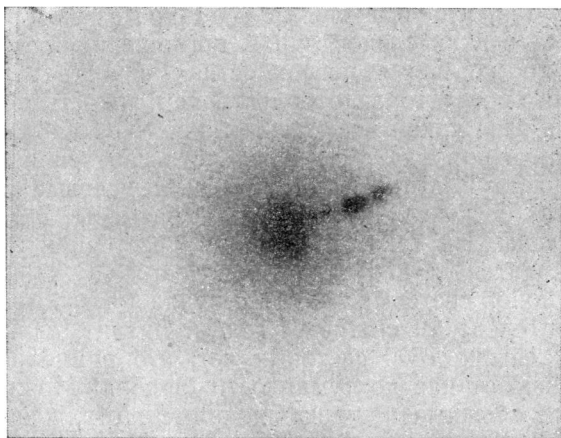


Рис. 120. Центральная часть радиогалактики NGC 4486.

тельная эллиптичность «радиоизображения» этой туманности, между тем как оптическое её изображение — почти правильная окружность. Это очень редкий случай: обычно «радиоизображение», перекрывая оптическое, гораздо менее вытянуто, чем последнее (сравни, например, распределение яркости туманности Андромеды в оптических и радиолучах, см. рис. 74). Поразительно то, что большая ось эллипса «радиоизображения» галактики NGC 4486 в пределах ошибок наблюдений перпендикулярна к оси «выброса». Но, в то время как угловые размеры большой оси около $6'$, угловые размеры «выброса» почти в 20 раз меньше. Несомненна теснейшая связь между

аномально-большой радиоизлучательной способностью всей галактики NGC 4486 и наличием в её центральной части загадочного образования — «выброса». Важно то, что радиоизлучение исходит от всего объёма галактики, а «выброс» занимает меньше чем одну стотысячную всего объёма.

Как же можно представить влияние сравнительно ничтожного «выброса» на радиоизлучение сфероидальной галактики NGC 4486? По мнению автора этой книги, ключ к разгадке этого удивительного явления природы лежит в особенности спектра (оптического) «выброса». Оказывается, что его спектр — строго непрерывный, без всяких следов линий поглощения или излучения. В то же время поверхностная яркость отдельных «узлов выброса» гораздо больше, чем яркость центральной, наиболее яркой части галактики NGC 4486. Какова может быть природа столь странного излучения «выброса»? Нужно иметь в виду, что хотя угловые размеры «выброса» и невелики, линейные размеры его весьма значительны. На таком громадном расстоянии, на котором находится от нас радиогалактика NGC 4486 (около 20 миллионов световых лет), 1 секунда дуги соответствует приблизительно 90 световым годам. Значит, длина этого выброса свыше 1500 световых лет, что примерно равно расстоянию от нас до туманности Ориона! Можно показать, что обычные причины, например, отражение света или тепловое излучение раскалённых газов, не могут объяснить странного яркого излучения этого выброса. Напрашивается вывод, что природа излучения выброса такая же, как и у «аморфной» массы Крабовидной туманности (см. главу XI). В обоих случаях оптическое излучение обладает непрерывным спектром и связано с мощным радиоизлучением.

Оптическое излучение Крабовидной туманности вызывается космическими электронами, движущимися в слабых магнитных полях с огромными энергиями и со скоростью, почти равной скорости света. Та же причина, повидимому, вызывает и свечение «выброса» у галактики NGC 4486. Напряжённости магнитных полей и энергии космических электронов будут приблизительно одинаковыми как у Крабовидной туманности, так и у «выброса».

Мы не знаем пока причины появления «выброса» у галактики NGC 4486. Но, коль скоро этот «выброс» каким-то способом образовался, можно понять, почему в нём возникает достаточно большое количество космических электронов с огромными энергиями. Причина та же, что и в Крабовидной туманности: она заключается в очень быстрых беспорядочных движениях намагниченных газовых масс, из которых состоит «выброс» (см. главу XI). Образовавшиеся космические электроны постепенно будут удаляться из «выброса», рассеиваясь в окружающем пространстве. Там они попадут в более слабые магнитные поля, а ещё до этого начнут тормозиться, уменьшая свою энергию. Следовательно, они будут излучать гораздо более длинные электромагнитные волны — радиоволны. Постепенно эти электроны заполнят почти всю галактику. Это значит, что радиоволны будут излучаться всей галактикой, а причина радиоизлучения — космические электроны, возникшие в «выбросе».

Хотя причина появления «выброса» пока неизвестна, уже сейчас можно оценить энергию, выделившуюся при его образовании. Она должна быть, во всяком случае, не меньшей, чем энергия релятивистских электронов в радиогалактике. Оказывается, что эта энергия в десятки миллионов раз больше энергии, выделяющейся при вспышке сверхновой звезды!

Для проверки теории было бы важно попытаться найти поляризацию оптического излучения «выброса». Если такая поляризация будет обнаружена, это явится решающим подтверждением нашей теории. Заметим, что подобного рода наблюдения требуют первоклассных телескопов и большого искусства наблюдателей. Интересно заметить, что «выброс» смог образоваться сравнительно недавно — один или два миллиона лет назад, в то время как галактика NGC 4486 существует по крайней мере несколько миллиардов лет. «Молодость» «выброса» следует из того простого факта, что его протяжённость составляет 1500 световых лет, и газы, двигаясь со скоростью 300 км/сек (наблюдаемая скорость движения газов в области «выброса»), распространятся на такое расстояние примерно за полтора миллиона лет.

Какой же грандиозный «космический фейерверк» был причиной образования «выброса» у галактики NGC 4486? Будущие исследования, несомненно, ответят на этот вопрос.

Представителем другого типа радиогалактик является NGC 5128. Это — одна из самых ярких, а следовательно, самых близких галактик. Её звёздная величина равна 7. Фотография этой радиогалактики (негатив), полученная с помощью 5-метрового рефлектора, приведена на рис. 121. Обращает на себя внимание широкая тёмная (на негативе она светлая) полоса, пересекающая всю галактику. Несомненно, она вызывается поглощающими свет облаками космической пыли, находящимися в экваториальной плоскости галактики NGC 5128. Угловые размеры этой галактики очень велики — около $25'$. Очень интересно распределение яркости радиоизлучения в этой галактике. Наиболее «яркая» в радиолучах область образует эллипс, угловые размеры которого $7' \times 1',3$. Характерно, что направление большей оси этого эллипса совпадает с направлением тёмной полосы, о которой речь шла выше. Кроме «яркого» эллипса, радиоизлучение исходит из всей области, занимаемой туманностью, образуя своего рода «корону» сравнительно небольшой яркости, простирающуюся на расстояние 1° от центра галактики. Таким образом, линейные размеры области, откуда к нам приходит радиоизлучение, примерно в пять раз больше «оптических» размеров этой галактики.

Американские астрофизики Бааде и Минковский считают, что и здесь мы наблюдаем столкновение двух галактик: спиральной, видимой «с ребра» и расположенной ближе к нам, и эллиптической, на которую проектируется более близкая спиральная галактика.

Вряд ли, однако, это так. Тщательное изучение фотографии, приведённой на рис. 121, говорит о том, что это скорее всего одна галактика, а не две. Заметим, что относительная радиоизлучательная способность галактики NGC 5128 всего лишь в 50 раз больше, чем у обычных спиральных галактик.

В 1952 г. П. Н. Холопов и автор этой книги отождествили довольно мощный источник радиоизлучения в созвездии Печи с галактикой NGC 1316, по внешнему виду

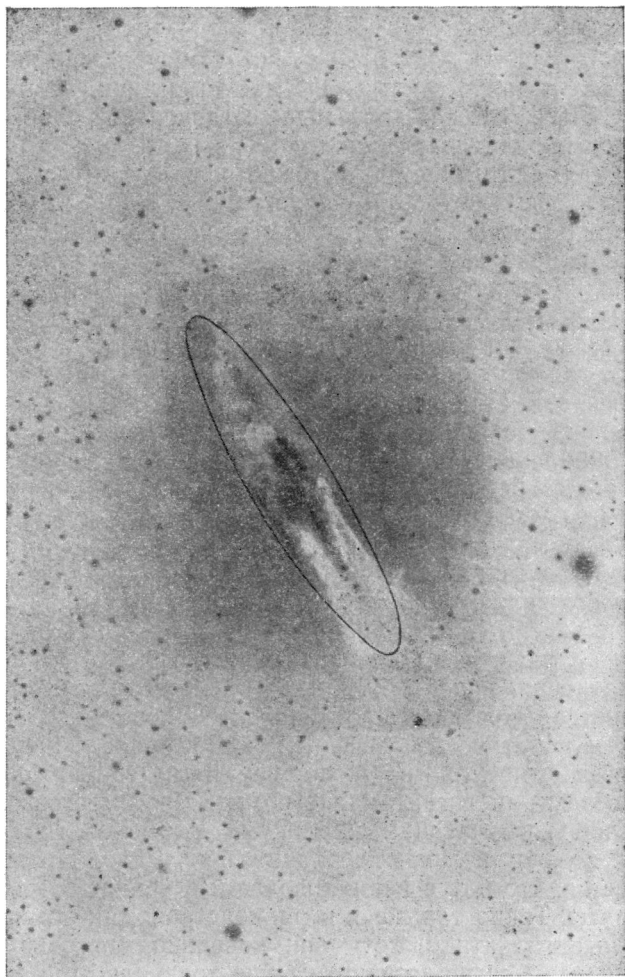


Рис. 121. Радиогалактика NGC 5128 (негатив). Эллипсом ограничена область наибольшей интенсивности радиоизлучения

очень похожей на NGC 5128. И в этом случае характерной особенностью галактики является наличие широкой экваториальной полосы. Относительная радиоизлучательная способность у радиогалактики NGC 1316 примерно такая же, как у NGC 5128. Австралийский астроном де Вокулер недавно открыл ещё две галактики, похожие на NGC 5128, отождествляемые с довольно слабыми источниками радиоизлучения.

Мы видим, что имеется довольно редкий тип галактик (представителем которого является NGC 5128), излучающих в радиоспектре в десятки раз интенсивнее, чем обычные спиральные галактики. Число таких галактик примерно в сотню раз меньше, чем число спиралей. Открытие нескольких радиогалактик, похожих на NGC 5128, делает крайне маловероятной гипотезу столкновения галактик. Действительно, почти невероятно, чтобы все эти сталкивающиеся галактики были одинаково ориентированы по отношению к лучу зрения, т. е. чтобы спиральная галактика была к нам ближе, наблюдалась бы «с ребра» и определённым образом проектировалась на «заднюю» эллиптическую галактику. Повидимому, повышенное радиоизлучение есть внутреннее свойство таких галактик. Причиной радиоизлучения скорее всего являются космические электроны.

Возникает интересный вопрос: к какому типу радиогалактик относится большинство слабых источников радиоизлучения, расположенных в метагалактическом пространстве? Постановка задачи здесь примерно такая же, как и в оптической звёздной астрономии: к какому типу звёзд относятся наблюдаемые нами сравнительно яркие звёзды — к гигантам с огромной светимостью или же к слабо излучающим карликам? Карликов гораздо больше, но они излучают сравнительно мало. Поэтому оказывается, что почти все наблюдаемые яркие звёзды — это гиганты. Точно так же и в радиоастрономии обычные спиральные галактики, хотя они довольно многочисленны, составляют очень незначительную долю слабых источников радиоизлучения. Но, может быть, имеет место другая крайность: большинство этих источников являются сталкивающимися галактиками типа Лебедь — А, радиосветимости которых в миллионы раз больше, чем у

обычных галактик? В этом случае они должны были бы находиться от нас на огромном (даже по метagalактическим масштабам) расстоянии. Такого рода «лобовые» столкновения больших галактик должны происходить исключительно редко. Ведь расстояние до ближайших к нам сталкивающихся галактик около 200 миллионов световых лет! Поток радиоизлучения от самых слабых из наблюдаемых радиогалактик в 3000 раз слабее, чем от источника Лебедь — А. Считая, что эти радиогалактики по своей природе и радиосветимости похожи на Лебедь — А, легко сообразить, что они должны находиться в 50 раз дальше. Это составляет 15 миллиардов световых лет! Между тем, даже самые слабые из наблюдаемых 5-метровым рефлектором галактик находятся на расстоянии не свыше 5 миллиардов световых лет. Приведённый расчёт указывает на огромную проникающую способность современных радиотелескопов. Уже сейчас, хотя радиоастрономия существует немногим дольше 10 лет, проникающая способность самых больших радиотелескопов примерно вдвое больше, чем у самых больших оптических телескопов! Этот вопрос настолько важен и интересен, что мы немного отойдём от нашей основной темы (можно ли сталкивающиеся галактики типа Лебедь — А отождествить со слабыми источниками?).

Когда говорят о проникающей способности телескопов, то обычно полагают, что она зависит только от диаметра объектива рефрактора или зеркала рефлектора. В самом деле, чем слабее поток излучения от какой-нибудь удалённой галактики, тем большей должна быть площадь, с которой улавливаются её лучи, собираемые потом в фокусе. Но при этом часто забывают об одном важном обстоятельстве: проникающая способность телескопа определяется также абсолютной светимостью излучающих объектов. Мощные источники света видны издалека... Например, если бы звёзды не группировались в галактики и если бы не вспыхивали сверхновые звёзды, проникающая способность оптических телескопов была бы гораздо ниже. В этом воображаемом случае слабое пятнышко на фотографической пластинке, помещённой в фокусе 5-метрового телескопа, было бы не галактикой, а звездой, светимость которой в десятки

тысяч раз меньше, чем у галактики. Следовательно, она и к нам в сотню раз ближе. Проницающая способность 5-метрового гигантского рефлектора была бы «всего» около 50 миллионов световых лет!

В радиодиапазоне соотношение светимостей различных космических объектов совершенно другое, чем в оптическом диапазоне. Такой объект, как сталкивающиеся галактики Лебедь — А, удалённый от нас на 200 миллионов световых лет, посылает на Землю примерно такой же поток радиоизлучения, как Солнце, удалённое на восемь световых минут! Ясно, что подобные мощнейшие источники излучения можно наблюдать с очень больших расстояний. Значит, проницающая способность радиотелескопов не потому так велика, что они очень мощные, а потому, что некоторые источники радиоизлучения обладают чудовищной излучающей способностью.

Что касается мощности радиотелескопов, то хотя их диаметры раз в 10—20 больше диаметров оптических больших телескопов, всё же они гораздо менее мощны, чем оптические. Дело в том, что диаметр радиотелескопа-гиганта лишь в десятки раз больше длины волны (речь идёт о метровом диапазоне), а у оптического телескопа диаметр в миллионы раз больше длины световых волн.

Вернёмся, однако, к вопросу о возможности отождествления слабейших из метагалактических источников радиоизлучения со сталкивающимися галактиками типа Лебедь — А. Если бы это было так, то наблюдалось бы непомерно большое число источников с мощностью, в десятки и сотни раз меньшей, чем у источника Лебедь — А, обусловленных сталкивающимися галактиками, удалёнными на расстояние «всего» миллиарда световых лет. Ничего подобного, однако, не наблюдается.

Ещё одно важное обстоятельство препятствует отождествлению слабейших источников радиоизлучения с галактиками типа Лебедь—А. Речь идёт о «красном смещении».

Это замечательное явление состоит в следующем. Как мы уже говорили, спектры галактик, определяющиеся суммарным излучением всех входящих в их состав звёзд, похожи на спектр Солнца. И вот, оказывается, что все тёмные фраунгоферовы линии спектра какой-нибудь галактики смещены в красную сторону. Это смещение тем

больше, чем более удалена от нас данная галактика. По своему характеру оно совершенно такое же, как при эффекте Допплера (см. главу VIII). Отсюда можно сделать вывод, что все галактики удаляются от нас со скоростью тем большей, чем дальше они от нас находятся. Уже на расстоянии 200 миллионов световых лет эта скорость удаления достигает 16 000 км/сек. А на расстоянии около миллиарда световых лет скорость удаления будет уже 80 000 км/сек. Напомним, что максимально возможная в природе скорость движения материальных тел не может превышать скорости света, т. е. 300 000 км/сек (это следует из теории относительности). Не существует прямых наблюдательных данных о спектрах галактик, удалённых на расстояние больше 800 миллионов световых лет: слишком мало света посылают нам такие галактики. Естественно думать, что скорости и дальше будут расти, но не так быстро, ибо скорость удаления галактик не может превышать скорости света.

Из наблюдаемого факта «красного смещения» ряд буржуазных учёных-идеалистов делали вывод о расширении вселенной. Эти же учёные приходили к идеалистическому выводу о конечности вселенной, о какой-то дате «начала вселенной». Из рассмотрения скорости «разбегания» галактик они делали вывод, что это «разбегание» началось около 4 миллиардов лет назад. Тогда вся вселенная якобы была «в одной точке».

Отдельные буржуазные учёные, например католический аббат профессор Леметр, договорились до существования некоего гигантского «отца-атома», который 2 миллиарда лет назад волей божественного провидения взорвался и дал начало наблюдаемой вселенной; последствия этого взрыва мы и наблюдаем сейчас в виде разбегания галактик... Нетрудно видеть антинаучный, церковно-идеалистический характер этой, с позволения сказать, «теории», являющейся продуктом идеологии класса капиталистов. Факты, однако, говорят против этой «теории». Например, тот простой факт, что Земля существует во всяком случае дольше чем 4—5 миллиардов лет (это следует из геологических и радиохимических данных), находится в явном противоречии с «концепцией» аббата Леметра. Точно так же нет никаких научных оснований

говорить о «конечности вселенной» и о «расширении всей вселенной». Однако это не значит, что отдельные, возможно даже значительные, части вселенной не могут расширяться или сжиматься. Мы живем в такой области вселенной, где, повидимому, имеет место расширение. Но это расширение, конечно, не началось «из точки». Повидимому, отдельные большие области вселенной могут то расширяться, то сжиматься. Эпохи «расширения» могут чередоваться с «эпохами сжатия».

Как следствие эффекта Доплера, наблюдаемый поток излучения от удаляющегося источника будет меньше, чем от неподвижного. Это уменьшение потока будет тем заметнее, чем быстрее скорость удаления. При скоростях удаления около $100\,000\text{ км/сек}$ поток излучения уже уменьшится в несколько раз. Отсюда ясно, что «красное смещение», обусловленное разбеганием галактик в наблюдаемой части вселенной, будет как бы «обрезать» излучение от весьма удалённых источников типа Лебедь—А. Это обстоятельство уменьшает проникающую способность радиотелескопов и является новым важным аргументом в пользу утверждения, что среди слабейших метагалактических источников очень мало объектов, подобных Лебедю — А. Скорее всего, большинство этих источников должно отождествляться с радиогалактиками типа NGC 4486. Радиогалактики типа NGC 5128 имеют сравнительно небольшую радиосветимость и их не так уж много, чтобы их можно было наблюдать в достаточно большом количестве среди слабейших источников.

Остановимся ещё на одном важном следствии «красного смещения». Речь идет о поверхностной яркости неба в радиолучах, определяемой яркостной температурой. Если бы в бесконечной вселенной галактики были распределены с постоянной (или почти постоянной) плотностью, то яркость неба была бы исключительно высока — значительно больше, чем яркость отдельных радиогалактик. Ведь любой бесконечный «луч зрения» пересекал бы много радиогалактик, а каждая радиогалактика в значительной степени прозрачна для радиоизлучения галактик, находящихся «сзади». Однако это не имеет места: поверхностная «радиояркость» неба после учёта галактического радиоизлучения очень низка.

Нет никаких оснований считать, что на протяжении 5 миллиардов световых лет средняя плотность находящихся в Метагалактике радиогалактик резко уменьшается. Поэтому только наличие «красного смещения», ослабляющего и «обрезающего» радиоизлучение удалённых радиогалактик, может объяснить наблюдаемую низкую поверхностную яркость неба в радиолучах. Таким образом, радиоастрономия даёт независимое важное подтверждение наличия «красного смещения».

Отдел астрономии, занимающийся вопросами объяснения «красного смещения», свойствами огромных областей пространства, включающего все наблюдаемые галактики, а также другими родственными вопросами, называется космологией. Легко понять, что эта ветвь астрономии имеет огромное научное и идеологическое значение. Как мы видели, радиоастрономические методы исследования имеют исключительно большое значение для космологии! По мере увеличения размеров радиотелескопов и чувствительности приёмников роль радиоастрономических методов в космологии будет непрерывно расти. Мы лишний раз убеждаемся, с каким большим числом основных проблем естествознания переплетается современная радиоастрономия.

Радиоастрономия в последнее время помогла выяснить важные структурные детали сравнительно близких к нам областей Метагалактики. Неправильно было бы думать, что галактики в метагалактическом пространстве распределены равномерно. Как показывают наблюдения, они группируются в скопления, содержащие по несколько сот членов. Протяжённость таких скоплений достигает нескольких миллионов световых лет. В пространстве между скоплениями галактики встречаются очень редко.

Наиболее близким из таких скоплений является скопление галактик в созвездиях Девы и Волос Вероники. Повидимому, наша Галактика и её ближайшие соседи (например, туманность Андромеды) находятся на краю этого скопления. Форма скопления (в пространстве) похожа на довольно плоский диск, напоминая форму нашей Галактики. Но в Галактике насчитывается много десятков миллиардов звёзд, а в скоплении галактик — всего лишь несколько сот членов. Сплюснутая форма скопле-

ния галактик, к которому принадлежит наша Галактика, приводит к тому, что довольно яркие (а следовательно, как можно ожидать, и близкие) галактики, члены этого скопления, распределены по небу вдоль некоторого большого круга. Аналогичным образом большинство звёзд нашей Галактики концентрируется к большому кругу — центральной линии полосы Млечного Пути.

Яркие галактики и в самом деле распределены не случайно. Две трети галактик ярче 12-й величины расположены в полосе шириною около 10° , центральная линия которой есть большой круг, приблизительно перпендикулярный к галактическому экватору. Следовательно, «Млечный Путь галактик» почти перпендикулярен к звёздному Млечному Пути. Скопление галактик, которое мы наблюдаем как «Млечный Путь галактик» и к которому принадлежит наша Галактика, получило недавно название «Сверхгалактики». Это скопление галактик очень велико — его размеры свыше 10 миллионов световых лет. Повидимому, вся эта система галактик вращается вокруг некоторой оси.

В 1953 г. было обнаружено довольно слабое радиоизлучение от полосы Сверхгалактики. Этому открытию помогло удачное расположение полосы Сверхгалактики по отношению к центральной полосе Галактики — Млечному Пути. Так как обе полосы на небе почти перпендикулярны, то гораздо более яркое радиоизлучение Галактики не «забывает» слабое радиоизлучение Сверхгалактики.

Ещё раньше было обнаружено радиоизлучение от нескольких скоплений галактик, удалённых от нас на расстояния в десятки миллионов световых лет. Интересно скопление галактик в созвездии Персея. Здесь на площади неба в 3 квадратных градуса (в 12 раз большей, чем видимый диск Солнца) насчитывается до 500 галактик, средняя звёздная величина которых около 16. В том же скоплении галактик находится радиогалактика NGC 1275, довольно мощно излучающая из-за столкновения с другой галактикой.

Перед радиоастрономией была поставлена задача: какую долю наблюдаемого потока радиоизлучения даёт радиогалактика NGC 1275, и какую долю даёт само скопление галактик. Эта задача совсем недавно была решена

английскими учёными. Исследуемая область неба наблюдалась при помощи двух радиоинтерферометров. Один интерферометр был с большой базой, так что ширина лепестков его диаграммы направленности была $25'$, а другой — с малой базой (ширина лепестков около 4°). Так как угловые размеры скопления галактик около 2° , то при наблюдениях интерферометром с узкими лепестками принимаемая мощность должна быть значительно меньшей (по расчётам в 16 раз), чем при наблюдениях интерферометром с широкими лепестками. С другой стороны, если источником излучения является галактика NGC 1275, угловые размеры которой меньше $1'$, то мощность, наблюдаемая на двух интерферометрах, должна быть почти одинаковой. Наблюдения показали, что при наблюдениях интерферометром с широкими лепестками мощность принимаемого радиоизлучения на 30% больше, чем при наблюдениях «узколепестковым» интерферометром. Это означает, что радиогалактика NGC 1275 излучает в три раза больше всего скопления галактик.

Возникает интересный вопрос: можно ли объяснить радиоизлучение от скоплений галактик (в частности, от нашей Сверхгалактики) суммарным излучением входящих в состав скопления галактик? Почти все радиоастрономы считают, что можно. Однако автор этой книги придерживается другого мнения. Не исключено, что причиной радиоизлучения от скоплений галактик является излучение межгалактической, весьма разреженной газовой материи, заполняющей пространство между галактиками в пределах скопления. Нельзя, разумеется, считать пространство между галактиками абсолютно пустым. Подобно тому как в пространстве между звёздами имеются облака газа и пыли, в пространстве между галактиками также должны быть газ и, возможно, пыль. Из-за чрезвычайной разреженности этой среды её пока не удалось наблюдать методами оптической астрономии.

В пространстве между галактиками должны быть космические электроны. Это следует хотя бы из того, что при столкновении галактик, как мы видели, в «оторвавшихся» газовых «коронах» образуется весьма большое число космических электронов, которые потом неизбежно должны рассеяться в окружающем межгалактическом

пространстве. Можно ожидать, что в межгалактическом пространстве будут также слабые магнитные поля, поскольку там есть движущийся проводящий, пусть даже очень разреженный газ. Если это так, то, двигаясь в межгалактических очень слабых магнитных полях, электроны должны излучать радиоволны, которые мы и наблюдаем как радиоизлучение от скоплений галактик.

Таким образом, радиоастрономия впервые открывает возможность изучения межгалактической газовой среды, что имеет принципиальное значение.

Недавно австралийские радиоастрономы обнаружили излучение водородной радиолнии 21 см (см. главу VIII) от двух самых близких к нам галактик — Большого и Малого Магеллановых Облаков. Эти две галактики — наши ближайшие соседи — можно наблюдать только в южных широтах. Их фотографии приведены на рис. 122. Они похожи на два больших, как бы оторвавшихся куска Млечного Пути. Угловые размеры каждой из этих галактик — несколько градусов. Но если учитывать менее яркие области, окружающие более яркие «ядра» этих галактик, то их угловые размеры будут больше десяти градусов. Это означает, что они к нам довольно близки. Действительно, расстояние до них около 140 тысяч световых лет, т. е. лишь в шесть раз больше, чем расстояние от Солнца до центра Галактики. Вспомним, что расстояние до туманности Андромеды около 1,5 миллиона световых лет. По своим размерам эти галактики уступают нашей, хотя далеко не являются «карликами» среди галактик.

Так как на небе они занимают очень большую площадь, то их весьма удобно изучать радиоастрономическими методами. Интересно отметить, что при наблюдениях излучения радиолнии водорода 21 см от Магеллановых Облаков был применён новый метод, отличный от метода «частотной модуляции».

При неподвижном радиотелескопе (рис. 123) приёмник работал на постоянной частоте, принимая радиоизлучение в узкой полосе частот шириною 40 кГц. Из-за вращения небесной сферы в «поле зрения» радиотелескопа последовательно попадали участки неба, расположенные вдоль суточной параллели. Такими «разрезами»

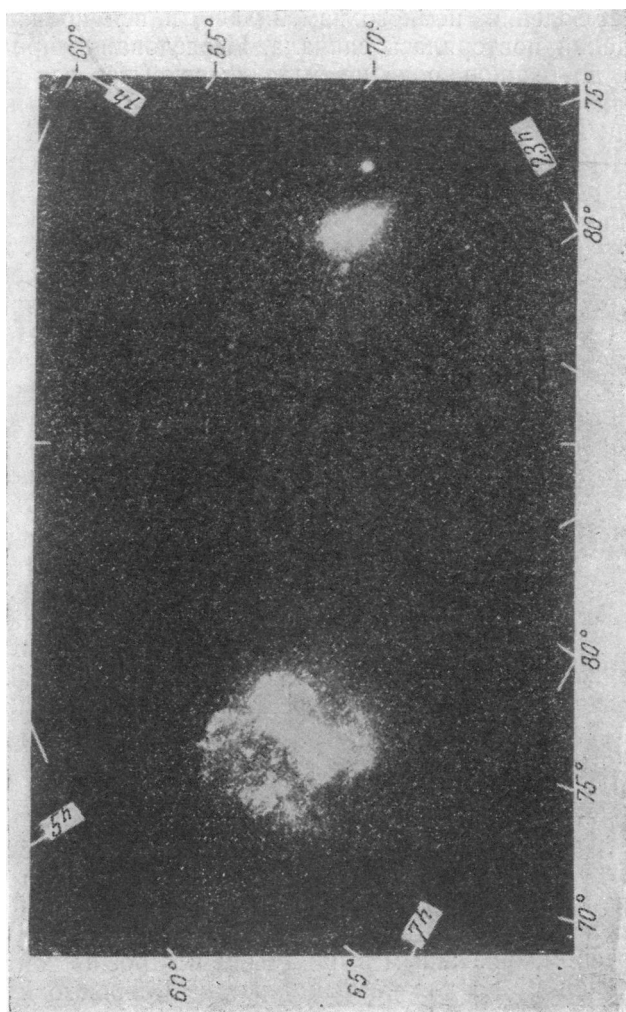


Рис. 122. Фотография Большого и Малого Магеллановых Облаков.

в течение нескольких дней наблюдений перекрывалась вся исследуемая область. Затем частота, на которой велись наблюдения, немного изменялась, и вся процедура наблюдений повторялась сначала. Исследования продолжались до тех пор, пока не была «перекрыта» вся спектральная область шириною в $1\frac{1}{2}$ мегагерца, примыкающая к центральной частоте линии 21 см. На рис. 124 приведены результаты наблюдения Малого Магелланова Облака на разных частотах. На картах дано распределение яркостной температуры в градусах абсолютной шкалы. Каждой фиксированной частоте, на которой проводились наблюдения, соответствует, очевидно, совершенно определённая скорость удаления (+) или приближения (—), указанные на этих картах. Бросается в глаза различие в распределении и величине яркости на разных частотах. Лучшее всего выражена структура излучающей области для частоты, соответствующей скорости удаления около 150 км/сек. Такова лучевая скорость движения Малого Магелланова Облака (как целого) по отношению к Земле. Нужно, однако, иметь в виду, что эта относительная скорость складывается из скорости движения газовых масс в Малом Магеллановом Облаке, из скорости вращения Солнца и окружающей его группы звёзд вокруг центра Галактики и из скорости движения Солнца по отношению к ближайшим звёздам. Для изучения движения газов в Магеллановых Облаках нужно тщательно учесть все «собственные» скорости наблюдателя.

Заметим, что основная часть излучения от Магеллановых Облаков приходится на спектральный участок, расположенный на значительном расстоянии от центра линии 21 см, где излучение нашей Галактики очень слабо. Это обстоятельство значительно облегчает наблюдения, так как излучение Магеллановых Облаков и нашей Галактики почти не налагаются друг на друга.

Способом, описанным выше, были построены контуры радиолинии 21 см для разных участков Большого и Малого Магеллановых Облаков. Несколько таких контуров для Малого Магелланова Облака приведено на рис. 125. Имея такие контуры, можно было для каждой части Магеллановых Облаков вычислить полную яркость водо-

родного излучения на всех частотах. Кривые, дающие распределение полной яркости водородной линии 21 см для Магеллановых Облаков, приведены на рис. 126, масштаб которого такой же, как и у рис. 122.

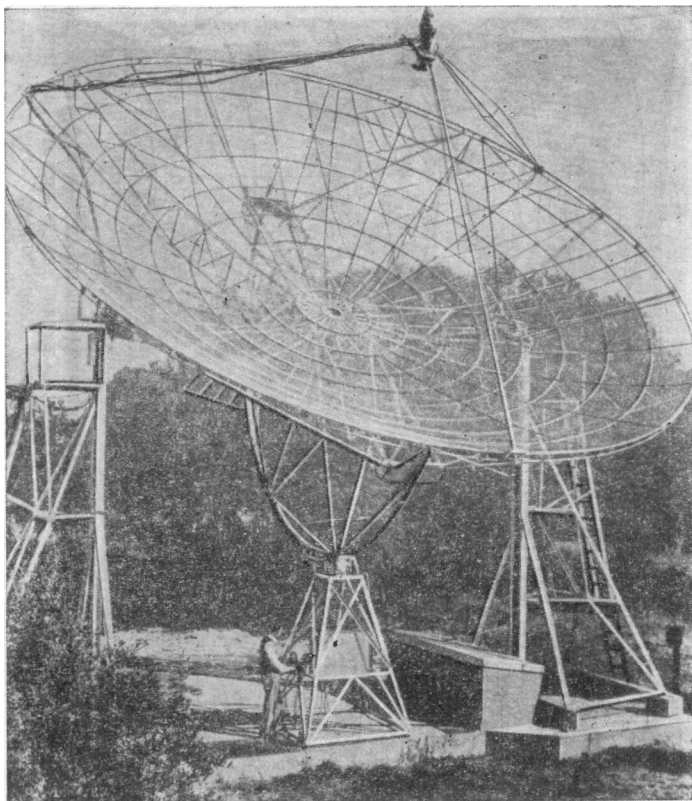


Рис. 123. Радиотелескоп, с помощью которого велись наблюдения водородного радиоизлучения Магеллановых Облаков.

При сравнении рис. 122 и 126 резко бросается в глаза, что протяжённость Магеллановых Облаков в радиолучах значительно больше, чем в оптических. Обе галактики окружены весьма протяжённой водородной «коронай». Более того, можно сделать вывод, что обе эти галактики

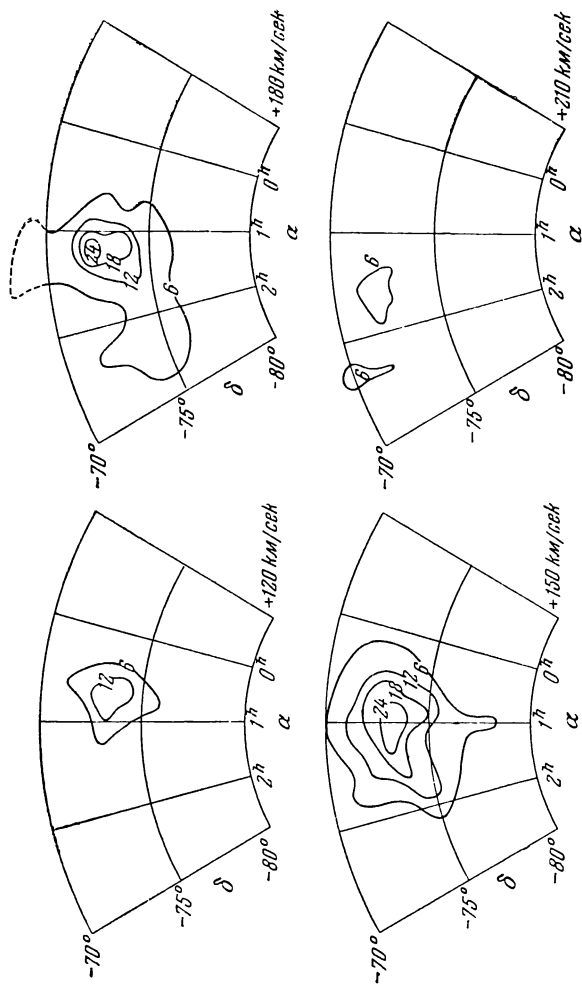


Рис. 124. Распределение яркости радиоизлучения водородной линии при разных значениях частоты, на которой велись наблюдения. Каждая такая частота по принципу Доплера соответствует определённому значению скорости по лучу зрения. Эти скорости обозначены на отдельных графиках.

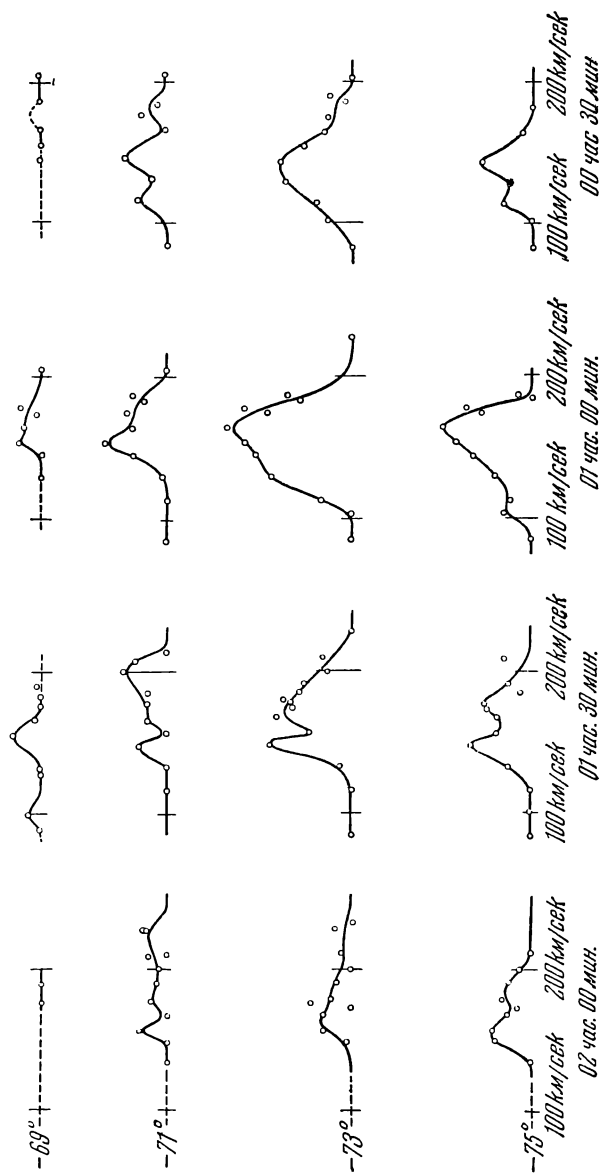


Рис. 125. Контуры радиолнии 21 см для различных участков Малого Магелланова Облака.

«плавают» в общей водородной атмосфере. Уже на рис. 126 видно, что Большое и Малое Магеллановы Облака почти соприкасаются. Пунктирная линия на этом рисунке, ограничивающая обе галактики, определяется только чувствительностью приёмника. Предельная яркостная температура, которую он мог зарегистрировать, была около 3 градусов. Несомненно, что если бы эта величина была равна 1—2 градусам, то можно было бы наблюдать излучение во всей области между галактиками. Заметим, что угловое расстояние между центрами Магеллановых Облаков около 30° . Из геометрических соображений ясно, что линейное расстояние составляет около половины расстояния от Солнца до Магеллановых Облаков. Значит, если эти галактики «окутаны» общей весьма разреженной водородной атмосферой, то следует считать, что и наша Галактика «плавает» в той же весьма разреженной водородной среде. Считая, что яркостная температура этого межгалактического водородного радиоизлучения составляет $1\frac{1}{2}$ градуса, можно подсчитать, что средняя плотность водорода, заполняющего пространство между этими тремя близкими друг к другу галактиками, будет около $3 \cdot 10^{-27}$ г/см³, т. е. в 500 раз меньше, чем плотность межзвёздного газа в окрестностях Солнца, и в несколько десятков раз меньше, чем плотность разреженной среды в пространстве между облаками межзвёздного газа.

Для того чтобы полностью обосновать соображения, о которых только что шла речь, надо повторить наблюдения австралийских радиоастрономов с приёмником, чувствительность которого раза в три выше.

Описанные наблюдения позволили получить ряд важных сведений о природе Магеллановых Облаков. Было буквально сосчитано полное число водородных атомов в этих галактиках. Оказалось, что масса межзвёздного водорода, заключённого в Большом Магеллановом Облаке, в 600 миллионов раз больше массы нашего Солнца, а масса водорода, заключённого в Малом Магеллановом Облаке, в 400 миллионов раз больше массы Солнца. Межзвёздный водород составляет около 20% от массы обеих галактик. Интересно, что в Большом Магеллановом Облаке имеется значительное количество поглощающей свет космической пыли (см. главу VI), а в Малом Магеллано-

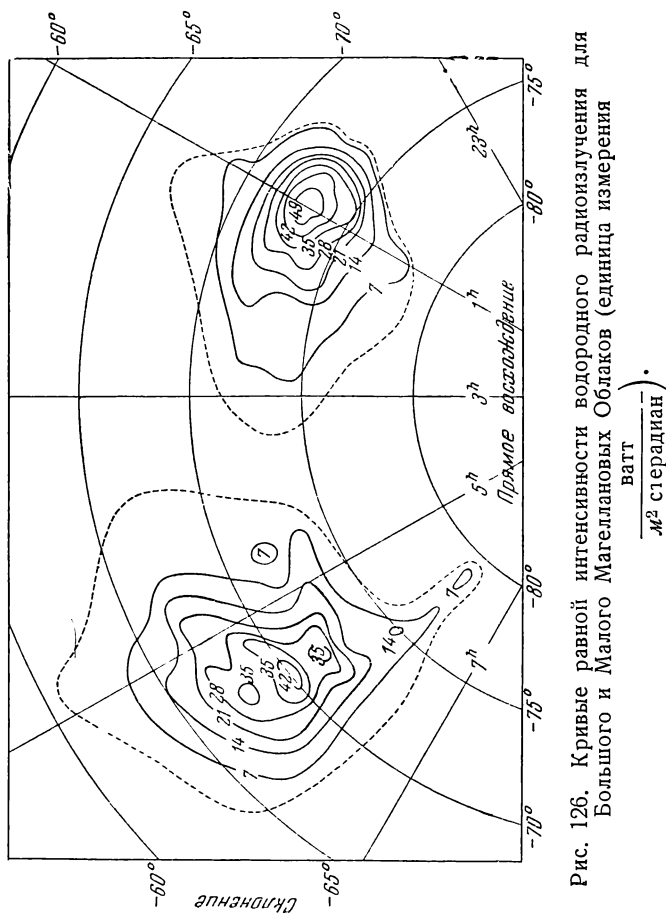


Рис. 126. Кривые равной интенсивности водородного радиоизлучения для Большого и Малого Магеллановых Облаков (единица измерения

вом Облаке пыли почти нет. Таким образом, отношение массы межзвёздного газа к массе космической пыли у обеих галактик весьма различно. Это обстоятельство имеет большое значение для решения проблемы происхождения звёзд и галактик. Важные результаты были получены при исследовании скорости движения водородных масс в обеих галактиках (путём изучения контуров радиолинии в различных местах Магеллановых Облаков). На рис. 127 приведено наблюдаемое распределение скоростей по лучу зрения, а на рис. 128 исправленное, после учёта скорости вращения нашей Галактики и движения Солнца по отношению к ближайшим звёздам. Из характера распределения скоростей, приведённых на рис. 128, следует, что обе галактики вращаются вокруг своих осей. Анализируя особенности этого вращения, можно получить значения полных масс Магеллановых Облаков. Дело в том, что центростремительное ускорение какой-нибудь массы межзвёздного газа, расположенной на краю облаков (которое получается из наблюдаемой скорости вращения), равно ускорению, обусловленному притяжением основной массы галактики. Следовательно, зная скорость вращения галактики и её размеры, можно (правда, довольно грубо) оценить её массу. Таким образом, наблюдения водородной радиолинии, излучаемой Магеллановыми Облаками, позволяет определить не только массу межзвёздного водорода заключённого в них, но и всю массу галактик, обусловленную в основном звёздами.

Если внимательно рассмотреть рис. 128, то видно, что у Большого Магелланова Облака скорость по лучу зрения положительна (т. е. эта галактика удаляется от нас), а у Малого — отрицательна.

Средние скорости по лучу зрения для Большого и Малого Магеллановых Облаков равны соответственно $+37$ и -16 км/сек. Повидимому, это объясняется тем, что одна галактика обращается вокруг другой. Поэтому Магеллановы Облака нужно рассматривать как «двойную» систему, члены которой связаны силой тяготения.

Нужно еще иметь в виду, что на движения Магеллановых Облаков огромное влияние оказывает притяжение со стороны нашей Галактики, которая раз в 40 массивнее, чем Большое Магелланово Облако. По существу три

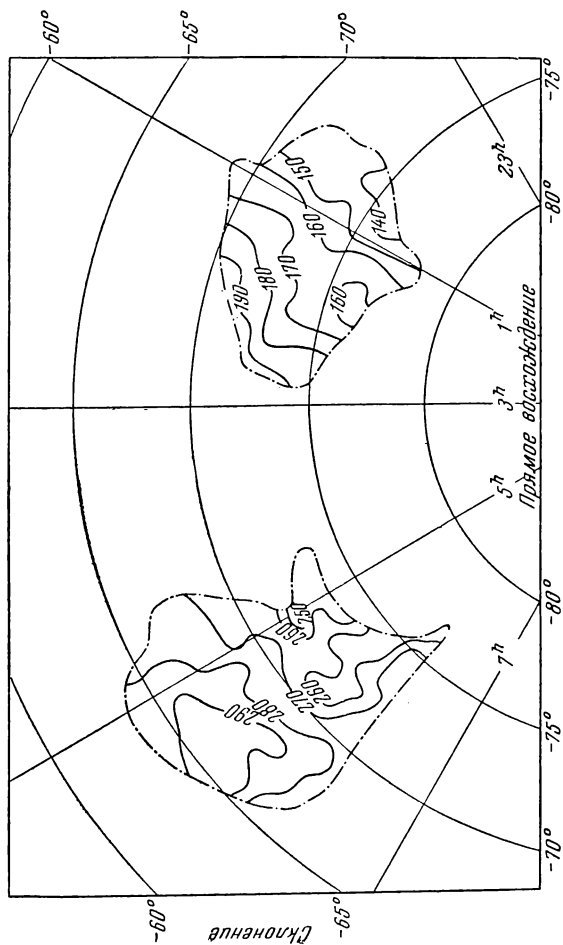


Рис. 127. Наблюдаемое распределение радиальных скоростей межзвёздного водорода в Магеллановых Облаках.

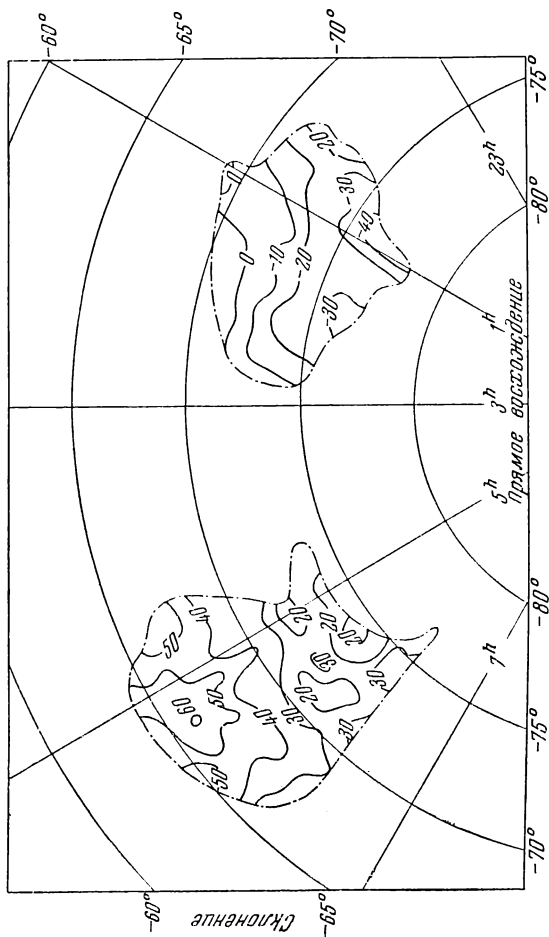


Рис. 128. Распределение радиальных скоростей межзвёздного водорода в Большом и Малом Магеллановых Облаках после учёта скоростей движения Солнца и вращения нашей Галактики.

галактики (наша Галактика и Магеллановы Облака) — это одна тройная система, заключённая в общую, весьма разреженную водородную атмосферу. Интересно отметить, что недавно были найдены доказательства прямой связи между нашей Галактикой и Большим Магеллановым Облаком. Повидимому, между этими галактиками существует «мост», состоящий из большого числа звёзд и межзвёздной среды.

Есть все основания полагать, что в недалёком времени и другие объекты в Метагалактике будут исследованы при помощи водородной радиолнии. На очереди — задача обнаружения водородного радиоизлучения на волне 21 см от межгалактического газа в более обширных пространствах Метагалактики, чем область Магеллановых Облаков. Решению этой проблемы сильно мешает «красное смещение». По этой причине излучение удалённых областей Метагалактики будет сосредоточено не около частоты 1420,5 мегагерц (соответствующей длине волны 21 см), а в области более низких частот. Смещение излучения в сторону низких частот будет тем больше, чем дальше находятся излучающие области. По этой причине интенсивность излучения по мере того, как луч зрения пересекает всё более и более удалённые области Метагалактики, не будет расти, хотя спектральная область, где можно зарегистрировать излучение, будет становиться всё шире и шире. Следовательно, водородное радиоизлучение Метагалактики даст не линию, а очень широкую, но весьма малоинтенсивную полосу, тянущуюся в сторону низких частот от частоты 1420,5 мегагерц. Можно ожидать, что интенсивность этого радиоизлучения имеет яркостную температуру в несколько десятых градуса.

Более перспективными являются поиски водородного радиоизлучения от отдельных скоплений галактик. В этом случае средняя плотность межгалактического газа будет, как можно полагать, больше, что, естественно, повысит интенсивность излучения. Наблюдаться будет не широкая полоса, а одна линия шириною примерно в полтора мегагерца. Впрочем, астрономов могут ожидать большие сюрпризы при исследовании Метагалактики радиоастрономическими методами. Будем же ожидать новых наблюдений.

ГЛАВА XIII

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АСТРОНОМИЯ

В первой главе мы указали на две ветви радиоастрономии. О второй ветви — радиолокационной астрономии — в этой книге пока ничего не говорилось. Между тем, в настоящее время радиолокационная астрономия тоже имеет немало достижений. Она стала мощным методом исследования метеоров. Попадая в земную атмосферу, космические пылинки образуют в ней значительное количество ионов. След метеоров, состоящий из проводящих электричество газов, хорошо отражает радиоволны. Это даёт возможность обнаружить след от метеора обычными методами радиолокации. Специальные радиолокационные станции позволяют с большой точностью определить расстояние до метеора, его скорость, а также физические условия в газовом следе метеора.

Систематические наблюдения метеоров методами радиолокационной астрономии позволили обнаружить значительное число метеоров, которые оптическими методами не могли быть замечены. Это объясняется тем, что радиолокационные наблюдения в отличие от оптических не зависят от времени суток и погоды. Подобные наблюдения значительно увеличили наши сведения о метеорах и характере их движения. Кроме того, такие наблюдения имеют большое геофизическое значение.

Большим достижением радиолокационной астрономии является посылка на Луну и получение отражённого от неё радиосигнала.

Идея подобного эксперимента была впервые высказана советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. В начале 1946 г. этот эксперимент был выполнен независимо и почти одновременно венгерской

исследовательской группой во главе с проф. Баем и группой американцев. На рис. 5 (стр. 16) изображена антенна, при помощи которой был осуществлён этот интересный опыт. В дальнейшем этой проблемой занимались австралийские радиоастрономы.

При подобных опытах удалось наблюдать любопытное явление, впрочем, известное и в оптической астрономии.

С точки зрения наблюдателя, находящегося на Земле, Луна колеблется с угловой скоростью $1\text{--}2^\circ$ в день вокруг оси, проходящей через её центр, что приводит к приближению к нам одной половины Луны и к удалению другой. Это явление называется *либрацией*. Скорость движения по лучу зрения, вызванная либрацией, очень мала — около 1 м/сек . Если падающий на Луну электромагнитный импульс занимает очень небольшой интервал частот, после отражения он будет занимать более широкий интервал частот (эффект Допплера!), что и было обнаружено.

Хотя такими опытами и не удалось получить принципиально новых данных о Луне, всё же они хорошо показывают богатые возможности радиоастрономии. Ведь речь идёт о ничтожной скорости либрации — меньшей, чем скорость пешехода! Такой эффект оптическая астрономия никогда не смогла бы измерить непосредственно. В своё время для определения либрации Луны потребовались длинные ряды наблюдений высокой точности и длительные расчёты.

До настоящего времени локация Луны не дала новых научных результатов. Однако в этом направлении открываются интересные перспективы. Помимо возможности точных определений расстояний до Луны в разные моменты времени, что важно для решения задачи о весьма сложном движении нашего спутника, укажем на следующее. Принято считать, что Луна лишена атмосферы. Но такое утверждение требует пояснений. Оптические наблюдения позволяют сделать вывод, что если на Луне и есть атмосфера, то она по крайней мере в 2000 раз разреженнее, чем на Земле. Но значит ли это, что на Луне совершенно отсутствует атмосфера? Может быть, она есть, но только очень разрежена, а оптические методы слишком грубы, чтобы её обнаружить?

Когда-то на Луне была мощная горообразовательная и вулканическая деятельность. Об этом свидетельствуют особенности лунного рельефа. При этом должно было выделяться большое количество углекислого газа CO_2 . Хотя напряжение силы тяжести на поверхности Луны примерно в шесть раз меньше, чем на Земле, тяжёлые молекулы углекислого газа не могли целиком улетучиться в мировое пространство. Часть их могла остаться, образовав разреженную лунную атмосферу.

Довольно значительная часть земной атмосферы — около 1% — состоит из аргона. Доказано, что аргон в земную атмосферу поступает из земной коры вследствие непрерывного радиоактивного распада изотопа калия с атомным весом 40. По той же причине аргон должен непрерывно поступать и в лунную атмосферу из лунной коры. Так как атомы аргона довольно тяжелы, то можно ожидать, что Луна смогла удержать и аргоновую атмосферу.

Если на Луне имеется хотя бы даже и очень разреженная атмосфера, то её верхние слои должны быть ионизованы. В самом деле, на Земле ионосфера образуется в высоких разреженных слоях атмосферы под действием ультрафиолетовых лучей Солнца. Та же самая причина должна привести к образованию лунной ионосферы. На Земле ионосфера, расположенная на уровнях выше 200 км, составляет одну миллиардную часть всей атмосферы по числу молекул! Если бы лунная атмосфера была в миллиард раз более разрежена, чем земная, то и тогда в ней под действием ультрафиолетовых лучей Солнца образовалась бы ионосфера с плотностью электронов почти такой же, как и в земной, однако лунная ионосфера начиналась бы прямо у лунной поверхности.

Для отражённого радиосигнала далеко не безразлично, имеет ли место отражение от твёрдой поверхности Луны или от её ионосферы. Радиосигналы некоторых частот в том случае, если на Луне есть ионосфера, будут испытывать полное отражение, в то время как от лунной поверхности отразилось бы меньшее количество энергии. Таким образом, характер отражения от Луны радиосигналов позволит установить наличие лунной ионосферы, а следовательно, и атмосферы. Решение этой проблемы,

очевидно, — дело недалёкого будущего. Возможно, что радиометоды позволят обнаружить лунную атмосферу, если она даже в миллиард раз более разрежена, чем земная.

Пока ещё никакие небесные тела, кроме Луны, не были подвергнуты радиолокации. Каковы же перспективы радиолокационной астрономии в этом направлении? Прежде всего, встаёт проблема локации Солнца, точнее, самых внешних слоёв солнечной короны, откуда волны, если их длина около 15 м, могли бы отражаться. Хотя угловые размеры Солнца такие же, как и Луны, отражённый от Солнца сигнал, пока он дойдёт обратно до Земли, уменьшит свою интенсивность в 400^2 раз больше, чем если бы он отразился от Луны, потому что Солнце в 400 раз дальше от Земли, чем Луна. Для локации Солнца требуется гораздо большая мощность радиоимпульса, чем в случае локации Луны. Мощность современной радиоаппаратуры на пределе позволила бы осуществить подобный эксперимент. Этот опыт имел бы большое научное значение, так как он позволил бы исследовать самые наружные части солнечной короны, пока ещё очень слабо изученные.

Установка, способная послать радиоимпульс на Солнце и получить отражённый сигнал, сможет получить отражённый радиосигнал и от Венеры и Марса. Быть может, очень неясный вопрос о вращении Венеры вокруг своей оси нашёл бы, наконец, своё решение, ибо скорость вращения можно было бы определить по эффекту Доплера.

Для локации других планет нашей солнечной системы нужно ещё больше увеличить мощность посылаемого сигнала. Если удастся осуществить локацию больших планет — Юпитера и Сатурна, — то, быть может, окажется возможным выполнить эксперимент, который даже сейчас представляется фантастическим.

Была высказана очень интересная мысль. Можно ожидать, что на больших планетах имеются довольно значительные (хотя и гораздо меньшие, чем на Солнце) магнитные поля. Прежде чем отразиться от какого-то уровня весьма протяжённой атмосферы такой планеты, радиолуч пройдёт через области, где имеются магнитные поля. Их

действие может вызвать поворот плоскости поляризации радиосигнала на некоторый угол, тем больший, чем длиннее путь луча в магнитном поле и чем больше напряжённость поля. У вернувшегося на Землю радиосигнала плоскость поляризации может оказаться повёрнутой на десятки градусов.

Конечно, в подобном проекте много трудностей; например, в северном и южном полушарии большой планеты направления магнитного вращения будут противоположны, а наблюдаться будет один отражённый импульс — нельзя же послать сигнал только на северное полушарие Юпитера! Но может помочь затмение Юпитера Луной — явление не такое уж редкое.

Так радиоастрономия уже сейчас может ставить проблему измерения слабых магнитных полей на планетах, тогда как методами современной оптической астрономии подобная задача не может быть решена.

Всё же радиолокационная астрономия даже в далёкой перспективе не может изучать космические тела, расположенные за пределами солнечной системы. Область её применения, если можно так выразиться, пространственно ограничена. Подробно об успехах радиолокационной астрономии см. книгу Б. Ловелла и Дж. Клегга «Радиоастрономия» (Издательство иностранной литературы, 1953).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы познакомились с основами техники и методики радиоастрономических исследований и с рядом важнейших результатов, полученных радиоастрономией за последние годы. При этом неоднократно выявлялась глубокая связь радиоастрономии с рядом важнейших проблем современного естествознания, например проблемой происхождения космических лучей. Науки о природе не существуют изолированно одна от другой и, конечно, радиоастрономия не может быть исключением. Будущее развитие радиоастрономии, несомненно, приведёт к установлению новых связей с другими разделами естествознания.

Радиоастрономия — наука очень молодая. Многие вопросы ещё ждут своего решения. Например, не существует сейчас достаточно разработанных теорий природы радиоизлучения возмущённого Солнца. Отсутствует математически разработанная теория излучения радиотуманностей и радиогалактик. Можно было бы значительно умножить список проблем, ещё ждущих своего окончательного решения. Учитывая темп развития радиоастрономии, значительное число этих проблем в скором времени, как можно полагать, будет решено. Но прогресс радиоастрономии поставит ряд других, может быть, совершенно неожиданных проблем.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Из предисловия автора к первому изданию	3
Предисловие автора ко второму изданию	4
Глава I. Введение	5
Глава II. Основы техники и методики радиоастрономических наблюдений	15
Глава III. Радиоизлучение «спокойного» Солнца	55
Глава IV. Радиоизлучение «возмущённого» Солнца	75
Глава V. Радиоизлучение Луны	97
Глава VI. Некоторые сведения о строении Галактики	102
Глава VII. Радиоизлучение Галактики	118
Глава VIII. Излучение радиолинии водорода с длиной волны 21 см	140
Глава IX. Открытие «радиозвёзд»	175
Глава X. Космические лучи и вторая составляющая радиоизлучения Галактики	191
Глава XI. Радиотуманности	208
Глава XII. Радиогалактики и проблема радиоизлучения Метагалактики	254
Глава XIII. Радиолокационная астрономия	290
Заключение	295

Цена 5 р. 45 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1955