

**С. Я. Брауде
В. М. Конторович**

Радиоволны рассказывают о Вселенной



Брауде С.Я.
Конторович В.М.

Радиоволны рассказывают о Вселенной



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 52
ББК 22.6
К 65

Брауде С.Я., Конторович В.М. **Радиоволны рассказывают о Вселенной.** — 3-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-1262-8.

Книга рассказывает о достижениях современной радиоастрономии.

В популярной форме изложены наблюдательные и теоретические данные о радиогалактиках, квазарах, пульсарах, космических мазерах и других космических объектах, излучающих радиоволны. Рассмотрены пути эволюции звезд, взрывы сверхновых и радиоизлучение их остатков, возникновение белых карликов и нейтронных звезд, явления в центрах галактик и слияния галактик, ответственные за возникновение радиогалактик и квазаров. Обсуждается радиоизлучение Солнца, в том числе связанное со вспышками, и радиоизлучение планет. Излагается современная точка зрения на эволюцию Вселенной, происхождение оставшегося от Большого Взрыва реликтового излучения и его анизотропии. Отдельная глава посвящена описанию радиотелескопов.

Рассчитана на студентов, преподавателей и всех интересующихся проблемами современной науки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Предисловие (к первому изданию)	7
Предисловие (ко второму изданию)	8
Невидимый мир (вместо введения)	9
Глава 1. XX–XXI век — революция в астрономии	13
Открытие Галактики и большой Вселенной	13
Расширяющийся мир	14
Красное смещение	17
Рождение радиоастрономии	20
Большой взрыв	21
Судьбы звезд	24
Судьбы звезд (продолжение)	27
Круг замыкается	29
Глава 2. Как устроены и какие существуют радиотелескопы.	33
Рефлекторные антенны параллельного синтеза	37
Рефракторные антенны параллельного синтеза	44
Радиотелескопы с незаполненной апертурой	47
Системы параллельного синтеза	47
Рефракторные радиотелескопы	47
Системы последовательного синтеза	50
Система с независимой записью сигналов	58
Южная Европейская Обсерватория	60
Радиоинтерферометры «УРАН» Академии наук Украины	60
Приемники излучения (радиометры)	64
Радиотелескопы XXI века	65

Глава 3. Радиоастрономия Солнечной системы	71
Радиоизлучение Солнца	71
Излучение спокойного Солнца	71
Солнечные всплески.	77
Радиоизлучение планет Солнечной системы.	88
Юпитер	89
Земля	89
Радиолокационная астрономия.	91
Что позволяет измерить радиолокационная астрономия.	91
Радиолокационные наблюдения Луны и планет Солнечной системы	93
Радиолокация Солнца	95
 Глава 4. Наша галактика в радиолучах	99
Структура Галактики в радиолинии водорода.	102
Рекомбинационные радиолинии и области H II.	108
Молекулярные космические радиолинии	114
Радиоизлучающие оболочки взорвавшихся звезд	127
Радиопульсары	138
Микроквазары	149
Центр Галактики.	150
 Глава 5. Другие миры	160
Внегалактические объекты, излучающие радиоволны.	163
Общие свойства внегалактических радиоисточников	164
Нормальные галактики.	164
Радиогалактики	165
Квазары.	165
Лацертиды.	167
Дискретные источники космического излучения	168
Обзоры и каталоги.	168
Возможные типы частотных спектров	172
Нелинейные электронные спектры	173
Экспериментальные данные о частотных спектрах	176
Распределение яркости.	179
Структура радиогалактик в скоплениях	183

«Сверхсветовые» источники	185
Поляризация излучения	186
Галактики с активными ядрами	188
Мегамазеры	191
Слияния галактик как причина активности	192
От сверхновых к гиперновым	196
Глава 6. Мир в целом	201
Геометрия расширяющегося мира	201
Первое отступление — черные дыры	210
Второе отступление — космогония XX века	216
Радиоастрономия и космология	220
Реликтовое излучение и космология	223
Сахаровские пики	225
Космический вакуум	227
Заключение	231
Семен Яковлевич Брауде (1911–2003)	234
Литература	237

ПРЕДИСЛОВИЕ

Третье издание нашей книги выходит в замечательное время для астрономических исследований и любителей астрономии. Я имею в виду даже не столько Год Астрономии, объявленный ЮНЕСКО, сколько успешный запуск целой плеяды космических телескопов самых разных диапазонов. К заслуженному ветерану — телескопу *Хаббл*, рентгеновским телескопам *Ньютон* и *Чандра*, гамма-телескопу *Интеграл* — присоединились телескопы *Спитцер* и *Гершель* в инфракрасном, *Планк* в миллиметровом и *Ферми* в гамма-диапазоне. Запущен телескоп *Кеплер* для поиска планет. Непрерывно совершенствуются и работают замечательные наземные оптические, гамма- и радиотелескопы. В Европе строится грандиозный низкочастотный радиотелескоп ЛОФАР, высоко в Андах скоро вступит в строй субмиллиметровый радиотелескоп АЛЬМА, вот-вот произойдет запуск космического радиоинтерферометра. Это означает, что в самое ближайшее время нас ждет новое, очень значительное продвижение по пути познания Вселенной.

Автор благодарен Издательскому дому «Академперіодика» НАН Украины, в котором в 2005 г. вышло 2-е издание нашей книги, директору Издательского дома Е. Г. Вакаренко и зам. директора Л. Ф. Куртенку за разрешение использовать его в данном издании и сделать доступным более широкому кругу читателей. Автор благодарен своим коллегам А. А. Коноваленко, М. А. Сидорчуку и В. А. Шепелеву за сделанные замечания и дополнения, а также студентам кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина за помощь в устранении ряда неточностей и опечаток.

В. М. Конторович

Укажем на источники добавленных иллюстраций с благодарностью их авторам, не упоминая рисунки, перешедшие из 1-го издания книги:

Рис. 1.1 — веб-сайт HST и Chandra, а также журнал «Земля и Вселенная», <http://hubblesite.org/>; <http://chandra.harvard.edu/>; рис. 2.2 — веб-сайт NRAO <http://www.nrao.edu/>; рис. 2.4 — <http://www.jb.man.ac.uk/>; рис. 2.6 — <http://www.mpfir-bonn.mpg.de/div/effelsberg/>; рис. 2.18 — веб-сайт NRAO; рис. 2.23 — <http://alma.nrao.edu/>; рис. 3.1 — <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>; рис. 4.12 — Из книги: «Cosmic masers: from protostars to black holes», 2003; рис. 4.19 — Из обзора «Parks multibeam pulsar», MNRAS, 2001; рис. 4.21 — веб-сайт NRAO; рис. 4.28 — <http://www.eso.org/>; рис. 5.3 — веб-сайт NRAO, <http://hea-www.harvard.edu/XJET/>; рис. 5.7 — веб-сайт NRAO; рис. 5.14 — <http://hea-www.harvard.edu/XJET/>; рис. 5.17 — <http://hubblesite.org/>; рис. 5.18 — по работе Д. Сандерса и др. Ap. J., 1988; рис. 5.19 — по работе И. Ф. Миравеля и др. A & A, 1991; рис. 5.20 — по работе И. Пикко в сб. «The epoch of galaxy formation»; рис. 5.21, 5.22 — <http://hubble.nasa.gov/>; рис. 5.23 — по работе Фрайла и др. Nature, 1998.

ПРЕДИСЛОВИЕ

(к первому изданию)

Вторая половина XX века характеризуется бурным развитием астрономических исследований. Еще 50 лет тому назад под астрономией подразумевали науку о Вселенной, почти все данные о которой человечество получало, изучая электромагнитные волны, приходящие к нам из космоса через узкое «оптическое» окно шириной около октавы.

В настоящее время, изучая Вселенную, астрономия использует огромный диапазон частот шириной около 50 октав, который простирается от сверхдлинных радиоволн до жестких гамма-лучей. Астрономия стала всеволновой. Она с успехом использует также корпускулярное излучение, например нейтрино. Можно с полным правом утверждать, что в XX (а теперь уже и в XXI) веке мы переживаем революцию в астрономии, значение которой вполне сравнимо с революцией времени Коперника, Кеплера и Галилея.

Использование для изучения космических объектов электромагнитных колебаний с частотами, отличными от оптических, началось в 30-е годы XX века. Первыми были радиоволны. С той поры радиоастрономии удалось открыть целый ряд новых объектов и явлений.

Древнейшая из наук — астрономия — является и одной из наиболее популярных. С возникновением радиоастрономии наряду с научными работами, в которых излагались ее методы и наиболее существенные достижения, начали выходить и научно-популярные книги. Однако процесс усовершенствования радиоастрономических инструментов и исследования на них развиваются столь быстро, что научно-популярная литература не успевает их своевременно освещать. Наша книга ставит своей целью в какой-то мере восполнить этот пробел, рассказав в самых общих чертах о том, что могут узнать радиоастрономы о Вселенной и какими средствами они ее изучают.

Введение, первую, четвертую и шестую главы книги написал В. М. Конторович, вторую, третью и пятую главы — С. Я. Брауде.

Мы старались обходиться по возможности без математики и лишь изредка использовали ее в объеме, доступном читателю со средним образованием. В списках литературы мы отдали предпочтение источникам, доступным широкому читателю, и не ставили перед собой задачи дать полную библиографию по вопросам, затронутым в книге.

Мы хотим поблагодарить наших коллег, и в первую очередь П. В. Блюха, И. Г. Колесника, В. Г. Писаренко, за полезные замечания, которые старались учесть, Е. И. Власюк, Н. А. Степанову, А. П. Мирошниченко, Л. Г. Пташник — за помощь в выполнении фотографий, рисунков и таблиц.

ПРЕДИСЛОВИЕ

(ко второму изданию)

С момента выхода первого издания книги прошло более 20 лет. Это были годы поразительного развития всех ветвей астрономии, в том числе и радиоастрономии, которой посвящена книга. Кроме того, хотя планировали переиздание мы вместе, заканчивать его приходится только одному из авторов. Изменился не только взгляд на многие процессы в окружающем нас Большом мире. Изменился и окружающий нас ближний мир, изменился и наш потенциальный читатель. В этом издании мы даем ссылки также и на сайты Интернета, где можно найти важную информацию и которые теперь стали вполне доступны заинтересованному читателю. Ряд разделов книги существенно дополнен новой информацией. Но в целом и ее план, и содержание большинства глав выдержали испытание временем и сохранены в книге. Главы, написанные в свое время С. Я., я старался, по возможности, не изменять, а стремился ограничиваться дополнениями к тексту. Но не всегда это было возможно. Добавление нового материала неизбежно требовало сокращений первоначального. Это относится прежде всего к главе о телескопах, размах строительства которых за эти годы потребовал бы написания отдельной книги. Это относится также к разделу, посвященному исследованию Солнца и планет Солнечной системы. Здесь поразительные успехи последних лет и приоритет лежат все же в другой области и техники и спектра. Поэтому указанные разделы с некоторыми сокращениями оставлены в первоначальном виде, как они были написаны С. Я. Наибольшие добавления и изменения коснулись внегалактической радиоастрономии, исследования Центра нашей Галактики, описания космических мазеров, и, конечно же, исследования реликтового излучения и космологии.

Автор благодарен сотрудникам Радиоастрономического института и Института радиофизики и электроники НАН Украины за помощь в работе над переизданием книги. В особенности М. А. Сидорчуку и Е. Ю. Банниковой, а также И. А. Житренко за самоотверженное воспроизведение рисунков, В. В. Захаренко, О. М. Ульянову и Л. В. Здорик за сканирование 1-го издания книги, послужившего основой для написания нового текста, Г. В. Голубничей за его предварительное редактирование. Л. В. Здорик и Л. Н. Остапченко за быструю и безотказную помощь в напечатании новых страниц. Моим коллегам Е. Ю. Банниковой и С. В. Степкину за помощь в подборе современных материалов. Надежде Михайловне и Ирине Семеновне Брауде я благодарен за ценные материалы из архива Семена Яковлевича. Редакции журнала «Радиофизика и Радиоастрономия» — за разрешение воспроизвести ряд материалов, в том числе персоналию из юбилейного издания журнала. А. В. Меню и А. А. Коноваленко за ценные дополнения в соответствующих местах текста. Л. Н. Литвиненко за постоянную поддержку. Без неоценимой помощи Я. С. Яцкива эта книга никогда бы не появилась.

Я благодарен моим домашним за помощь и терпение.

НЕВИДИМЫЙ МИР (вместо введения)

На поверхности Земли человек надежно защищен от проникающих космических излучений многокилометровой толщей атмосферы. Она не пропускает ни рентгеновское, ни еще более жесткое гамма-излучение, в значительной мере — благодаря тонкому слою озона — задерживает ультрафиолетовое излучение Солнца. В ясную безоблачную погоду мы видим Солнце, а ночью звезды лишь потому, что в атмосфере есть «окно» прозрачности для света, т. е. электромагнитных волн оптического диапазона. Тысячелетиями человечество черпало информацию об окружающей нас Вселенной, глядя в это окно. Для более длинных — инфракрасных и миллиметровых электромагнитных волн — прозрачность атмосферы ухудшается. Самые длинные волны, используемые для радиовещания, не пропускаются ионосферой — прозрачным в оптических лучах и потому невидимым проводящим слоем, окутывающим Землю на высотах в несколько сот километров. Замечательно, что между этими диапазонами лежит еще одно окно прозрачности. Через него человечество также с давних времен могло бы наблюдать Вселенную, если бы люди обладали радиоглазами. Радиоволны — от декаметровых до миллиметровых волн — свободно проникают из космоса на Землю, достигая ее поверхности. Но для человека это неподходящий диапазон с чисто биологической точки зрения — природа не обеспечила людей (и животных) соответствующими органами чувств. Только техническая цивилизация, дав людям радио, позволила увидеть «невидимую сторону» Вселенной. Это был первый прорыв. За ним последовали другие, когда были выведены на орбиту ракеты, искусственные спутники и межпланетные корабли. Стала доступной информация, заключенная в том широчайшем диапазоне длин волн, который задерживается атмосферой. И тогда человек увидел Вселенную во всем многоцветье ее излучений (рис. 1). В радиолучах удалось впервые детально рассмотреть нашу звездную систему — Галактику — с ее завитыми в спираль «рукавами», где содержатся газ и большинство молодых горячих звезд. В радио- и инфракрасном диапазонах удалось увидеть ее Центр, скрытый завесой пыли (как казалось ранее — навечно) от людских глаз, вооруженных лучшими оптическими телескопами. На счету радиоастрономии целый ряд замечательных достижений. Это открытие реликтового излучения, оставшегося от грандиозного «Большого взрыва». Открытие самых

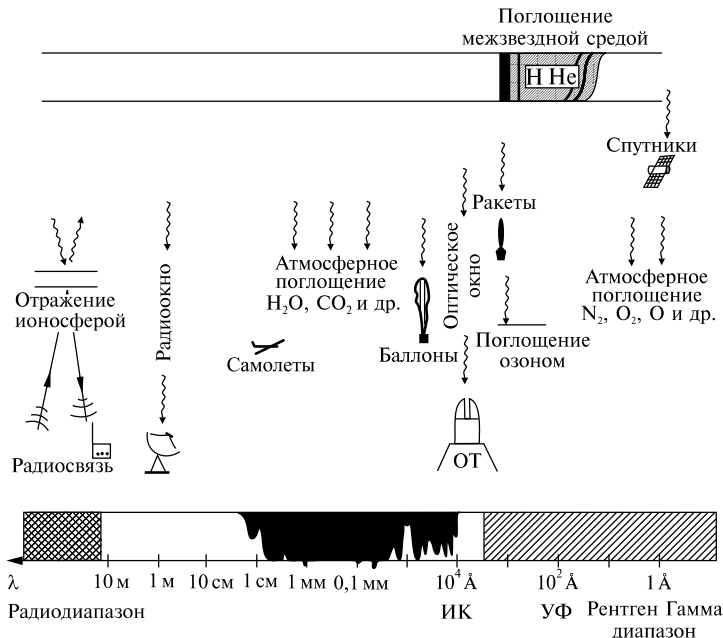


Рис. 1. Окна «прозрачности» в атмосфере для электромагнитных волн. Показаны области поглощения межзвездной средой (вверху) и атмосферой (снизу). В промежутке между радио- и оптическим окнами есть «форточки», в которых также возможны наземные измерения. В областях непрозрачности атмосферы измерения проводятся в зависимости от диапазона с помощью самолетов, баллонов, ракет, спутников, что символически изображено на рисунке

далеких и поэтому самых «юных» объектов во Вселенной — квазаров. Открытие нейтронных звезд — пульсаров, быстро вращающихся радиомаяков нашей Галактики, являющихся средоточением экстремальных свойств — сверхсильных магнитных полей, сверхтекучести нейтронной жидкости и максимальных плотностей вещества. Открытие изобилия межзвездных молекул, в том числе сложных органических соединений, которые могут иметь отношение к происхождению жизни. А наблюдения волн, генерируемых в короне Солнца, радиосигналы от космических мазеров, приходящие из мест рождения звезд, радиоизлучение остатков взрывов сверхновых — самых грандиозных явлений в звездном мире Галактики, дающих жизнь пульсарам и рождающих космические лучи! Мир, представлявшийся ранее довольно единообразным, когда считали его состоящим практически только из звезд, напоминает, как любят теперь говорить астрономы, сад или зоопарк, населенный причудливыми

созданиями¹ разнообразнейших «расцветок» и форм. Наиболее многочисленны в этом «зоопарке» фотоны теплового реликтового излучения и нейтрино. На каждый атом вещества во Вселенной приходится около миллиарда квантов этого излучения (и, по видимому, столько же нейтрино). Его температура — всего около трех градусов, отсчитанных от абсолютного нуля. Равновесным (тепловым) является также излучение звезд, цвет которых зависит от температуры их поверхности (порядка нескольких тысяч градусов). Зачастую равновесны космическое инфракрасное и рентгеновское излучения. Но космическое *радиоизлучение*, как правило, очень сильно неравновесно (рис. 2). Оно свидетель-

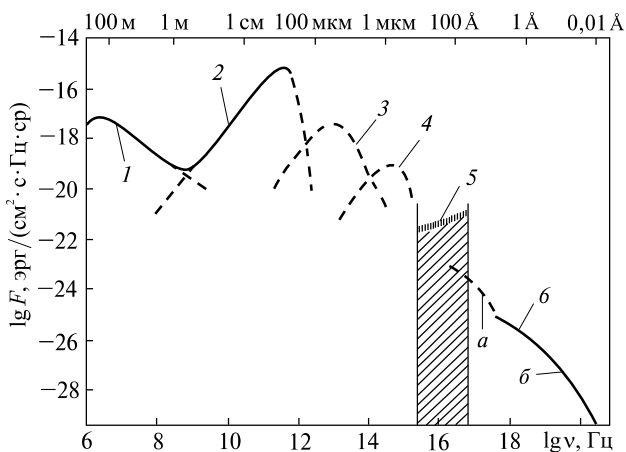


Рис. 2. Спектр космического электромагнитного излучения, создаваемый объектами различной природы — «фон», на котором «видны» отдельные более яркие источники: 1 — дискретные радиоисточники; 2 — чернотельное излучение 2,7 К; 3 — инфракрасные источники; 4 — оптическое излучение нормальных галактик; 5 — ненаблюдаемый ультрафиолет; 6 — рентгеновское излучение (а — мягкое, б — жесткое)

ствует о бурных процессах ускорения частиц (электронов) до скоростей, близких к световым, причем излучение происходит в магнитных полях, как регулярных, так и хаотических, силовые линии которых нередко настолько запутаны, что не выделяют каких-либо преимущественных направлений, по которым могла бы сориентироваться достаточно длинная магнитная стрелка.

¹ Неудивительно, как заметил И. С. Шкловский, что с древнейших времен особое внимание привлекали «небесные странники» — планеты и кометы. Ловля комет в новое время стала своеобразным спортом и привела к созданию в 1781 г. знаменитого каталога Мессье незвездных объектов, мешающих быстрому обнаружению комет, с «персонажами» которого мы еще встретимся.

Таково излучение радиогалактик, происходящее из колоссальных облаков плазмы, возможно, выброшенных из материнской галактики, наблюдаемых в современные радиотелескопы. Таковы же радио- и оптическое (!) излучения Крабовидной туманности — остатка вспышки сверхновой, произошедшей около тысячи лет тому назад и фигурирующей в списке Мессье под номером 1. И таково же, по-видимому, излучение активных ядер галактик, горячих нестационарных объектов, столь отличающихся от нашего относительно спокойного Млечного Пути. Возможно, таким является и излучение квазаров — самых мощных радиоизлучателей Вселенной. Более того, эти же ускоренные до релятивистских скоростей электроны, передавая при столкновениях часть своей энергии фотонам, заставляют светить радиогалактики и квазары и в рентгеновском диапазоне, превращая их в объекты и рентгеновской астрономии. Теперь уже немыслимо обсуждение строения Вселенной без использования данных радиоастрономии и вообще всей богатейшей неоптической информации. Астрономия, используя диапазон от жестких гамма-лучей до длинных радиоволн, уже стала всеволновой. В этом результат великой технической революции, произошедшей в астрономии в XX веке. Конец века ознаменовался грандиозными открытиями: обнаружением флуктуаций реликтового радиоизлучения — «оттисков» зародышей современных звездных систем, открытием ускоренного расширения Вселенной под влиянием антигравитации вакуума, раскрытием тайны космических гамма-всплесков, наблюдением через гравитационные линзы юных сверхдалеких (даже более далеких, чем квазары) галактик, открытием микроквазаров в нашей Галактике, и, наконец, обнаружением уже более сотни планет, обращающихся вокруг звезд солнечного типа. XXI век достойно принял эту эстафету: революция продолжается. Но есть еще одна сторона современной астрономии: она стала эволюционной. Как никогда, в небывалом единстве Вселенная представляется нам в развитии: астрономическая, химическая, биологическая, геологическая эволюции составляют единый образ изменения и развития, пронизавший всю науку XX, а теперь и XXI века². К обсуждению эволюционной картины мира мы и перейдем в первой главе.

² Наподобие проблем Гильберта в математике, сформулированных им с наступлением XX века, патриарх астрономии Алан Сэндидж сформулировал астрономические проблемы, которые XX век передает веку XXI (см. журнал «Природа», № 3 за 2003 г.). Лауреат Нобелевской премии академик В. Л. Гинзбург неоднократно формулировал список важнейших проблем по физике и астрофизике на переломе веков.

Глава 1

XX–XXI ВЕК — РЕВОЛЮЦИЯ В АСТРОНОМИИ

В этой главе мы вместе с читателем бросим общий взгляд на современное состояние тех представлений о Вселенной, которые образуют основу, фундамент всей деятельности астрономов, какими бы методами они ни пользовались. Эти представления в то же время характеризуют основные достижения физики и астрономии нашего века, впервые создавших величественную и, по-видимому, непротиворечивую научную картину мира «в целом». На этом фоне в дальнейшем изложении мы сможем уже детально рассказать о достижениях, методах и перспективах радиоастрономии.

Я человек, я посередине мира.
За мною мириады инфузорий,
Передо мною мириады звезд.
Я между ними лег во весь свой рост —
Два берега связующее море.
Два космоса соединивший мост.

А. Тарковский

ОТКРЫТИЕ ГАЛАКТИКИ И БОЛЬШОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Начало XX века в физике подобно затишью перед бурей: кажущаяся ясность, полнота — связанная и последовательная картина мира; только несколько облачков на этом ясном небе, из которых чуть позже грянули громовые удары, взорвавшие классическую физику и ознаменовавшие рождение релятивистской и квантовой механики. В астрономии — представление о безграничном мире звезд и звездных систем, устроенных подобно нашей Солнечной системе, торжество ньютоновского закона тяготения. Далеко позади бури «революций», разрушивших «хрустальные сферы» и распространивших законы «подлунного мира» на всю Вселенную, «Несчетны Солнца там горят, народы там и круг веков», — писал еще Ломоносов. И в то же время — туманности, изучаемые Гершелем и его последователями

в крупнейшие телескопы. К началу века завершается строительство еще более крупных телескопов, в том числе 60-, а затем и 100-дюймового рефлектора Хейла на горе Маунт-Вилсон, сыгравшего замечательную роль в дальнейших событиях. Деятельность Дж. Хейла отражала новый этап в строительстве телескопов и астрономии. Если раньше сами астрономы шлифовали стекла (и Галилей, и Ньютон, и Гершель), то XIX век — век промышленности и инженерии — позволил создать недоступные труду одиночек машины для наблюдения за Вселенной. Этот процесс продолжается и поныне. В 1948 г. начал действовать 200-дюймовый (пятиметровый) хейловский телескоп в обсерватории Маунт-Паломар. В начале 80-х, когда вышло предыдущее издание этой книги, крупнейшим в мире был «шестиметровый» телескоп Академии наук СССР. Он установлен на Северном Кавказе близ станции Зеленчукская в 1977 г. Сейчас в мире работает целая армада оптических телескопов с диаметром зеркала шесть и более метров. Среди них «Джемини» — два 8-метровых «близнеца» на горе Мауна Кеа на Гавайях, четыре 8-метровых телескопа на пустынном высокогорном плато в Чили, образующие оптический интерферометр, по два 10-метровых телескопа на Гавайях и в Чили. Эти телескопы, а также их меньшие по размерам партнеры используют самую совершенную современную адаптивную оптику, электронику, приемники излучения. На орбите успешно трудится заслуженный ветеран, космический телескоп имени Хаббла с диаметром зеркала 2,4 м (рис. 1.1) со своими молодыми партнерами (см. Предисловие). Столь велик прогресс в астрономической технике сегодня. Но эти проекты уже так дороги, что недоступны отдельным странам, и являются результатом успешного межгосударственного сотрудничества.

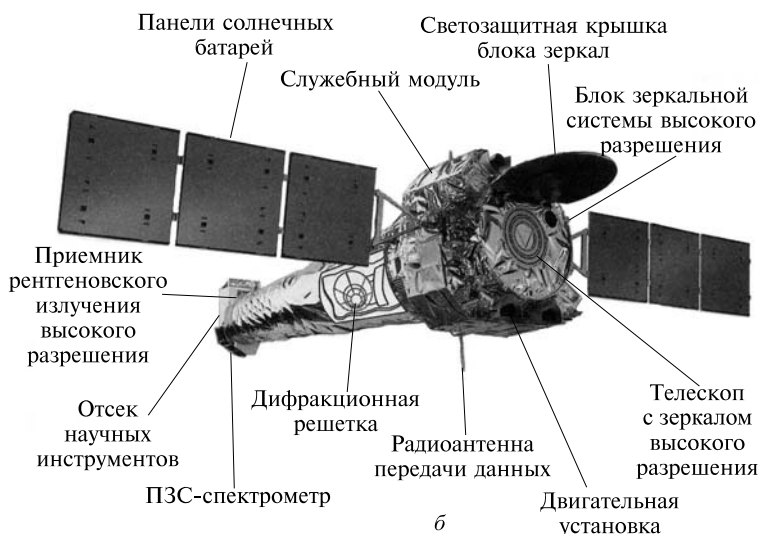
Введение в строй больших телескопов позволило уже к двадцатым годам прошлого века в общих чертах завершить процесс открытия нашей Галактики и Большой Вселенной. Земля, уже раз отошедшая от Центра Мироздания на периферию Солнечной системы, теперь вместе с Солнцем оказалась на периферии нашего звездного острова — Млечного Пути, а он стал одной из пылинок Метагалактики, содержащей почти столько же галактик, других островов, сколько звезд в каждом таком острове.

РАСШИРЯЮЩИЙСЯ МИР

Между тем в физике происходили крупнейшие события. К 1916 г. Эйнштейн завершил создание общей теории относительности (ОТО). Как частные случаи эта теория содержит



а



б

Рис. 1.1. Космический телескоп имени Э. Хаббла (а). Рентгеновская космическая обсерватория «Чандра» (б)

и ньютоновскую теорию тяготения, и специальную (частную) теорию относительности (СТО). Если СТО сформулирована Эйнштейном в одной работе (1905 г.), то при создании ОТО окончательной формулировке уравнений предшествовала целая серия работ, докладов — буквально на каждом последующем заседании Прусской академии наук. Достижения сменялись отступлениями. И, наконец, уравнения получены — самые общие,

самые красивые и самые трудные уравнения физики, описывающие тяготение как результат искривления пространства–времени. Из них вытекали три знаменитых эффекта: объяснение вращения «перигелия» Меркурия, предсказание вдвое большего, чем по Ньютону, отклонения света при прохождении мимо Солнца¹ и «гравитационное» красное смещение частоты. В наше время — время лазеров и спутников — точности и возможности эксперимента возросли настолько, что целый ряд эффектов ОТО (не говоря уже о СТО) подтвержден в «лабораторных» условиях. Но тогда количественное подтверждение экспедицией А. Эддингтона в 1919 г. эффекта отклонения света во время солнечного затмения произвело сенсацию, далеко вышедшую за пределы чисто научной литературы. Споры об относительности стали неотъемлемой чертой интеллектуальной жизни этого времени. В целом ситуация хорошо описывается эпиграммой, известной по переводу С. Маршака, первые две строки которой принадлежат английскому поэту А. Поупу и посвящены Ньютону: «Был этот мир глубокой тьмой окутан. Да будет свет! И вот явился Ньютон. Но сатана недолго ждал реванша. Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше». После создания уравнений Эйнштейна начались поиски их решений. Именно тогда было найдено замечательное решение К. Шварцшильда, таившее в себе сложности идеологии коллапса и «черных дыр», что в полной мере стало ясно лишь впоследствии. В понятой в то время части это было статическое сферически-симметричное решение. Сам Эйнштейн искал также статические, не зависящие от времени решения, которые должны были бы описать существующую Вселенную. Для этого ему пришлось ввести дополнительный «космологический» член (что попеременно считалось разными исследователями то величайшей заслугой, то величайшей ошибкой Эйнштейна²), который позволял найти такие решения, но они содержали источники «материи» и «поля» и вносили своеобразные трудности в теорию.

Между тем советский физик А. А. Фридман нашел нестационарные решения уравнений Эйнштейна, в том числе и без космологического члена. Вначале Эйнштейну показалось, что

¹ На самом деле, к этому времени даже сам факт отклонения, связанный с устаревшей ньютоновской корпускулярной теорией света, был забыт.

² Недавнее открытие ускоренного расширения Вселенной, вызываемого антигравитацией вакуума, также связано с этой идеей Эйнштейна, которую он сам отбросил в свое время, считая, что она не соответствует наблюдениям. Более подробно мы расскажем об этом в 6-й главе.

Фридман ошибся, но вскоре он признал свое заблуждение. В зависимости от знака кривизны пространства–времени решения Фридмана описывали «замкнутый» или «открытый» однородный мир. Этот мир был нестатичен. Он либо расширялся, либо сжимался, причем в случае замкнутого мира расширение должно было смениться сжатием. А то, какой должна была быть кривизна, определялось только плотностью материи в соответствии с идеями Римана и уравнениями Эйнштейна. Ответ на вопрос, в каком мире мы живем, могли дать только наблюдения.

«В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся, и любой толковый студент усваивает теорию без труда. Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но это поймет только тот, кто пережил все сам» (А. Эйнштейн).

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

Совершенно независимо на протяжении многих лет американский астроном Э. Хаббл, продолжая работу на 100-дюймовом хейловском телескопе, измеряет спектральные свойства галактик — «туманностей» Гершеля (рис. 1.2–1.5). Ему удастся выделить в них наиболее яркие звездные скопления и исследовать



Рис. 1.2. Туманность Андромеды (спиральная галактика М 31)

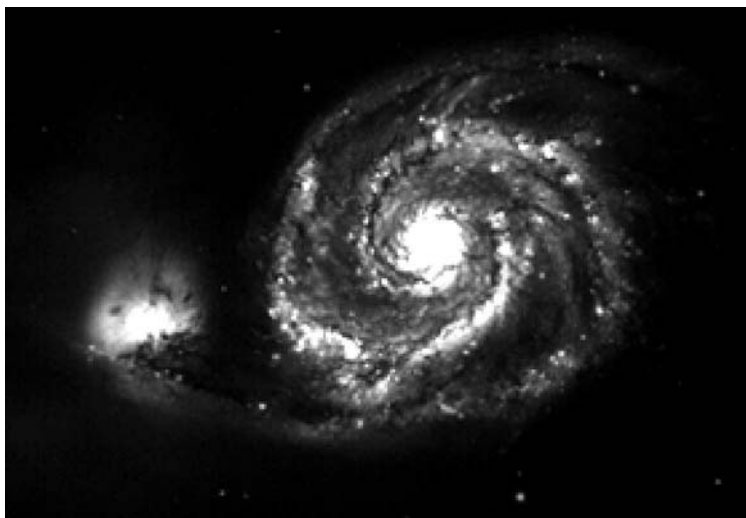


Рис. 1.3. Спиральная галактика М 51

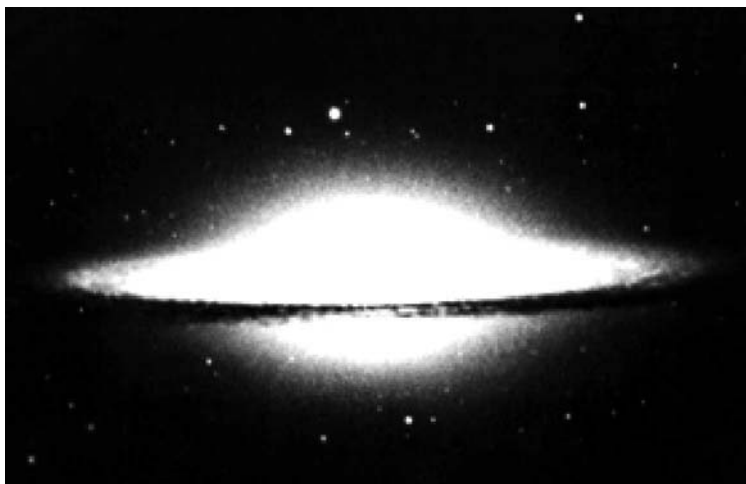


Рис. 1.4. Спиральная галактика М 104, видимая с ребра

их спектры. Оказалось, что эти спектры отличаются от спектра звезд нашего Млечного Пути: почти все они сдвинуты в более длинноволновую красную сторону спектра. Это *красное смещение* z оказывается разным для разных галактик. Хаббл удалось установить для ближайших галактик, для которых можно было найти более или менее надежные способы определения рас-



Рис. 1.5. Галактика в Центавре NGC 5128 (радиогалактика СепА). Наблюдения в ИК-диапазоне позволили увидеть за пылевой полосой результат слияния: окружающую центр богатую газом спиральную галактику

стояний, закономерность: величина красного смещения пропорциональна расстоянию до галактики. Последующая кропотливая работа привела в конечном счете к закону Хаббла $z = Hr/c$. Постоянная Хаббла H в этом законе вначале считалась равной $500 \text{ (км/с)} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, а затем, в результате пересмотра шкалы расстояний, уменьшилась на порядок; современное ее значение с десятипроцентной точностью $H \approx 70 \text{ (км/с)} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

Какова же природа красного смещения? Блестящая идея его интерпретации связала его с расширением Вселенной. Известно, что при удалении источника любых колебаний их частота уменьшается из-за эффекта Допплера. Еще не так давно для объяснения эффекта Допплера привлекали знакомое всем изменение тона свистка паровоза по мере его удаления от наблюдателя. Теперь паровозы стали редкостью, зато эффект Допплера широко известен. Его изучают в школе, а сотрудники ГАИ обнаруживают с его помощью превысивших скорость водителей. Допплеровская природа красного смещения (при $z \ll 1$ $z = V/c$) означает разбегание галактик. Пропорциональность скорости удаления V расстоянию r может быть легко понята, если исходить из однородного расширения, подобного расширению надувного резино-

вого шарика или растягиваемой резинки. Так как растягивается в одно и то же число раз каждый элемент, то степень удаления узелков на резинке или точек, нарисованных на шарике, пропорциональна расстоянию между ними. Более удаленные будут соответственно быстрее удаляться друг от друга.

В расширяющейся Вселенной —
Если это действительно так, —
Что ты чувствуешь,
Обыкновенный
Человек,
Неученый простак?
Эти споры о красном смещенье,
Возле них создаваемый шум
Не приводят в смущенье твой ум.
И когда разбеганье Галактик
Наблюдаешь в космической мгле,
То не столь теоретик, сколь практик,
Обращаешь ты взоры к Земле³.

Л. Мартынов

РОЖДЕНИЕ РАДИОАСТРОНОМИИ

Радио — это также подарок девятнадцатого века двадцатому. М. Фарадей, Дж. Максвелл и, наконец, Г. Герц проложили путь к исследованию невидимых электромагнитных волн, значительно более длинных, чем световые. В конце века во многих лабораториях мира с энтузиазмом экспериментировали с волнами Герца. Честь открытия радио как средства связи принадлежит А. С. Попову. В 1896 г. в Петербурге им впервые была послана и принята радиограмма со словами «Генрих Герц». В лаборатории Ф. Брауна в Страсбурге к исследованиям в этой области приобщается молодой Л. И. Мандельштам, будущий создатель советской радиофизики. То, что пробовал Г. Маркони, вряд ли стал бы делать достаточно здравомыслящий физик — отрицательный ответ на вопрос о загоризонтной радиосвязи был очевиден: как и луч света, пучок радиоволн распространяется почти прямолинейно. Но Маркони устанавливает не только загоризонтную — заокеанскую радиосвязь! Следствием является открытие невидимой плазменной оболочки Земли — ионосферы — зерка-

³ Заметим, что Земля, Солнечная система, наша Галактика, небольшие скопления галактик представляют собой гравитационно связанные системы, которые не расширяются.

ла, отражающего достаточно длинные электромагнитные волны. Изучение ионосферы идет параллельно с развитием радиосвязи, Эпплтон, Брейт и Тьюв принимают отраженный от ионосферы сигнал, но радиолокации суждено появиться позднее. В молодой советской республике развитию радиосвязи уделяется особое внимание. Знаменитая Шуховская башня и радиостанция имени Коминтерна — символы той эпохи.

И, наконец, происходит событие, от которого радиоастрономия отсчитывает свое существование. В 1931 г. американский радиоинженер Карл Янский, испытывая антенную систему, обнаруживает шумы космического происхождения. Далее следует короткий, но выразительный этап любительской радиоастрономии. Подобно тому как ранее те, кого интересовали небеса, сами шлифовали линзы и мастерили телескопы, теперь другой американский радиоинженер, Грот Ребер⁴, строит у себя дома параболическую антенну для астрономических наблюдений.

Но надвигалась война. Радар стал тщательно охраняемым секретом Англии, защищавшейся от фашистских бомбардировок. Первые советские радиолокаторы смотрели в небо Москвы уже в 1941 г. Но как только отгремели последние выстрелы, военная техника стала использоваться в мирных исследованиях. Реализовывались довоенные планы, идеи, зарождавшиеся под обстрелами и бомбежкой, во время работ над военными проектами.

В оккупированной Голландии студент Ван де Хулст высказывает мысль о наблюдении Галактики в радиолинии основного строительного материала Вселенной — водорода. Об этом мы еще расскажем. Сейчас же для нас важно достижение уже «выбившейся в люди», сформировавшейся науки радиоастрономии — открытие реликтового излучения.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Идея «большого взрыва», высказанная Дж. Гамовым, связана с расширением Вселенной. Раз Вселенная расширяется, то в прошлом плотность вещества в ней должна была быть очень велика. Большим плотностям в начале расширения могли соответствовать и высокие температуры. Тогда картина расширения напоминает как бы большой взрыв с разлетающимися осколками — галактиками. На деле эта аналогия неполна. Сами галактики образовались на достаточно поздней стадии расширения (и охла-

⁴ 70-летнему юбилею этих событий был посвящен минисимпозиум «От Карла Янского до микроянских» в Будапеште в 2003 г.

ждения). Значительно раньше температуры были столь велики, что из всех видов материи преобладало излучение. Вначале излучение и вещество (т. е. совокупность частиц с отличной от нуля массой покоя) охлаждались «вместе». Но, начиная с момента, когда вещество из состояния ионизированной плазмы перешло в нейтральное состояние, их пути разделились. Взаимодействие излучения с веществом почти полностью прекратилось. С этого момента излучение охлаждалось отдельно и сильнее (см. подробнее гл. 6), чем вещество.

По оценкам Гамова, к настоящему времени его температура должна была упасть приблизительно до пяти градусов от абсолютного нуля температур. Но тогда это остывшее реликтовое излучение (РИ) должно было стать в основном радиоизлучением, подобно тому как при остывании меняется цвет раскаленных тел — они излучают преимущественно все более и более длинные электромагнитные волны.

Именно это излучение (температура его оказалась около 3 К) и было обнаружено радиоастрономами в 1965 г. История открытия весьма драматична. Для того чтобы обнаружить шум, соответствующий реликтовому излучению, нужна исключительная совершенная радиоприемная аппаратура. В США известный физик Р. Дикке с сотрудниками строили подобную аппаратуру, надеясь проверить гипотезу Гамова. Между тем необходимая для этого антенная система с малолшумящими приемниками была уже создана фирмой «Белл» для спутниковой связи (рис. 1.6). Два молодых экспериментатора, А. Пензиас и Р. Вилсон, начали систематические измерения радифона Галактики на сантиметровых длинах волн. К своему удивлению, они обнаружили, после исключения всех источников шума, изотропную компоненту с температурой около 3 К, которую никак не удавалось исключить. В группе Дикке сразу поняли, что открыто реликтовое излучение, и объяснили замечательный результат Пензиаса и Вилсона. Вскоре этот вывод получил дополнительное подтверждение. Ведь в сантиметровом радиодиапазоне лежит только часть кривой равновесного реликтового излучения, соответствующая классической области закона Рэлея–Джинса. С ростом частоты плотность энергии излучения проходит через максимум (который и определяет «цвет»), связанный уже с квантовой природой излучения — газа фотонов. Это знаменитый закон Планка, в котором впервые в 1900 г. появилась квантовая постоянная. Максимум и последующий спад лежат уже в трудной для наземных измерений миллиметровой области спектра (рис. 1.7). Здесь весьма велики ошибки эксперимента, но последние данные, по-

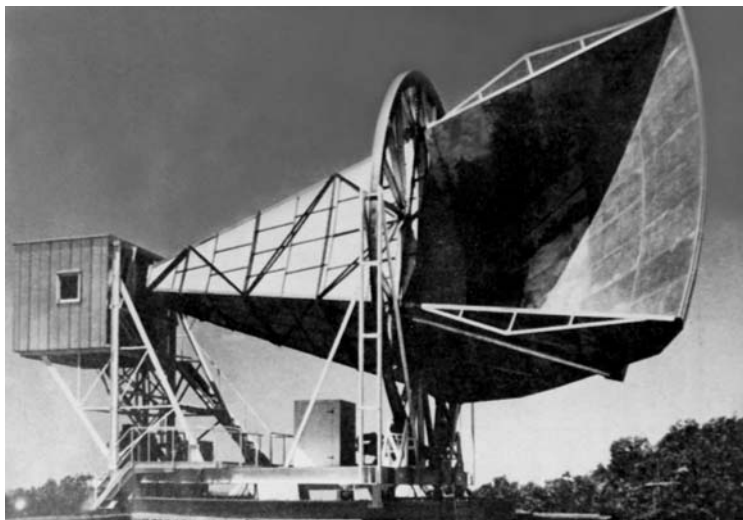


Рис. 1.6. Рупорная антенна, с помощью которой было обнаружено реликтовое излучение

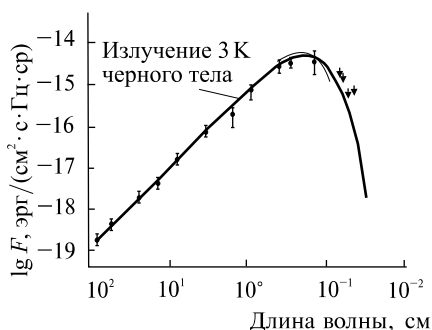


Рис. 1.7. Распределение энергии в спектре равновесного излучения (распределение Планка) и экспериментальные точки, соответствующие реликтовому излучению ($T = 2,7 \text{ K}$, ранние измерения). В настоящее время измеренные отклонения от планковской кривой не превышают сотой доли процента (см. гл. 6)

лученные с использованием как наземных, так и космических средств, уверенно свидетельствуют о планковском характере кривой (о чем более подробно будет рассказано ниже).

Более того, в результате почти двадцатилетнего направленного экспериментального и теоретического поиска были обнаружены флуктуации РИ, что прежде всего подтверждает правильность современных представлений об эволюции Вселенной. Обнаружены их угловая анизотропия, проявляющаяся, в частности, в Сахаровских пиках на углах порядка десятка минут дуги, а также поляризация, несущие бесценную информацию о ранней Вселенной.

Итак, Горячая Вселенная, Большой взрыв и различные его следствия — от образования легких элементов до образования галактик из первоначальных флуктуаций вещества — все укладывается в единую картину, мозаику, в которой отдельные части согласуются друг с другом или по крайней мере достаточно мирно уживаются. По-видимому, главное достижение — в единстве и динамичности картины, воссозданной наукой XX века, для которой стал характерным эволюционный сценарий, в отличие от «классицизма» прошлых веков.

СУДЬБЫ ЗВЕЗД

Эволюционными стали и наши представления о звездах. Звезда как символ вечности и нетленности издавна была любимой поэтами. «Чья сущность неизменна, — о звезды, слава вам!... не ведаете вы ни дряхлости, ни тлена», — эти строки Тютчева напомнил астрофизик Л. М. Озерной как пример противостояния поэзии и астрономии. Впрочем, были и более проникательные поэты.

Без жалости нас смерть разит:
И звезды ею сокрушатся,
И Солнца ею потушатся,
И всем мирам она грозит, —

писал Г. Державин.

И все же поэзии трудно конкурировать с современной наукой. Астрономы XX века смогли увидеть, как звезды живут и умирают и как они рождаются буквально на наших глазах.

Звезды — это гигантские термоядерные костры, горящие во Вселенной. Квантовая механика дала ключ к пониманию источника их энергии: это ядерное горючее, которое в настоящее время физики в сотрудничестве с инженерами хотят приспособить к мирному, управляемому использованию на Земле. «Нет ничего проще звезды», — сказал Эддингтон⁵. И действительно, в звездах типа нашего Солнца «горит» водород, высокая температура недр и связанное с ней давление препятствуют сжатию,

⁵ Этот тезис, впрочем, несколько поколебали результаты экспериментов Дэвиса по обнаружению солнечных нейтрино, долголетний маундеровский минимум солнечной активности и обнаружение стоминутных пульсаций его поверхности, плохо укладывающихся в привычные представления. В докладе с символическим названием «Загадки солнечной активности» Паркер — один из крупнейших знатоков Солнца — сказал не так давно: «Надо признать, что Солнце — искусный фокусник».

связанному с силой тяготения. Но наступает пора, когда водород выгорает, превратившись в гелий. Время горения зависит от температуры и, следовательно, через давление, — от массы звезды. Парадоксально, но чем больше масса, тем быстрее сгорает звезда. В этот период своей жизни звезда находится на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела, выражающей зависимость цвета звезды (т. е. температуры ее поверхности) от мощности излучения — светимости, в конечном счете связанной с массой. Разным температурам, точнее, спектральным классам, соответствуют буквы, выбранные ранее в алфавитном порядке в связи с утратившей потом свой смысл идеей, но сохраняемые по традиции (О, В, А, F, G, K, М)⁶. При движении от О до М вдоль главной последовательности температура звезды падает так (от 50 000 до 3000 К), что из голубой яркой звезды она превращается в тусклого красного карлика. Теперь известно, что это не реальный путь эволюции звезды (см. рис. 1.8б).

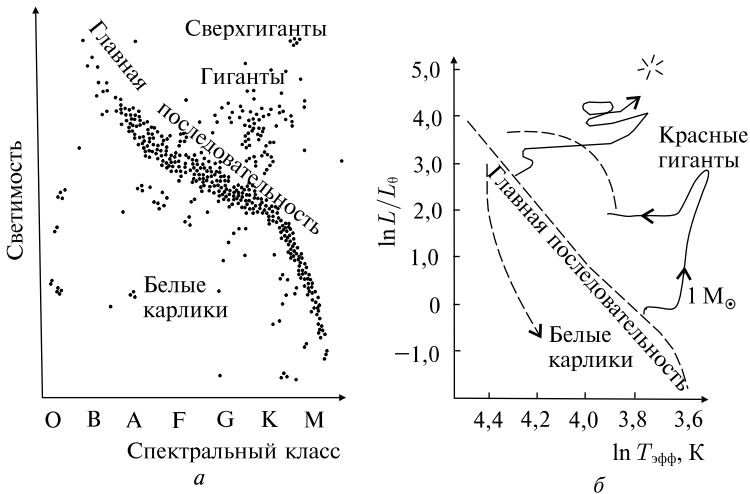


Рис. 1.8. Диаграмма спектр–светимость (а) и эволюционные треки звезд (б) (по А. Д. Камерону). Звезда с массой Солнца образует планетарную туманность и превращается в белый карлик. Массивная звезда взрывается, образуя сверхновую

Наша звезда — Солнце — желтая (класс G) и скромная по размерам, почти карлик, очень экономна в расходе энергии, ее хватит на миллиарды лет. Голубые же горячие звезды типа О

⁶ O, Be A Fine Girl, Kiss Me — шуточное мнемоническое правило.

сгорают за десяток миллионов лет. При выгорании водорода, который превращается в гелий, возобновляется сжатие, вновь повышается температура недр. Когда она повысится настолько, что начнет гореть гелий, звезда испытывает «второе рождение». Изменяется и «внешность» звезды, проходящей стадии красного гиганта и сверхгиганта. Подобным образом происходят смена реакций и последовательное производство и горение элементов вплоть до железа, начиная с которого реакции синтеза требуют уже затраты энергии. Тогда начинаются охлаждение и сжатие, которое, однако, может быть остановлено за счет квантовых эффектов. Согласно принципу запрета Паули, ферми-частицы, например электроны, протоны, нейтроны, т.е. частицы с полуцелым (в единицах квантовой постоянной Планка) собственным (спиновым) моментом количества движения, не могут находиться в одном и том же состоянии. Поэтому даже при температуре, равной абсолютному нулю, но при большой плотности в системах ферми-частиц должны быть частицы со значительными энергиями, если состояния с меньшими энергиями уже заняты подобными частицами. Например, в обычных земных металлах при комнатных температурах по тем же причинам энергии электронов соответствуют эффективным температурам в десятки тысяч градусов.

Такой «вырожденный» электронный газ образуется в звезде и останавливает сжатие, как показывает расчет, если масса звезды меньше 1,43 массы Солнца. При этом вещество звезды чрезвычайно плотно — атомные оболочки смяты и электроны обобществлены. Таких звезд размером с Землю («белых карликов») много, и открыты они уже давно. Примером может служить спутник Сириуса⁷, образующий двойную систему с ярчайшей на небосклоне массивной горячей звездой. В двойных системах, составляющих значительный процент всех звезд, легко определяются массы компонентов при удачном расположении их орбит, и по светимости и радиусу — плотность. Тем не менее прошли десятки лет и потребовалось создание квантовой механики, прежде чем астрономы признали существование белых карликов. Для пульсаров этот срок сократился до нескольких месяцев.

⁷ «Невидимая звезда Бесселя» (впервые заподозрившего наличие массивного спутника у Сириуса) — так называли современники еще не открытую звезду. Это была эпоха торжества вычислений: Леверье открыл новую планету в Солнечной системе и даже пытался указать на еще одну планету — между Меркурием и Солнцем. Аномалии орбиты Меркурия, на которые опирался Леверье, были впоследствии объяснены ОТО Эйнштейна.

СУДЬБЫ ЗВЕЗД (продолжение)

На пути превращения звезд, однако, могут встретиться фазы, которые приводят к взрывам, иногда катастрофическим для звезды. Термоядерные взрывы являются причиной разгорания *новых* звезд, входящих в двойные системы, а в *сверхновых* звездах в результате взрыва происходит почти полный сброс газовой оболочки. Наиболее известная из туманностей — Крабовидная (рис. 1.9 и рис. 1.10, см. вклейку) — это расширяющаяся оболоч-

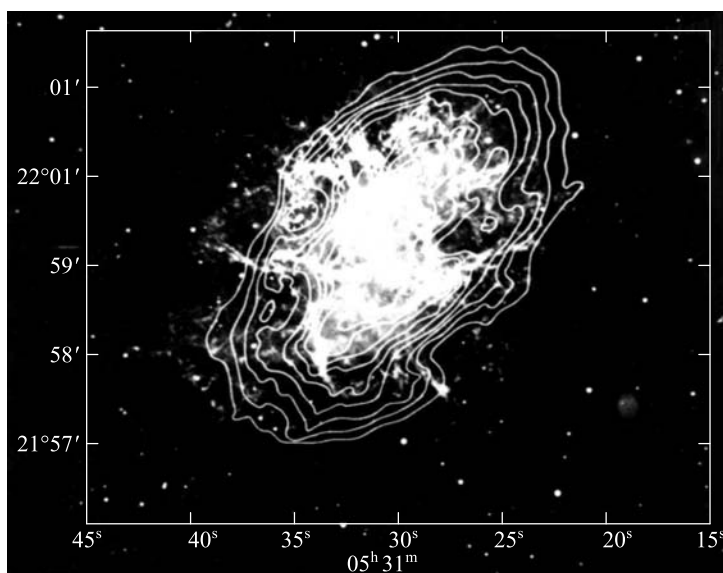


Рис. 1.9. Крабовидная туманность: радиоизофоты на фоне оптического излучения туманности

ка сверхновой, вспыхнувшей в 1054 г. и горевшей так ярко, что в течение многих месяцев она была видимой даже днем. В центре туманности радиоастрономы обнаружили звездный остаток взрыва — пульсар, оказавшийся не только радио-, но и оптическим, а также рентгеновским и гамма-пульсаром. Излучение Крабовидной туманности нетепловое, и разгадка его природы составила целую эпоху в астрофизике. Оказалось, что это излучение космических лучей (их электронной компоненты) в магнитном поле туманности. По-видимому, сам процесс ускорения космических лучей также происходит в сверхновых, в окрестностях пульсаров и т. п. Сверхновые вспыхивают редко — раз в 30–100 лет в одной

галактике — и в настоящее время наблюдаются только в других галактиках⁸. Наряду с мощнейшим оптическим излучением — в течение нескольких дней звезда светит так же ярко, как целая галактика, — безусловно, возникает и более жесткое излучение. Как в этот период, так и в последующем — в расширяющейся оболочке, в идущих по ней к окружающему газу ударных волнах — происходит ускорение частиц, дающих начало космическим лучам. Оболочка еще долго остается источником мощного нетеплового излучения, связанного с ускоренными частицами.

Что касается остатка взорвавшейся звезды, если он еще достаточно массивен, то в процессе взрыва он чрезвычайно уплотнится. Если же масса невзорвавшегося остатка звезды выше предельной ($1,43 M_{\odot}$) и в процессе взрыва плотность звезды превысит равновесную плотность белых карликов, то самосжатие продолжается. Так как электроны оказываются слишком близко от протонов, вступает в игру взаимодействие, при котором электрон и протон превращаются в нейтрон. Нейтронизация продолжается до тех пор, пока почти все вещество не превратится в нейтроны. Только вблизи поверхности, где давление меньше, может остаться некоторая примесь протонов, да на самой поверхности твердая, по-видимому железная, кора. Это так называемые нейтронные звезды. Они были предсказаны Л. Д. Ландау, В. Бааде и Ф. Цвикки еще в 30-е годы, а обнаружены, и притом неожиданно, спустя 40 лет с помощью радиоастрономии. Эта история достаточно хорошо известна, включая тот факт, что аппаратура, способная измерять быстропеременные сигналы, изготавливалась студентами и аспирантами под руководством профессора Э. Хьюиша совсем для других целей, а также обнаружение регулярных радиосигналов мисс Джоселин Белл и гипотезу о «маленьких зеленых человечках». Удивительно, что до открытия пульсаров никому не удалось представить себе нейтронную звезду как маяк и тем самым предсказать пульсары. (Хотя усиление магнитного поля при коллапсе и ускорение вращения предсказывались незадолго до открытия.) И насколько это трудно, ясно из того, что подыскать адекватное объяснение механизму радиоизлучения пульсаров до сих пор в полной мере не удалось.

Но и нейтронный вырожденный газ способен сдерживать гравитационное давление лишь тех звезд, у которых масса не очень велика и не превышает несколько солнечных. Замечательно, что безотносительно к тому, произойдет ли еще какая-либо «останов-

⁸ Сверхновая в Магеллановом Облаке, вспыхнувшая в 1987 г., явилась неожиданным подарком и полигоном для исследователей.

ка» в сжатии с ростом массы звезды, наступает предел по массе, когда на некоторой фазе сжатия сила обращается в бесконечность, так что никакие физические взаимодействия не в состоянии приостановить «коллапс», изучавшийся впервые Р. Оппенгеймером и Г. Волковым. Эти результаты были получены уже в рамках ОТО, но понять их можно на классическом примере, рассматривавшемся еще Лапласом (а даже несколько ранее — английским исследователем Митчелом) в одном из изданий «Системы мира». В наш космический век, по-видимому, наиболее очевидно утверждение, что с ростом массы растет и вторая космическая скорость. Когда она достигнет скорости света, никакие тела и даже электромагнитные волны (фотоны) не смогут покинуть звезду, точнее, пересечь поверхность горизонта, «сферу» радиуса, равного так называемому гравитационному радиусу. Именно на нем космическая скорость становится равной скорости света c и обращаются в бесконечность гравитационные силы, действующие на неподвижное тело. В процессе коллапса достаточно массивной звезды вещество должно, падая под действием сил тяжести, уходить под поверхность горизонта, выйти из-под которого невозможно ничему, даже свету. Образуется невидимая (как еще недавно думали) для внешнего наблюдателя «черная дыра».

Открытие нейтронных звезд — пульсаров — поставило на повестку дня поиски черных дыр, для возникновения которых масса коллапсирующей звезды должна быть больше некоторой критической — порядка трех масс Солнца. Стало ясно, что черные дыры могут быть «видимыми» и даже очень яркими из-за падения на них вещества. В процессе этого падения (аккреции) вещество разогревается и становится источником мощного рентгеновского излучения с рядом характерных особенностей. Список источников такого излучения (начатый в свое время Лебедем X-1), которые «заслуженно» подозреваются в том, что содержат в тесной двойной системе черную дыру с массой более трех солнечных, насчитывает несколько десятков объектов. Не являются ли черные дыры источниками энергии в ядрах активных галактик, квазарах, о которых пойдет речь в гл. 5, а также в ядре нашей собственной Галактики? Этот вопрос открыт и по сей день, но все больше аргументов за то, что именно эта идея верна.

КРУГ ЗАМЫКАЕТСЯ

В том, что касается структуры Вселенной в целом, две стороны одной проблемы особенно волнуют астрономов. Почему Вселенная столь однородна в больших масштабах? Почему она

столь неоднородна в масштабах малых? Последнее, в принципе, понятно. Общая причина этой неоднородности — гравитационная неустойчивость, неустойчивость по отношению к самосжатию вещества силами тяготения, известная еще И. Ньютону и подробно исследованная Дж. Джинсом. Закон тяготения Ньютона вполне аналогичен закону Кулона. Но в отличие от электростатики, где вещество в целом нейтрально и существуют притяжение и отталкивание (впрочем, для устойчивости и здесь нужны неэлектрические силы), закон всемирного тяготения есть закон притяжения. И как только потенциальная энергия поля тяжести, определяемая размером и массой, превысит кинетическую энергию движения, определяемую температурой, начинается сжатие. При этом увеличивающаяся плотность способствует дальнейшему сжатию, если только его не останавливает рост температуры и связанного с ней газового давления. При малых плотностях неустойчивость возникает только для очень больших масштабов и, соответственно, больших масс.

Эти массы, по современным представлениям, дают начало скоплениям звезд в галактиках, причем при достижении определенных плотностей возникает неустойчивость уже меньших масштабов и масс, дающая начало группам звезд и отдельным звездам. Что же касается возникновения галактик, то здесь картина менее определена. Джинсова неустойчивость развивается в расширяющемся мире⁹, испытывающем на себе влияние сложных процессов развития первоначальных флуктуаций, причем как их спектр, так и его состав нам по большей части неизвестны. Здесь недостаток сведений о юном возрасте Вселенной очень чувствителен. Поэтому уникальная возможность получить информацию об ее состоянии на момент рекомбинации водорода, т. е. на момент, когда излучение, вырвавшись из остывающей полностью ионизованной плазмы в прозрачные просторы нейтрального вещества, сохранило информацию об этой эпохе до наших дней, на долгие годы стала путеводной звездой в астрономических исследованиях. Теперь это важнейший источник информации об эволюции и параметрах Вселенной (см. гл. 6).

Исследуя закономерности крупномасштабного распределения вещества, также удастся сделать выводы об определенных периодах жизни Вселенной в прошлом. По-видимому, в образовании галактик и их скоплений преобладало сгущение вещества, которое, однако, происходило далеко не равномерно.

⁹ Ее исследовал в рамках ОТО Е. М. Лифшиц.

Существенную роль играло и взаимодействие галактик между собой. В прошлом, когда галактики находились значительно ближе друг к другу, чем теперь, их притяжение часто приводило к слияниям. По-видимому, этим может быть объяснено «внезапное», если двигаться из прошлого, появление массивных галактик при красном смещении $z \sim 6$. В скоплениях, в местах повышенной концентрации галактик слияния продолжают и поныне. Слияния галактик приводят к возникновению их активности за счет открывающейся возможности выпадения части вещества на центр. Эти процессы были существенны уже в более близкую к нам эпоху рождения квазаров $z \sim 2-3$. Таково, скорее всего, происхождение активности и радиогалактик.

Разнообразие форм галактик связано с ролью таких факторов, как вращение, магнитные поля и, возможно, предыстория их слияний. Мы живем в спиральной Галактике, где весьма существенно вращение. Спиральные рукава представляют собой волны уплотнения газа и звезд в диске Галактики. Газ, втекающий в спиральный рукав, проходит через скачок уплотнения — ударную волну. Именно здесь в настоящее время происходит в основном образование звезд. Здесь же концентрируется слой пыли — «копоты» звездных костров. Местами она концентрируется в непрозрачные газопылевые облака, о которых уже шла речь. В них происходит скрытый от глаз, однако видимый в радиолучах процесс формирования протозвезд. Но в Галактике существуют разные виды населения, разные поколения звезд. Ранее — в процессе формирования самой Галактики — возникали звезды первого поколения. В современном процессе звездообразования благодаря наличию тяжелых элементов и пыли есть целый ряд способов эффективного охлаждения, в том числе в спектральных линиях элементов и молекулярных радиолиниях. Ввиду этого могут коллапсировать и относительно небольшие массы. Звезды же первого поколения в чистой водородно-гелиевой среде, где охлаждение значительно затруднено, могли образовываться лишь очень большими группами. Это население Галактики представлено шаровыми звездными скоплениями с массами порядка миллиона масс Солнца, образующими сферическую составляющую и тяготеющими к Центру Галактики. Впрочем, шаровые скопления со звездами уже другого состава возникают также в ударных волнах, образующихся при слияниях галактик, что позволяет проследить историю слияний.

Итак, для газовой компоненты галактик характерна неоднородная, облачная структура, а наиболее плотные и холодные облака, в частности испытывавшие сжатие в ударной спиральной

волне, могут дать начало новым звездам. Здесь также, по-видимому, вначале коллапсирует большая масса, которая затем разбивается на меньшие фрагменты, дающие начало уже отдельным звездам. Не останавливаясь в деталях на этом интересном и малоизученном процессе, заметим, что в возникающих совокупностях звезд самые большие могут «коллапсировать» быстрее, а вспыхнув, приводят к образованию обширных зон ионизованного их ультрафиолетовым излучением водорода. Эти области являются источниками как поглощения, так и излучения радиоволн и успешно изучаются оптическими и радиоастрономическими методами. Вблизи от них сосредоточены области, где продолжает происходить звездообразование. Невидимые в оптическом диапазоне, еще не вспыхнувшие протозвезды долгое время оставались недоступными прямому исследованию. Радиоастрономия и здесь дала мощное оружие — исследование этих областей в молекулярных радиолиниях. Межзвездные мазеры, подобные изобретенным незадолго до того на Земле, не только сообщили нам о местах возникновения протозвезд. Мегамазеры в центрах активных галактик очерчивают контуры аккреционных дисков в их движении. Мазеры сами играют важную роль в космической эволюции, осуществляя необходимое для сжатия газа охлаждение. При этом уже загоревшиеся массивные звезды создают также «видимые» в радиодиапазоне области ионизованного водорода (H II), в окрестности которых продолжается процесс формирования молодых звезд меньших масс.

Таким образом, возникающее молекулярное излучение несет информацию об этапах развития Вселенной, недоступных для изучения до самого последнего времени. Совершенной неожиданностью явилось открытие радиоастрономами органических молекул в протозвездных облаках. Астрономическая эволюция, таким образом, тесно связана с химической, а возможно, и с биологической, ибо органические соединения, необходимые для возникновения жизни, как оказалось, в изобилии возникают еще на дозвездной стадии сжатия.

Там я звездное чую дыханье,
Слышу речь органических масс.
И стремительный шум созиданья,
Столь знакомый любому из нас.

Н. Заболоцкий

Глава 2

КАК УСТРОЕНЫ И КАКИЕ СУЩЕСТВУЮТ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ

Инструменты, с помощью которых можно принимать радиосигналы, идущие к нам из глубин Вселенной, называются радиотелескопами. Они состоят из антенной системы и высокочувствительного приемного устройства — так называемого радиометра. Существуют самые разнообразные типы антенных систем, которые отличаются друг от друга по конструкции, принципу действия и по назначению, однако из всего многообразия инструментов можно выделить по аналогии с оптическими два класса радиотелескопов — рефлекторы и рефракторы.

Обычно рефлекторы представляют собой металлические зеркала, в большинстве случаев параболической формы, которые сводят пучок падающих параллельных лучей в точку — фокус. В этой точке располагается облучатель (или вторичное зеркало), принимающий сфокусированное излучение и передающий его на вход приемного устройства. Такой тип антенн используют, главным образом, при измерениях, производимых на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых радиоволнах. На более длинных волнах — метровых и декаметровых — чаще применяют другой тип антенн — рефракторы: синфазные антенны, состоящие из многих вибраторов, похожих на используемые для приема телевизионных сигналов. Отдельные вибраторы соединяются при этом друг с другом с помощью системы кабелей таким образом, чтобы сигналы на входе радиометра, приходящие с какого-либо заданного направления, были в фазе и складывались оптимально.

Для того чтобы направить антенны радиотелескопов в исследуемую область пространства, используются как механические, так и электрические методы. Обычно параболические зеркала имеют две оси, вокруг которых происходит механическое вращение. В некоторых инструментах осуществлена так называемая экваториальная монтировка, являвшаяся до последнего времени традиционной для оптических телескопов, — когда одна из осей направлена на полюс Мира, т. е. точку на небе, где расположена

Полярная звезда, а другая перпендикулярна ей. Такая монтировка удобна тем, что сопровождение телескопом наблюдаемых объектов осуществляется с помощью часового механизма. Этот механизм обеспечивает вращение инструмента с угловой частотой, равной угловой частоте вращения Земли вокруг своей оси. Однако в последнее время и в оптическом, и в радиодиапазонах экваториальная монтировка из-за ряда технических трудностей, особенно ощутимых для больших инструментов, не используется. Ее полностью вытеснила так называемая угломестно-азимутальная монтировка, при которой зеркало телескопа вращается вокруг горизонтальной и вертикальной осей, а наведение инструмента на объект производится с помощью компьютера. В отличие от рефлекторных антенн, которые обычно являются подвижными и наводятся на исследуемый объект механически, рефракторные антенны, как правило, неподвижны, и ориентация луча такого инструмента осуществляется электрически. В некоторых обсерваториях есть радиотелескопы, использующие как механическое, так и электрическое управление лучом. У современных антенн одиночных радиотелескопов сравнительно небольшая разрешающая способность, определяемая как отношение длины волны λ к характерному размеру антенны D . На самых коротких волнах она сравнима с разрешающей способностью человеческого глаза, которая, как известно, составляет примерно угловую минуту. Однако даже для получения такого относительно небольшого разрешения приходится строить большие антенные сооружения массой во много сотен тонн, стоящие больших денег. Известно, что разрешающая способность параболического зеркала, работающего на данной длине волны, возрастает пропорционально величине его диаметра, стоимость же такого зеркала, как показывает опыт, увеличивается пропорционально кубу его диаметра. Стоимость этих инструментов высока не только потому, что велики их габариты, но и из-за необходимости тщательной обработки металлических поверхностей рефлекторов. Для нормальной работы рефлектора антенны радиотелескопа необходимо, чтобы форма его поверхности не отличалась от заданной, например параболической, более чем на одну десятую или даже на одну шестнадцатую длины волны. Так, у радиотелескопа диаметром 100 м, который предназначен для работы на волнах начиная с сантиметра, допустимая ошибка формы не должна превышать миллиметра при любом рабочем положении этого инструмента относительно вертикали.

Если необходимо повысить разрешающую способность радиотелескопов, приходится переходить от одиночных инструментов

к системам, состоящим из элементов, определенным образом расположенных в пространстве на большом расстоянии друг от друга. В таком случае говорят о радиотелескопах с незаполненной апертурой. Разрешающая способность этих инструментов огромна — она намного превышает таковую для оптических телескопов. Работающие в настоящее время так называемые радиоинтерферометры со сверхдлинной базой могут на радиоволнах сантиметрового диапазона обеспечить разрешение в тысячные или даже несколько десятитысячных долей угловой секунды. Для того чтобы уяснить, что представляет собой такое разрешение, отметим, что оно достаточно, чтобы различить голову и хвост лошади, если бы ее удалось поместить на Луне и она могла бы излучать сантиметровые радиоволны.

Наряду с достаточной разрешающей способностью, радиотелескопы должны обладать высокой чувствительностью. Чувствительность радиотелескопа определяется соотношением полезного сигнала и шумов, принимаемых этим инструментом. Оказывается, что отношение сигнала к шуму прямо пропорционально площади антенн, корню квадратному из ширины полосы пропускания принимаемого сигнала и времени его накопления в приемной аппаратуре и обратно пропорционально температуре шумов всей системы. Поэтому при прочих равных условиях для повышения чувствительности необходимо при максимально возможной площади антенн добиваться минимальной шумовой температуры всей системы радиотелескопа. На радиоволнах от дециметровых до длинноволновых дециметровых шумы системы практически определяются внешними факторами — шумовой температурой неба, а на более коротких — внутренними шумами системы, которые удается резко уменьшить, используя охлаждаемые до низких температур параметрические усилители и квантовые парамагнитные усилители — мазеры. В настоящее время плотности потоков энергии, излучаемые космическими телами, которые могут быть приняты радиотелескопами, работающими на сантиметровых волнах, достигают нескольких миллианских. На дециметровых волнах чувствительность радиотелескопов достигает нескольких янских (1 янский равен 10^{-26} Вт · м⁻² · Гц⁻¹).

Сейчас в мире работает множество радиотелескопов. Нередко они похожи друг на друга и отличаются только конструкцией и размерами. Прежде чем приступить к описанию отдельных инструментов, приведем хотя бы примерную их классификацию (рис. 2.1), где все радиотелескопы разбиты по принципу незаполненной и заполненной апертур.

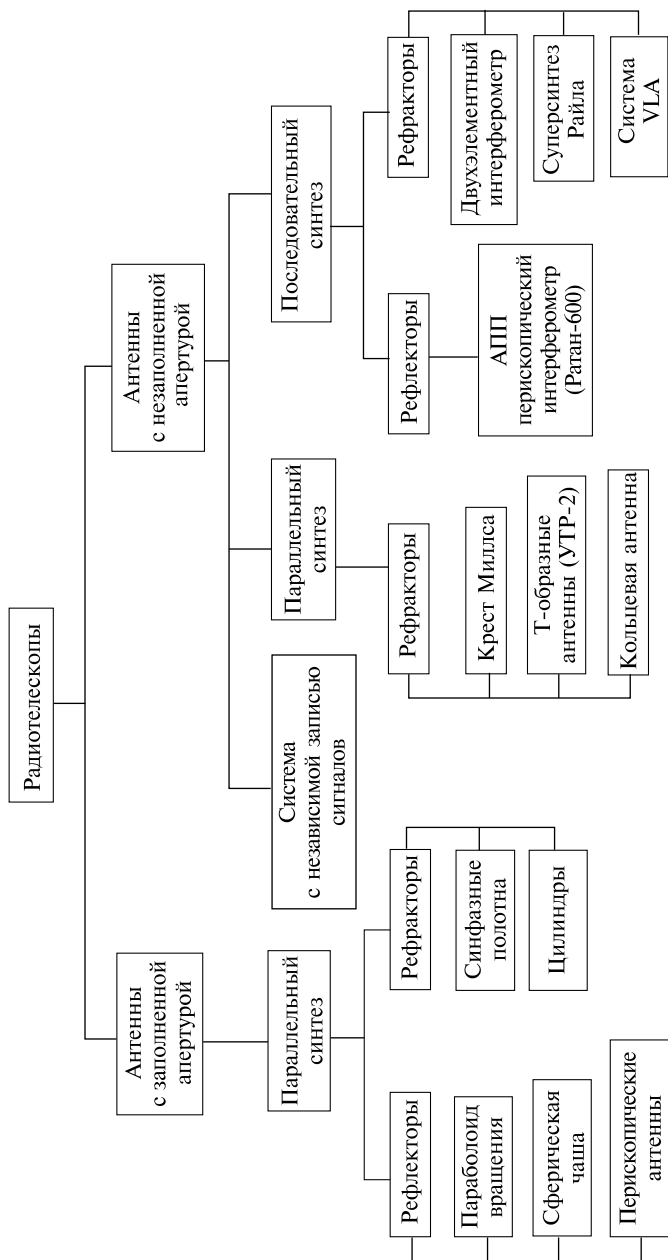


Рис. 2.1. Классификация радиотелескопов (по Н. А. Есепкиной, Д. В. Королькову, Ю. Н. Парийскому)

К антеннам с заполненной апертурой относятся радиотелескопы, разрешающая способность которых полностью определяется их эффективной площадью. В основном, это антенны рефлекторного типа: параболоиды вращения, сферические чаши, антенна типа Крауса. Рефракторные антенны такого типа используются, в основном, на метровых волнах.

Пытаясь построить инструменты, у которых разрешающая способность практически не зависела бы от эффективной площади, радиоастрономы предложили располагать собирающие поверхности телескопов — в пространстве по различным схемам. В результате этого появились системы синтеза: параллельного — в виде крестообразных и кольцевых радиотелескопов — и последовательного — в виде интерферометров с переменной базой, использующих вращение Земли, антенн азимутального апертурного синтеза (антенны переменного профиля — АПП), очень большой антенной решетки (VLA) и др.

РЕФЛЕКТОРНЫЕ АНТЕННЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

Наиболее типичными инструментами такого типа являются параболические антенны. Как уже отмечалось, в радиоастрономии используются параболические антенны как экваториальной, так и угломестно-азимутальной монтировки.

Крупнейшим и наиболее совершенным инструментом с экваториальной монтировкой был 43-метровый радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории НРАО (в Грин-Бэнк, США), введенный в эксплуатацию в 1965 г. (В настоящее время недалеко от этого телескопа сооружен новый совершенный инструмент диаметром 100 м (рис. 2.2).) Инструмент мог работать в диапазоне дециметровых, сантиметровых и длинных миллиметровых волн. Эксплуатация 43-метрового радиотелескопа показала, что увеличение диаметра антенн при экваториальной монтировке и повышение точности практически невозможны из-за деформаций поверхности зеркала, и поэтому в дальнейшем более крупные инструменты изготавливались только с угломестно-азимутальной подвеской. В СССР этот тип подвески использовался во всех конструкциях радиотелескопов с самого начала их строительства (А. Е. Саломонович, П. Д. Калачев). Еще в 1959 г. в Физическом институте АН СССР был построен 22-метровый радиотелескоп, который явился первым крупным инструментом, пригодным для работы на миллиметровых волнах. (Аналогичный радиотелескоп улучшенной конструкции работает в Крымской

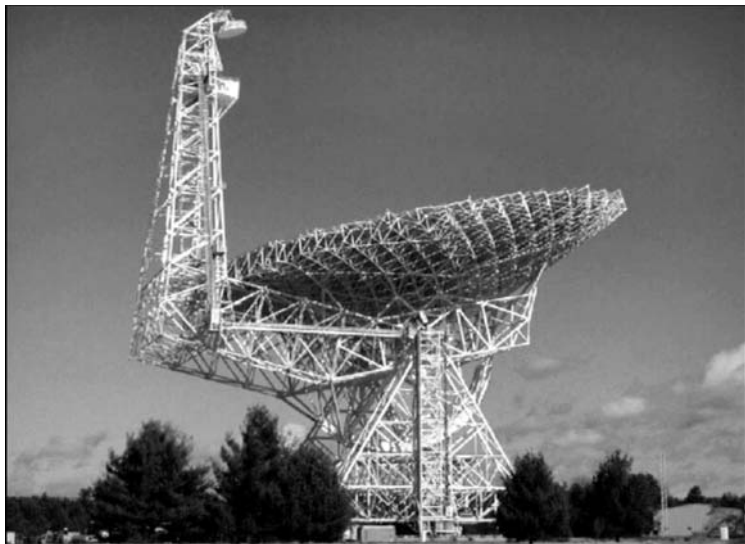


Рис. 2.2. GBT. Крупнейший полноповоротный радиотелескоп им. Р. Берда диаметром 100–110 м (Грин-Бэнк, США), принадлежащий Национальной радиоастрономической обсерватории США

астрофизической обсерватории с 1960 г.) На рис. 2.3 приведена фотография этого инструмента, размещенного в г. Пущино на радиоастрономической станции ФИАН. Минимальная волна,



Рис. 2.3. Прецизионный радиотелескоп с диаметром зеркала 22 м Пущинской радиоастрономической обсерватории Физического института им. П. Н. Лебедева (Пущино на Оке, Россия). С благодарностью Р. Д. Дагкесаманскому

на которой работает этот радиотелескоп, — 8 мм, и на этой волне ширина луча составляет две угловые минуты. Используя мазер на волну 1,35 см, на этом инструменте удалось добиться рекордной чувствительности, его шумовая температура в направлении зенита составляет около 80 К. Ширина луча диаграммы этого телескопа на волне 2,16 мм составляет около угловой минуты.

В последнее время происходит быстрое освоение миллиметрового диапазона радиоволн. Введены в строй крупные инструменты: 45-метровый телескоп в Японии в обсерватории Нобейяма, 30-метровый телескоп на юге Испании, а также в Бразилии, диаметром 13,7 м, в Швеции, диаметром 20 м, и др. Классическим примером инструментов этого диапазона может служить 11-метровый радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории США, работающий с 1967 г. Радиотелескоп расположен в Аризоне в обсерватории Китт-Пик на высоте около 2000 м. Точность изготовления его поверхности такова, что среднеквадратичная ошибка не превышает 0,1 мм, что позволяет вести наблюдения вплоть до волн 1 мм. Этот радиотелескоп, подобно оптическим инструментам, помещен в куполе, который собран из металлоконструкций, покрытых влагонепроницаемой синтетической тканью. Поглощение в ткани невелико и практически не влияет на результаты измерений. Коэффициент использования антенны на волне 3,5 мм равен 50 %, а на волне 1,2 мм — около 10 %.

Для работы в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн построен ряд крупных параболических антенн (рис. 2.4). До начала 70-х годов самым крупным инструментом, работавшим



Рис. 2.4. Радиотелескоп им. Ловелла (Джодрел Бэнк, Великобритания). Телескоп является также головным в системе апертурного синтеза MERLIN, позволяющей достичь разрешения в сотую угловой секунды

на длинных сантиметровых и коротких дециметровых радиоволнах, был построенный в Австралии 64-метровый радиотелескоп (рис. 2.5). Этот инструмент эффективно используется начиная



Рис. 2.5. Радиотелескоп диаметром 64 м (Паркс, Австралия)

с 1962 г. В 1969 г. зеркало его подверглось реконструкции, в результате чего около 50 % его площади может работать на волне до 5 см. На волне 3,4 см коэффициент использования достигает 36, а на волне 1,35 см — 17 %.

Крупнейший полноповоротный радиотелескоп мира (теперь он делит первое место с американским телескопом в Грин-Бэнк) — параболическое зеркало диаметром 100 м — был построен в ФРГ в 1972 г. (рис. 2.6). Телескоп работает в диапазоне волн от 1 до 21 см. Так как на самой короткой волне среднеквадратичная ошибка не должна превышать 1 мм, относительная точность изготовления зеркала, равная отношению этой ошибки к его диаметру, составляет 10^{-5} . Оказалось, что получить такую величину при использовании ранее разработанных конструкций невозможно. Поэтому при построении телескопа был использован новый принцип — гомологический, предложенный радиоастрономом фон Хорнером. Принцип заключается в том, что деформации, превышающие среднеквадратичную ошибку, считают-



Рис. 2.6. Полноповоротный радиотелескоп диаметром 100 м (Бад Мюнстеррайфель-Эффельсберг), принадлежащий Радиоастрономическому институту им. Макса Планка

ся возможными, однако они должны быть такими, чтобы поверхность параболоида, ось которого направлена в зенит, при наклоне зеркала по углу места переходила за счет упругих деформаций в другие параболоиды, которые могут иметь и другое направление оси, и другое фокусное расстояние. Искажения, приводящие к смещению фокальной точки, можно скомпенсировать соответствующим смещением облучателя (рис. 2.7). Тогда отклонения деформированной поверхности от параболоида будут минимальными при всех положениях радиотелескопа. У инструмента, который удалось построить на основе этого принципа, поверхность

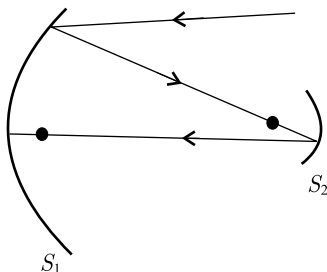


Рис. 2.7. Ход лучей в стометровом Боннском радиотелескопе: S_1 — параболоид, S_2 — эллипсоид

зеркала покрыта в центральной части (диаметром 79 м) сплошным листом, кольцо от 79 до 84 м — перфорированным листом, а остальная часть — проволоочной сеткой с 6-миллиметровой ячейкой. Отражающая поверхность составлена из 2372 панелей размерами 120×300 см, крепящихся на четырех регулируемых опорах. Точность установки этих щитов около 0,5 мм. Высокая точность изготовления зеркала и использование гомологического принципа сохраняют коэффициент усиления антенны в широком диапазоне углов места. Коэффициент использования зеркала на волне 21 см — около 55, а на волне 1,25 см — 18 %. На этой волне ширина луча радиотелескопа — около 40 угловых секунд.

В Советском Союзе также было создано совершенное поколение радиотелескопов с диаметром зеркала около 70 метров. Об одном из наиболее прецизионных и совершенных радиотелескопов такого типа можно прочитать в журнале «Наука и жизнь», № 3 за 1982 г.

Кроме радиотелескопов, использующих параболические рефлекторы, сооружено небольшое количество инструментов, в которых применены зеркала сферической формы. Такие инструменты обычно используют земную поверхность как среду, в которой расположены отражающие элементы. Наибольший радиотелескоп подобной конструкции начал работать в 1963 г. в Пуэрто-Рико на ионосферной обсерватории в Аресибо (США). Поверхность рефлектора расположена в карстовой впадине, которой придана сферическая форма. Диаметр зеркала 305 м. Расположение зеркала в земле и его неподвижность обеспечивают конструкции необходимую жесткость и позволяют работать вплоть до волны 1 см. Форма зеркала выбрана сферической, а не параболической — это увеличивает область обзора неба. Луч телескопа перемещается за счет смещения облучателя. Последний по необходимости довольно сложен, ибо он должен также компенсировать так называемую сферическую аберрацию, обусловленную тем, что сферическое зеркало, в отличие от параболического,

ческого рефлектора, не обладает фокусирующими свойствами. Облучатель перемещается по сфере радиусом 132,5 м с помощью плоской фермы. На рис. 2.8 приведена фотография такого

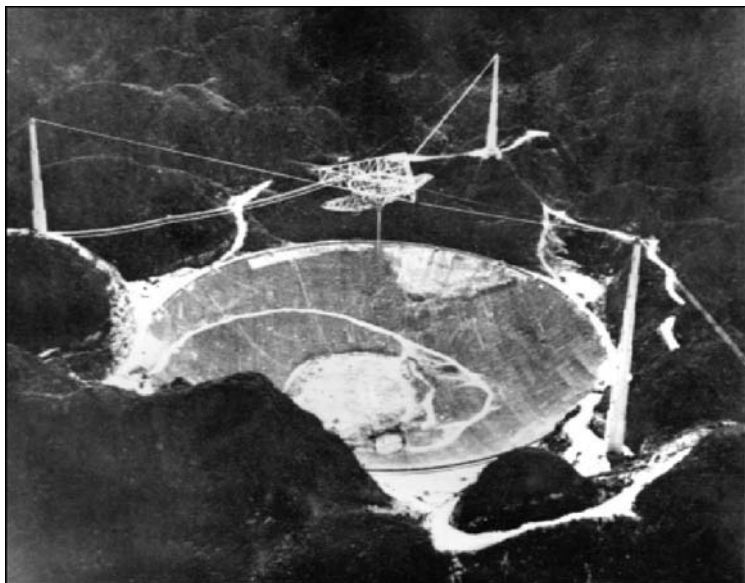


Рис. 2.8. Сферический рефлектор радиотелескопа диаметром 305 м (Аресибо, Пуэрто-Рико)

зеркала. Наблюдения объектов с помощью этого инструмента возможны в пределах $\pm 20^\circ$ от зенита. В 1974 г. радиотелескоп был модернизирован, и сейчас наблюдения ведутся до волны 6 см. По-видимому, могут быть созданы инструменты подобного типа с еще большим диаметром, и с этой точки зрения они весьма перспективны, ибо полноповоротные системы с диаметром, значительно превосходящим 100 м, вряд ли удастся построить в ближайшее время.

Наряду с полноповоротными параболическими и неподвижными сферическими радиотелескопами, существуют инструменты, имеющие возможность вести слежение по углу места, в то время как вращение Земли обеспечивает слежение по другой координате. Такие телескопы носят название меридиональных. Радиотелескоп такого типа был построен в США Краусом в 1960 г. (рис. 2.9). Радиоизлучение из космоса падает на плоское зеркало, отражается от него на параболическое и фокусируется им в рупор, являющийся облучателем системы. Поворот плоского

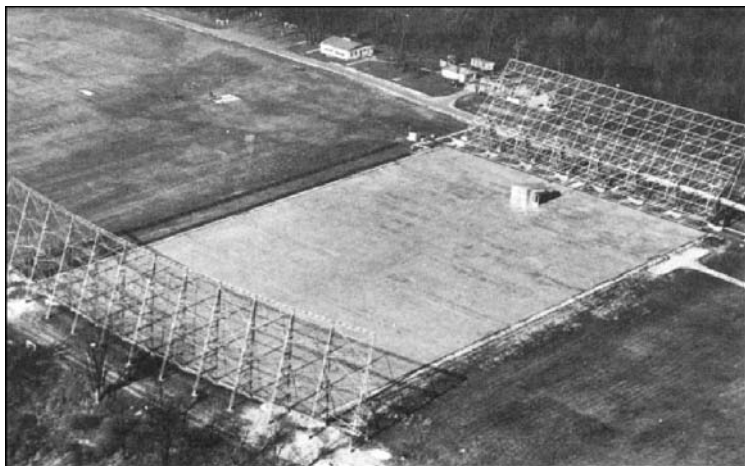


Рис. 2.9. Радиотелескоп Крауса (США)

зеркала на некоторый угол изменяет направление телескопа на двойной угол. Поверхность между зеркалами металлизирована, что как бы увеличивает вдвое размеры системы. Размеры плоского отражателя радиотелескопа $79 \times 30,5$ м, а параболического зеркала — 110 м по горизонтали и 21 м по вертикали (расстояние между зеркалами 146 м). Наблюдения можно вести до волны 13 см. Инструмент имеет луч ножевой формы. Более крупный радиотелескоп такого типа построен во Франции, в Нанси. В нем вместо параболического зеркала использован сферический рефлектор, что позволило сопровождать наблюдаемый источник в течение двух часов. Размеры зеркал этого радиотелескопа 200×40 м и 305×35 м, и наблюдения на нем возможны вплоть до волны 6 см. Наиболее точный (в смысле допусков) радиотелескоп такого типа был построен в Горьком (СССР). Он имеет точность зеркал до 0,1 мм и позволяет вести наблюдения на миллиметровых волнах. Размеры параболического рефлектора этого инструмента 25×2 м.

РЕФРАКТОРНЫЕ АНТЕННЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

В дальнейшем мы будем использовать термины «параллельный» и «последовательный» синтез антенн. Эти термины связаны с методом формирования луча антенны радиотелескопа. Если сигналы от наблюдаемого источника принимаются одновременно всеми элементами антенной системы, то происходит одновременное формирование луча системы. В этом случае говорят

о параллельном синтезе. Если же для формирования луча радиотелескопа используют ряд отдельных систем, сигналы которых собираются вместе неодновременно, говорят о системах последовательного синтеза.

Рефракторные антенны параллельного синтеза используются на метровых и декаметровых волнах. Они либо состоят из синфазных антенных решеток, либо представляют собой комбинацию из синфазных облучателей и рефлекторов, обычно цилиндрических. Типичным примером рефракторной антенны с заполненной апертурой является синфазная решетка, использованная в радиотелескопе БСА (большая синфазная антенна) в Пуццино на радиоастрономической обсерватории ФИАН. Работает инструмент на частоте $102,5 \pm 1,5$ МГц. Он состоит из 16 384 волновых вибраторов, образующих двумерную фазированную решетку из 256 рядов, по 64 вибратора в каждом. Все вибраторы расположены над плоским экраном. Общие размеры решетки 200×400 м. Поляризация антенны линейная, диполи ориентированы с запада на восток. Управление лучом электрическое. В антенне сформировано шестнадцать лучей, которые можно выставлять по склонению. Чувствительность радиотелескопа при времени накопления 1 с составляет 0,5 янских.

Аналогичная антенная решетка, работающая на частоте 81 МГц, построена в Кембридже (Англия). Она состоит из 2048 волновых (т. е. равных длине волны) вибраторов, соединенных в 16 рядов, по 128 элементов в каждом. Решетка вытянута по направлению с востока на запад, ее размеры 470×75 м. В антенне используется проволочный рефлектор. Луч антенны имеет ножевую форму, ширина его 30 угловых минут по направлению восток–запад и 6° по углу места. В антенне сформированы четыре луча, разнесенных в меридианной плоскости на 3° .

Количество радиотелескопов, представляющих собой заполненные синфазные решетки, невелико. Кроме описанных, есть еще аналогичные инструменты в США и Чили. Основными недостатками рассмотренных радиотелескопов являются отсутствие диапазонности (узкополосность) и сравнительно небольшое угловое разрешение по сравнению с тем, которое может быть получено, если использовать излучатели решетки в инструменте с незаполненной апертурой. Применить рефракторные антенны на более высоких частотах весьма сложно, ибо если задаться площадью, занимаемой антенной, то число вибраторов возрастет прямо пропорционально квадрату частоты.

Ввиду названных недостатков радиоастрономы уже довольно давно используют заполненные апертуры смешанного типа, где

наряду с синфазными антеннами применяются также и рефлекторы. Обычно в таких инструментах рефлектором является параболический цилиндр — либо неподвижный, либо механически перемещающийся. Длина такого цилиндра в некоторых радиотелескопах достигает 0,5–1 км. Такой рефлектор преобразует падающую волну из плоской в цилиндрическую, рефракторный облучатель, представляющий собой синфазную, линейную антенну, превращает эту волну в сферическую и, кроме того, осуществляет управление электрической осью инструмента в одной плоскости, т. е. обеспечивает электрическое качение луча. Такие телескопы успешно работают в России, Индии, США и Англии. На рис. 2.10 приведена фотография Кембриджского радиотеле-



Рис. 2.10. Кембриджский радиотелескоп (Англия)

скопа такого типа, работающего на частоте 178 МГц. Наиболее совершенный инструмент такого типа — построенный в УТИ (Индия) радиотелескоп, работающий на частоте 326,5 МГц. Этот инструмент введен в эксплуатацию в 1970 г. Он расположен вблизи экватора (широта около $11,5^\circ$) на высоте около 2000 м над уровнем моря. Ось радиотелескопа параллельна оси вращения Земли, его монтаж экваториальный. Параболический цилиндр длиной 529 м и шириной 30 м эквивалентен по площади параболическому зеркалу диаметром 138 м с коэффициентом использования около 60%. Облучатель обеспечивает формирование двенадцати лучей и электрическое управление ими по углу места. Он состоит из отражателя в виде уголка с раствором 90° и 968 полуволновых вибраторов, сгруппированных по 44 в 22

группы. Чувствительность инструмента при времени накопления 1 с составляет в зависимости от режима работы от 0,35 до 0,5 янских. Ширина луча по прямому восхождению 2° , а по склонению — около 3–5 угловых минут.

Некоторые радиоастрономы полагают, что инструменты, в которых используются как рефлекторные, так и рефракторные антенны, несмотря на узкополосность этих систем и сложность конструкции, перспективны с точки зрения построения радиотелескопов с большой эффективной площадью для решения специальных радиоастрономических задач.

Радиотелескопы с незаполненной апертурой

Как мы уже отметили, в радиотелескопах с заполненной апертурой эффективная площадь инструмента и его разрешающая способность жестко связаны друг с другом. Поэтому такие системы не позволяли построить инструменты с разрешающей способностью, намного превышающей одну угловую минуту. Выход из положения был связан с переходом к незаполненным апертурам. Появился ряд систем параллельного и последовательного синтеза, которые позволили в диапазоне радиоволн от декаметров до сантиметров создать радиотелескопы с разрешением, как сравнимым, так и намного превосходящим разрешение оптических инструментов. Обилие предложенных и реализованных вариантов радиотелескопов столь велико, что не представляется возможным даже описать построенные инструменты, поэтому в дальнейшем мы коснемся только некоторых наиболее характерных систем.

СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

Тень телевизиорной антенны,
похожая на букву «Т»,
легла на мраморные стены,
напоминая о кресте.

Л. Мартынов

Рефракторные радиотелескопы

В случаях когда высокая яркостная температура галактического фона определяет чувствительность радиотелескопов, как это наблюдается на волнах метрового и дециметрового диапазонов, особо важна разрешающая способность применяемых инструментов. В этих условиях целесообразно использовать ре-

фракторные радиотелескопы. Первым таким инструментом был крестообразный радиотелескоп Миллса, впервые построенный в Австралии в 1953 г. Более совершенный инструмент такого же типа Миллс построил в 60-х годах. Он имеет длину плеч 1600 м и работает на основной волне 73,5 см. В основу действия инструмента положен очень остроумный принцип (рис. 2.11). Крест

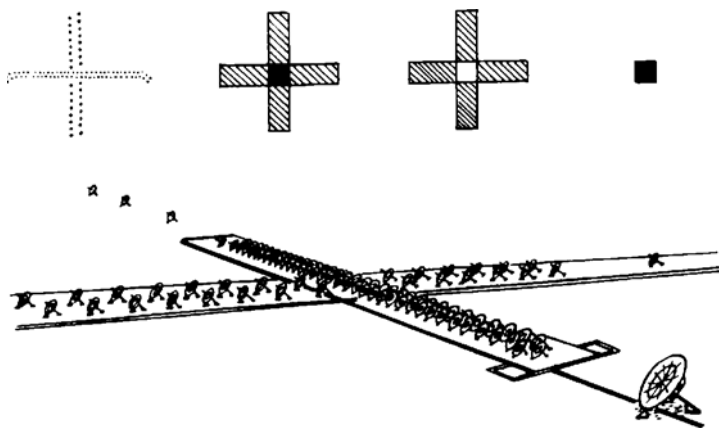
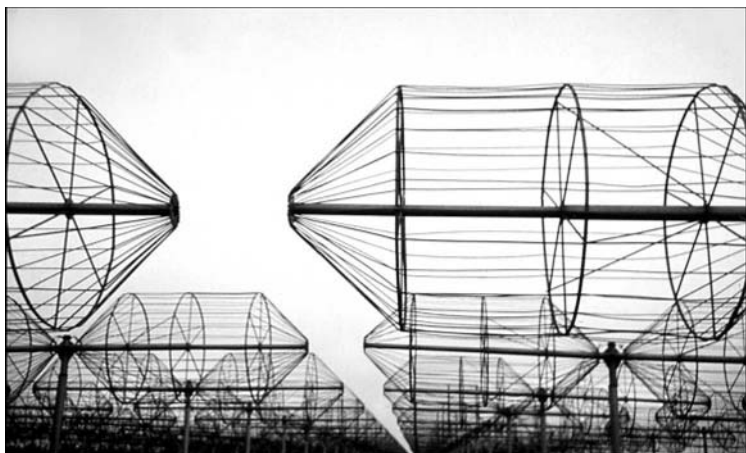


Рис. 2.11. Принцип работы креста Миллса

Миллса состоит из двух антенных полотен. Полотна представляют собой два вытянутых прямоугольника, один из которых расположен вдоль меридиана, а другой — вдоль параллели, образуя крест. Луч каждого из полотен имеет ножевую форму. С помощью модуляционного устройства эти два полотна попеременно включаются то в фазе, то в противофазе. Затем специальное устройство принимает сигналы, которые промодулированы с частотой, соответствующей частоте переключения антенных полотен.

В результате, как это следует из рис. 2.12 а, радиотелескоп принимает лишь те сигналы, которые воспринимаются узким лучом, обусловленным общей для обоих полотен диаграммой, — пересечением диаграмм двух полотен. На этом принципе построен радиотелескоп в Молонгло. Каждое из антенных полотен представляет собой параболический цилиндр с размерами 1600×13 м. Вдоль оси цилиндра установлены облучатели на волны 75 см и 3 м. Фазирующая система формирует 11 лучей по углу места, расположенных на расстоянии 1,4 угловой минуты друг от друга. Минимальная ширина луча по углу места и в азимутальной плоскости составляет 2,8 угловой минуты на волне



а



б

Рис. 2.12. Антенная система УТР-2 (Граково, СССР); а — плечо север–юг. Вид этой антенной системы приведен также на обложке книги; б — плечо запад–восток (снимок сделан П. В. Блюхом в день осеннего равноденствия, видно заходящее солнце). Фотографии УТР-2, приведенные на обложке, сделаны А. А. Коноваленко

73,5 см. Инструмент имеет высокую чувствительность — 30 миллианских на 73,5 см. Как видно из описания, инструмент является соединением рефрактора и рефлектора. Можно показать, что крестообразная конфигурация избыточна в том смысле, что необходимое разрешение может быть получено и в случае, когда вместо крестообразной конфигурации используется аналогичная Т-образная.

Наибольший в мире радиотелескоп с такой конфигурацией, представляющий собой чисто рефракторный инструмент, построен под Харьковом и носит название УТР-2 (Украинский Т-образный радиотелескоп, вторая модель) (рис. 2.12). В отличие от других аналогичных инструментов, УТР-2 пока что единственный широкополосный радиотелескоп, он работает в диапазоне от 10 до 25 МГц. УТР-2 состоит из 2040 широкополосных вибраторов, расположенных на двух антенных полотнах. Одно полотно размерами 1880×54 м расположено вдоль меридиана, а второе (900×54 м) — вдоль параллели. Первое полотно содержит 1440, а второе — 600 вибраторов. Вибраторы расположены в шесть рядов. Все диполи ориентированы с востока на запад и обеспечивают прием одной линейной поляризации. Система управления лучом УТР-2 электрическая, дискретная, позволяющая направлять луч и сопровождать источник в любую точку неба в пределах конуса с углом $\pm 70^\circ$ от вертикали. По углу места располагаются пять лучей. Наблюдения ведутся одновременно на шести частотах. Форма луча радиотелескопа карандашная, его ширина около 25 угловых минут на частоте 25 МГц. Чувствительность инструмента на этой частоте составляет около 15 янских.

К тому же классу инструментов, что и крест Миллса и Т-образный радиотелескоп, относится кольцевая антенна Дж. П. Уальда, используемая в солнечном радиогелиографе в Австралии. Этот телескоп предназначен в основном для изучения радиоизлучения Солнца, хотя на нем ведутся и некоторые другие исследования. Он работает на двух частотах (80 и 160 МГц); некоторые измерения ведутся и на частоте 43,25 МГц. Как и в крестообразном радиотелескопе, в радиогелиографе специальной обработкой принятых сигналов выделяется луч карандашного типа. По структуре радиогелиограф — рефрактор с параллельным синтезом.

Инструмент состоит из 96 параболических зеркал диаметром 13 м, расположенных по кругу диаметром 3 км. На частоте 80 МГц угловое разрешение инструмента — 3,5 угловой минуты, фазовое управление отдельными элементами позволяет осуществить быстрое качание луча и получение изображения области диаметром около 2 угловых градусов за время 1 с.

СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

Наиболее совершенные системы радиотелескопов с незаполненной апертурой, способные обеспечить высокую разрешающую способность, используют для получения радиоизображения ме-

тод апертурного синтеза. В основе метода лежит использование для наблюдения принципа интерферометра, который впервые был предложен в оптике французским ученым А. Физо около 170 лет тому назад и успешно применен для решения ряда фундаментальных задач оптической астрономии и физики А. Майкельсоном в конце XIX и в начале XX века. Отметим, что при апертурном синтезе используется для формирования диаграммы направленности ряд интерферометров, имеющих различную длину, причем сам луч реализуется не мгновенно, а путем длительных наблюдений. Для того чтобы понять идею апертурного синтеза, рассмотрим принцип действия простейшего — двухантенного — интерферометра, схема которого приведена на рис. 2.13 а. Интерферометр состоит из двух антенн, разнесенных

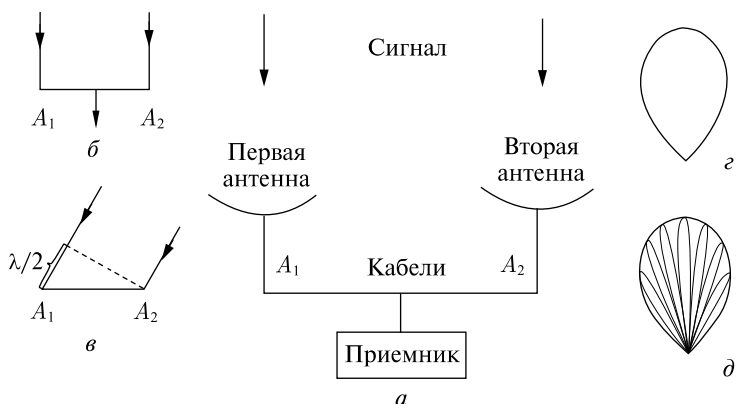


Рис. 2.13. Принцип работы интерферометра

на некоторое расстояние, называемое базой, и кабелей, соединяющих эти антенны с приемником. Пусть антенны принимают сигнал от далекого космического объекта. Рассмотрим, как будет зависеть величина этого сигнала от направления на источник, излучающий радиоволны. Если направление прихода радиоволн перпендикулярно направлению базы и длины кабелей от обоих зеркал, A_1 и A_2 , одинаковы, то сигналы попадут в приемник с одинаковой фазой и сложатся (рис. 2.13 б). Пусть теперь источник переместится так, что длины пути приходящих сигналов будут отличаться на половину длины принимаемой волны $\lambda/2$ (рис. 2.13 в). Тогда к приемнику придут два сигнала, сдвинутые на 180° , и результирующий сигнал будет равен нулю. Если источник будет продолжать двигаться, то настанет момент, когда длины путей приходящих сигналов будут отличаться друг от

друга на длину волны λ , и тогда на приемник попадут два сигнала, которые снова будут в фазе, и результирующий сигнал удвоится. Таким образом, луч интерферометра будет состоять из ряда лепестков, имеющих нули и максимумы. Если изобразить луч каждого из зеркал интерферометра, как показано на рис. 2.13 *г*, то лучи интерферометра будут иметь вид, приведенный на рис. 2.13 *д*. Итак, задача интерферометра заключается в том, чтобы разбить широкий луч каждого из зеркал, имеющих ширину луча, примерно равную λ/D (D — диаметр зеркала), на ряд узких лучей, ширина которых примерно равна λ/d , где d — размер базы. Если наблюдаемый источник точечный, то при его передвижении сигнал изменяется от максимума до нуля, причем наибольший максимум сигнала соответствует направлению на излучающий источник (рис. 2.14 *а*). Если же источник оказы-

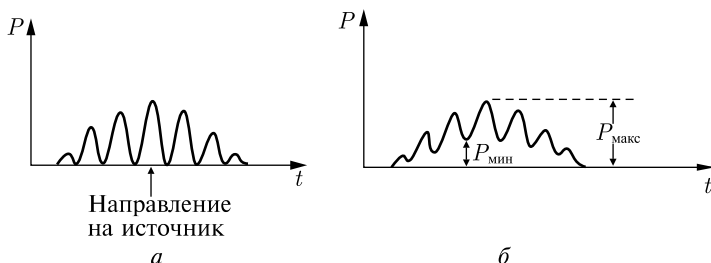


Рис. 2.14. Запись сигнала от источников: *а* — точечного; *б* — протяженного

вается не точечным, а протяженным, то, разбивая его на ряд точечных и складывая затем принимаемые сигналы, получим на выходе интерферометра сигнал, изображенный на рис. 2.14 *б*. Хотя и в этом случае есть максимумы и минимумы, однако последние не доходят до нуля. Таким образом, имея запись интерферограммы, можно судить об угловом размере источника, излучающего радиоволны. Величина u , характеризующая угловые размеры, носит название функции видности Майкельсона и численно равна

$$\frac{P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}}{P_{\text{макс}} + P_{\text{мин}}},$$

где $P_{\text{макс}}$ и $P_{\text{мин}}$ — мощность принимаемого сигнала в максимуме и минимуме интерференционной кривой.

В случаях когда необходимо более детально изучить картину радиоизлучающей области, используются интерферометры с переменной базой. Любая картина радиоизлучающей области, согласно известному принципу Фурье, может быть разложена на суммы различных элементарных волн, имеющих разные

амплитуды и фазы. Эти элементарные волны могут быть представлены в виде синусных и косинусных составляющих, и каждая такая составляющая будет соответствовать интерферометру с данной базой. Имея ряд интерферометров с разными базами или один интерферометр с переменной базой, можно получить сведения о структуре излучающего источника, намного более детальные, чем получение с помощью одиночного зеркала, даже если его размеры равны самой большой базе используемого интерферометра.

Познакомившись со свойствами простого интерферометра, можем перейти к принципу апертурного синтеза. Предположим, у нас есть синфазная решетка, заполненная рядом параболических радиотелескопов. Если бы прием велся сразу на все телескопы, мы могли бы реализовать разрешающую способность системы, обусловленную размерами решетки. Покажем, как это можно сделать, имея в своем распоряжении только два параболических телескопа (рис. 2.15). Пусть вся решетка состоит из 42 площадок, на которых могут располагаться два изображенных на рисунке радиотелескопа. Как с их помощью покрыть всю площадь решетки, чтобы обеспечить необходимую разрешающую способность? Очевидно, для этого целесообразно использовать оба зеркала в схеме интерферометра (тогда можно учесть и амплитуду, и фазу сигналов), причем база его в этом случае должна быть переменной. Однако очевидно, что нет необходимости для полного синтеза диаграммы помещать радиотелескопы во все 42 точки, ибо данные, полученные при измерениях в точках ab и cd или ac и bd , аналогичны и, следовательно, их можно учесть при обработке, но не проводить повторных измерений. Таким образом, помещая радиотелескопы в различные пункты решетки и комбинируя принимаемые сигналы, можно осуществить последовательный принцип синтеза, избегая при этом измерения на идентичных базах. Известно много различных методов апертурного синтеза. В одном из них используется вращение Земли, и он называется суперсинтезом. Впервые этот метод предложил Райл. На его основе были построены вначале радиотелескоп длиной 1,7 км, а затем аналогичный инструмент с линейным разме-

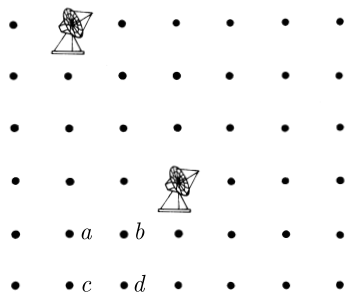


Рис. 2.15. Принцип апертурного синтеза (объяснения в тексте)

ром 5 км. Принцип, положенный в основу работы инструментов такого типа, заключается в том, что если вращать линейную систему инструментов, можно образовать двумерную апертуру. В ряде случаев удобно воспользоваться вращением Земли вокруг своей оси. Действительно, если линейная антенна расположена в направлении восток–запад и состоит из двух зеркал с расстоянием d между ними, то при вращении Земли их взаимное расположение относительно заданной точки на небесной сфере будет изменяться как по длине, так и по направлению. Таким образом, будет изменяться и величина базы, спроектированной на небесную сферу. Если при этом есть возможность изменять и саму базу, то такая система может синтезировать двумерную эллиптическую (или круговую) решетку. Синтез осуществляется при полном обороте Земли, т. е. за 24 ч, однако можно показать, что все необходимые ориентации для синтеза диаграммы при заданной базе могут быть получены в течение 12 ч.

В Кембриджском радиотелескопе Райла первого поколения было два стационарных и одно подвижное параболическое зеркало диаметром 18 м каждое. Все зеркала имели экваториальную монтировку. Расстояние между неподвижными зеркалами — 800 м, а подвижное могло быть удалено еще на 750 м. Основным недостатком метода последовательного синтеза является необходимость вести длительные измерения. Для сокращения времени наблюдений необходимо увеличить общее количество элементов в системе. Это было осуществлено в ряде наиболее современных радиотелескопов. Так, в 5-километровом Кембриджском радиотелескопе используются уже восемь параболических зеркал диаметром 13 м с экваториальной монтировкой. Зеркала расположены по линии восток–запад, расстояние между крайними зеркалами составляет 4,5 км. Минимальная волна, на которой ведутся измерения, — 2 см, и при этом разрешающая способность инструмента около угловой секунды. Четыре зеркала расположены неподвижно на расстоянии 400 м друг от друга, остальные — подвижные — могут двигаться по рельсовому пути протяженностью 1200 м. Число независимых интерферометров, которые образуют все зеркала, равно 16. Еще более совершенным инструментом такого типа является радиотелескоп, построенный в Вестерборке (Нидерланды). Он состоит из 12 полноповоротных 25-метровых параболических зеркал с экваториальной монтировкой, расположенных вдоль линии восток–запад. Из них десять неподвижны и расположены друг от друга на расстоянии 144 м, а два крайних могут перемещаться. Общая длина инструмента 1602 м. Расстояние между антеннами выдерживается

с точностью до $\pm 0,1$ мм. Рельсовый путь, по которому движутся зеркала, выполнен с высокой точностью — его отклонение от прямой линии не превосходит в среднем 0,73 мм при максимальной ошибке 0,5 мм. Зеркала могут образовывать интерферометры с 20 различными базами длиной от 36 до 1600 м. Телескоп работает на частотах 610, 1415 и 4895 МГц. Синтезированная диаграмма на волне 21 см равна примерно 20 угловым секундам. Общий вид инструмента приведен на рис. 2.16.

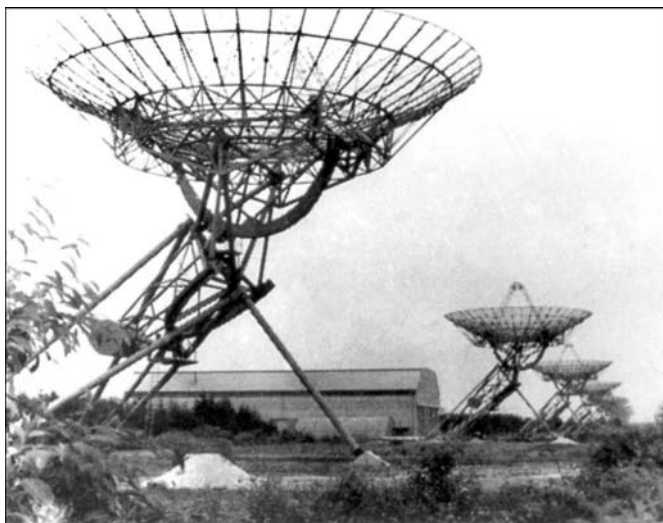


Рис. 2.16. Синтезированный радиотелескоп в Вестерборке (Нидерланды). Фотография Х. Майера (Обсерватория солнечной и галактической радиоастрономии, Двинглоо), любезно предоставленная руководством обсерватории

Как видим, радиотелескопы, использующие суперсинтез, — весьма сложные инструменты. Для синтеза диаграммы и управления телескопом применяются электронно-вычислительные машины, самая современная электронная технология, а также специально разработанные приемные и измерительные комплексы.

Особое место среди инструментов последовательного синтеза занимает антенна переменного профиля (АПП) РАТАН-600. Принцип, положенный в его основу, был предложен С. Э. Хайкиным и Н. Л. Кайдановским в 1954 г. Телескоп сооружен Ю. Н. Парийским, Д. В. Корольковым с сотрудниками на Кавказе вблизи станции Зеленчукской. Он состоит из 900 плоских щитов размерами 7,4 м по вертикали и 2 м по горизонтали, установленных по кольцу диаметром 588 м (рис. 2.17). Щиты имеют три



Рис. 2.17. Радиотелескоп РАТАН-600 (станция Зеленчукская, Россия). С благодарностью М. Мингалиеву

степени свободы — они могут вращаться вокруг горизонтальной и вертикальной осей и двигаться вдоль радиуса. Каждый из щитов может сопровождать источник радиоизлучения и переломлять это излучение в фокус системы. Основной рефлектор антенны представляет собой часть поверхности параболоида или, точнее, эллиптического конуса, которая преобразует падающую плоскую волну в цилиндрическую, с вертикальной осью. Луч радиотелескопа ножевой, узкий в азимутальной плоскости. В фокусе системы расположен облучатель со вторичным зеркалом. Рабочий диапазон волн от 0,8 до 21 см. В южной части РАТАН-600 установлено перископическое зеркало размерами 400×8 м, которое образует с южной частью основного рефлектора инструмент, аналогичный системе Крауса. В зависимости от угла места изучаемого объекта для наблюдений используется различное количество щитов. Для низких углов места работает от 15 до 25 % окружности, а в зените — вся окружность. Описанная система осуществляет последовательный азимутальный синтез и обеспечивает на волне 0,8 см разрешение от 5 до 3 угловых секунд на угловую минуту. Чувствительность инструмента до 0,01 янского.

Наиболее совершенная система последовательно апертурного синтеза построена в пустынной местности штата Нью-Мексико в США (рис. 2.18). Она носит название Большой антенной системы — VLA. Радиотелескоп состоит из 27 полноповоротных параболических зеркал диаметром 25 м каждое, имеющих



Рис. 2.18. Крупнейший современный радиотелескоп VLA (Very Large Array), Соккоро, юг США (вверху). Справа отдельный составляющий элемент телескопа — зеркало диаметром 25 м

угломестно-азимутальную ориентировку. Зеркала расположены по радиусам, ориентированным под углом 120° друг к другу в виде латинской буквы Y. Длина системы 21,21 и 19 км. Зеркала могут перемещаться вдоль рельсового пути со скоростью до 5 км/ч и устанавливаться в 72 фиксированных положениях с базами 0,6; 1,9; 4; 6 и 21 км. Минимальная рабочая волна за 20 лет переместилась от 1 см до 3 мм. Рабочие волны, на которых работает радиотелескоп, от 1,3 до 21 см расширились до 4 м. На коротких сантиметровых волнах разрешающая способность инструмента превышает таковую для оптических телеско-

пов и составляет на волне 1,3 см 0,1 угловой секунды, а чувствительность — 0,1 миллианского. Описания и достижения VLA достойны отдельной книги.

СИСТЕМА С НЕЗАВИСИМОЙ ЗАПИСЬЮ СИГНАЛОВ

При исследовании ряда объектов, например таких, как квазары, а также при исследованиях структуры радиогалактик возникает необходимость в инструментах с разрешающей способностью в тысячные и даже десятитысячные доли угловой секунды. Описанные нами системы радиотелескопов не могут обеспечить такого разрешения, так как для этого необходимы инструменты с базами, составляющими десятки и сотни миллионов длин волн. Тянуть кабельные линии на такие расстояния или даже использовать для сведения сигналов от ряда зеркал в одно место ретрансляционные радиорелейные линии по ряду причин оказывается невозможным, хотя для получения меньшего разрешения такие системы успешно используются в широком диапазоне радиоволн от сантиметров до деkamетров, обеспечивая разрешения до сотых долей угловой секунды. С целью получения предельного разрешения Н. С. Кардашев, Л. И. Матвеев и Г. Б. Шоломицкий предложили метод сверхдальней интерферометрии или интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), который сейчас используется радиоастрономами всего мира (рис. 2.19, см. вклейку). Разрешающая способность таких систем приближается к тысячной доле угловой секунды. Принцип работы этой системы можно понять, сопоставляя ее с обычным двухантенным интерферометром (см. рис. 2.13 а), в котором сигналы от зеркал A_1 и A_2 подводятся к приемнику кабелями. Затем принимаемый сигнал в специальном устройстве смешивается с высокостабильным генератором — гетеродином, и на выходе смесителя появляется пониженная (разностная) частота, сигнал которой усиливается, снова попадает в смеситель, где частота снова понижается, пока не станет настолько низкой, что сигнал на выходе приемного устройства можно будет записать на самописец, включенный на выходе приемника (см. рис. 2.15). В такой системе принципиальным является то, что один и тот же сигнал из космоса приходит от двух зеркал к приемнику и происходит интерференция когерентных сигналов, приходящих от антенн A_1 и A_2 . Когерентность обеспечивают кабели, соединяющие зеркала с приемником, и общий гетеродин, преобразующий эти колебания в более низкочастотные. Если база

интерферометра становится большой, кабели необходимо исключить, и здесь возникает вопрос: как доставить сигналы, принятые зеркалами A_1 и A_2 , к приемнику, сохранив их когерентность? Предложенный метод сверхдальней интерферометрии решает эту задачу следующим образом. Каждое зеркало имеет приемник, у которого как гетеродин используются атомные стандарты с высочайшей стабильностью частоты. Например, относительная стабильность частоты водородного стандарта достигает 10^{-13} . Такая стабильность позволяет сохранять когерентность принимаемых сигналов на волне 1,35 см (частота $2,22 \cdot 10^{10}$ Гц) в течение 800 с. Используя такие гетеродины, приемники, расположенные у каждого из зеркал, преобразуют принимаемые сигналы и записывают их с помощью специальных широкополосных магнитофонов на магнитную ленту. Ленты от обоих зеркал привозятся в общий вычислительный центр и там соответствующим образом обрабатываются на ЭВМ. Так же как и когерентное преобразование сигналов, синхронизация записей производится с помощью атомных стандартов частоты. Очень важно провести точную привязку времени на пунктах приема. Здесь нужна точность до долей микросекунды. Она обычно достигается перевозкой атомных стандартов в одно и то же место. Такие интерферометры со сверхдлинной базой, достигающей 80 % диаметра земного шара, успешно работают, и с их помощью получен ряд важных результатов. Следует, однако, заметить, что наблюдения с помощью таких систем очень громоздки и дорогостоящи. Возможно осуществлять радиоинтерферометрию со сверхдальними базами несколько иначе. Между двумя или несколькими составляющими интерферометр зеркалами помещается искусственный спутник Земли, находящийся на высоте 36 000 км. Этот спутник «видит» все зеркала интерферометра и используется как ретранслятор для получения интерференционной картины в реальном масштабе времени, как в обычных интерферометрах. Большие перспективы открываются перед орбитальной РСДБ, принципы которой также разработаны Н. С. Кардашевым, в которой одна или несколько антенн установлены на спутниках. В 1997 г. такой космический интерферометр был впервые реализован и опробован с помощью японского спутника HALKA (рис. 2.20, см. вклейку). Осуществление подобных проектов имеет целью получение важнейшей научной информации (например, о внутренней структуре активных ядер галактик и окрестностях черных дыр), носящей принципиальный характер и недоступной никаким другим методам. Отметим также американский вариант глобальной интерферометрии VLBA, использующий 10 радиотелескопов северо-американского континента.

риканского континента, английскую интерферометрическую сеть MERLIN обсерватории Джодрел Бэнк, использующую 6 антенн с максимальной длиной базы 233 км и работающую с 1986 г.

ЮЖНАЯ ЕВРОПЕЙСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Южная Европейская Обсерватория была основана в 1962 г. для изучения южной небесной полусферы небосвода. Она поддерживается десятью странами: Бельгией, Данией, Францией, Германией, Италией, Нидерландами, Португалией, Швецией, Швейцарией и Великобританией. Ее инструменты расположены в двух пунктах высокогорной пустыни Атакама в Чили. На горе Паранал на высоте 2600 м над уровнем моря построен новый крупнейший в мире оптический инструмент VLT (Very Large Telescope). Он состоит из четырех телескопов диаметром 8,2 м. Они могут использоваться как независимо, так и в составе гигантского интерферометра (VLTI). На высоте 2400 м в Ла Силла расположено несколько оптических телескопов с диаметрами до 3,6 м и субмиллиметровый радиотелескоп SEST.

Это места с наилучшим в мире астроклиматом. Установленные там инструменты позволяют проводить наблюдения в инфракрасном диапазоне, что чрезвычайно важно для наблюдения Центра Галактики и других объектов, непрозрачных в оптической части спектра из-за космической пыли. Административный и научный центр ESO расположен в Южной Германии вблизи Мюнхена.

Подобная концентрация интеллектуальных и финансовых резервов, использование оптимальных природных условий, выходящих за рамки отдельных стран, характерна для современной астрономии и ряда других областей науки. Это, пожалуй, единственный безоговорочно успешный пример «глобализации», вызывающей большие споры в других областях человеческой деятельности.

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ «УРАН» АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ¹

Как указывалось выше, для получения высокого разрешения в радиоастрономии используются различные способы, основанные на совместном применении далеко разнесенных в про-

¹ Данный раздел по просьбе авторов написан А. В. Менем.

странстве антенн, образующих так называемые интерферометры, сигналы которых формируются путем сложения или, значительно чаще, перемножения высокочастотных сигналов, принятых отдельными антеннами. В диапазонах от миллиметровых до метровых волн интерферометры и системы, основанные на них, широко используются в ряде стран (Англии, США, Канаде, Нидерландах, Австралии и др.). Однако в декаметровом диапазоне, т.е. на наиболее длинных радиоволнах, излучение которых еще может быть принято у поверхности Земли, такие интерферометры в течение многих лет практически не применялись из-за трудностей проведения наблюдений в этом диапазоне. Во-первых, это очень существенное влияние ионосферы Земли, из-за которой наблюдения обычно можно проводить только в осенне-зимний период, причем в ночное время суток. Во-вторых, в этом диапазоне работает очень большое число радиовещательных и других радиостанций, создающих помехи радиоастрономическим наблюдениям и на много порядков превышающих принимаемые из космоса сигналы. В-третьих, на этих волнах очень высоки температуры (сотни тысяч и больше градусов Кельвина) излучения галактического фона. Наконец, в этом диапазоне в мировой практике не были раньше известны необходимые для радиоастрономических исследований антенны, которые располагали бы большими эффективными площадями в десятки и сотни тысяч квадратных метров и позволяли бы длительно оперативно принимать космическое излучение из достаточно широкого сектора пространства.

После решения проблемы создания требуемых для декаметрового диапазона антенных систем в Институте радиофизики и электроники, а впоследствии в Радиоастрономическом институте НАН Украины была построена радиоинтерферометрическая система УРАН (Украинские Радиоинтерферометры Академии Наук), состоящая из пяти декаметровых антенн, работающих в диапазоне от 25 МГц до 16,7 МГц (рис. 2.24). Все эти антенны представляют собой плоские эквидистантные антенные решетки, состоящие из отдельных излучателей, расположенных на высоте 3,5 м от земной поверхности. В качестве основного (базового) инструмента в системе УРАН, состоящей из 4 интерферометров, используется антенна «Север-Юг» радиотелескопа УТР-2 (рис. 2.12). Эта антенна состоит из 6 параллельных рядов излучателей, ориентированных вдоль меридиана. В каждом ряду 240 широкополосных линейных излучателей, всего в антенне 1440 излучателей, размеры ее 1841×53 м. Эффективная площадь (без учета потерь) около $100\,000\text{ м}^2$ на частоте 20 МГц при приеме

из зенитного направления. Расположена эта антенна возле села Волохов Яр Чугуевского района Харьковской области. Остальные антенны УРАНа для учета существенного в декаметровом диапазоне эффекта Фарадея (поворота плоскости поляризации излучения в одном пункте интерферометра относительно другого пункта) состоят из турникетных (взаимно перпендикулярных) излучателей, оси которых ориентированы под углом 45° к меридиану. Для каждой линейной поляризации используется своя независимая система формирования результирующей диаграммы направленности и управления ею в пространстве. Для управления диаграммой направленности всех антенн системы УРАН используется не механический, а чисто электрический способ с помощью специальных линий задержек сигналов во времени. Это обеспечило возможность приема сигналов из космоса в широком секторе пространства в достаточно широкой полосе частот.

Антенна УРАН-1 (рис. 2.21), расположена около г. Змиева Харьковской области на удалении около 42,3 км от базовой ан-

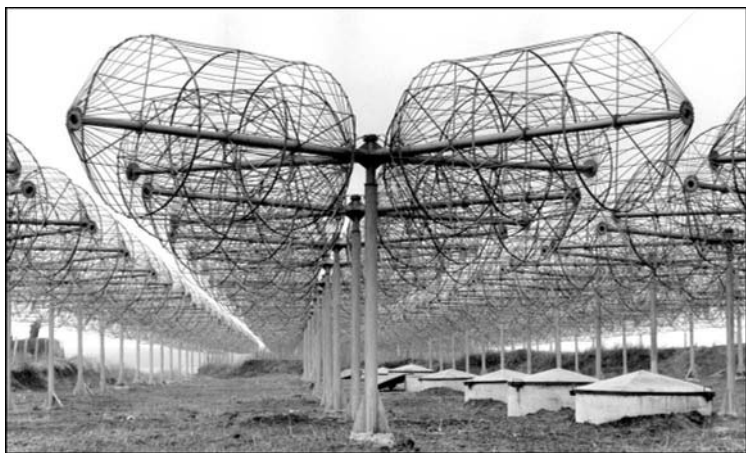


Рис. 2.21. Антенное поле радиоинтерферометра УРАН-1, г. Змиев, Харьковская обл., Украина

тенны («Север–Юг» УТР-2). Она состоит из 4 ориентированных вдоль параллели рядов по 24 турникетных излучателя в каждом (всего 96 штук). Размеры антенного поля 193×28 м, максимальная эффективная площадь около 4975 м^2 . Антенна УРАН-2, расположенная в селе Степановка Полтавской области на удалении 152,3 км от базовой антенны, состоит из 16 ориентированных вдоль параллели рядов по 32 турникетных излучателя в ряду (всего 512 штук). Размеры антенного поля 238×118 м,

максимальная эффективная площадь около $28\,141\text{ м}^2$. Антенна УРАН-3, расположенная около г. Шацка Волынской области на удалении $946,2\text{ км}$ от базовой антенны, состоит из 8 рядов, ориентированных вдоль параллели, по 32 турникетных излучателя в ряду (всего 256 штук). Размеры антенного поля $238 \times 58\text{ м}$, максимальная эффективная площадь около $13\,851\text{ м}^2$. Антенна УРАН-4, расположенная около поселка Беляевка Одесской области на удалении $613,1\text{ км}$ от базовой антенны, состоит из 4 рядов, ориентированных вдоль параллели, по 32 турникетных излучателя в ряду (всего 128 штук). Размеры антенного поля $238 \times 28\text{ м}$, максимальная эффективная площадь около $6\,707\text{ м}^2$. Схема размещения антенн УРАН приведена на рис. 2.22.



Рис. 2.22. Расположение радиотелескопов радиоинтерферометра УРАН

Результирующий (интерференционный) сигнал каждого интерферометра образуется путем перемножения сигналов, принятых базовой антенной, с сигналами, принятыми соответствующими антеннами УРАН, причем, так как эти антенны одновременно принимают излучение двух линейных поляризаций, на выходе каждого интерферометра образуются одновременно два интерференционных сигнала.

Интерферометры УРАН работают в режиме РСДБ (радиоинтерферометров со сверхдлинными базами), при этом сигналы всех антенн, синхронизированные во времени, предварительно записываются, а их перемножение проводится с помощью компьютера при последующей обработке результатов наблюдений.

Однако интерферометр УРАН-1 работает одновременно также в режиме реального времени. Для этого сигналы базовой антенны при наблюдениях с помощью радиорелейной линии ретранслируются на УРАН-1, где перемножение сигналов проводится с помощью радиоаппаратуры и регистрация интерференционных сигналов ведется в ходе эксперимента в реальном времени.

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ (РАДИОМЕТРЫ)

Мы рассказали о системах и методах, позволяющих принимать слабые радиосигналы, излучаемые космическими телами. Речь шла в основном об антеннах и их расположении с точки зрения получения максимальной разрешающей способности радиотелескопов. В заключение остановимся кратко на принципах получения максимальной чувствительности этих инструментов. Чувствительность радиотелескопов определяется их приемными системами. В некотором отношении эти системы похожи на используемые в радиовещании и телевидении, однако они намного более чувствительны и имеют высокую стабильность. Эти приемные устройства (радиометры) предназначены для приема сигналов очень малой мощности, сопровождаемых быстрыми случайными изменениями амплитуды и фазы — «шумом». Принимая такие шумовые сигналы, можно довольно точно находить средний уровень их мощности. Эту задачу и выполняют радиометры. Прием шумовых сигналов, излучаемых космическими объектами, определяет особенности работы радиометров. Если принимаются сигналы достаточно длинных радиоволн, к примеру декаметровых, метровых и длинных дециметровых, то наряду с «полезным шумом», идущим от изучаемого космического источника, на вход радиометра попадает «мешающий шум», обусловленный фоновым радиоизлучением неба. Иная ситуация при приеме сигналов коротких сантиметровых радиоволн. На этих волнах температура неба невелика и основная роль «мешающих шумов» приходится на долю собственных шумов приемного устройства, связанных, в основном, с шумами ламп, транзисторов, элементов приемного тракта и т. п. Для повышения чувствительности необходимо понижать температуру «мешающих шумов». Там, где температура определяется шумами приемного устройства, этого можно достичь, используя малошумящие мазерные или охлажденные параметрические усилители на входе радиометров. Там же, где «мешающие шумы» обусловлены фоновой температурой неба, задача их подавления сложнее. В ряде случаев применение узких диаграмм направленности позволяет повысить чувствительность ра-

диотелескопов, изучающих космические объекты небольшой протяженности. От обычных радиоприемников радиометры отличает и то, что там, где это возможно, ширину их полосы делают максимально широкой, в то время как полосы обычных приемников стараются сделать возможно более узкими, чтобы отделить друг от друга сигналы близко расположенных радиостанций. Увеличение полосы приема радиометра увеличивает его чувствительность, так как при этом становится все более и более устойчивым среднее значение принимаемого сигнала и, тем самым, более заметным всякое изменение этой величины, а значит, возрастает чувствительность системы. Современные радиометры могут измерять разницу температур, достигающую 0,001 К. Одним из методов, позволяющих получить такую чувствительность, является метод модуляционного радиометра, впервые предложенный Р. Дикке. На вход радиометра периодически подается сигнал то с выхода антенной системы радиотелескопа, то от стандартного источника, мощность шума которого строго калибрована. Такая методика значительно ослабляет вредные эффекты, связанные с изменениями режима работы приемной системы и т. п. Частота переключения должна быть достаточно высокой (обычно она составляет от 10 до 100 Гц), и ее выделение на выходе радиометра может быть обеспечено с точностью, гарантирующей измерение изменений температуры в несколько тысячных долей градуса.

Сложные антенные системы и высокочувствительные радиометры позволяют радиоастрономам изучать процессы, происходящие во Вселенной на огромных расстояниях, проникая в глубь космического пространства на удаления порядка 10 млрд световых лет. На этом пути уже было обнаружено и изучено много интересных объектов.

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ XXI ВЕКА ²

В августе 2003 г. в Будапеште состоялся Симпозиум Европейского астрономического общества «Радиоастрономии 70 лет: от Карла Янского до микроянского». На нем подводились основные итоги развития радиоастрономии за 70 лет и обсуждались главные научные результаты, многие из которых представлены в этой книге. Не меньше внимания уделялось перспективам радиоастрономии как в ближайшее время, так и в протяжении нового XXI века.

² Раздел написан А. А. Коноваленко по просьбе авторов.

Радиоастрономия всегда активно впитывала в себя все достижения научно-технического прогресса (в свою очередь, оказывая и обратное влияние). Радиоастрономические антенны — это одни из наиболее грандиозных и дорогих сооружений, используемых в человеческой деятельности. Приемники радиоастрономических сигналов — также наиболее чувствительные средства радиофизики и радиотехники. Изогранные методы и техника регистрации, хранения и обработки радиоастрономической информации поражают своими возможностями.

Бурный прогресс электронной, компьютерной техники, средств телекоммуникации и информационных технологий буквально революционизирует радиоастрономию как сейчас, так и в обозримом будущем.

Прежде всего актуальна модернизация существующих радиотелескопов. Внедрение радиоастрономических сверхчувствительных приемников нового поколения на антенных системах позволяет резко поднять эффективность исследований даже без увеличения размеров антенн. Такие приемники создаются на базе НЕМТ-транзисторов (High Electron Movement Transistor) и имеют собственную шумовую температуру (в неохлажденном варианте) до 10 градусов Кельвина, («классические» транзисторы обеспечивают шумовую температуру порядка 300 К). При охлаждении до температуры жидкого гелия такие приемники имеют собственный шум порядка единиц градусов Кельвина, т. е. вблизи абсолютного нуля.

Особо следует сказать о создании и внедрении регистрирующих средств нового поколения. Прогресс цифровой техники столь велик, что возможности новых регистрирующих средств на ее основе просто фантастические. Цифровые регистраторы и анализаторы сигналов уже сейчас обеспечивают полосы анализа до 100 МГц (в недалеком будущем до 1000 МГц) при числе эквивалентных каналов до 10^6 , временном и частотном разрешении менее 1 мкс и 1 кГц соответственно и огромный динамический диапазон (до 70 дБ). Для иллюстрации отметим, что внедрение цифровых спектральных процессов и цифровых корреляторов нового поколения на крупнейшем в мире радиотелескопе УТР-2 позволило получить принципиально новые результаты в области изучения Солнца, планет межпланетной и межзвездной среды, пульсаров, источников непрерывного радиоизлучения. Нет сомнений в том, что дальнейшее улучшение параметров выходной аппаратуры даст еще множество новых и неожиданных результатов.

Как всегда актуальны применение и развитие в радиоастрономии методов апертурного синтеза и радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), которые обеспечивают угловое разрешение до 10^{-4} угловых секунд как у гипотетического радиотелескопа с диаметром, приближающимся к диаметру Земли. Перспективы этого направления связаны с улучшением параметров антенн и приемных средств, включением в глобальную и локальную сети на постоянной основе новых антенн, что дает увеличение чувствительности и повышение качества радиоизображений. Последнее активно реализуется в Украине, где имеются превосходные антенны РТ-70 (Евпатория), РТ-32 (Симферополь), РТ-22 (Симеиз) и ряд других антенн³.

Активно проводится создание и внедрение новых средств РСДБ — регистрации и обработки. Система нового поколения Марк V позволит отказаться от громоздких носителей на магнитных лентах, что облегчает и повышает эффективность наблюдений и обработки данных. Особое значение имеет внедрение в РСДБ идеологии современных средств телекоммуникаций и информационных технологий (оптоволоконные линии передачи, спутниковые каналы связи, полная автоматизация экспериментов, создание антенных приемно-компьютерных сетей высокого уровня, обеспечение РСДБ реального времени). Состояние и перспективы развития данного направления позволили ввести термин *е-радиоастрономия* (электронная радиоастрономия), что уже в недалеком будущем обеспечит принципиально новые возможности как в организации экспериментов, так и в решении новых астрофизических задач.

Ключевым направлением развития РСДБ-метода является наземно-космическая радиоинтерферометрия. Дело в том, что угловое разрешение наземных сетей РСДБ ограничивается диаметром Земли ($\sim 12\,000$ км). В то же время решение многих крайне актуальных задач астрофизики и космологии требует лучшего углового разрешения на 1–2 порядка (до 10^{-6} угловых секунд!), для чего необходимы базы до 100 000 км. Очевидно, что это можно реализовать только путем вывода хотя бы одного из радиотелескопов на космическую орбиту с соответствующим апогеем. Все наземные радиотелескопы работают при этом синхронно с космическим в наземной и наземно-космических РСДБ-сетях. Несмотря на кажущуюся фантастичность такого проекта, он уже был реализован! Первый космический радиоте-

³ Цифры означают диаметр зеркала антенны.

лескоп диаметром 10 м (KPT-10) был запущен в СССР в 1979 г. на станции «Салют». Первый Международный наземно-космический РСДБ-проект (VSOP–VLBI Space Observatory Program) реализован в течение последнего десятилетия. С помощью японского космического аппарата HALCA 12 февраля 1997 г. на орбиту высотой 20 000 км был выведен радиотелескоп диаметром 8 м, работавший в сантиметровом диапазоне волн. Полученные результаты доказали перспективность такого подхода. Сейчас готовится новый Международный наземно-космический проект «Спектр-Р», головная организация — Астрокосмический центр ФИАН. Аппарат «Радиоастрон» должен вывести радиотелескоп диаметром 10 м на орбиту до 200 000 км. Рассматривается апогей вплоть до орбиты Луны (–400 000 км). Рабочие диапазоны приемной системы 327 МГц, 1,6 ГГц, 4,8 ГГц, 22 ГГц. Запуск запланирован на 2010 г. Реализация проекта обеспечит беспрецедентное угловое разрешение и решение астрофизических задач первостепенной важности. Готовится продолжение проекта VSOP–VSOP-2. Обсуждается проект реализации будущего космического радиотелескопа диаметром 30 м (проект ARISE), а также международный космический проект «Миллиметронтрон». Без сомнения, наземно-космическая радиоинтерферометрия будет одним из генеральных направлений радиоастрономии нового века. Среди наиболее перспективных крупнейших наземных радиоастрономических проектов ближайшего будущего укажем следующие.

В миллиметровом диапазоне волн начато строительство системы апертурного синтеза ALMA-Atacama Large Millimeter Array. Эта система представляет собой 64 высокоточных зеркала диаметром 12 метров, позволяющих работать даже на длинах волн короче 1 мм. Система будет расположена на плато Атакама на высоте 5 км и будет введена в эксплуатацию в 2010 г. Другой грандиозный проект обеспечит работу в сантиметровом-дециметровом диапазоне волн (частоты 200 МГц–226 Гц). Этот проект SKA (Square Kilometer Array) уже готовится около 15 лет и обеспечит суммарную эффективную площадь до 1 млн кв. м! Есть несколько концепций реализации столь гигантской площади (решетка из антенных элементов, множество небольших зеркальных антенн, гигантские чаши в карстовых впадинах и др.) Проект планируется завершить к 2012 г. В реализации проекта участвует много стран и, возможно, будет построено несколько таких гигантских сооружений.

Особо следует сказать о международных проектах низкочастотной радиоастрономии, которая бурно прогрессирует во всем



Рис. 2.23. Проект строящегося субмиллиметрового радиотелескопа нового поколения ASCA. Южная Европейская Обсерватория, высокогорная пустыня Атакама в Чили

мире в последнее десятилетие. В Голландии создается система LOFAR (Low Frequency Array). Диапазон ее работы составляют 30–80 МГц и 110–240 МГц. Система имеет распределенную иерархическую структуру при общем количестве элементов в несколько десятков тысяч, суммарной эффективной площади до нескольких сотен тысяч м^2 , что обеспечит чувствительность на уровне миллианских и разрешающую способность на уровне секунд дуги. Идеология работы системы предполагает большое поле зрения и многолучевой широкополосный прием при использовании современных цифровых и информационных технологий. Многие страны Европы, включая Украину, планируют установку выносных станций LOFAR на своих территориях (Е-LOFAR — европейский LOFAR). В США ведутся работы по созданию аналогичной системы LWA (Long Wavelength Array) с диапазоном 20–80 МГц. Согласно целевой программе Национальной академии наук Украины ведется создание радиотелескопа ГУРТ (Гигантский Украинский Радиотелескоп) с диапазоном 10–30 МГц на территории Обсерватории радиотелескопа УТР-2. Основная идея этих инструментов состоит в реализации максимального диапазона частот, чувствительности и помехоустойчивости, что важно для изучения радиоизлучения (в том числе спорадического) многих объектов Вселенной. Отметим также

низкочастотные проекты ряда стран в диапазоне 50–300 МГц. Одна из главных целей их создания — космологическая — изучение «эпохи реионизации» водорода, сопутствующей возникновению первых звезд и галактик (см. гл. 6). При этом за счет красного смещения спектральные особенности радиоизлучения смещаются в низкочастотный диапазон. Так, линия водорода 21 см из-за красного смещения в $1 + z$ раз при $z = 5$ попадает в метровый диапазон, а при $z = 50$ — в декаметровый.

Как известно, на частотах менее 10 МГц космическое радиоизлучение с поверхности Земли наблюдать невозможно из-за экранирующего влияния ионосферы. Поэтому в первой четверти XXI века, безусловно, появятся низкочастотные радиоастрономические системы космического базирования — в открытом космосе и/или даже на обратной стороне Луны! В этом случае, влияние как ионосферы, так и земных помех будет сведено к минимуму.

В данной главе мы кратко рассмотрели перспективы развития экспериментальной базы всеволновой радиоастрономии, не касаясь будущих астрофизических задач и возможных научных открытий. Безусловно, применение описанных выше грандиозных радиоастрономических сооружений обогатит наши знания о Вселенной результатами первостепенного значения.

Глава 3

РАДИОАСТРОНОМИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА

В пространстве, хором сфер объят,
Свой голос Солнце подает,
Свершая с громовым раскатом
Предписанный круговорот.

Гёте

Для нас, жителей Земли, Солнце — ближайшая звезда. До недавнего времени оно было единственной звездой, от которой принимались радиосигналы. Радиоизлучение Солнца наблюдалось во всем доступном на Земле диапазоне — от миллиметровых до декаметровых радиоволн, а также — с помощью ракет и спутников (рис. 3.1) — от сверхдлинных радиоволн вплоть до гамма-лучей. В дальнейшем, говоря об излучении Солнца, мы будем иметь в виду только радиоволны, которые могут быть приняты радиотелескопами на поверхности Земли.

Характер радиоизлучения Солнца весьма сложен. Условно это излучение можно разбить на три группы, между которыми, строго говоря, нет четких, резко очерченных границ.

К первой группе относят тепловую компоненту, называемую «излучением спокойного Солнца»; ко второй — «медленно меняющуюся компоненту», имеющую также тепловую природу; к третьей группе относят нестационарные и, как правило, нетепловые явления, объединенные общим термином «всплески».

Излучение спокойного Солнца

Недра Солнца непрозрачны для электромагнитных волн, и мы видим лишь его яркую поверхность — фотосферу. Во время затмений и в специальных приборах, где фотосфера закрыта, можно видеть «атмосферу» Солнца — нижний, относительно тонкий (10–15 тыс. км) окрашенный слой — хромосферу и верхнюю

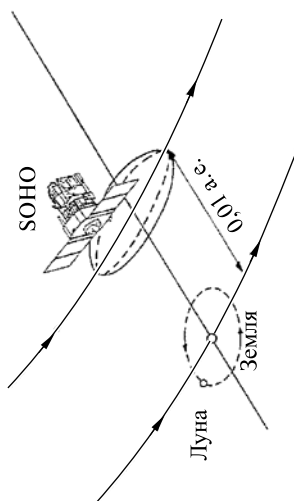
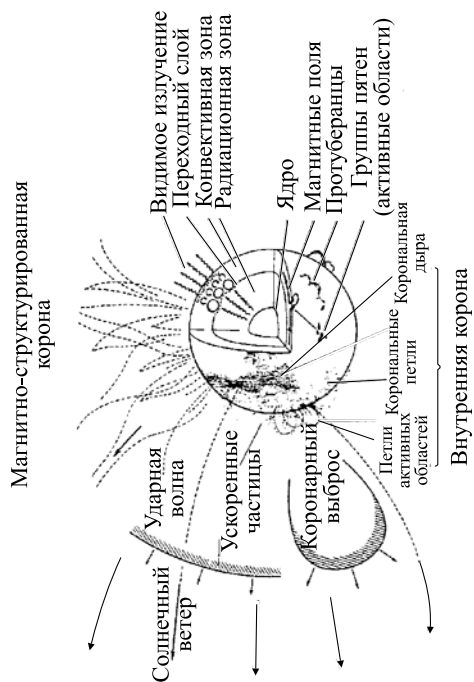


Рис. 3.1. Схема Солнечной активности. В точке Лагранжа показана солнечно-гелиосферная станция SOHO

атмосферу — его серебристую корону. Хромосфера представляет собой горячую ($T_{\text{хр}} \approx 30\,000\text{ K}$), очень подвижную ионизированную среду — плазму, подверженную сильному воздействию магнитных полей. С. Б. Пикельнер сравнивает хромосферу с «травой, охваченной пламенем», языки которого тянутся иногда до высоты 10 тыс. километров и более. В активных областях над магнитными пятнами вздымаются протуберанцы, уходящие своими арками в нижнюю корону. Корона представляет собой еще более разреженную и еще более горячую — с температурой около миллиона градусов — плазму сложной структуры, пронизанную магнитными полями, потоками частиц и т. п. Корона непрерывно расширяется и переходит в «солнечный ветер», обдувающий планеты, в том числе и Землю (рис. 3.1).

Попытки обнаружить радиоизлучение Солнца предпринимались еще в конце XIX века, однако они оказались безуспешными, ибо чувствительность используемой аппаратуры была недостаточной. Только в 40-е годы XX века Г. Реберу и Г. Ц. Саусворту в США и Дж. С. Хейу в Англии удалось принять солнечное радиоизлучение. Такой успех объясняется быстрым развитием радиолокационной техники и созданием высокочувствительных приемников во время Второй мировой войны. Впрочем, тогда эти данные были засекречены и опубликованы только после ее окончания. Дж. С. Хей, в частности, наблюдал вспыхивающее спорадическое излучение Солнца (рис. 3.2) в качестве помех при поиске немецких самолетов.

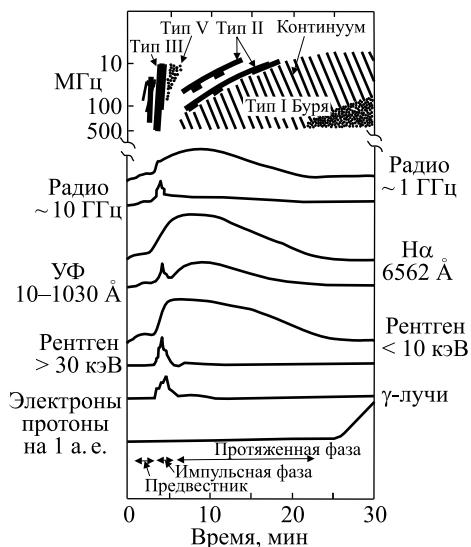


Рис. 3.2. Зависимость от времени излучения при солнечной вспышке в различных частях спектра (по Дж. Далку)

Работами Дж. Л. Пози с сотрудниками в Австралии, С. Э. Хайкина с сотрудниками в СССР было установлено, что радиоизлучение Солнца состоит из постоянного (в течение месяцев или даже лет) фона и медленно изменяющегося со дня на день излучения. Первая из этих компонент — «излучение спокойного Солнца» — связана с тепловой эмиссией солнечной атмосферы. Механизм такого излучения был детально рассмотрен еще в конце 40-х годов В. Л. Гинзбургом (СССР) и С. Ф. Смердом (Австралия). При этом учитывалось, что в излучение вносит вклад плазма как хромосферы, так и короны. Чтобы иметь возможность выполнить необходимые расчеты, связанные с излучением радиоволн различных диапазонов, нужно знать зависимость средней плотности числа электронов (концентрации) N от высоты над солнечным диском. Зная величину N , можно определить так называемую плазменную частоту (e и m — заряд и масса электрона)

$$\omega_e = \left(\frac{4\pi N e^2}{m} \right)^{1/2},$$

на которой показатель преломления солнечной короны обращается в нуль, и тем самым определить высотный уровень, на котором возникает генерация той или иной частоты.

Дело в том, что плазма, т. е. полностью или почти полностью ионизированная среда, обладает весьма необычными свойствами. В частности, она прозрачна лишь для электромагнитных волн с частотой, превышающей плазменную. Более низкие частоты отражаются от плазмы как от зеркала. Кстати, и настоящее зеркало действует по этому же принципу: ведь его металлическое покрытие содержит плотную электронную плазму ($N \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\omega_e/(2\pi) \sim 10^{15} \text{ Гц}$), которая и отражает свет.

В солнечной короне концентрация ($N(r) \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ при $r \approx 2R_\odot$, где r — расстояние от центра Солнца, а R_\odot — его радиус) такова, что плазменные частоты приходятся на радиодиапазон. Для каждой частоты ω имеется свой «зеркальный» слой, где $\omega = \omega_e(r)$. Приблизительно из этого слоя в основном и идет излучение на данной частоте.

Оказалось, что генерация практически всего диапазона волн от сантиметровых до декаметровых происходит в диапазоне изменений r/R_\odot от 1 до 3, причем десятикратное увеличение плотности электронов, которое может наблюдаться в годы повышенной солнечной активности, лишь незначительно изменяет эти пределы.

Уровень, на котором происходит излучение спокойного Солнца, при повышении частоты постепенно перемещается из «горячей» солнечной короны в более «холодную» хромосферу. На сантиметровых и более длинных волнах «радиодиаметр» Солнца превышает его оптический диаметр, что как раз и обусловлено излучением радиоволн хромосферой и солнечной короной, а не только фотосферным диском. Солнечный лимб значительно ярче на дециметровых волнах в сравнении с сантиметровыми и темнее на метровых и декаметровых волнах. Дело в том, что сантиметровые волны излучаются хромосферой и нижней кромкой солнечной короны, которые прозрачны для этих волн. Солнечный диск закрывает часть короны, и поэтому наблюдается излучение только от тех ее частей, которые обращены к нам. Однако достаточно отойти на небольшое расстояние от диска, чтобы увидеть излучение и «передней», и «задней» частей короны. Это и приводит к уярчению солнечного диска на дециметровых волнах. На больших расстояниях от края диска, там, где генерируются метровые и декаметровые волны, интенсивность излучения падает, так как она определяется сильно разреженными, а следовательно, и малоизлучающими областями солнечной короны. После того как была разработана теория радиоизлучения спокойного Солнца, ряд исследователей в разных странах (Австралия, Англия, СССР, США) провели наблюдения на различных радиоволнах — от коротких миллиметровых до декаметровых. Наблюдать радиоизлучение спокойного Солнца, особенно на метровых и декаметровых волнах, довольно трудно, так как на Солнце практически всегда происходят нестационарные процессы, вызывающие другие типы его радиоизлучения. Поэтому компоненту спокойного Солнца изучали, используя статистический материал. Было установлено как предсказанное теорией уярчение лимба, так и радиоизлучение за пределами фотосферного диска. В итоге радиоданные явились сильным аргументом в пользу высокой кинетической температуры в солнечной короне (10^6 K) и значительной температуры в хромосфере ($3 \cdot 10^4$ K). Для изучения более далеких областей короны Солнца широко используется предложенный В. В. Виткевичем метод покрытия солнечной короной дискретных источников, в частности Крабовидной туманности. С помощью этого метода удалось получить информацию о плотности и структуре короны при $r \geq 5R_{\odot}$.

На излучение спокойного Солнца накладывается медленно меняющаяся, или S-компонента, которая представляет собой тепловое радиоизлучение, возникающее в локализованных областях

солнечной атмосферы с высокой электронной концентрацией. Наиболее ярко эта компонента проявляется на сантиметровых и дециметровых волнах. Яркие области солнечной атмосферы, ответственные за излучение S-компоненты, обычно занимают около 10^{-3} площади солнечного диска, а их средняя яркостная температура¹ может достигать $5 \cdot 10^6$ К. Большая часть таких областей совпадает с положением групп солнечных пятен, хотя в некоторых случаях эти области наблюдаются и в их отсутствие. Высоты над фотосферой, где наблюдается S-компонента, различны и изменяются от 10^4 до 10^5 км. Интенсивность S-компоненты весьма велика — от $5 \cdot 10^3$ до 10^5 янских на волне 21 см и до 10^6 янских на волнах 3 и 10 см. Излучение компоненты направленно, источник излучения имеет вид тонкого слоя, параллельного поверхности фотосферы. Двумерные радиокарты

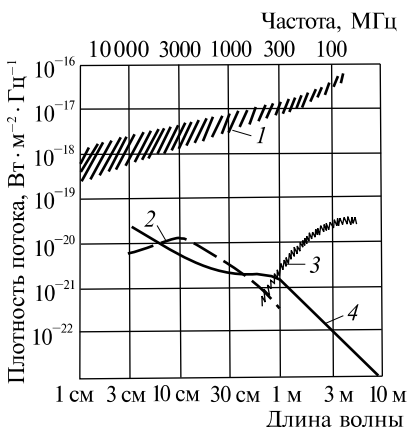


Рис. 3.3. Спектр радиоизлучения Солнца: 1 — вспышки; 2 — медленно меняющаяся компонента; 3 — бури; 4 — спокойное Солнце

Солнца обнаружили хорошее соответствие размеров и формы источников излучения S-компоненты с поверхностями локализованного магнитного поля и областями пятен. Использование радиотелескопов с большой разрешающей способностью позволило установить, что источники S-компоненты обычно состоят из интенсивной области малого диаметра (около 1–2 угловых минут), которая, по-видимому, соответствует области солнечных пятен, и менее интенсивной части с размерами около 5–8 угловых минут. Яркостные температуры этих двух областей порядка 10^6 и 10^5 К соответственно. Яркая область источников S-компоненты имеет круговую поляризацию. Частотный спектр S-компоненты весьма своеобразен и отличается от спектра спокойного Солнца (рис. 3.3).

¹ Яркостная температура — это температура воображаемого нагретого тела, размеры которого равны размерам изучаемого объекта, излучающего на данной частоте и в данном направлении такое же количество энергии, как и наблюдаемый источник.

Солнечные всплески

Этот тип излучения наблюдается на всех уровнях солнечной атмосферы. При этом диапазон длин волн простирается от миллиметров до декаметров. Области, принадлежащие хромосфере, генерируют при всплесках миллиметровые и короткие сантиметровые волны, а области, связанные с солнечной короной, ответственны за излучение более длинных радиоволн вплоть до декаметровых. Интенсивность всплесков различных типов может достигать огромных величин с эквивалентной яркостной температурой 10^{10} – 10^{12} К. Механизмы всплесков — неравновесные, нетепловые. Характер всплесков сильно зависит от частоты, на которой они генерируются. Самый простой характер имеют всплески на миллиметровых и сантиметровых волнах. Они появляются в виде отдельных импульсов излучения с быстрым нарастанием интенсивности и более медленным ее спадом. Это излучение имеет круговую поляризацию, а также сопровождается в ряде случаев непрерывным фоном. Излучение на дециметровых волнах также непрерывно, но наблюдаются импульсные вспышки, которые дрейфуют с большой скоростью по частоте (10 МГц/с и выше) от высоких частот к низким или обратно.

Наиболее сложны всплески на метровых и декаметровых радиоволнах. По их спектральным характеристикам различают пять основных типов.

Всплески первого (I) типа и связанные с ними шумовые бури состоят из медленно изменяющегося непрерывного радиоизлучения в широкой полосе частот. Этот процесс может длиться от нескольких часов до нескольких дней. На такое непрерывное излучение накладывается ряд узкополосных всплесков, дрейфующих по частоте со скоростью около 5 МГц/с, которые длятся от доли секунды до нескольких секунд. Излучение имеет значительную круговую поляризацию и может быть связанным с солнечными вспышками и пятнами или появлением активных областей на солнечном диске.

Всплески второго (II) и третьего (III) типов представляют собой процессы, длящиеся соответственно минуты или секунды (рис. 3.4). Излучающие объекты изменяют частоту с высокой скоростью. Так, всплески II типа дрейфуют со скоростью порядка 0,5 МГц/с, а всплески III типа — 20 МГц/с. Эти дрейфующие по частоте всплески объясняются возбуждением плазменных колебаний. Так как плазменная частота связана с плотностью плазмы, то всплески II и III типов связывают с объектами, движущимися в солнечной атмосфере — ударными волнами и элек-

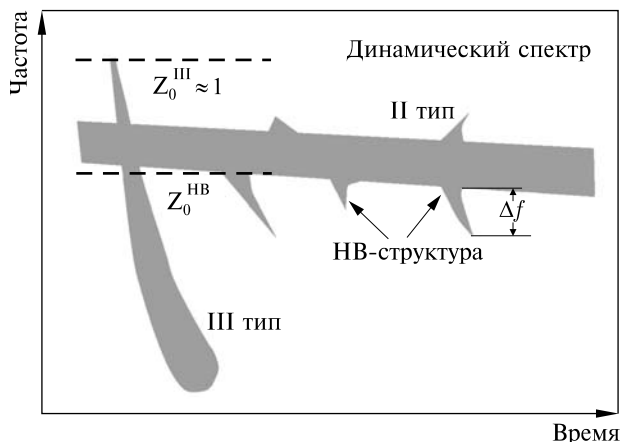


Рис. 3.4. Схема динамического спектра всплеска III и II типа с елочной (НВ) структурой

тронными пучками. Их скорости порядка 10^3 км/с для всплесков II типа, возбуждаемых ударными волнами, и порядка 10^5 км/с для всплесков III типа, возбуждаемых пучками ускоренных электронов. (Последние, таким образом, движутся со скоростями, уже сравнимыми со скоростью света.) Оба эти типа всплесков изучены наиболее детально. Возможен *U*-образный вариант всплесков III типа, когда дрейф, идущий от более высоких частот к более низким, на некоторой частоте изменяет направление на обратное. На длинных метровых и декаметровых волнах наблюдается расщепление основного всплеска по частоте, встречаются отдельные детали в виде цепочек и т.п. Во многих случаях у всплесков наряду с первой частотной гармоникой наблюдается еще и вторая, в редких случаях третья.

Всплески четвертого (IV) типа — это частично поляризованное непрерывное широкополосное излучение, которое тянется от сантиметровых до декаметровых волн. Такие всплески имеют длительность от нескольких минут до нескольких часов. Характер всплесков IV типа на разных частотах резко различается, так как эти всплески вызываются разными источниками. В частности, на волнах метрового диапазона источники имеют большие угловые размеры и начальные скорости до нескольких тысяч километров в секунду.

Всплески пятого (V) типа похожи на всплески типа IV. Это также непрерывное излучение, происходящее в основном на волнах метрового диапазона и длящееся от нескольких секунд до нескольких минут.

Таким образом, свойства и виды всплесков существенно зависят от длины волны. Здесь мы ограничимся более детальным описанием низкочастотных всплесков метрового и декаметрового диапазонов.

В этих диапазонах радиоволн наиболее характерными являются кратковременные одиночные либо групповые, быстро дрейфующие от более высоких к более низким частотам всплески III типа. Они возбуждаются на соответствующих плазменных уровнях потоками частиц (электронов, реже протонов), движущихся в солнечной короне со скоростями до трети скорости света. Ускоренные частицы образуются во время солнечных вспышек, с которыми всплески III типа тесно связаны. Наблюдения с помощью спектроанализаторов показали, что всплески III типа имеют тонкую структуру и часто сопровождаются дрейфующими *U*-образными всплесками. Характерный для всплесков III типа вид спектрограммы изображен на рис. 3.5. Представлена частотно-временная зависимость всплеска, а его интенсивность отмечена различной штриховкой. Характерными особенностями всплеска являются быстрый дрейф по частоте (в среднем 20 МГц/с), продолжительность в несколько минут, более быстрый, чем нарастание, спад интенсивности. Довольно часто у всплесков III типа наблюдаются первая и вторая гармоники (относительно плазменной частоты). Всплески III типа частично поляризованы по кругу, но наблюдается и линейная поляризация. Механизм их образования связан с возбуждением плазменных волн потоками частиц, пронизывающих солнечную корону, а преобразование продольных плазменных волн в поперечные электромагнитные волны определяется пространственными неоднородностями плотности плазмы и взаимодействием волн. Если величина и конфигурация магнитного поля таковы, что электронные потоки поворачивают обратно к Солнцу, то они генерируют *U*-образные всплески.

В декаметровом диапазоне волн солнечная активность очень часто проявляется в виде короткоживущих узкополосных всплес-

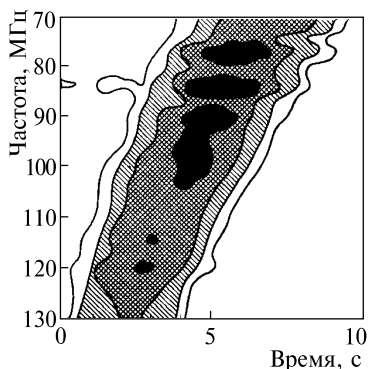


Рис. 3.5. Типичная диаграмма зависимости интенсивности всплеска III типа от времени и частоты. Зачернение соответствует уровню сигнала

ков, имеющих вид либо одиночных, либо двойных и тройных событий, расщепленных как по частоте, так и по времени. Такие всплески не наблюдаются на более высоких частотах. Они часто группируются в быстродрейфующие по частоте цепочки. Последние появляются в виде как изолированных, так и двойных трасс. Эти двойные трассы образуют всплески III-b и диффузные всплески III типа (рис. 3.6). Оба этих типа всплесков объясняют-

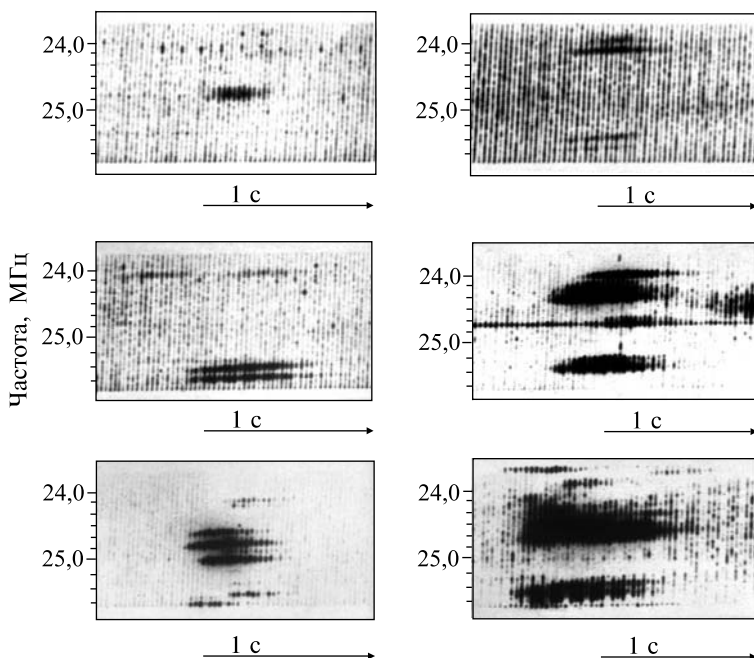


Рис. 3.6. Динамические спектры всплесков типа III-b; двойные и тройные трассы (по работе Э. П. Абранина, Л. Л. Базеляна и Н. Ю. Гончарова, выполненной на УТР-2)

ся плазменным механизмом, согласно которому рождаемые активностью Солнца ускоренные надтепловые электронные пучки возбуждают плазменные волны, трансформирующиеся в радиоизлучение.

Плазменный механизм возбуждения всплесков III типа позволил определить распределение плотности электронов по высоте короны, причем эта плотность была выше нормальной для короны и соответствовала плотности в струях над активными областями. Наблюдение времен затухания плазменных колебаний позволило по данным о всплесках III типа определить распреде-

ление температуры в короне. Изучение всплесков III типа позволило также получить ряд важных сведений о характеристиках электронных пучков, возбуждающих плазменные колебания.

Наряду с быстро дрейфующими по частоте всплесками III типа наблюдаются медленно дрейфующие всплески II типа (частота дрейфа 0,25–0,5 МГц/с). У этих всплесков также наблюдаются первая (основная) и вторая гармоники. Всплески II типа значительно более редки, чем всплески III типа, они возникают в среднем раз в 50 часов вспышечной активности, в то время как всплески III типа — примерно раз в течение нескольких минут. У всплесков II типа существует минимальная частота, ниже которой колебания не возбуждаются. Очень часто всплески II типа следуют непосредственно за всплесками III типа. Иногда у этих всплесков наблюдается «елочная» структура, похожая также на «скелет селедки» (откуда и их обозначение НВ — herring bones), — быстро дрейфующие по частоте всплески малой продолжительности, возникающие из основного медленно дрейфующего всплеска. Интенсивность всплеска высокая, она достигает 10^7 янских. Около 70 % всех всплесков II типа сопровождается всплесками III типа и около 30 % — всплесками IV типа. Всплески II типа также связаны с солнечными вспышками, они начинаются вблизи максимума такой вспышки, продолжаясь после ее окончания, и вызываются гидромагнитной ударной волной, возникающей над активной областью Солнца и возбуждающей плазменные колебания в солнечной короне, которые затем преобразуются в электромагнитные волны. Высота, на которой ударная волна становится заметной, определяет частоту (100–300 МГц), на которой появляются всплески II типа. Возможен и другой механизм возбуждения всплесков II типа: всплески могут генерироваться непосредственно электронами, ускоренными ударной волной. Не исключено сосуществование обоих механизмов.

Мощные вспышки иногда сопровождаются длительными периодами усиленного непрерывного излучения — всплесками IV типа. Они возникают после мощных солнечных вспышек, им обычно сопутствуют на метровых волнах всплески II типа. Продолжительность таких всплесков — от нескольких минут до многих часов. Метровое излучение всплесков IV типа сопровождается интенсивными всплесками на сантиметровых и дециметровых волнах, являясь, таким образом, чрезвычайно широкополосным и охватывая диапазон от сантиметровых до дециметровых волн. Это излучение, обладая различными свойствами в разных диапазонах, тем не менее всегда поляризовано. Эквивалентные температуры всплесков IV типа могут достигать 10^{12} К. Магнитные

поля, необходимые для их генерации, — порядка эрстеда, а энергии возбуждающих частиц — около нескольких мегаэлектрон-вольт. Необходимую для генерации всплесков IV типа энергию электроны приобретают в нижних слоях солнечной атмосферы. Ускоряясь с помощью механизма Ферми на гидромагнитных волнах в сильных магнитных полях солнечных пятен, тепловые электроны могут приобрести релятивистские скорости уже после нескольких «лобовых» столкновений с фронтами ударных волн. Наиболее энергичные частицы проникают в солнечную корону, генерируя там всплески IV типа за счет синхротронного излучения в магнитных полях солнечных пятен.

Одно из наиболее частых явлений на волнах метрового диапазона — шумовые бури, о которых мы уже упоминали. Это излучение возникает во время появления мощных солнечных пятен, имеет такие же размеры, как и пятна, и возникает непосредственно над ними. Шумовые бури — резкое увеличение фонового излучения — связаны с появлением всплесков I типа малой продолжительности. Как непрерывное излучение, так и всплески сильно поляризованы по кругу. Полагают, что за шумовые бури ответственны черенковские колебания плазмы, возбужденные быстрыми частицами, выброшенными при солнечных вспышках. Эти явления наблюдаются на метровых и декаметровых волнах — от 1 до 30 м. С повышением частоты интенсивность шумовых бурь и всплесков резко падает, на коротких дециметровых волнах они практически отсутствуют.

В период сильноразвитой солнечной активности во время шумовых бурь в декаметровом диапазоне волн встречается еще один тип короткоживущих всплесков с тонкой структурой. Это так называемые дрейфующие пары. Они были исследованы в частотных диапазонах 12–13 и 24–26 МГц. Примеры динамических спектров таких всплесков приведены на рис. 3.7. Обычно они представляют собой две сравнительно узкие полосы излучения (0,1–0,4 МГц на частоте 32,5 МГц) длительностью от 0,5 до 1,5 с, дрейфующие от низких частот к высоким или наоборот. Скорость их частотного дрейфа примерно в 2,5 раза меньше, чем у всплесков III типа, и составляет около 1,5 МГц/с на частоте 25 МГц.

Всплески V типа — широкополосное слабополяризованное интенсивное излучение на частотах ниже 150 МГц. Они обычно связаны со всплесками III типа, смещенными относительно источников всплесков V типа. Их продолжительность возрастает с понижением частоты. Излучение пучка электронов происходит

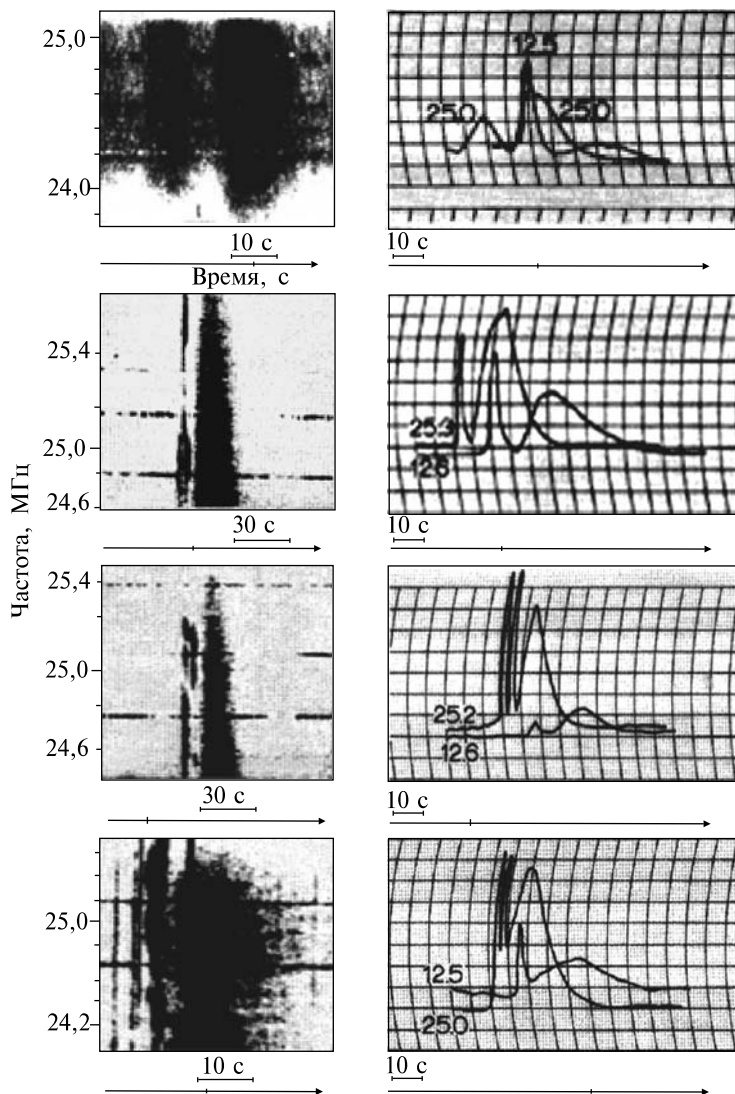


Рис. 3.7. Динамические спектры дрейфующих пар (по Э. П. Абранину, Л. Л. Базеляну и Н. Ю. Гончарову). Четко видны первая и вторая гармоники

на удвоенной плазменной частоте в магнитном поле петлеобразной конфигурации.

Из вышеизложенного видно, что радиоизлучение Солнца при всей его сложности имеет ряд важных особенностей, связанных с возбуждением плазмы солнечной короны быстрыми пучками

Типы радиоизлучения Солнца

Вид излучения	Источник излучения	Продолжительность излучения	Размер области излучения
Излучение спокойного Солнца	Фотосфера, хромосфера, корона	Изменяется с 11-летним циклом	Более 30', растет с длиной волны
Медленно меняющаяся S-компонента	Нижняя корона над центрами активности	От нескольких дней до нескольких месяцев	1'–10'
Сверхвысокочастотные всплески А, В, С	Совпадают с источниками S-компоненты	От нескольких минут до нескольких часов	До 2–3 угловых минут
Шумовые бури; повышенное излучение, связанное с солнечными пятнами	Область короны над группами пятен	От нескольких дней до нескольких часов	До 10 угловых минут
Всплески I типа		Доли секунды	2'–6'
Всплески II типа	Область в короне ¹ , перемещающаяся от хромосферной вспышки со скоростью 10^3 км/с	Минуты	5'–7'
Всплески III типа	Область в короне ² , перемещающаяся от хромосферной вспышки со скоростью $\sim 10^5$ км/с	Секунды, доли секунд	До 10'; увеличивается с длиной волны
Всплески IV типа	Область в короне ³ , перемещающаяся от хромосферной вспышки со скоростью $\sim 10^3$ км/с	От нескольких минут до нескольких часов	10' (иногда больше)
Всплески V типа	Область в короне ⁴	От нескольких секунд до 2–3 мин	До 10' (иногда больше)

Примечание. ¹ Возможно, связана с частицами, вызывающими магнитные за вспышками II типа. Имеет вид непрерывного континуума. ⁴ Следует за

Таблица 3.1

(по В. В. Железнякову, М. Кунду и др.)

Длины излучаемых радиоволн	Поляризация излучения	Наблюдаемая яркостная температура	Механизмы радиоизлучения
мм, см, дцм, м, дкм	Не поляризовано	Не превышает $2 \cdot 10^6$ К	Тепловой
мм, см, дцм	Слабополяризовано (на сантиметровых волнах иногда наблюдается круговая поляризация)	Около $2 \cdot 10^6$ К	Тепловой
мм, см, дцм	Частично поляризовано	Не превышает 10^9 К	Тепловой и магнитотормозной, некогерентный
м, дкм	Сильно поляризовано	$10^9 - 10^{10}$ К	Магнитотормозной некогерентный и когерентный, черенковский когерентный
м, дкм	Не поляризовано	10^{11} , иногда до 10^{15} К	Плазменные колебания, ударная волна, черенковский когерентный
дцм, м, дкм	Иногда частично поляризовано	От 10^8 К до 10^{11} К	Магнитотормозной некогерентный, черенковский когерентный
дцм, м, дкм	Частично поляризовано	От 10^8 К до 10^{12} К	Плазменный
м–дкм	Иногда эллиптическая поляризация	от 10^{11} К до 10^{12} К	По-видимому, магнитотормозной, некогерентный

бури.² Обычно возбуждаются потоками релятивистских электронов.³ Следует всплесками III типа. Имеет вид континуума.

частиц. Его наблюдение позволило впервые проникнуть вглубь солнечной короны и изучить ряд неизвестных до этого физических процессов, происходящих в атмосфере Солнца. Возникла даже новая ветвь физики — магнитная гидродинамика, создание которой связано, в частности, с именем Альвфена. В последнее время важные сведения о короне, солнечном ветре и даже о недрах Солнца получают благодаря исследованиям в рентгеновском, ультрафиолетовом и оптическом диапазонах с использованием космических аппаратов, а также благодаря наблюдениям солнечных нейтрино. В итоге сведения о короне и недрах Солнца существенно пополнились.

Сейчас уже можно в общих чертах нарисовать картину солнечной активности. В отличие от Земли, у Солнца, наряду с незначительным дипольным магнитным полем, в глубинах существует мощное тороидальное поле², которое благодаря конвекции время от времени всплывает и выходит за поверхность фотосферы, формируя на ней солнечные пятна.

Над областями сильного поля образуются плотные конденсации, ответственные за S-компоненту радиоизлучения. Для вышедших в нижнюю корону магнитных трубок характерна арочная структура, причем эффекты теплового и магнитного давления наподобие сифона поднимают по ним вещество, образуя протуберанцы, достигающие иногда совершенно гигантских размеров (рис. 3.8). В активных областях выстраиваются целые галереи таких арок. Особые события разыгрываются, когда рядом оказываются группы пятен разных полярностей. Это вызывает резкие изменения магнитного поля и связанное с этим появление мощных токовых слоев и электрических полей. Здесь, по современным представлениям, в развитие которых большой вклад внес советский физик С. И. Сыроватский, вблизи «нулевой линии» магнитного поля и начинается солнечная вспышка.

² Именно магнитной энергией и генерацией поля механизмом гидромагнитного «динамо» определяются процессы активности. Гидромагнитное «динамо» является естественным аналогом динамо-машины, но без проводов, которые заменяют сложные потоки плазмы, возбуждаемые совместным действием дифференциального вращения, кориолисовых и магнитных сил и магнитогидродинамической турбулентности. Тороидальные поля возникают симметрично, но с разными знаками в высоких широтах обоих полушарий, залегая под конвективной зоной, и постепенно перемещаются к солнечному экватору. По мере сближения северного и южного магнитных торов у экватора они ослабляют друг друга и исчезают. После чего вновь возбуждаются в высоких широтах. В этом состоит 22-летний солнечный цикл активности. Многие детали его уже стали понятны.



Рис. 3.8. Петлеобразный протуберанец. Видна арочная структура магнитного поля, проникающего в корону. Высота арок приблизительно равна диаметру Земли

«Перезамыкание» магнитных силовых линий в области токовых слоев³ (рис. 3.9) взрывным образом высвобождает колоссальную магнитную энергию. Электрические поля ускоряют электроны

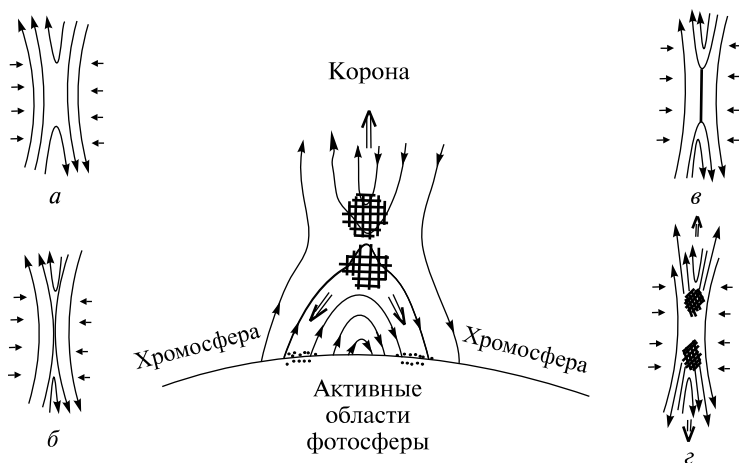


Рис. 3.9. Модель хромосферной вспышки: а-г — последовательные стадии перезамыкания магнитных силовых линий

³ Неустойчивость магнитных конфигураций, приводящая к перезамыканию, по всей видимости, является общим механизмом «магнитных взрывов» в плазме не только на Солнце и в земной магнитосфере, в установках управляемого термоядерного синтеза — токамаках, она наблюдалась и в специально поставленных лабораторных опытах.

и протоны до релятивистских энергий. Часть из них, движущаяся от Солнца, наблюдается по возбуждаемым ими всплескам III типа. Другая часть движется к фотосфере, разогревая ее, следствием чего является оптическое и рентгеновское излучение вспышки. От активных областей распространяются ударные волны, вызывая всплески II типа. Весь процесс связан с возбуждением мощной магнитной и плазменной турбулентности, приводящей к всплескам I и IV типов и шумовым бурям. Пучки ускоренных частиц через несколько часов достигают окрестностей Земли, где их обнаруживает аппаратура, установленная на спутниках. Благодаря атмосфере и магнитной защите Земли — ее магнитосфере — влияние потоков частиц на поверхность Земли существенно ослаблено. Но для космонавтов оно представляет реальную опасность. Прорываясь в область магнитных полюсов, частицы вызывают полярные сияния; возмущая ионосферу, вызывают нарушения радиосвязи. Следствия воздействия солнечной активности на Землю и жизнь на ней еще недостаточно изучены. Существуют предположения о возможной связи солнечных вспышек и обострений сердечно-сосудистых и других заболеваний. Радиовсплески, прибывая на Землю первыми, могут сыграть полезную роль, извещая о начавшейся вспышке на Солнце.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Первым было обнаружено радиоизлучение от Луны. Это произошло в 1945 г., в конце войны, благодаря наблюдениям Дикке и Беринджера на волне 1,25 см. Позднее было найдено собственное радиоизлучение от всех больших планет Солнечной системы и даже от астероидов и комет.

Обычно считалось, что планеты видны лишь благодаря отражению ими солнечного света. Исследованиями в диапазоне инфракрасных волн было установлено, что излучение планет связано с нагреванием их поверхности до нескольких сотен градусов Кельвина. Поэтому, когда радиоастрономы начали изучение планет в области радиоволн, никто не сомневался, что механизм излучения этих объектов будет чисто тепловым. Однако уже в 1955 г. были обнаружены интенсивные всплески радиоизлучения Юпитера в диапазоне дециметровых волн. Это излучение оказалось нетепловым. Дальнейшие исследования, связанные с Юпитером, показали, что его нетепловое излучение существует не только в дециметровом, но и в дециметровом диапазоне. Было

установлено, что это излучение возникает в мощном радиационном поясе, который окружает планету.

Таким образом, планеты могут излучать радиоволны как теплового, так и нетеплового происхождения. Ниже мы кратко остановимся лишь на радиоизлучении Юпитера и Земли.

Юпитер

Радиоизлучение планеты наблюдается на дециметровых волнах (5–30 м) в виде всплесков, а в сантиметровом и дециметровом диапазонах (3–70 см) — в виде непрерывного излучения. Следует в первую очередь сказать, что интенсивность всплесков очень велика — она достигает 10^6 – 10^9 янских, наибольшая интенсивность всплесков наблюдается на частотах 38–20 МГц. Само излучение сильно поляризовано. Было установлено отсутствие прямой связи между радиоизлучением Юпитера на дециметровых волнах и солнечной активностью. Предполагают, что наблюдаемые радиосигналы связаны с магнитотормозным (синхротронным) излучением быстрых электронов в радиационных поясах планеты. Яркой особенностью Юпитера является наличие спутника Ио с низкой круговой орбитой, пролегающей в радиационных поясах (магнитосфере) планеты. Вместе с планетой спутник Ио образует униполярный индуктор, генерируя большую разность потенциалов. С Юпитером Ио связывает мощный токовый шнур, навивающийся на проходящую через Ио силовую линию дипольного магнитного поля Юпитера и скользящий по более плотной нейтральной атмосфере планеты, в плазме которого и генерируются дециметровые радиовсплески. Некоторые из них напоминают солнечные (рис. 3.10). Быстрое вращение, связанная с ним несферическая форма Юпитера, смещенное положение магнитного диполя, наклоненного к оси вращения, привносят своеобразные особенности в интерпретацию происходящих процессов.

Земля

По очевидным причинам наша планета не является объектом изучения классической радиоастрономии. Но на спутниках уже возможно наблюдать ее радиоизлучение. Кроме теплового излучения земной поверхности и атмосферы, для Земли характерно существенное излучение ионосферы и магнитосферы. В частности, наблюдается интенсивное километровое излучение из областей магнитосферы, расположенных над магнитными полюсами.

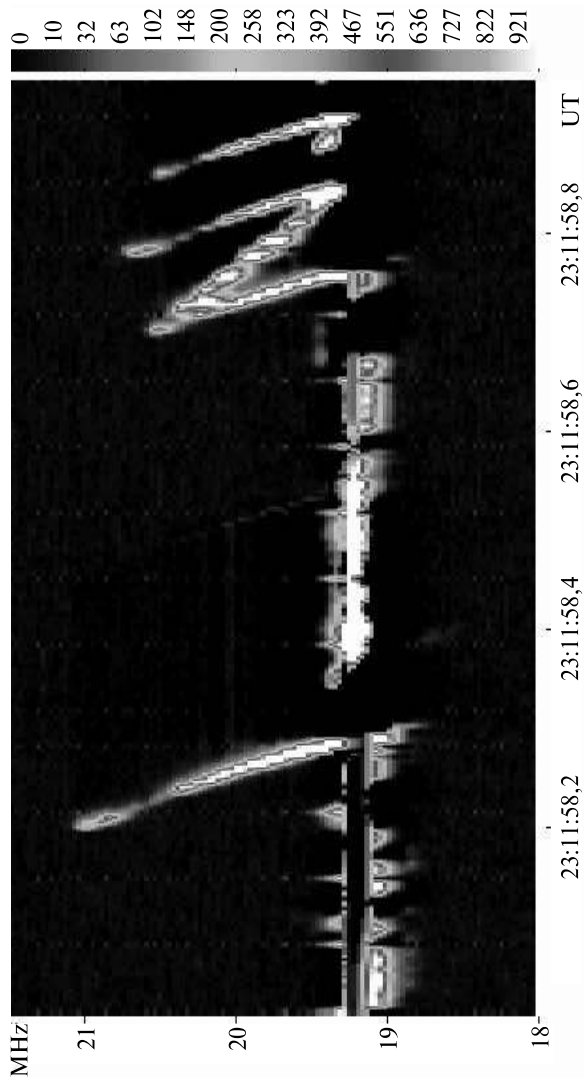


Рис. 3.10. Динамический спектр связанного со спутником Ио радиовсплеска Юпитера. Повторяющаяся на многих изображениях деталь в виде буквы N не позволяет дать простую локальную интерпретацию явления, заставляя привлекать распределенные когерентные механизмы. Измерения Б. П. Рябова на УТР-2

Наряду с этим очень мощное радиоизлучение связано с технической деятельностью человека: излучением радио- и телевизионных станций, промышленных установок. Такой аспект интересен в связи с проблемами экологии нашей планеты, а также с изучением того, как проявляет себя цивилизация во Вселенной.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АСТРОНОМИЯ

С древних времен и до появления радиоастрономии астрономия была наукой наблюдательной. Этим она отличается от таких наук, как, например, физика и биология, являющихся, как известно, науками экспериментальными, где не только наблюдают явления и пытаются их объяснить, но могут также ставить опыты, позволяющие получать у природы ответы на поставленные вопросы. С развитием радиоастрономии возможность постановки экспериментов над космическими телами появилась и у астрономов. Оказалось возможным посылать на Солнце и планеты Солнечной системы радиоволны и наблюдать на Земле отраженные и рассеянные ими сигналы. По этим данным были построены радиокарты ближайших планет, изучены различные процессы, происходящие на Солнце. Был получен ряд важных сведений о строении планет.

Изучает свойства Солнца и планет путем зондирования их радиоволнами радиолокационная астрономия. Впервые использовать такую методику для изучения Луны предложил советский академик Н. Д. Папалекси. В 1946 г. были проведены первые удачные эксперименты. Методика первых опытов была слишком громоздкой и соответствовала сложному физическому эксперименту. В дальнейшем она была видоизменена и стала более простой, чисто радиолокационной. Импульсный сигнал определенной продолжительности направлялся на Луну, и специальное устройство принимало рассеянное излучение. В 50-х, 60-х и 80-х годах XX века аналогичные эксперименты были проведены при изучении Венеры, Меркурия, Марса и, наконец, Солнца.

Что позволяет измерить радиолокационная астрономия

При анализе результатов радиолокационных зондирований планет или Солнца обычно изучают, как изменяются в зависимости от угла падения на объект амплитуда, величина запаздывания отраженного сигнала, его фаза, частота и поляризация.

Полученные данные сопоставляются с теоретическими моделями, и такое сопоставление, как и в других экспериментах по рассеянию электромагнитных волн, позволяет определить структуру рассеивающих тел, а также скорость и направление их движения и вращения, размеры шероховатости поверхности и ряд других параметров.

Рассмотрим, как происходит процесс рассеяния радиолокационного сигнала при его падении на твердую поверхность планеты⁴. В первом приближении будем считать, что поверхность этих тел представляет собой сферу с определенной диэлектрической проницаемостью. Конечно, сфера не гладкая, ее поверхность шероховата, и размеры этих шероховатостей могут быть различными. Облучая такую сферу радиоволнами различной длины, можно по данным измерений выяснить, как шероховатости распределены по размерам. Если взять рассеивающий объект в виде гладкой металлической сферы радиуса a , то, как хорошо известно из теории и наблюдений, ее «эффективная площадь», характеризующая интенсивность отраженного сигнала, будет изменяться в зависимости от длины волны. По мере увеличения отношения a/λ , где λ — длина волны, эффективная площадь σ (отнесенная к величине πa^2) сначала монотонно нарастает, а затем, колеблясь, приближается к единице. Таким образом, облучая сферу радиоволнами, можно определить ее радиус. Аналогично можно определить распределение рассеивающих неоднородностей и для шероховатой сферы, которой можно приближенно заменить поверхность планеты. Здесь конкурируют два различных механизма рассеяния: при угле падения волны $\Psi \geq 45^\circ$ преобладает диффузное, а при $\Psi \leq 40^\circ$ можно говорить о квазизеркальном рассеянии.

В радиолокационной астрономии используется также вращение изучаемых тел. Если такое тело облучается электромагнитной волной, то в рассеянном сигнале будут наблюдаться доплеровские сдвиги частоты, зависящие от того, приближается данный элемент космического тела к радиолокационной станции или удаляется от нее. Наличие доплеровских сдвигов частоты наряду с запаздыванием отраженного импульса позволяет определять с высоким разрешением место, откуда пришел рассеянный сигнал. Обычно это разрешение значительно более высокое, чем то, которое может обеспечить сама по себе антенна радиолокационной установки.

⁴ Рассеяние от поверхности Солнца будет рассмотрено ниже.

Радиолокационные наблюдения Луны и планет Солнечной системы

Мощь развитой за время Второй мировой войны радиолокационной техники была продемонстрирована уже в 1946 г., когда впервые была осуществлена радиолокация Луны. На очередь встали планеты земной группы, но эта задача потребовала значительных технических и научных усилий. Звездными часами радиолокационной астрономии стали 60-е годы, когда в ряде стран (США, СССР, Англии) была осуществлена локация Венеры, Марса и Меркурия. Удалось определить по угловым зависимостям отражения (рассеяния) степень «шероховатости» поверхностей планет, по эффективности отражения — их диэлектрические свойства. По ним уже можно было судить о материале, из которого состоят поверхности планет. В этих экспериментах существенно использовалось и вращение изучаемых тел.

Интерес к радиолокационному изучению планет как с Земли, так и со спутников, был чрезвычайно большим. К началу радиолокационных исследований Луны о свойствах последней было известно довольно много по данным, полученным оптической астрономией, но о планетах наши сведения были довольно ограниченными. Например, не были известны ни точное расстояние до Венеры, ни направление ее вращения. Поверхность Венеры покрыта облаками, и оптические наблюдения вообще не могут дать сведений о твердой поверхности планеты. Другая планета — Меркурий — столь близка к Солнцу, что оптикам было трудно проводить наблюдения, и радиолокационные данные внесли ряд существенных поправок в величины периода, расстояния и т. п.

Установки, с помощью которых к началу 60-х годов удалось провести радиолокационные наблюдения Венеры, Меркурия и Марса, использовали как импульсное зондирование планет, так и облучение их с помощью непрерывных радиосигналов. В последнем случае нельзя было находить расстояние до планет, однако, изучая доплеровские спектры отраженных сигналов, можно было определять периоды и направление их вращения. Пожалуй, первым важным результатом таких измерений явилось более точное, чем раньше, определение величины астрономической единицы — расстояния до Солнца. Эти данные были получены уже при первых радиолокационных наблюдениях Венеры, причем точность определения астрономической единицы возросла сразу на два порядка.

Так же как и для Луны, для этих планет были измерены величины эффективной поверхности и определена зависимость

рассеяния от угла падения. Для Луны $\sigma/(\pi a^2) \approx 0,07$ и не зависит от длины облучающей волны. Для Венеры четко выражена зависимость $\sigma/(\pi a^2)$ от длины волны, причем характерно резкое падение величины σ при укорочении длины волны. Так, если для дециметровых волн $\sigma/(\pi a^2)$ примерно равняется 0,1–0,15, то для сантиметровых волн эта величина падает до 0,01. Одна из возможных причин такого резкого падения σ — поглощение сантиметровых волн в атмосфере Венеры, где давление, как показали измерения, проведенные со спутников, достигает 100 атм. Другой причиной может быть то, что благодаря высокой температуре поверхности Венеры возможно более интенсивное поглощение этой поверхностью сантиметровых радиоволн. Из того факта, что величина σ для Венеры на дециметровых волнах довольно значительна, был сделан вывод, что поверхность планеты состоит из каменных пород. Как известно, наблюдения со спутников и данные телевизионных съемок полностью подтвердили выводы, полученные радиолокационной астрономией.

Измерения эффективной рассеивающей площади Меркурия проводились в диапазоне длин волн от 3,8 до 70 см. Оказалось, что величина $\sigma/(\pi a^2) \approx 0,05$ не зависит от длины волны, сравнима с таковой для Луны, и строение их поверхности, по-видимому, аналогично.

Измерение σ для Марса было проведено на сантиметровых и дециметровых волнах. Средняя величина $\sigma/(\pi a^2) \approx 0,1$. Она близка к соответствующим значениям для Луны и Меркурия. Однако при измерениях была обнаружена довольно сильная зависимость σ от долготы планеты. Весьма вероятно, что это связано со значительными изменениями самой структуры поверхности Марса.

В то время как измерения σ позволяют судить об электрических параметрах, а следовательно, и о материале, из которого состоит планета, распределение рассеянной мощности в зависимости от угла падения дает возможность представить себе структуру рассеивающей поверхности планеты. Был проведен ряд экспериментов по изучению закона рассеяния радиоволн поверхностью Венеры. В среднем для Луны и Венеры процесс рассеяния довольно сходен. Оказалось, что наклоны лунной поверхности круче венерианских. Аналогичные эксперименты, проведенные при локации Меркурия, показали, что эта планета менее «гладкая», чем Луна. Радиолокация Марса показала, что он, напротив, более «гладкий», чем Венера. Таким образом, шероховатость планет возрастает в таком порядке: Марс, Венера,

Луна, Меркурий. Разумеется, эти сведения учитывались при конструировании спускаемых на поверхность планет аппаратов, с помощью которых в настоящее время проводятся исследования.

Очень важным результатом радиолокационных наблюдений было установление периодов и направлений вращения планет. Оказалось, что период вращения Венеры вокруг Солнца составляет 243 сут., а направление вращения планеты вокруг своей оси противоположно направлению вращения Земли вокруг ее оси. Период вращения Меркурия вокруг Солнца составил 59 ± 5 дней вместо 88 дней по оптическим данным. Детальное изучение оптических данных подтвердило, что истинным периодом вращения Меркурия вокруг Солнца является тот, который определен радиолокационным методом. Так же как и для Луны, было предпринято картографирование поверхностей Меркурия, Марса и Венеры с помощью радиолокационных установок. Были обнаружены области с необычными свойствами отражения вблизи полюсов Луны, Меркурия и Марса, возможно из-за присутствия под поверхностью воды (в виде льда). Радиолокационные изображения астероидов показали, что многие из них имеют вытянутую неправильную форму, некоторые из них оказались двойными.

Радиолокация Солнца

По мере развития радиолокационной астрономии естественно было попытаться осуществить и радиолокацию Солнца. Вопросы, связанные с этой задачей, впервые были рассмотрены в 50-е годы XX века в Австралии и на Украине. Уже с самого начала было ясно, что процессы рассеяния радиоволн поверхностями Луны и планет, с одной стороны, и Солнца — с другой, должны коренным образом отличаться. Луна и планеты — это твердые, шероховатые тела, в то время как Солнце — газовый плазменный шар, который, кроме фотосферы с температурой 6 тыс. градусов, имеет также хромосферу и солнечную корону, температура которых составляет соответственно 30 тыс. и миллион градусов. Особенно существенно наличие короны — полностью ионизованной водородной плазмы. Радиоволны, проникая в такую среду, не только рассеиваются, но и поглощаются, причем характер этих процессов зависит от длины падающей радиоволны, так как ее показатель преломления существенно зависит от частоты. При более подробном рассмотрении процесса падения радиоволн на солнечную корону оказалось, что для локации практически пригоден только очень узкий диапазон радиочастот, а именно волны декаметрового диапазона — примерно от 15 до 40 МГц.

Более высокие частоты глубже проникнут в солнечную корону и там поглотятся, а на более длинных волнах нельзя проникнуть через земную ионосферу. Для того чтобы рассчитать параметры радиолокационной станции, с помощью которой можно было бы зондировать Солнце, необходимо знать эффективную площадь рассеяния σ , а также оценить влияние поглощения радиоволн в солнечной короне и учесть влияние на принимаемые сигналы различных «шумов», в том числе космического радиофона.

Для определения величины σ в первых работах по радиолокации Солнца была принята модель, согласно которой поверхность солнечной короны, в связи с наличием тепловых флуктуаций электронной плотности, считалась «шероховатой». Для дециметровых волн отраженные сигналы будут идти из областей солнечной короны, расположенных на расстоянии от 1,3 до 2 радиусов Солнца. Таким образом можно было бы исследовать области, недоступные для оптической астрономии, так как солнечная корона прозрачна для волн этого диапазона. В отраженном от Солнца сигнале, кроме доплеровского сдвига частоты, связанного с вращением Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси, а также с вращением Солнца, следовало ожидать доплеровских сдвигов, обусловленных хаотическим движением в плазме солнечной короны. Из-за этих движений полосу приемника радиолокационной станции нельзя делать уже, чем примерно 30 кГц.

Первые попытки обнаружить радиосигналы, рассеянные солнечной короной, были предприняты в 1960 г. в США, а систематические исследования начались с 1961 г. Измерения велись на частоте 38,25 МГц около трех лет. Параметры радиолокационной станции соответствовали приведенным выше расчетным данным. Было проведено около 600 наблюдений отражения радиоволн солнечной короной.

Исходя из того что солнечная корона на частотах 15–40 МГц является «шероховатым» телом, следовало ожидать, что величина $\sigma/\pi R_{\odot}^2$ будет порядка 1. Однако в результате радиолокационного зондирования солнечной короны оказалось, что эффективная площадь рассеяния изменяется в очень широких пределах, а в ряде случаев является очень большой, $\sigma/(\pi R_{\odot}^2) \gg 1$.

Во время этих экспериментов не удалось установить заметной корреляции между изменениями σ , количеством солнечных пятен, излучением самого Солнца на частоте 2800 МГц и другими характерными индексами. Кроме величины σ , были измерены частотные спектры рассеянного сигнала. Пример такого спектра приведен на рис. 3.11. Здесь по оси абсцисс приведены доплеровские частоты от 0 до ± 15 кГц, а по оси ординат — расстояние

от места отражения сигнала, выраженное в радиусах Солнца R_{\odot} . Интенсивность рассеянного сигнала внутри отдельных клеток отмечена величиной почернения. В разных экспериментах рассеяние солнечной короной радиолокационного сигнала могло существенно различаться. Основная группа рассеянных сигналов могла как приходиться с расстояния около $1,4R_{\odot}$, так и быть «размазанной» по дистанции. Хотя радиолокационные измерения проводились в течение небольшого промежутка времени (если сравнивать его с периодом солнечной активности) и только на одной частоте, удалось получить ряд важных сведений. Так, измерения показали, что эффективная площадь рассеяния может изменяться в широких пределах — от 0,1 до 800. Измерения, при которых $\sigma/(\pi R_{\odot}^2) \approx 60$, наблюдались в 10 % случаев. Кроме того, глубина, на которой происходило отражение радиолокационного сигнала, также изменялась в широких пределах — от 1 до $1,8 R_{\odot}$. Допплеровские смещения частоты сигналов наблюдались во всем диапазоне частот ± 15 кГц, которые могли измеряться с помощью использовавшейся аппаратуры, причем средний доплеровский сдвиг соответствовал положительным сдвигам частоты. Для дистанций, у которых задержка сигнала была меньше 993 с (время, соответствующее отражению от Солнца на расстоянии астрономической единицы), разброс доплеровских частот оказывался сравнительно небольшим. По-видимому, эти доплеровские сдвиги свидетельствуют о наличии интенсивных движений в солнечной плазме, а также о влиянии этих движений на процессы рассеяния радиоволн. Наблюдения свидетельствуют о том, что не существует отражений зеркального или квазизеркального типа.

Данные проведенных экспериментов позволили сделать очень важный вывод и о самом механизме рассеяния солнечной короной радиоволн дециметрового диапазона. Как мы уже отмечали,

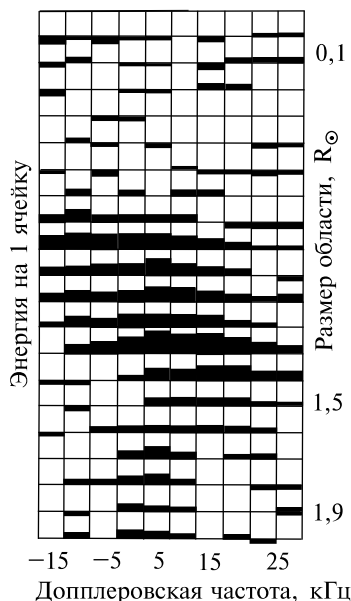


Рис. 3.11. Наблюдаемое распределение отраженного от Солнца сигнала по расстоянию и частоте доплеровского сдвига (Эль Кампо, 25 июля 1963)

ожидалось, что величина $\sigma/\pi R_{\odot}^2$ приблизительно равна единице, в то время как из эксперимента следовало, что она во много раз больше и даже наблюдались — хотя и редко — случаи, когда $\sigma/\pi R_{\odot}^2$ достигала 800. Никакими изменениями величины плотности электронов и их температуры, которые бы не противоречили экспериментальным данным, объяснить такие огромные значения σ для модели «шероховатого» Солнца оказалось невозможным. Это побудило харьковского астрофизика И. М. Гордона высказать гипотезу о том, что механизм рассеяния радиоволн, приводящий к возникновению эффективных поверхностей $\sigma/(\pi R_{\odot}^2) \gg 1$, обусловлен не «шероховатостью» Солнца, а рассеянием на магнитоионных волнах (аналоге звуковых волн), возникающих в плазме солнечной короны. Пользуясь этой гипотезой, можно объяснить как большие значения $\sigma/(\pi R_{\odot}^2)$, так и характер распределения доплеровских сдвигов. Впоследствии все же была обнаружена некоторая корреляция между всплесками III типа и появлением больших отраженных сигналов. Это позволило другому харьковскому астрофизiku, В. Н. Мельнику, высказать предположение, что сильное отражение происходит на встречных электронных пучках, создающих мощную анизотропную ленгмюровскую турбулентность. Следует, однако, отметить, что полученные результаты и предложенные теории положили лишь начало радиолокационному изучению солнечной короны. Необходимы эксперименты на ряде частот декаметрового диапазона волн с большими мощностями передающих устройств и более широким диапазоном измеряемых доплеровских сдвигов частоты. Такие исследования позволят более детально изучить сложнейшие процессы, происходящие в солнечной короне.

Глава 4

НАША ГАЛАКТИКА В РАДИОЛУЧАХ

Если бы оказалось возможным взглянуть на небо «радиоглазами», мы увидели бы картину, значительно отличающуюся от оптической и существенно изменяющуюся с частотой. Для примера приводим карту ночного неба (рис. 4.1) на частоте 250 МГц,

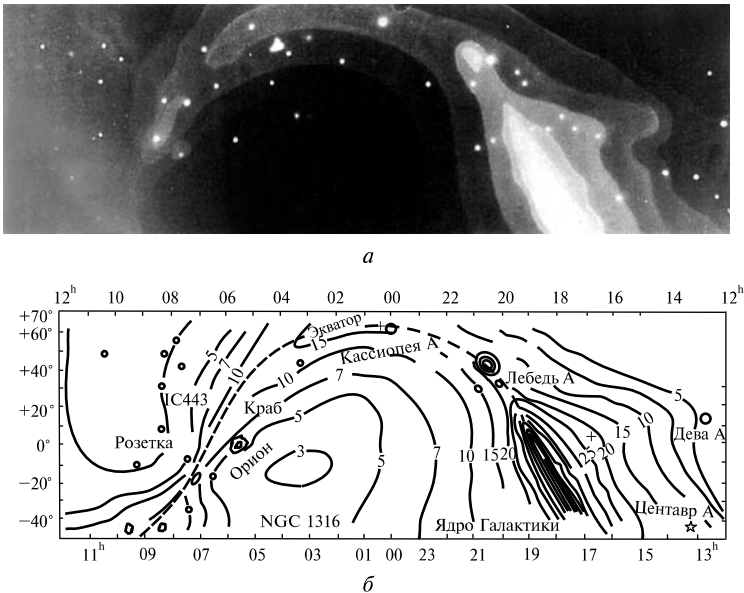


Рис. 4.1. Радиокарта ночного неба (по Краусу и Ко) в метровом диапазоне (частота 250 МГц): *a* — вид, открывающийся перед «радиоглазами»; *б* — тот же участок неба — изофоты и названия. Используются координаты, связанные с вращающейся Землей

полученную Ко и Краусом, а также — в других координатах и в меньшем масштабе — карту Ландекера и Вилебинского (рис. 4.2) на частоте 150 МГц. Ярче всего светится Центр Галактики. Виден в радиолучах и Млечный Путь — ее диск. Долгое время велись споры, существует ли у Галактики, кроме этого,

сферическое радиогало. Подобное гало найдено у нескольких галактик, по всей видимости, оно существует и у нашей.

В непрерывном излучении видны крупномасштабные структуры. Так, на карте фона на 150 МГц нанесены три большие петли, образуемые изофотами радиоизлучения, и крестиками отмечены их центры. Самая большая петля носит название северного полярного шпура. Имеется в виду, конечно, Галактический северный полюс, что видно из карты. По небу разбросаны дискретные источники разной яркости, хорошо видимые на карте Крауса. Самые яркие из них — в созвездиях Кассиопее, Лебедя и Деве. Это отнюдь не звезды, хотя радиозвезды, значительно более мощные, чем наше Солнце, тоже наблюдаются. Кассиопея А — радиоизлучающая туманность, представитель остатков взорвавшихся «сверхновых» звезд. Удивительно, что два других ярчайших источника — Лебедь А и Дева А — находятся далеко за пределами Млечного Пути. Это ближайшие к нам радиогалактики — генераторы невероятной силы.

Все это источники неравновесного нетеплового радиоизлучения, что можно установить, измеряя зависимость испускаемой ими мощности от частоты. Но в Млечном Пути есть и тепловые радиоисточники. Это обширные области ионизованного водорода вокруг наиболее горячих звезд, ультрафиолетовое излучение которых ионизирует межзвездный газ.

С уменьшением частоты повышается общая яркость фона, некоторые дискретные источники становятся ярче, другие тускнеют.

В радиолиниях видны отдельные составляющие Галактики. В радиолинии $\lambda = 21$ см виден холодный нейтральный (рис. 4.3),

а в рекомбинационных радиолиниях — горячий возбужденный атомарный водород. В молекулярных радиолиниях прослеживаются темные плотные облака молекулярного водорода. Сигналы пульсаров довершают этот великолепный оркестр.



Рис. 4.3. Радиогало галактики NGC 891 ($\lambda = 21,2$ см) (по Р. Сансизи). По всей видимости, подобное радиогало имеется и в нашей галактике

СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ В РАДИОЛИНИИ ВОДОРОДА

При взгляде на фотографии галактик, полученные на крупнейших телескопах, бросается в глаза разнообразие структур, прежде всего проявляющееся в различии между спиральными и эллиптическими галактиками. Хаббл расположил их в последовательность («камертон» Хаббла, см. рис. 5.1 в пятой главе), руководствуясь в основном этим признаком и придавая ему эволюционный смысл. Но, по-видимому, эволюция, скорее, направлена обратно вдоль «камертона» и «по нормали» к структурным формам, найденным Хабблом. Она существенно связана с активностью галактик или их ядер, о которой зачастую свидетельствует их мощное радиоизлучение. Несомненно, что основное различие — между спиральными и эллиптическими галактиками — связано с сохраняющейся величиной — моментом количества движения. И его трудно потерять или приобрести в процессе эволюции уже сформировавшейся звездной системы, разве что при слияниях галактик, т.е. морфология галактик может быть следствием как тех начальных условий, в которых образовалась галактика, так и истории ее слияний.

Глядя на галактику «со стороны», значительно легче определить ее структуру и форму. А вот открытие спиральной структуры «в собственном доме» явилось делом исключительно трудным. И хотя основные факты были установлены героическими усилиями оптической астрономии, из-за межзвездного поглощения света ее возможности, по существу, были ограничены примыкающим к Солнцу участком в 3–4 кпк. Значительно более полное исследование распределения межзвездного нейтрального водорода оказалось возможным в радиодиапазоне после реализации уже упоминавшейся идеи Ван де Хулста.

Речь идет об измерении излучения (или поглощения), возникающего при переходах между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода. Если не быть очень строгим, то можно говорить о влиянии взаимной ориентации собственного электронного и протонного (ядерного) магнитных моментов на энергию атома. Согласно квантовой механике учет этого обстоятельства приводит к возникновению двух отличающихся по энергии состояний: одного с параллельным, другого — с антипараллельным расположением собственных моментов (спинов) электрона и протона. Переход между этими состояниями соответствует испусканию (или поглощению) одного кванта излучения с длиной волны $\lambda = 21$ см. Так как основная масса газо-

образного водорода в Галактике находится именно в нейтральном атомарном состоянии, а длина волны резонансного излучения попадает в удобный для измерений диапазон и практически не ослабляется межзвездной средой, открытие Ван де Хулста сыграло исключительно важную роль в изучении газовой структуры нашей и соседних галактик. В 1951 г., следуя этой идее, австралийские (Кристиансен) и американские (Юэн и Перселл) радиоастрономы обнаружили линию излучения нейтрального водорода. Первый обзор Галактики в линии 21 см был выполнен Я. Оортом и Ван де Хулстом.

Схема спиральной структуры Галактики по измерениям, проведенным на 64-метровом радиотелескопе в Парксе и 90-метровой антенне Грин-Бэнк, относится к 1967 г. (рис. 4.4). Колоссальное количество наблюдательного материала воплощено в ряде более поздних карт и схем. Эта работа продолжается.

Заметим, что и в оптике главными указателями спиральной структуры стали не сами звезды, а ярко светящиеся в спектральных линиях области ионизованного водорода. Гигантскими облаками размером до сотни парсеков они окружают наиболее горячие молодые, т. е. наиболее массивные звезды (так называемых ранних классов О и В), которые и являются источниками ионизации.

Другим удобным оптическим приемом является обнаружение в спектрах излучения от удаленных звезд линий поглощения межзвездного газа (главным образом, ионов кальция и натрия). Сведения об областях ионизованного водорода дают также рекомбинационные радиолинии, о которых пойдет речь ниже. Рассмотрим на примере линии поглощения $\lambda = 21$ см в сигнале, принимаемом от мощного радиоисточника Кассиопея А (рис. 4.5), какую информацию при этом можно извлечь из наблюдений. Измеренная линия лежит вблизи от частоты перехода в атоме водорода, равной 1420 МГц, но имеет сложную форму и смещена по частоте. Эти смещения вызваны эффектом Допплера из-за движения поглощающих облаков. Два значительно разнесенных минимума соответствуют

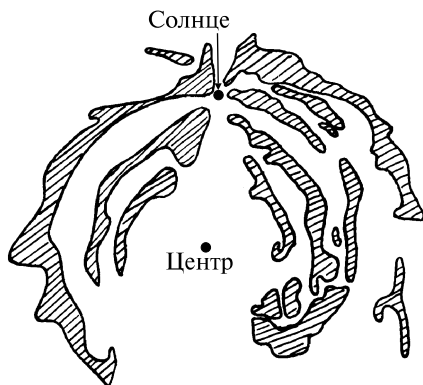


Рис. 4.4. Распределение нейтрального водорода в Галактике по наблюдениям линии $\lambda = 21$ см (по Ф. Дж. Керру)

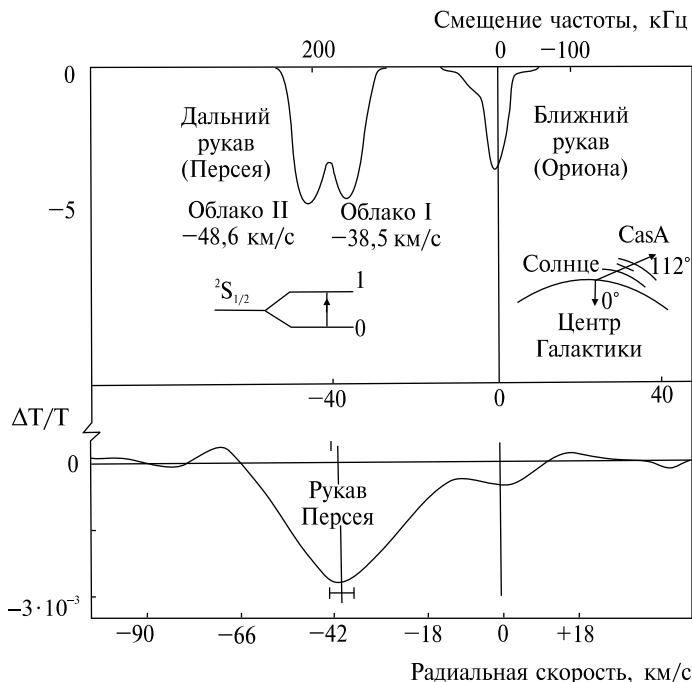


Рис. 4.5. Линия поглощения водорода $\lambda = 21$ см в спектре излучения Кассиопеи А (вверху) и линия поглощения на частоте 26 МГц в спектре Кассиопеи А — первое наблюдение (внизу)

двум облакам, лежащим на большом расстоянии друг от друга. Они участвуют в общем галактическом вращении вокруг Центра, которое, однако, носит не «твердотельный», а дифференциальный характер. Угловая скорость падает с удалением облака от Центра в соответствии с законами Кеплера. Поэтому, используя модель вращения, можно по доплеровским смещениям ΔV определить расстояние до облаков. Именно такие методы были использованы при построении карты в линии излучения. Основное поглощение излучения от Кассиопеи А происходит в рукаве Персея ($\Delta V = -38 \div -48$ км/с) и более слабое — в рукаве Ориона ($\Delta V = -0,8$ км/с). Линия поглощения, относящаяся к рукаву Персея, тоже имеет структуру и содержит близкие по скоростям компоненты. Ширина линий, относящихся к какому-то определенному облаку, связана уже с хаотическими — тепловыми или турбулентными — движениями в нем. В первом случае можно определить температуру, а по величине максимума поглощения — количество газа на луче зрения в том или ином облаке.

Труднее всего однозначно определить расстояние до облаков, их толщину и т. п. Здесь результат существенно зависит от используемой модели (например, модели вращения или соответственно значения плотности водорода в облаке). Поэтому часто результат формулируют в терминах непосредственно измеряемых величин (указывают скорость, что эквивалентно указанию смещения по частоте, и так называемые меру эмиссии и меру вращения, связанные с числом атомов на луче зрения).

Если попытаться нарисовать картину спирального узора, то нас ждет некоторое разочарование. До сих пор вполне однозначно можно говорить лишь о достаточно близких областях, ибо необходимость пользоваться моделями и трудности сведения наблюдений над различными объектами в единую картину столь велики, что их еще нельзя считать преодоленными. Все же доказано существование трех рукавов: Ориона (у внутреннего края которого находится Солнце), внешнего рукава Персея и внутреннего рукава Стрельца. На некоторых моделях эти рукава являются элементами двух спиральных ветвей, совершающих около полутора оборотов вокруг Центра Галактики. Существуют различные перемычки, в одной из которых находится Солнце. Есть загадочные крупномасштабные образования газа (невидимые в оптике) — так называемые риджи и шпуры, например северный полярный шпур, к обсуждению природы которого мы еще вернемся.

Слой газа в рукаве значительно шире «слоя звезд» и имеет клочковатое строение. Вся структура вращается вокруг центра с периодом 250 млн лет, образующим галактический год. Но в облаках, на которые распадается Спираль, весьма заметны и различные нерегулярные и радиальные движения (в том числе вблизи Галактического ядра, о чем подробнее мы расскажем). Все это существенно осложняет выяснение «генерального плана» (Лин) строения Галактики. Конечно, газ и звезды имеются и вне спиральных ветвей. В последних лишь повышена их концентрация. Существенно, что скорость движения спирального узора не совпадает со скоростями движения материи (ни газа, ни звезд). Тем самым подтверждается волновой характер спирали. Это волна плотности, бегущая по вращающейся Галактике. Сжатие в ней велико и, по всей видимости, распространяется по газу со сверхзвуковой скоростью в виде ударной волны. Именно здесь, в зоне дополнительного сжатия, и разыгрываются основные процессы современного нам звездообразования. Здесь по передней кромке волны, отороченной полосой пыли, разбросаны яркие области

ионизованного водорода, молодые звезды и газопылевые туманы, являющиеся, как будет видно, местом рождения звезд.

Подобная картина хорошо наблюдается в соседних галактиках, откуда в свою очередь должна быть ясно видна картина спиральных ветвей нашей Галактики, которую нам так трудно воссоздать, наблюдая ее «изнутри». В последнее время наметился значительный прогресс в понимании того, чем же в действительности вызывается появление спиралей в дисках галактик. К этому мы вернемся в следующей главе.

В радиодиапазоне находится переход между компонентами сверхтонкой структуры основного состояния (из наиболее распространенных элементов) также у дейтерия и азота. Для азота переход попадает в декаметровый диапазон, и наблюдение межзвездного азота сопряжено с преодолением существенных трудностей. Лишь спустя четверть века после предложения И. С. Шкловского (его оценки были еще «ухудшены» Г. Е. Черняком и В. М. Конторовичем) Л. Г. Седин и А. А. Коноваленко предприняли попытку обнаружить линию наиболее распространенного изотопа азота N^{14} на телескопе УТР-2 в спектре излучения Кассиопеи А. В основном состоянии три электрона внешней незаполненной оболочки атома азота движутся таким образом, что их суммарный орбитальный момент равен нулю, а спиновый момент максимален и в единицах $\hbar/(2\pi)$ равен $3/2$. Спин ядра азота равен единице. Три различные допустимые в квантовой механике взаимные ориентации этих моментов приводят к трем подуровням с суммарными моментами $5/2$, $3/2$ и $1/2$. Переходы с излучением возможны между отличающимися на единицу состояниями (этот момент уносит фотон). Таким образом, возникают переходы на двух частотах:

$$\nu_1 = 26,127 \text{ МГц} \quad (5/2 \rightarrow 3/2),$$

$$\nu_2 = 15,676 \text{ МГц} \quad (3/2 \rightarrow 1/2).$$

Поскольку при переходе изменяется только магнитный момент атома азота (так же как и для атома водорода), то интенсивность излучения каждым атомом азота очень мала. Но по сравнению с водородом она еще меньше, так как меньше частота перехода, от которой интенсивность зависит очень сильно (как частота в кубе). Кроме того, азота существенно меньше, чем водорода (в среднем в десять тысяч раз по числу атомов). Поскольку же расстояния между уровнями у него меньше, чем у водорода, то можно ожидать и меньшую разность чисел частиц, находящихся на этих уровнях (в состоянии равнове-

сия она пропорциональна частоте). А именно разностью частиц определяется суммарный эффект излучения (или поглощения). Поэтому ожидаемый сигнал очень слаб. Шумы, напротив, значительно выше, чем для линии водорода. Для экспериментов по обнаружению линии пришлось разрабатывать специальную высокочувствительную аппаратуру — цифровой знаковый коррелометр, сопряженный с компьютером. Наблюдения проводились в течение года. В результате в нужной области частот линия была обнаружена, причем был обнаружен также связанный с орбитальным движением Земли доплеровский сдвиг по частоте. Этот факт явился серьезным подтверждением космической природы наблюдаемого явления. Спектр Кассиопеи А в этой линии, приведенный на рисунке, вполне соответствует спектру в линии H I. Однако оказалось, что обилие азота, вытекающее из результатов измерений, больше чем на порядок превышает среднее по Галактике. Такое расхождение навело американских радиоастрономов Д. Блэйка, Р. Кратчера и В. Ватсона на мысль о том, что наблюдавшаяся линия поглощения связана не с азотом, а с рекомбинационной линией углерода с главным квантовым числом $n = 631$ (см. ниже). Дополнительные эксперименты Коноваленко и Содина подтвердили это предположение. Переходы между столь высоколежащими уровнями наблюдались впервые.

Низкочастотные радиорекомбинационные линии углерода, впервые обнаруженные с помощью радиотелескопа УТР-2, оказались эффективным средством изучения холодной, частично ионизованной межзвездной среды, малодоступной для других методов астрофизических исследований. Расстояния по частоте между линиями рекомбинационной серии уменьшаются с падением частоты. Вблизи 26 МГц они имеют значения, близкие к 100 кГц. Это позволяет резко повысить чувствительность измерений за счет одновременного наблюдения ряда линий и последующего их усреднения. На рис. 4.6 приведен спектр, полученный в направлении Кассиопеи А с помощью УТР-2 в 2000–2003 гг. в полосе 1,2 МГц. Девять интенсивных линий соответствуют так называемым α -переходам между соседними уровнями атомов углерода с главными квантовыми числами, равными 628–638 (большее число соответствует меньшей частоте). Кроме того, на спектре отчетливо видны также β -линии, связанные со скачками электронов через один уровень с главными квантовыми числами, равными 790–802 (некоторые такие α - и β -линии наложены друг на друга). Атомы в столь высоковозбужденных состояниях имеют гигантские размеры в доли миллиметра и могут существовать только в космосе в разреженной и холодной межзвездной среде.

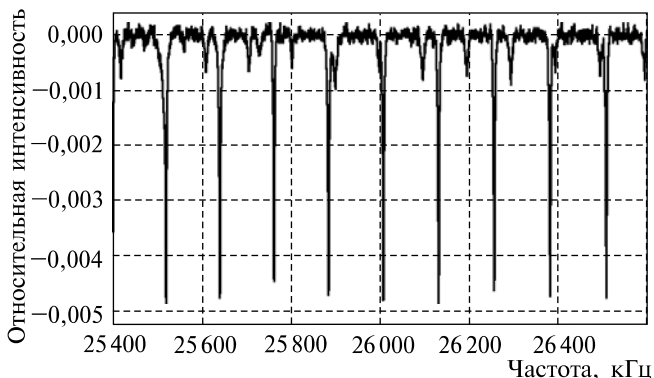


Рис. 4.6. Серия декаметровых рекомбинационных линий углерода при переходе на рекордно высоких квантовых уровнях (измерения на УТР-2)

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ РАДИОЛИНИИ И ОБЛАСТИ Н II

Мы уже рассматривали линию $\lambda = 21$ см, которая формируется в обширных областях холодного нейтрального водорода. В раскаленном излучением наиболее горячих звезд областях ионизованного водорода Н II наблюдается серия так называемых рекомбинационных радиолиний. Остановимся вначале на том, как на фоне непрерывного излучения водородного «пламени» могут появляться отдельные спектральные линии.

Цвет пламени, если только занятая им область велика, не зависит ни от цвета горящих предметов, ни от их химического состава. Только температура определяет состав излучения, описываемого равновесным распределением Планка. Если же область, занятая пламенем, тонка, то спектральные линии отдельных элементов окрашивают его в свои, только им присущие цвета. Для разных линий — это разные толщины, так как подобная «оптическая толщина» зависит от поглощения на данной частоте. Таким образом, цвет пламени (например, цвет звезд) определяется их температурой. Соответственно на этот цвет накладываются линии, оптическая толщина которых невелика и которые еще не пошли в «общий котел» равновесного распределения. На больших толщинах отдельные линии исчезают, потому что свет их поглощается и переизлучается по пути другими атомами.

На радиочастотах поглощение значительно меньше, чем в оптике. И для линии водорода $\lambda = 21$ см даже толща галактик соответствует малой оптической толщине. Существенно и то, что это очень слабый «запрещенный» переход (он связан с из-

менением не электрического, а магнитного дипольного момента атома). Видимыми в этой линии становятся только значительные по размерам образования.

Рекомбинационные линии значительно сильнее, так как связаны они с изменениями в десятки тысяч раз большего, чем магнитный, электрического дипольного момента атома.

Пришло время совершить небольшое отступление и напомнить, как устроен атом водорода. Он, как известно, состоит из протона и электрона, притягивающихся друг к другу по закону Кулона. Этот закон подобен закону Ньютона для притягивающихся масс. Неудивительно¹, что и сам атом устроен планетарным образом: в центре тяжелое ядро ($\sim 10^{13}$ см), вокруг которого движется по эллиптической орбите (размером 10^{-8} см) электрон. На деле эта классическая картина далека от реальности (в мире атома царит не обычная механика Ньютона, а квантовая механика), поэтому ею можно пользоваться лишь с большой осторожностью, не придавая таким понятиям, как орбита, буквального классического смысла. В атоме разрешены состояния лишь с определенными значениями энергии E_n (в этом проявляется его квантовая природа), которые можно перенумеровать. Квантовая теория приводит к системе уровней атома водорода, энергия которых обратно пропорциональна квадрату их номера:

$$E_n = -\frac{I}{n^2} \quad (n = 1, 2, \dots),$$

причем энергия ионизации — отрыва электрона от ядра — принята за начало отсчета. Эти уровни можно представить себе расположенными в «потенциальной яме» (рис. 4.7), образованной кулоновским полем, причем размер орбиты a_n растет с номером уровня ($a_n = a_1 \cdot n^2$). Находясь в таких «стационарных» состояниях, атом не излучает, а излучение происходит при переходах из одного состояния (n) в другое состояние (m). При этом испускается квант энергии $h\nu_{nm} = E_n - E_m$, где h — квантовая постоянная Планка, а ν_{nm} — боровская частота. Излучаемая линия спектра представляет собой пакет волн с частотами, близкими к боровской, в пределах ширины линии $\Delta\nu$.

¹ В действительности это было чрезвычайно удивительно: электрон быстро потерял бы энергию на излучение электромагнитных волн и упал бы на ядро (по классическим представлениям). Опыты Э. Резерфорда, доказавшие планетарную модель атома, разрушили механику Ньютона в атомных масштабах и проложили путь к квантовому атому Бора.

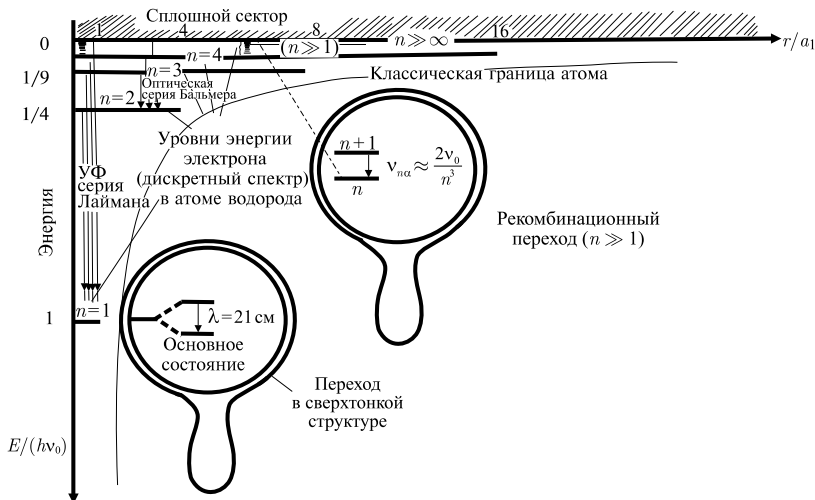


Рис. 4.7. Кулоновская потенциальная яма для электрона в атоме водорода и его уровни энергии

Оценим характерные частоты, возникающие при переходах. При размере электронной орбиты атома водорода $a_1 \sim 10^{-8}$ см энергия, необходимая для отрыва электрона от ядра (преодоления кулоновского притяжения), порядка $I \sim e^2/a_1 \sim 10^{-19}/10^{-8} = 10^{-11}$ эрг. Соответствующий квантовый переход приводит к боровской частоте $\nu \sim 10^{15}$ Гц. Переходы между уровнями с частотами ν_{nm} группируются в серии, из которых лаймановская серия переходов на уровень $m = 1$ (в «основное» состояние) начинается в ультрафиолете, а бальмеровская серия ($m = 2$) — в оптическом диапазоне. Переходы между большими значениями n , малоотличающимися друг от друга ($\Delta n \sim 1$), лежат в тем более длинноволновом диапазоне, чем больше номер n . Так, при $n \sim 100$ они относятся к радиодиапазону. К этим переходам мы сейчас и обратимся. Они несут важную информацию об областях горячего атомарного водорода и после теоретических работ Н. С. Кардашева и наблюдений Р. Л. Сороченко и А. Ф. Дравских вошли в арсенал радиоастрономии.

Исследование радиорекомбинационных линий составляет сейчас важную самостоятельную область радиоастрономических исследований. Линии водорода в радиодиапазоне наблюдаются в широком интервале частот от $3 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^8$ Гц (что соответствует переходам $n \rightarrow n - 1$ при значениях n от 50 до 300). Почти в таком же интервале наблюдаются линии гелия. Излучение происходит в областях ионизованного водорода

(и гелия) вблизи горячих звезд, т.е. рекомбинационные линии позволяют измерять температуры и плотности (концентрации компонентов), а также скорости турбулентных движений в эмиссионных туманностях. Наблюдаются также линии углерода от соседних с туманностями областей, содержащих пылевые облака, глобулы и т.п. О дециметровых рекомбинационных линиях углерода мы уже говорили. Трудно переоценить значение подобной детальной информации.

Удивительна сама возможность наблюдения этих линий, предоставленная природой. У возбужденных электронных уровней атома водорода весьма велики ширины, связанные с конечным временем жизни атома в возбужденном состоянии (в связи с быстрым переходом в основное состояние с излучением фотонов). В свою очередь линии, излучаемые при переходах между уширенными уровнями энергии, сами имеют конечную ширину, определяемую ширинами уровней.

Вероятность перехода (спонтанного) пропорциональна кубу частоты и квадрату дипольного момента атома $d \approx ea$, где e — заряд, a — размер орбиты электрона. Для перехода в лаймановских и бальмеровских α -линиях, открывающих каждую серию, т.е. на переходах $2 \rightarrow 1$, $3 \rightarrow 2$, вероятность перехода $\sim 10^9 \text{ с}^{-1}$ и такова же в частотной шкале ширина этих возбужденных уровней. Разумеется, никакие переходы в радиодиапазоне (например, между компонентами сверхтонкой структуры возбужденных состояний, аналогичных переходу $\lambda = 21 \text{ см}$ для основного состояния) не могут при этом проявиться в виде узких линий.

Ситуация удивительным образом меняется, если мы достаточно высоко поднимаемся вверх по лестнице уровней. В связи с квадратичным ростом размера орбиты электрона с номером n уровня так же растет и его дипольный момент, определяющий переходы с уровня n на близкие ему уровни. Переход же на низкие удаленные уровни становится все более затрудненным из-за большой разницы в размерах и свойствах электронных орбит.

Соответствующий «матричный элемент», играющий роль электрического дипольного момента, для $n \gg 1$ убывает как $1/n^3$ с ростом n . Частота же перехода в основное состояние меняется не очень существенно с изменением n , так как уровни сгущаются к ионизационному пределу при $n \rightarrow \infty$, а уже для перехода со второго уровня на первый частота соответствующего ультрафиолетового кванта лайман- α составляет $3/4$ частоты перехода с бесконечности на первый уровень. Поэтому незначительный рост частоты не может компенсировать убывание дипольного момента, и вероятность перехода в основное состояние быстро падает с ростом номера, уровни высоковозбужденных состояний оказываются достаточно узкими. Тем более что при больших значениях n возможны состояния с большим моментом количества движения, в которых электроны движутся по сильно вытянутым орбитам. Из этих

состояний непосредственный переход в основное состояние невозможен в силу ограничений, налагаемых законом сохранения момента. Излучаемый фотон может унести только единичный (в единицах постоянной Планка $h/2\pi$) момент, и соответственно только на такую же величину может измениться состояние атома. Это означает при больших моментах возможность перехода лишь на уровни с близкими номерами n . Им соответствуют малые частоты переходов:

$$\nu_{mn} = \nu_n(\Delta n) \approx 2\nu_1 \frac{\Delta n}{n^3}, \quad \Delta n = n - m \ll n.$$

Поэтому, несмотря на большой дипольный момент, вероятность излучательного спонтанного перехода, определяющая «естественную» ширину уровней, а значит, и линий, при больших n мала. В зависимости от момента ширина уровня составляет

$$\Delta\nu_{\text{ест}} \sim 10^9 \left(\frac{1}{n^3} \div \frac{1}{n^5} \right) \text{ Гц}.$$

Таким образом, уже при $n \sim 50$ естественные ширины уровней очень малы. В худшем случае это десяток кГц, в лучшем — несколько герц.

В этих условиях переходы между близкими значениями n приводят к достаточно узким линиям, попадающим в радиодиапазон (рис. 4.8). Ширины линий могут определяться либо

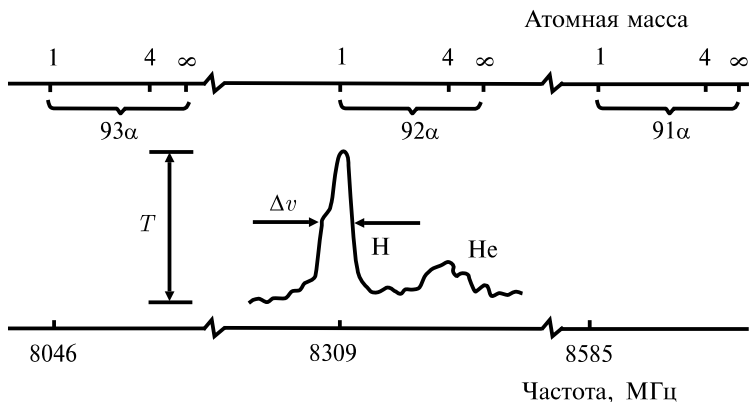


Рис. 4.8. Рекомбинационные радиолинии водорода и гелия в туманности Ориона (по Э. Д. Чейсону)

эффектом Доплера, либо столкновениями (главным образом, с электронами). Роль последних быстро растет с увеличением номера n , так как растет «поперечное сечение» атома:

$$\sigma \sim a_n^2 = a_1^2 n^4.$$

Приблизительно таким образом² и растет частота столкновений $v_{ст} \approx \sigma V N_e$, определяющих ширину уровня, где N_e — плотность электронов, а V — их характерная (тепловая) скорость. Это «штарковское» уширение приводит к полному размытию уровней, если их ширины становятся порядка расстояния между уровнями, что происходит, по-видимому, при $n \geq 10^3$. Заметим, что декаметровые рекомбинационные радиолнии водорода ($n \approx 600$) наблюдать до сих пор не удалось. Углерод оказался более удобным объектом из-за некоторых особенностей его спектра.

Допплеровское уширение убывает как $1/n^3$ с ростом n ввиду уменьшения по этому закону частоты переходов $n \rightarrow n-1$. Поэтому при низких номерах переходов — в высокочастотной области — ширины рекомбинационных линий служат как бы «термометром», измеряющим по ширине линии тепловые скорости частиц в областях ионизованного водорода. Если скорости турбулентных движений столь велики, что превышают тепловые, то именно они будут определять ширины линий и измеряться в экспериментах. Эти измерения тем точнее, чем меньше n . Так, для туманности Ориона температура 9000 К следует из измерений ширин перехода при $n = 39$ (самое низкое из наблюдаемых n). По отклонению от чисто доплеровской ширины (при $n \sim 150$) определяется электронная концентрация N_e туманности. Она оказывается несколько большей чем 10^3 см^{-3} в соответствии с измерениями непрерывного излучения. Более длинноволновые измерения служат, таким образом, «манометром», позволяющим определить эффекты давления.

Итак, по номерам n есть окно, соответствующее сравнительно узким уровням, переходы между которыми приводят к достаточно узким рекомбинационным радиолниям. Радионаблюдения позволяют исследовать эмиссионные туманности в линиях водорода и гелия (рис. 4.9), а также наблюдать линии углерода из прилегающих газопылевых облаков.

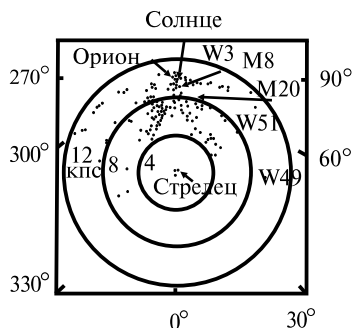


Рис. 4.9. Эмиссионные туманности Млечного Пути. Цифры указывают расстояние от Центра Галактики в килопарсеках

² В действительности все обстоит значительно сложнее, из-за того что влияние столкновений на процесс излучения зависит от очень тонких деталей взаимодействия.

При таких измерениях получают богатую и очень тонкую информацию, позволяющую восстановить распределение частиц по уровням энергии (которое зачастую отличается от равновесного), выяснить, чему равно отношение количества гелия к водороду ($\approx 0,1$) — очень важную величину для понимания происхождения Вселенной. Для относительно более низких значений n на распределение частиц существенно влияет излучение. В этом случае возможно перенаселение отдельных уровней и связанные с ним мазерные эффекты усиления, которые, по-видимому, наблюдались и в рекомбинационном излучении. Об этих эффектах мы подробнее будем говорить в связи с молекулярными межзвездными мазерами в следующем разделе.

Так же как и при наблюдениях на $\lambda = 21$ см, в рекомбинационных радиополосах удается обнаружить и исследовать те области H II, которые остаются невидимыми в оптике из-за большого удаления и завесы газопылевых облаков. С помощью радиоизмерений воссоздается общая картина распределения эмиссионных туманностей в Галактике, в которой также вырисовывается спиральный узор.

Наблюдаются рекомбинационные линии и в других галактиках.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ РАДИОЛИНИИ

Из теории ядерного горения в звездах следовало, что многие из них молоды и, по-видимому, и сейчас звезды где-то рождаются в просторах Галактики. Но увидеть это «воочию» позволила только радиоастрономия.

Дело в том, что процесс рождения звезды происходит не «на свету», а «в темноте». Именно в непрозрачных в оптике газопылевых облаках возможны эффективная конденсация газа, сжатие его в протозвезду за счет сил тяготения. Действительно, для того чтобы гравитационное самосжатие не приостанавливалось из-за нагрева и связанного с ним возрастания внутреннего давления при уплотнении среды, необходим достаточно быстрый отвод тепла. Из всей сжимающейся толщи тепло очень эффективно выносится только излучением. Но в достаточно остывшем газе тепловой энергии уже недостаточно для возбуждения атомных уровней. Ведь, как известно, для их возбуждения требуются температуры порядка десяти тысяч градусов. Поэтому прозрачные облака нейтрального водорода, остывающие относительно медленно ниже этой температуры, вообще говоря, не подвержены гравитационному самосжатию. Другое дело — непрозрачные

в оптике запыленные облака. В них возможно образование молекул, для возбуждения различных типов движений в которых достаточны значительно более низкие температуры — в сотни, десятки и даже в несколько градусов от абсолютного нуля.

Представления о межзвездной среде претерпели существенные изменения, с тех пор как были открыты такие ее фракции, как молекулярные облака (в том числе гигантские молекулярные облака массой до 10^5 – 10^6 солнечных масс) и горячий (корональный) газ, имеющий температуру около миллиона градусов, по объему занимающий чуть ли не половину всего межзвездного пространства. Этот газ был выброшен туда при взрывах сверхновых. Молекулярный водород, из которого, в основном, и состоят молекулярные облака, плохо различим в радиолучах. Непосредственно он наблюдался с помощью ультрафиолетового излучения на специализированных спутниках. Но чрезвычайно удобным оказалась возможность находить эти облака по излучению сопровождающей их моноокси углерода CO (печально известный угарный газ). Этот газ хорошо виден благодаря излучению в линии вращательного перехода $J = 1 \rightarrow 0$ на длине волны 2,6 мм. С другой стороны, его относительное содержание по отношению к молекулярному водороду, как показали прямые измерения, весьма постоянно. Поэтому наблюдения на длине волны $\lambda = 2,6$ мм позволили не только построить подробную картину распределения молекулярного водорода в диске Галактики, но и находить такие тонкие детали, как отдельные молекулярные облака, диски в молодых звездных объектах и многое другое.

Роль пыли в молекулярных облаках при этом двоякая. Во-первых, образование многих сортов молекул как раз и происходит на пылинках, на которых прилипшие к ним атомы проводят относительно много времени, диффундируя по поверхности. Во-вторых, возникшие молекулы в запыленной непрозрачной для жесткого ультрафиолетового излучения среде защищены от разрушения и живут очень долго. Энергию возбуждения, получаемую при столкновениях, молекулы отдают в виде длинноволнового излучения в линиях инфракрасного и радиодиапазона, интенсивно охлаждая среду³. Поэтому начавшееся гравитационное сжатие какого-либо случайного уплотнения (флуктуации) может продолжаться до очень больших плотностей. И лишь на последней «протозвездной» стадии опять происходит переход

³ В достаточно плотных облаках главную роль в охлаждении играют сами пылевые частицы.

к медленному остыванию, замедляющему процесс дальнейшего сжатия и превращения протозвезды в звезду. Именно эту картину позволили наблюдать и понять исследования молекулярных радиолиний.

Гидроксил ОН был первой молекулой, обнаруженной в космосе (в 1963 г.) при помощи радиоастрономических методов (на длине волны $\lambda = 18$ см, известной из лабораторных экспериментов). Этот переход аналогичен обсуждавшемуся выше переходу между компонентами сверхтонкой структуры водорода с длиной волны $\lambda = 21$ см. Но в молекуле гидроксила спектр усложнен так называемым Λ -удвоением, из-за чего должны наблюдаться четыре линии вместо одной у водорода.

Наинизшее энергетическое («основное») состояние этой молекулы обладает отличным от нуля электронным моментом (равным единице в долях квантовой постоянной Планка). При наличии вращения это состояние расщепляется, образуя так называемый лямбда-дублет. Природа лямбда-удвоения связана со взаимодействием электронного и вращательного моментов. В отсутствие вращения энергия молекулы ОН (как, впрочем, и любой линейной молекулы) не зависит от направления проекции электронного момента на ось молекулы. При наличии вращения молекула слегка «изгибается», и теперь уже энергия ее при разных знаках проекции электронного момента тоже оказывается разной.

В свою очередь подуровни дублета расщепляются — каждое на два — из-за «сверхтонкого» взаимодействия спина ядра со спином электрона, — аналогично тому, как это происходит в водороде при образовании уже обсуждавшейся нами линии с длиной волны 21 см. Для молекулы ОН каждый вращательный уровень расщепляется, таким образом, на 4 подуровня, причем величины расщеплений оказываются примерно одного и того же порядка. Эти переходы лежат вблизи от длины волны 18 см. В зависимости от состояния вращения возникают группы таких переходов, состоящие из четырех линий. Для основного состояния им соответствуют 4 частоты: более интенсивные линии 1665 и 1667 МГц и более слабые 1612 и 1720 МГц.

На возможность наблюдения этого и ряда других аналогов линии $\lambda = 21$ см обратил внимание И. С. Шкловский еще в 1953 г., но только в 1963 г. был поставлен первый удачный эксперимент. Вейнреб, Баррет, Микс и Генри, используя 26-метровую антенну и новый тип автокорреляционного приемника, обнаружили линию поглощения ОН в спектре уже знакомого нам радиоисточника Кассиопея А. Успеху предшествовало точное

экспериментальное измерение частоты перехода ОН в лабораторных экспериментах Ч. Таунса и его сотрудников. Заметим, что ранее для поисков молекул использовались лишь оптические методы. В 30-е годы в обсерватории Маунт-Вилсон с помощью 100-дюймового телескопа были обнаружены узкие линии поглощения в спектрах звезд и доказано, что поглощение происходит в межзвездных облаках. Так были открыты межзвездные CN, CH и CN^+ . Но на этом дело практически остановилось. И затишье сохранялось вплоть до успеха радиоастрономов, который породил буквально лавину открытий.

Первые же наблюдения принесли неожиданности. Наряду с линиями поглощения и излучения ОН, в общем имевшими ту же структуру, что и линии атомарного водорода на $\lambda = 21$ см, в ряде объектов в 1965 г. были обнаружены эмиссионные линии ОН с совершенно необычными свойствами. Вначале их пытались даже приписать неизвестной межзвездной молекуле («мистериуму», как называли ее первооткрыватели — ученые из Беркли и Гарварда).

Линии были чрезвычайно узкими и очень яркими, переменными, изменяющимися от источника к источнику. Это могло свидетельствовать о том, что в источниках необычного излучения осуществляется режим усиления, подобный тому, который незадолго до этого был открыт в лабораториях нобелевских лауреатов Н. Г. Басова и А. М. Прохорова в СССР и Ч. Таунса в США (рис. 4.10). Идея о том, что эти линии могут иметь мазерное происхождение, по-видимому, впервые пришла в голову И. С. Шкловскому. Уже в 1965 г. использование радиоинтерферометра Линкольновской лаборатории позволило получить доказательства мазерной природы излучения. Сейчас уже нет сомнения в том, что это была первая встреча с космическим мазером.

Еще Эйнштейн в работе 1917 г. открыл явление вынужденного испускания, совершенно симметричное процессу поглощения. Вероятность этого процесса отличается от вероятности известного нам спонтанного перехода тем, что она пропорциональна числу квантов излучения. Атом или молекула под влиянием резонансного излучения поглощает или испускает такой же квант (в зависимости от того, на каком энергетическом уровне — верхнем или нижнем — она находится). При наличии системы большого числа частиц результирующий эффект поглощения определяется только тем, что обычно (например, в состоянии теплового равновесия) частиц n_1 с меньшей энергией ϵ_1 больше (рис. 4.10а). Поэтому квантовых переходов с поглощением в среднем больше, чем с испусканием, и в итоге излучение

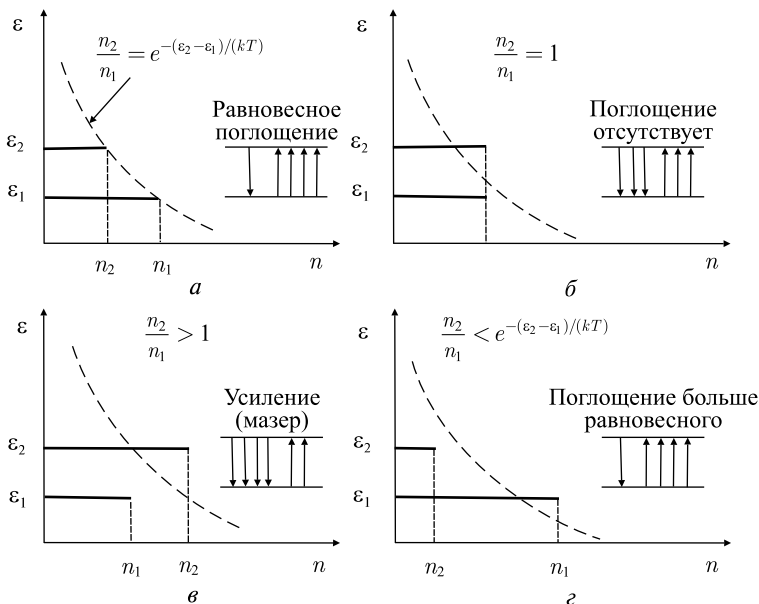


Рис. 4.10. Вынужденные переходы и поглощение излучения в равновесных и неравновесных системах. Пунктирная линия соответствует равновесному распределению частиц по уровням энергии: *a* — равновесие; *б* — $n_2 = n_1$ — насыщение; *в* — $n_2 > n_1$ — инверсия; *г* — переохлаждение

поглощается. Однако если искусственно создать перенаселенность уровня с большей энергией (как говорят, создать инверсию населенностей (рис. 4.10 *в*) на уровнях энергии, т. е. состояние с отрицательной температурой), то такая инвертированная система будет не поглощать, а усиливать излучение (строго определенное по частоте). Эти методы усиления и генерации сейчас хорошо известны и широчайшим образом используются. И вот оказывается, что и природа с давних времен «использует» это явление! С мазер-эффектом в космических процессах мы еще будем встречаться.

Итак, первые успехи вдохновили радиоастрономов на интенсивную работу, плоды которой не замедлили последовать. Группа ученых университета в Беркли во главе с Ч. Таунсом в 1968 г. с помощью нового 6-метрового радиотелескопа обнаружила в радиоисточнике Стрелец А вблизи от Центра Галактики линии аммиака NH_3 и паров воды с длиной волны около сантиметра. Линии H_2O были найдены также в туманности Ориона и области W49 (рис. 4.11).

Это были уже переходы сугубо молекулярные, принципиально отличные от того, что наблюдалось для Н и ОН. Так называемый инверсионный переход в аммиаке связан с «проскакиванием» атома азота через плоскость, в которой лежат три атома водорода, в другое симметричное положение равновесия. Переход этот чисто квантовый и происходит благодаря туннельному подбарьерному эффекту. Вероятность такого проскакивания невелика, что и определяет очень низкую частоту подобных собственных движений, отвечающих $\lambda = 1,25$ см. Интересно, что первые мазеры в земных лабораториях были выполнены на пучках аммиака на этом же переходе.

В случае паров воды были обнаружены вращательные переходы. При этом сама молекула находится в состоянии интенсивного колебательного движения. Мазерный эффект на линиях воды оказался еще более сильным, чем у гидроксила.

Первоначально преобладало мнение, что мазерный эффект возникает в сжимающихся под действием тяготения слоях протозвезды (см., например, первое издание этой книги). Как показали дальнейшие наблюдения, мазеры сопутствуют областям (биполярного) истечения вещества и джетам (узко сфокусированным струям) в молодых объектах или мощному звездному ветру, возникающему на поздней стадии эволюции массивных звезд (о мегамазерах в активных ядрах галактик см. следующую главу). Возможно, мазеры возникают в ударных волнах, формирующихся в этих структурах. Обычно они возникают группами в очень малых областях и точно локализуются лишь с помощью глобальной интерферометрии. Их скорости, определяемые по доплеровскому сдвигу частоты, помогают воссоздать пространственную картину течений. Более плотные глубинные слои порождают H_2O -мазеры со скоростями в десятки км/с. В менее плотных разлетающихся слоях возникают более быстро движу-

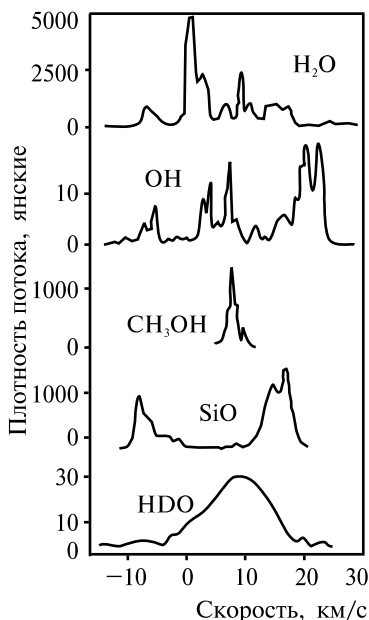


Рис. 4.11. Излучение космических мазеров из туманности Ориона и немазерная линия изотопа воды (по Д. М. Морану)

щиеся гидроксильные мазеры на различных переходах радикала ОН. Наконец, в еще более разреженной среде биполярного потока наблюдаются видимые в оптике и движущиеся с еще большими скоростями загадочные объекты Хербига–Аро, наводящие на мысль об их свободном баллистическом движении по инерции.

Наиболее изученный H_2O -мазерный переход возникает на частоте 22,235 ГГц (при наблюдении — с дополнительным сдвигом за счет эффекта Допплера). Переход этот, обозначаемый $6_{16}-5_{23}$, соответствует изменению состояния вращения молекулы, которое, как доказывает квантовая механика, может отвечать только целым значениям вращательного момента и его проекций в единицах постоянной Планка \hbar ⁴. Молекулы воды, скатываясь по лесенке подуровней при постоянном значении момента (самые быстрые переходы) на нижний подуровень (соответствующий индексам 1, 6 у цифры 6 при $J = 6$), накапливаются на нем. Напротив, ближайший по энергии подуровень 5_{23} , лежащий под ним, принадлежит уже моменту $J = 5$ и не является самым нижним на лесенке подуровней с таким моментом. Поэтому этот уровень все время опустошается, так как молекулы воды быстро «сваливаются» на свой самый нижний подуровень. В результате, даже при неизбирательной, например инфракрасной или ударной, «накачке» каскад переходов, возвращающих молекулу H_2O в состояние с наименьшей энергией, создает на переходе $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ инверсию населенностей, приводящую к мазерному эффекту.

Заметим, что аналогичных вариантов с перенаселением верхнего уровня при переходе с лесенки на лесенку в молекуле воды имеется несколько. Но все они лежат в гораздо более высокочастотной и трудной для наблюдений миллиметровой и субмиллиметровой области спектра. И только переход $6_{16} \rightarrow 5_{23}$, благодаря случайному совпадению чисел («вырождению»), попал в гораздо более удобный для классической радиоастрономии диапазон с длиной волны $\lambda = 1,35$. Освоение в последнее время более коротковолнового диапазона уже привело к наблюдению мазеров на переходах $3 \rightarrow 2$ (183,310 ГГц), $4 \rightarrow 3$ (380,1977 ГГц), $1_{10} \rightarrow 1_{01}$ (556,936 ГГц). Ввод в строй прецизионных миллиметровых и субмиллиметровых инструментов, таких как ВІМА

⁴ При переходах момент и его проекции могут либо не изменяться, либо изменяться только на 1. По отношению к вращению молекулы воды ведут себя как асимметричные волчки. У таких волчков нет одной выделенной оси, в отличие от всем известного детского волчка — юлы. Из-за этого их вращательное состояние при заданном полном моменте J приходится задавать двумя числами (1 и 6 для состояния с моментом 6; 2 и 3 для состояния с моментом 5), характеризующими проекции полного момента.

ассоциации Беркли–Иллинойс–Мериленд в США, радиоастрономической обсерватории NRO в Нобейяме (Япония), в Оуэнс-Велли (OVRO) в США, большой миллиметровой решетки ALMA в Атакаме (Чили), субмиллиметровой решетки SMA (в Австралии) и других (см. гл. 2), приведут в ближайшие годы к колоссальному прогрессу во всем диапазоне, в том числе к открытию и использованию для изучения областей звездообразования новых мазерных переходов и на молекулах воды.

Но вернемся к первооткрывателям. В следующем, 1969 г., Снайдер, Буль, Цукерман и Палмер открыли межзвездную молекулу формальдегида H_2CO на длине волны $\lambda = 6$ см с помощью 42-метрового радиотелескопа НРАО. Таким образом, вопреки устоявшимся представлениям о том, что в космосе нет многоатомных молекул, они заявили о себе как о важной составной части плотных газопылевых облаков. Через год было открыто семь, еще через год — десять таких молекул. А уже через пять лет общее число открытых межзвездных молекул превышало тридцать (сегодня счет идет на сотни). Удивительно обилие сложных органических молекул. Исключительным богатством молекулярных радиолиний отличается Центр Галактики. Ряд линий, например формальдегида, был открыт во многих галактических источниках и является характерным для спиральных ветвей. Для некоторых молекул удавалось наблюдать значительное число переходов. Так как большинство молекулярных переходов относится к миллиметровому и субмиллиметровому, а также к инфракрасному диапазонам длин волн, то центр тяжести исследований сместился в более коротковолновую область.

Вместе с тем для ряда измерений потребовался выход за пределы атмосферы. Важнейший результат был получен группой Карузерса в 1970 г., обнаружившей при ракетных запусках молекулярную линию водорода H_2 , лежащую в ультрафиолете, не пропускаемом земной атмосферой. Молекулярный водород, как предполагалось и как теперь доказано, является основной составной частью плотных холодных молекулярных облаков.

Оценим характерные частоты молекулярных переходов. Электронные энергии в молекулах примерно те же, что и в атомах, и соответствующие переходы лежат в ультрафиолете или оптическом диапазоне. Именно поэтому такое излучение способно привести и к разрушению молекулы.

Но в молекуле возможны и движения ядер, в первую очередь их колебания возле положения равновесия, и вращение вокруг различных осей. Частоты этих движений существенно зависят от массы молекулы, т. е. от массы ее ядер $m_{\text{яд}}$, в то время как электронные энергии включают только массу электрона m . Поэтому отношение энергий будет содержать и каком-то виде малый параметр $m/m_{\text{яд}} \approx 10^{-3}/A$, где A — молекулярная масса.

Теперь легко оценить интересующие нас частоты. Известно, что частоты колебаний груза на пружинке обратно пропорциональны корню из массы груза, т. е. $\omega_{\text{кол}} \approx 1/\sqrt{m_{\text{яд}}}$. Поэтому отношения частот колебательных и электронных переходов в молекуле $\omega_{\text{кол}}/\omega_{\text{эл}} \sim \sqrt{m/m_{\text{яд}}}$. Так как электронные переходы соответствуют оптическим частотам $\omega_{\text{эл}} \sim 10^{15}$, то колебательные частоты попадают, вообще говоря, в инфракрасный диапазон: $\omega_{\text{кол}} \sim 10^{13}/\sqrt{A}$. Характерные вращательные энергии, которые через моменты количества движения и моменты инерции тел $\sim m_{\text{яд}} a^2$ выражаются так же, как кинетическая энергия через импульсы и массы, обратно пропорциональны массе молекулы. На атомно-молекулярном уровне вращение квантуется и соответствующая частота перехода $\omega_{\text{вр}} \sim 1/m_{\text{яд}}$. Аналогично предыдущему, $\omega_{\text{вр}}/\omega_{\text{эл}} \sim m/m_{\text{яд}}$ и вращательные частоты попадают в область высоких радиочастот $\omega_{\text{вр}} \sim 10^{11}/A \text{ с}^{-1}$. Вообще говоря, это миллиметровый диапазон (для легких молекул). Но многие частоты по ряду причин соответствуют еще более длинным волнам, например, из-за того что в симметричных молекулах некоторые энергии совпадают, а малое нарушение симметрии приводит к дополнительным малостям уже в разностях энергий, которые проявляются в возникновении более низких боровских частот. Подобным примером может служить и уже упоминавшееся Λ или l -удвоение, возникающее в двухатомных (Λ) и вообще линейных (l) молекулах. В линейной молекуле электронные уровни совпадают для состояний, отличающихся направлением электронного момента относительно оси молекулы. Но при вращении молекула как бы изгибается, вследствие чего нарушается симметрия и энергии совпадавших состояний становятся различными. Уровни удваиваются (Λ - или l -удвоение), а боровский переход между расщепившимися компонентами попадает в еще более длинноволновую область. Этот эффект очень чувствителен к величине электронного момента. При нулевом моменте (в Σ -состоянии) он, разумеется, отсутствует. Для Π -состояния, в котором орбитальный момент равен единице,

$$\omega_{\text{удв}} \sim \omega_{\text{эл}} \left(\frac{m}{m_{\text{яд}}} \right)^2.$$

Это приводит к частотам перехода, попадающим в дециметровый диапазон $\omega_{\text{удв}} \sim 10^9/A^2 \text{ с}^{-1}$, где находятся и частоты переходов между компонентами сверхтонкой структуры. Для состояний с большими моментами расщепление уже столь мало (оно пропорционально $(m/m_{\text{яд}})^{2\Lambda}$, где Λ — величина момента в единицах $\hbar/2\pi$), что не попадает даже в радиодиапазон.

Молекулярные радиолинии оказываются превосходным термометром и измерителем плотности молекулярного водорода. Действительно, при температуре T будут заселены молекулярные состояния с энергиями (отсчитанные от основного состояния) меньше или порядка kT , где k — постоянная Больцмана. Это соответствует тому, что характерная передаваемая молекуле при столкновении энергия — порядка средней кинетической энергии движения частиц. При этом могут возбуждаться (за счет неупругих столкновений, когда часть этой энергии передается внутренним движением в молекуле) уровни, отстоящие от основного состояния на энергетический интервал такого же порядка. Соответственно при излучении молекула возвращается

в основное состояние, испуская квант $\hbar\omega \leq kT$. (Заметим, что энергия в обратных сантиметрах порядка температуры в кельвинах, а пересчет разности энергий в сантиметры соответствует характерной длине волны излучения.)

Оценка плотности газа в этих условиях основана также на столкновительном возбуждении уровней. Столкновения должны быть достаточно частыми, чтобы молекулы не успевали, высвечиваясь, полностью освобождать уровни. Но это значит, что столкновения должны происходить чаще, чем акты высвечивания, а именно: частота столкновений должна превышать частоту спонтанных переходов с данного уровня. (В случае мазеров нужно рассматривать индуцированные переходы и учитывать механизм инверсии.) Частота столкновений пропорциональна концентрации молекул водорода. Частота же спонтанных переходов известна (см. 111). Таким образом, уже сам факт наблюдения молекулярного перехода в излучении позволяет оценить температуру и плотность газа.

Кроме того, как обычно при наблюдениях линий, по доплеровскому смещению частоты перехода определяется скорость движения облака, по ширине линии можно оценить, в зависимости от механизма уширения, тепловые или турбулентные скорости и, наконец, по интенсивности — число излучающих молекул на луче зрения.

В особом положении находятся мазерные источники. Они проявляют значительную временную нестабильность, существенно изменяя спектр за время меньше года. Это, в частности, говорит об их малых размерах. Для локализации таких источников использовались методы апертурного синтеза и интерферометрии со сверхдлинными базами (рис. 4.12). Например, угловое разрешение в две десятитысячные секунды было достигнуто в 1971 г. при использовании плеча интерферометра длиной 7400 км между радиотелескопами Хайтекской (США) и Симеизской (Крым, СССР) обсерваторий на длине волны $\lambda = 1,35$ см.

Один из самых мощных мазеров был открыт Ченгом, Рэнком, Таунсом, Торнтоном и Уэлчем в 1969 г. в туманности W49. Это область ионизованного водорода, обеспечивающая источник питания — «накачку» мазера своим инфракрасным излучением, проникающим в граничащее с областью ионизованного водорода газопылевое облако. Излучают в линиях воды очень малые конденсации с размером порядка предельного разрешения длиннобазовой интерферометрии. Мощность излучения в узкой полосе около десятка мегагерц, содержащей отдельные спектральные детали с ширинами около нескольких десят-

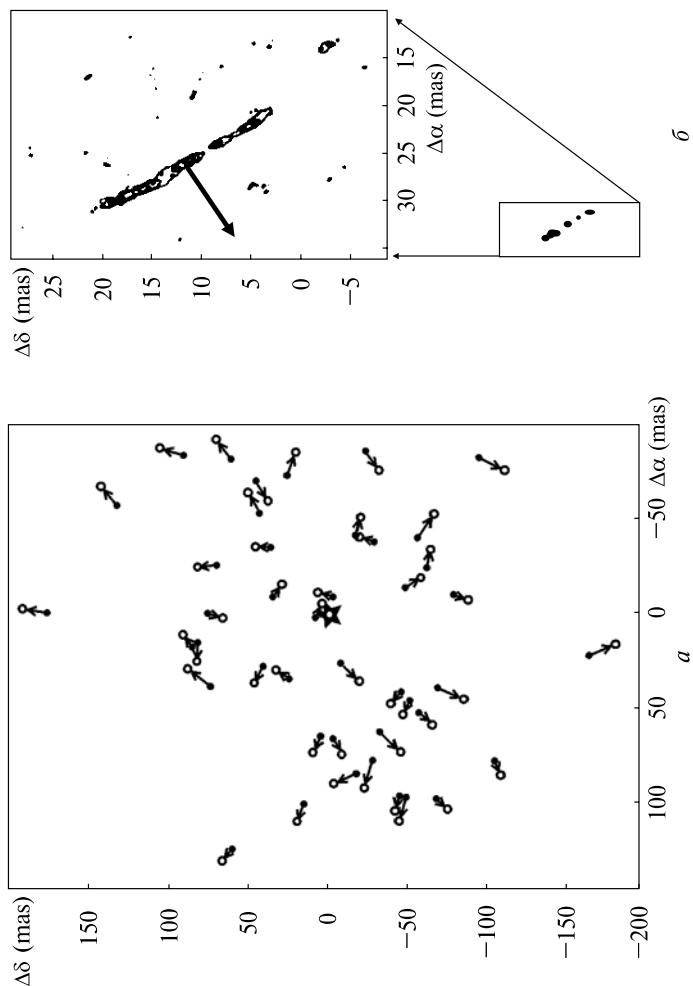


Рис. 4.12. *a* — Движение мазерных источников воды в окрестности красного гиганта VX Sgr, система MERLIN. Показаны изменения положений мазеров между 1994 и 1999 гг. (черные и белые кружки соответственно). Центр расширения отмечен звездочкой. Ошибки измерений меньше размера кружков. *б* — Мазерное H_2O -излучение ударного фронта звезды NGC 1333 SVS 13. По материалам конференции «Космические мазеры: от протозвезд до черных дыр», Рио-де-Жанейро, 2001 г.

ков килогерц, временами достигает полной светимости Солнца! Можно представить себе, каким эффективным средством охлаждения являются космические мазеры. Охлаждение излучением только на линиях H_2O -мазера составляет около десятой доли процента полной потери энергии при коллапсе массы порядка солнечной. Сравнение наблюдений с теориями коллапса и образования протозвезд, проведенное, например, для туманности Ориона и других хорошо исследованных объектов, вполне удовлетворительное. Параметры межзвездных молекулярных облаков по наблюдениям в радиолиниях приведены в табл. 4.1, из которой видно, что по различным линиям получают сведения о разных областях сжимающегося (или разлетающегося) облака. При этом мазерное излучение идет из самых плотных внутренних оболочек размером в несколько астрономических единиц, окружающих центральное ядро протозвезды.

ОН-мазеры на 1720 Мгц, открытые Фрайлом, Госсом и Слышем в 1994 г. методами РСДБ, в отличие от мазеров на главных переходах ОН, не появляются в компании водяных мазеров и соответствуют другой физической картине. Эти мазеры лежат на границе между остатками сверхновых и молекулярными облаками и возбуждаются ударной волной. Большинство из нескольких десятков таких мазеров, обнаруженных в Галактике, открыты в направлении на ее Центр (см. гл. 5). С их помощью удалось получить важнейший результат: доказать физическую близость к Центру источника Sgr A (East).

Настоящую сенсацию произвело открытие в межзвездных облаках большого количества органических молекул, которые в земных условиях возникают лишь как продукты жизнедеятельности или результаты специальных технологических процессов. Чрезвычайно интересным оказалось поведение формальдегида H_2CO . В отличие от аммиака и воды, он очень распространен в Галактике. В некоторых источниках формальдегид оказался переохлажденным настолько, что дал линию поглощения от трехградусного реликтового излучения. Такое поведение

Таблица 4.1
Параметры межзвездных молекулярных облаков по измерениям в радиолиниях

Излучающая молекула	Параметры облака H_2	
	T , К	n , см^{-3}
H_2CO (6 см)	10	10^3
CO	6	10^4
HCN	4	10^6
H_2CO (2 мм)	7	10^7
ОН	100	10^8
H_2O	600	10^{10}

Таблица 4.2

Первые межзвездные молекулы, открытые оптическими (опт) и радиоастрономическими методами

Год открытия	Символ	Диапазон обнаружения	Год открытия	Символ	Диапазон обнаружения	Год открытия	Символ	Диапазон обнаружения
1937	CH	опт	1971	CS	мм	1974	CH ₂ CHCN	21,9 см
1940	CO	»		SiO	»		CH ₃ NH ₂	мм
1941	CH ⁺	»		OCS	»		C ₂ H ₅ OH	»
1963	[OH] [*]	18 см, см		CH ₃ CN	»		HCOOCH ₃	18,8 см
1968	NH ₃	»		HNCO	»	1975	HCO	мм
	[H ₂ O]	»		HNC	»		SO ₂	»
1969	H ₂ CO [*]	»		CH ₃ C ₂ H	»		SiS	»
1970	H ₂	опт		CH ₃ CHO	28 см		NH ₂ CN	»
	CN	см		H ₂ CS	11 см		CH ₃ C ₃ N	»
	HCN [*]	»	1972	CH ₂ NH	см	1976	NS	»
	HCO ⁺	»		H ₂ S	мм		C ₂	опт
	HCOOH	18 см		CH ⁺	9,6 см		HC ₅ N	см
	CH ₃ OH	1,2 см	1973	SO	мм	1977	HNO	мм
	HC ₃ N	ск		(CH ₃) ₂ O	»		NO	»
	CO [*]	мм		N ₂ H ⁺	»	1978	HC ₇ N	см
1971	NH ₂ CHO	см		C ₂ H	»		HC ₉ N	»

Примечание. Молекулы, проявляющиеся в мазерах, обведены; наблюдавшиеся в других галактиках отмечены звездочкой.

соответствует неравновесному состоянию, в котором реализуется как бы инвертированный мазер: избыточное число молекул сосредоточено на самом низком энергетическом уровне (в основном состоянии).

Формальдегид представляет собой первую органическую молекулу, открытую в космосе. Вскоре Снайдер и Бул на 36-футовом телескопе в Китт-Пик открыли вторую органическую молекулу — синильную кислоту. Это вещество может служить исходным для построения простейших аминокислот. На этой почве возникает совершенно новый подход к великому вопросу о происхождении жизни. Органические молекулы посыпались как из рога изобилия, вознаградив усилия энтузиастов. В короткий срок были открыты представители спиртов, органических кислот и т.п., отражая исключительную роль углерода в межзвездной химии. И возможно, как сейчас считают многие ученые, это больше, нежели случайное совпадение, — конденсация звезды, концентрация пыли и молекул в планеты и атмосферы и даже последующая эволюция жизни, — все это, возможно, части единой эволюции. Не исключено, что это обычное явление в нашей Галактике.

Заметим, что уже обнаружены линии молекул в других галактиках (табл. 4.2).

РАДИОИЗЛУЧАЮЩИЕ ОБОЛОЧКИ ВЗОРВАВШИХСЯ ЗВЕЗД

Выше мы видели, что радиоизлучение — в молекулярных линиях — сопровождает рождение звезды. Для части звезд (около процента) гибель также сопровождается радиоизлучением. Пройдя в соответствии с массой положенный им цикл термоядерных превращений, большинство звезд сходит с главной последовательности и эволюционирует «мирным путем» (в красные гиганты). Последние, теряя часть оболочки в виде очень красивых кольцообразных планетарных туманностей, оставляют плотный звездный остаток, как правило, белый карлик, о котором будет рассказано в следующем разделе.

Но для некоторых звезд их «жизненный путь» оканчивается катастрофически. По-видимому, связанная с гравитационным коллапсом центральной части звезды ударная волна и детонация ядерного горючего на ее периферии приводят к срыву оболочки и ярчайшей световой вспышке. За такими взорвавшимися звездами закрепилось название сверхновых — по аналогии и в отличие от периодически вспыхивающих новых звезд. Сам факт

появления «новых звезд» на небе был известен еще античным астрономам и, кстати, послужил поводом для составления Гиппархом первого звездного каталога в II в. до н.э. Обнаружение в 1885 г. астрономом Дерптского (Тартуского) университета Гартвигом новой звезды⁵ в туманности Андромеды дало основание уже в 1928 г. (когда удалось определить расстояние) считать, что здесь наблюдалось совершенно другое, грандиозное по своим масштабам явление. Из-за чрезвычайной редкости таких событий в нашей Галактике и ее ближайших окрестностях систематически наблюдать подобные взрывы удастся лишь благодаря организации по инициативе Ф. Цвикки специальной службы слежения за вспышками сверхновых в других галактиках.

Сверхновая блекнет довольно быстро (в течение месяцев), но сброшенная взрывом оболочка — остаток сверхновой (ОСН) — продолжает расширяться и светить в виде туманности еще долгие тысячелетия. Громадные энергии взрыва, составляющие заметную долю энергии покоя звезды, являются систематическим поставщиком энергии разных видов в галактиках и в значительной мере расходуются на ускорение частиц до релятивистских энергий, когда их скорости становятся близкими к скорости света. Именно здесь, как теперь считают (главным образом после работ В. Л. Гинзбурга, С. И. Сыроватского и их учеников), образуются космические лучи в Галактике (за исключением самых энергичных, которые приходят к нам от соседних активных галактик). Запутавшиеся в хаотических магнитных полях релятивистские электроны являются источником мощного радиоизлучения. Благодаря этому и была получена первая информация о месте их ускорения в Галактике. Сами же электроны и ядра космических лучей настолько подвержены действию магнитных полей, что приходят на Землю почти совершенно изотропно, полностью утратив память о месте своего возникновения. В последнее время успехи гамма-астрономии позволили наблюдать ядерную компоненту космических лучей в Галактике.

Наряду с начальным запасом релятивистских частиц, ускоренных при взрыве, в остатке сверхновой, по-видимому, действует и механизм непрерывного ускорения частиц на фронте ударной волны, обрамляющей сорванную взрывом оболочку (рис. 4.13) или пронизывающей объем туманности. В некоторых случаях обнаружен мощнейший источник непрерывно уско-

⁵ Это открытие вызвало большой общественный резонанс. Генрих Ибсен посвятил рождению звезды восторженные стихи. Никому в то время не могло прийти в голову, что Гартвиг наблюдал не рождение, а гибель звезды.

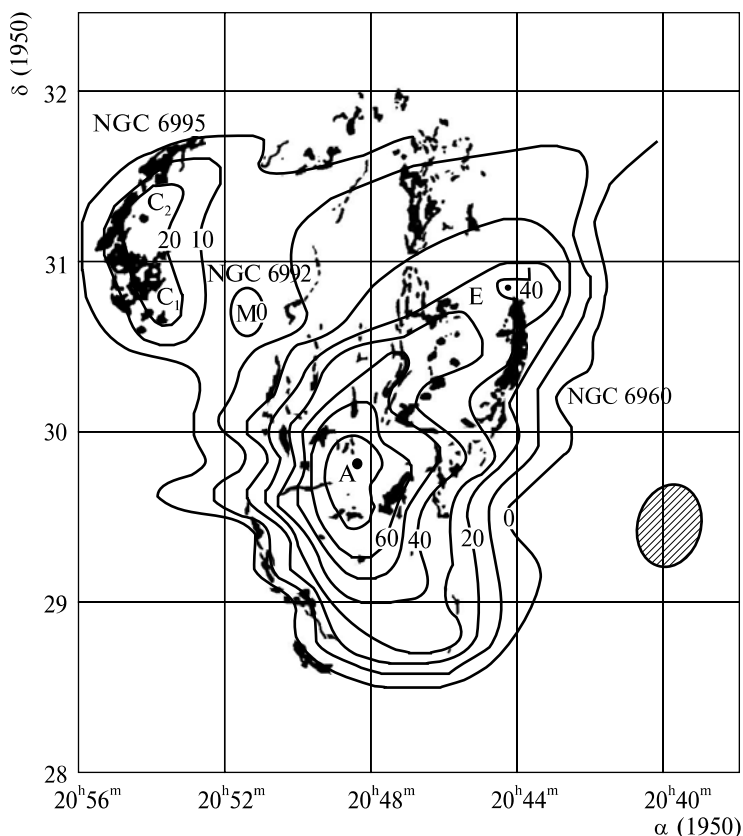


Рис. 4.13. Радиоизофоты декаметрового излучения остатка сверхновой (петля в Лебедь), наложенные на ее оптическое изображение (измерения Э. П. Абрамина и Л. Л. Базеляна на УТР-2)

ряемых частиц, связанный со звездным остатком сверхновой. Примером может служить знаменитая Крабовидная туманность, в центре которой находится пульсар, энергично ускоряющий электроны. Найдены пульсары и в остатке сверхновой в Парусах, и в туманности IC443. Недавно найден пульсар в остатке НВ9 (рис. 4.14). Не исключено, что он также связан генетически со взрывом, породившим туманность, так как время его движения от центра туманности согласуется с ее возрастом. О пульсарах мы расскажем несколько позже.

Вспышки сверхновых — очень редкое явление, происходящее в среднем один раз в 30–100 лет в галактике, подобной нашей. В Млечном Пути сверхновые, к великому огорчению астрономов,

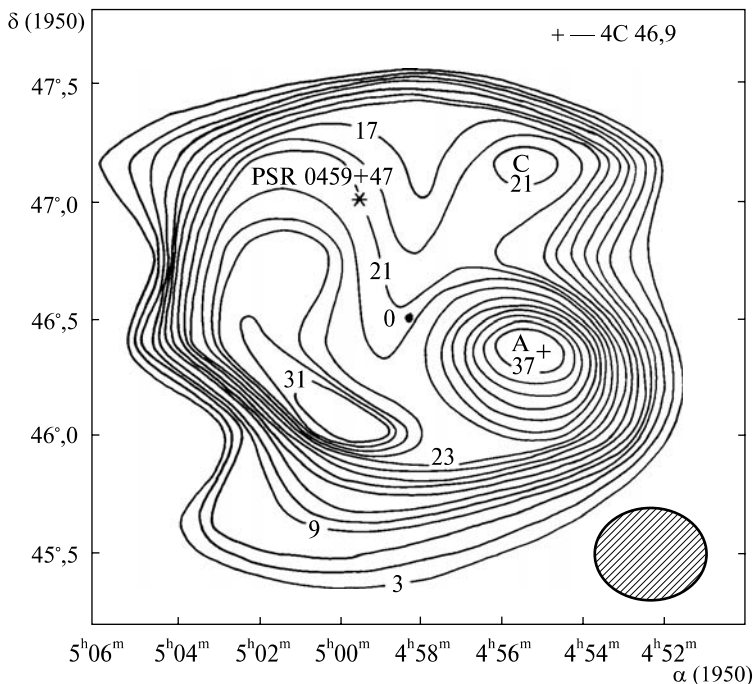


Рис. 4.14. Изофоты декаметрового радиоизлучения остатка сверхновой НВ 9, полученные на УТР-2 (по Э. П. Абранну, Л. Л. Базеляну и Н. Ю. Гончарову). Крестиком обозначен пульсар

не наблюдались в течение последних трехсот с лишним лет (см., однако, сноску на с. 28). Впрочем, как было установлено уже радиоастрономией, одна вспышка произошла после изобретения телескопа, но осталась незамеченной.⁶

На помощь астрономии приходит история. Хотя большинство из остатков слишком стары в сравнении с человеческой цивилизацией, но самые молодые из сверхновых (а также новых звезд и комет) оказались упомянутыми в письменных памятниках. Так, в Китае существовала систематическая «служба неба», в хрониках описывались все изменения, происходившие на небосклоне, все необыкновенные небесные явления. С ними в Китае и ряде других древних цивилизаций связывались судь-

⁶ Это уже упоминавшийся самый мощный — после Солнца — дискретный источник радиоизлучения в Галактике — Кассиопея А. Дискуссия о том, почему не была замечена вспышка сверхновой, обрела под собой более прочную почву после открытия «Чандрой» в центре Кассиопеи А видимой в рентгене и не излучающей радиоволн нейтронной звезды.

бы людей и народов. Ж. Био, а затем А. Гумбольт первыми среди западных ученых нового времени обратились к древним источникам, записям в хрониках. Превосходный обзор таких изысканий дан в книге И. С. Шкловского «Сверхновые звезды». Он считает подлинность этих записей неоспоримой. Достаточно сказать, что все без исключения появления кометы Галлея за последние две тысячи лет были отмечены в китайских хрониках. Древние китайские астрономы отличали «звезды-гости» от комет («звезды-гости» и есть новые или сверхновые). В результате этих исследований доказано, что в нашей Галактике вспыхивали сверхновые в 185, 1006, 1054, 1572, 1604 гг. Две последние изучались уже астрономами Нового Времени — Тихо Браге (1572) и И. Кеплером (1604).

Все исторические сверхновые хорошо отождествляются с источниками радиоизлучения. Исключительную роль сыграло отождествление (первое) Болтоном, Стенли и Сли в 1949 г. радиоисточника Телец А с Крабовидной туманностью. Краб, как фамиллярно называют его теперь астрономы, находится вблизи от места вспышки сверхновой 1054 г. Отождествление Краба с остатком этой сверхновой было проведено Мейялом и Оортом и опирается на исследования голландского востоковеда Дивендайка, предпринятые по инициативе Оорта. Сам факт вспышки 4 июля 1054 г. абсолютно достоверен. Он отражен во многих хрониках Китая и Японии⁷. Звезда была видима днем (разумеется, невооруженным глазом) в течение 23 дней, а всего была видна 653 дня!

Успех — лучший стимул к исследованиям! В 1952 г. на Манчестерской 76-метровой антенне Браун и Хазард предприняли поиски источника радиоизлучения на месте сверхновой Тихо 1572 г., которые увенчались успехом, несмотря на трудности, связанные с близостью значительно более мощного источника радиоизлучения — Кассиопеи А. В 1955 г. при составлении кембриджского каталога был обнаружен довольно мощный источник на месте сверхновой Кеплера 1604 г. Сейчас на месте всех видимых остатков исторических сверхновых обнаружены дискретные источники радиоизлучения.

⁷ Но не в Европе или арабском Востоке! Может быть, этому способствовала обстановка, предшествовавшая крестовым походам, или разгар борьбы пап с императорами. Шкловский считает удивительным отсутствие сведений о вспышке в Киевской Руси, учитывая, что 1054 г. — год смерти Ярослава Мудрого.

Знаменитейшая среди туманностей — остатков сверхновых — несомненно, Крабовидная. Самый мощный источник радиоизлучения среди них (и вообще мощнейший дискретный источник радиоизлучения в Галактике) — другой остаток сверхновой — туманность в Кассиопее (Cas A), отождествленная Бааде и Минковским в 1954 г. Породившая ее вспышка произошла совсем недавно, около 1667 г. (что было определено по схождению оптических деталей обратно во времени), но, как это ни удивительно, осталась незамеченной. Быть может, виной тому — поглощающие свет облака на пути от сверхновой, но возможны и более нетривиальные причины (см. гл. 6).

В оптике остатки сверхновых или подозреваемые в этом выглядят как волокнистые туманности, концентрирующиеся к галактическому диску. Поглощение в диске мешает их наблюдению при больших удалениях от Солнечной системы. Так как разлет оболочки существенно определяется как типами самих сверхновых (а их несколько) и возможной анизотропией взрыва, так и неоднородностями в газовых облаках, окружающих звезду, магнитным полем, ориентированным вдоль спирального рукава, и т. п., то остатки лишь в редких случаях имеют правильную сферическую форму. И, как всегда в астрономии, одна из основных трудностей — определение расстояния до туманности.

Непременная черта этих туманностей — весьма характерное нетепловое радиоизлучение. Именно по нему в настоящее время ищутся остатки, причем малое поглощение радиоволн в сравнении с оптикой позволяет исследовать более далекие от нас объекты. Всего сейчас известно более полутора сотен (около половины предполагаемого общего количества) источников радиоизлучения в Галактике — кандидатов на отождествление с остатками сверхновых. И у большинства из них уже исследована радиоструктура. Ряд подобных радиоисточников обнаружен и в других галактиках.

С помощью радиоинтерферометров на высоких частотах получены детальные карты многих остатков. Выяснено (по измерениям поляризации излучения) распределение в них магнитных полей, играющих, как мы уже знаем, важнейшую роль во всем явлении. Для молодых остатков поле в общем радиально, что соответствует разлету вещества от центра. На более поздних этапах оно приобретает поперечный характер в оболочке. За немногими исключениями (Краб!) поля в основном хаотизованы (степень поляризации мала), что соответствует возможности удержания заряженных частиц.

Заметим, что различают, в основном, два типа сверхновых — с менее массивной ($\leq 0,3 M_{\odot}$) и более массивной ($\approx 2 M_{\odot}$) выброшенной оболочкой. В первом случае энергия взрыва также несколько меньше, чем во втором, где она превышает 10^{50} эрг. И если для первого типа характерно «равнораспределение» энергии между частицами, магнитным полем, излучением и кинетической энергией, то для второго кинетическая энергия существенно преобладает.

Для старых остатков, таких, например, как Петля в Лебедь (возраст 70 000 лет), количество «выметенного» межзвездного вещества уже столь велико, что оно оказывает существенное влияние на происходящие процессы. Существуют галактические туманности разного возраста, находящиеся на разных стадиях расширения и разлета газа и релятивистских частиц, образовавшихся при взрыве. В целом можно стараться проследить, переходя от молодых к более «пожилым» объектам, за изменением структурных, видимых в оптике форм и картины радиоизлучения. Разлет продуктов взрыва естественно приводит к переходу от расширяющейся объемной структуры к разлетающейся оболочке. Такая картина соответствует тому, что происходит при «сильном взрыве», теория которого построена Л. И. Седовым (в связи с тем интересом, который проявляется на Земле к подобным явлениям в атомный век, в Англии подобная теория была построена Дж. Тейлором, а в США фон Нейманом). Наблюдения в оптических линиях свидетельствуют о преобладании кислорода, азота и других относительно тяжелых элементов в остатках оболочки, что естественно согласуется с общими представлениями о синтезе этих элементов при взрыве. Свечение связано с нагревом разлетающегося газа при сжатии в ударных волнах. В старых туманностях оболочка разрушается и распадается на отдельные облака, которые в конце концов перестают быть видимыми.

Однако природа радиоизлучения ОСН отнюдь не тепловая, а синхротронная, т. е. связанная не с общим нагревом, а с малой долей очень быстрых частиц, излучающих в относительно сильном магнитном поле.

С разгадкой тайны этого механизма, играющего исключительную роль в современной радиоастрономии, связано также понимание происхождения космических лучей. Заметим, что радиоизотопы тех остатков, которые имеют оболочечную структуру в оптике, подтверждают, что радиоизлучение идет из оболочки, приблизительно повторяющей одну и ту же форму на разных частотах вплоть до дециметрового диапазона. Спектр

этого излучения своим видом обязан спектру излучающих в магнитном поле релятивистских частиц (электронов). Для космических лучей, как было установлено в широчайшем энергетическом интервале от 10^7 до 10^{19} эВ, распределение частиц по энергиям практически степенное $n(E) \propto E^{-\gamma}$ с универсальным средним показателем $\gamma \approx 2,6$, увеличивающимся в области наибольших энергий. Такие распределения существенно неравновесны. Для их возникновения должны быть очень общие причины. И действительно, в ряде случаев нужно лишь поступление ускоренных частиц. Те же самые процессы, которые в отсутствие источника частиц приведут систему в состояние равновесия, при наличии источника энергетических частиц могут формировать спектры степенного вида (рис. 4.15). К подобным спектрам приводят

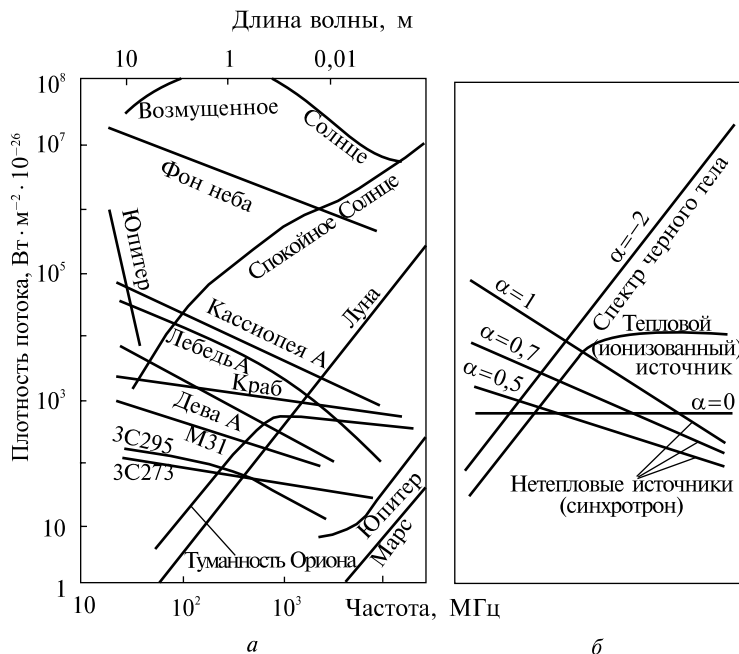


Рис. 4.15. Спектры излучения различных космических источников (по Д. Краусу): *а* — спектры источников; *б* — спектры сравнения

и непосредственно механизмы ускорения частиц, на что впервые указал Э. Ферми. При степенном распределении электронов спектр их излучения также оказывается степенным. Впервые понимание неравновесной природы излучения ОСН было достигнуто для непрерывного оптического излучения Крабовид-

ной туманности. В знаменитом каталоге Мессье эта туманность числится под первым номером — М1. Продолжая исследования Гершеля, лорд Росс на изготовленном им 72-дюймовом телескопе наблюдал и зарисовывал туманности, пытаясь проникнуть в закономерности их причудливой структуры. На его рисунке М1 напоминает краба, откуда и пошло название. Фотографии туманности позволяют ясно видеть переплетающуюся сеть волокон, образующих эллипсоидообразную объемную структуру размером $2' \times 3'$. Стремительное расширение соответствует скоростям разлета около 1500 км/с ($0,2''$ в год при расстоянии до туманности около 2 кпк). Впрочем, расстояние известно с точностью, не большей 10%. Если обратить скорости, то волокна схлопываются в точку, вблизи которой находятся две звезды. Одна из них — юго-западная, которая, как оказалось, является пульсаром, — в момент взрыва (1054 г.) находилась в центре схождения волокон. Причина диффузного свечения туманности была непонятна. Обычные механизмы требовали колоссальных энергий, источника возбуждения и все равно не могли объяснить нетепловую, степенную зависимость интенсивности излучения от частоты. И. С. Шкловский предположил, что излучают релятивистские электроны космических лучей в магнитном поле туманности. Это синхротронное излучение было хорошо известно создателям ускорителей. Идея применения синхротронного механизма для космического излучения (радиозвезд — как считали на заре радиоастрономии) восходит к работам Х. Альфвена, Н. Герлофсона, К. Кипенхойера. Развитие же ее, равно как и теории синхротронного излучения, — заслуга советской школы физиков, В. Л. Гинзбурга и его сотрудников, которые превратили идею шведских ученых в стройную теорию. Применение синхротронного механизма в Крабовидной туманности положило начало его триумфальному шествию, продолжающемуся до наших дней. Однако вначале астрономы отнеслись к этому объяснению довольно скептически. Решающую роль сыграл эксперимент. Харьковский астрофизик И. М. Гордон заметил, что синхротронный механизм должен привести к значительной поляризации излучения Крабовидной туманности. Первые же эксперименты В. А. Домбровского, М. А. Вашакидзе, а затем снимки, сделанные Оортом и Вальравеном в поляризованном свете, подтвердили это предположение.

Остановимся на механизме излучения. В магнитном поле электрон движется вдоль поля по спирали, излучая в узком конусе вдоль своего движения. Последнее — общее свойство излучения релятивистских частиц, движущихся со скоростями,

близкими к скорости света. Спектр излучения состоит из густого частотола гармоник циклотронной частоты $\omega_c = eH/mc$, причем максимум приходится на частоту, которую можно оценить по формуле, учитывающей преобразование частоты при эффекте Доплера: $\omega \approx \omega_c \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$ ($E \gg mc^2$). Таким образом, каждый электрон преимущественно излучает на частоте, квадратично зависящей от его энергии и пропорциональной величине магнитного поля. Отсюда следует, что система релятивистских электронов космических лучей, имеющая степенное распределение по энергиям $n(E) \propto E^{-\gamma}$, приведет к степенному спектру излучения $S(\omega) \propto \omega^{-\alpha}$ с индексом $\alpha = (\gamma - 1)/2$. Следовательно, если бы излучение создавалось электронами космических лучей, индекс спектра радиоизлучения был бы $\alpha = \frac{\gamma_{\text{к.л.}} - 1}{2} \approx 0,8$. Таков, например, спектр у Кассиопеи А. Но в среднем спектры излучения остатков куда более пологие ($\alpha \approx 0,5$). Возможно, это означает, что они возникают благодаря излучению электронов с более «жестким» ($\gamma \approx 2$), содержащим большую долю быстрых частиц, чем у космических лучей возле Земли, распределением по энергиям. Подобные распределения возникают при ускорении частиц на фронтах сильных ударных волн в турбулентной среде. Спектры же с индексом, близким к $\alpha \approx 0,8$, весьма типичны для многих внегалактических источников (см. рис. 4.15), о чем речь пойдет в следующей главе.

Исключительную роль в процессах, происходящих в Крабовидной туманности, играет пульсар. О нем, как о звездном остатке сверхновой, будет рассказано в отдельном разделе. Здесь же рассмотрим его вклад в излучение Краба и роль в качестве поставщика ускоренных частиц. Впервые (как радиопульсар) его наблюдали Стейлин и Рифенстайн на радиотелескопе НРАО в Грин-Бэнк в конце 1968 г., а затем Ричардс и Комелла в Аресибо точно определили период, а позднее и его убывание. В начале следующего года Кок, Дисней и Тейлор обнаружили, что юго-западная звезда в центре Краба (звезда Бааде), и ранее вызывавшая удивление астрономов тем, что в ее спектре не удавалось обнаружить линий, излучает свет строго синхронно с радиоимпульсами (с периодом 0,033 с). «Значение этого открытия, — пишет Шкловский в своей книге «Сверхновые звезды», — трудно переоценить; звезда, наблюдавшаяся астрономами свыше сотни лет, оказалась вовсе не звездой, а космическим объектом совершенно нового типа и особой природы... Если бы не выдающиеся успехи радиоастрономии, приведшие к открытию

радиопульсара в центре Крабовидной туманности, вряд ли когда-либо в обозримом будущем можно было бы доказать незвездную природу южной звезды — центра активности Крабовидной туманности».

Излучение пульсара нетепловое и также имеет степенной спектр (рис. 4.16). (На деле сразу же были обнаружены два пульсара в Крабе — второй, с рекордно длинным периодом 3,7 с, как оказалось, с туманностью не связан.) Наличие пульсара (но не только это!), являющегося мощным источником ускорения заряженных частиц до релятивистских энергий, существенно отличает Краб от тех ОСН, где пульсар отсутствует. Потери энергии вращения пульсара (оцениваемые по измеряемому замедлению) как раз дают

с избытком ту энергию, которую необходимо вводить в туманность для поддержания ее наблюдаемого состояния. В противном случае она бы очень быстро высвечивалась, как это и происходит с Кассиопеей А, в которой пульсар не найден. Впрочем, совершенно новые возможности, открывшиеся благодаря наблюдениям рентгеновского излучения с высоким разрешением, позволили установить наличие компактного рентгеновского объекта в центре этого остатка. Возможно, это нейтронная звезда, так и не ставшая пульсаром, и непрерывный источник инъекции энергичных частиц в Кассиопее А, по-видимому, отсутствует, хотя «Чандра» открыла рентгеновский джет у звездного остатка.

Крайне интересно наличие переменных оптических структур, наблюдаемых вблизи пульсара в виде «жгутов». Система из четырех волокон, обнаруженная еще В. Бааде, совершает движения, возможно связанные с передачей энергии от пульсара туманности. Обнаружен также джет. Изображение Краба в рентгене, полученное космическим телескопом «Чандра», представляет собой потрясающую картину винтовой раскручивающейся спирали, по которой ускоренные пульсаром частицы проникают в окружающую пульсар туманность. В целом Краб — нетипичный объект (хотя сейчас уже обнаружено несколько ему подобных, называемых теперь плерионами), в отличие от Кассиопеи А. Расширение

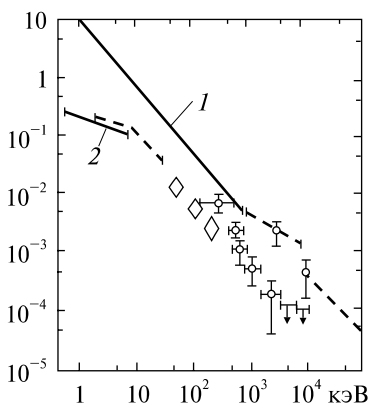


Рис. 4.16. Спектр излучения Крабовидной туманности и ее пульсара: 1 — полное излучение Крабовидной туманности; 2 — излучение пульсара

идет в нем с ускорением, в нем есть очень активный пульсар. В Кассиопее А, напротив, наблюдается эффект «остывания», связанного с расширением туманности. Впрочем, здесь также есть аномалия — выброс излучающих частиц в месте разрыва «оптической» оболочки.

Заметим, что галактические шпуры (см. карту на рис. 4.2), возможно, также являются остатками вспышек сверхновых, особенности которых, согласно Т. А. Лозинской и Н. Г. Бочкареву, объясняются взрывом в горячей разреженной среде. К уникальным свойствам сверхновых типа Ia, позволившим совершить замечательное открытие антигравитации вакуума и ускоренного расширения Вселенной, мы вернемся в последней главе.

Приведем для справок ссылку на каталог Грина остатков вспышек сверхновых: полная, постоянно обновляющаяся информация о 265 известных на сегодня ОСН — потоках, спектрах, картах (<http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/index.html>).

РАДИОПУЛЬСАРЫ

Хотя мы неоднократно упоминали о пульсарах (из чего ясно, что их роль в общей картине эволюции стала уже незаменимой), вернемся к началу — к моменту их открытия. Как и в случае большинства блестящих открытий современной астрономии, все началось с нетривиального технического результата — создания новой антенны и аппаратуры, способной регистрировать быстропеременные процессы в достаточно узкой полосе частот. Аппаратура создавалась для наблюдения мерцаний⁸ радиоисточников группой студентов Кембриджа под руководством профессора А. Хьюиша. Периодические импульсные сигналы, обнаруженные аспиранткой Хьюиша мисс Джоселин Белл, были совершенно неожиданны для исследователей. Регулярность сигналов наводила на мысль об их искусственном происхождении (рис. 4.17). Но вскоре предположение о «маленьких зеленых человечках» было отброшено. Начались поиски естественного объекта, способного с точностью, превышающей точность лучших хронометров, посылать импульсы в мировое пространство. Высокая частота

⁸ Явление, сходное с мерцанием звезд. Мерцают только очень малые по угловым размерам («точечные») объекты (например, планеты не мерцают). Мерцания связаны с рассеянием на флуктуациях — случайных отклонениях от средних — межзвездной или межпланетной среды. По мерцаниям можно оценить угловые размеры источника или параметры среды, если источник известен.

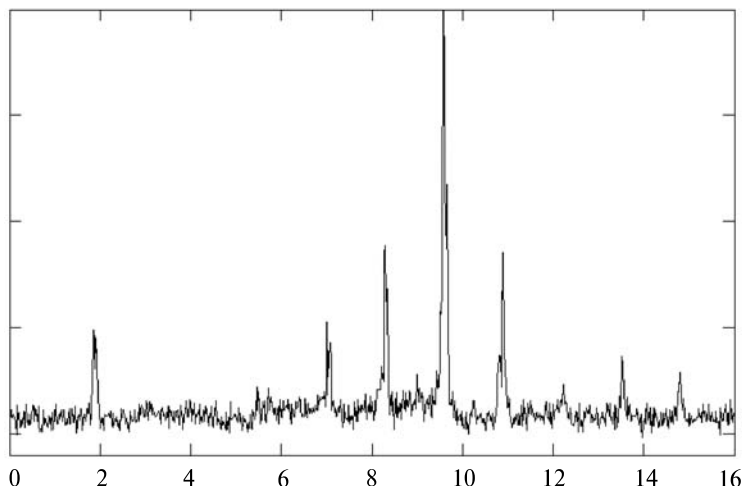


Рис. 4.17. Сигналы пульсара в дециметровом диапазоне (наблюдения на телескопе УТР-2, февраль 2000 г.). Профили импульсов PSR B0809+74, усредненные в полосе 18–30 МГц, получены в рамках международной программы исследования пульсаров при участии Радиоастрономического института НАН Украины, Института космических исследований (Грац, Австрия) и Медонского отделения Парижской обсерватории (Франция)

следования импульсов оставила лишь одну возможность: вращение компактного объекта размером около 10 км. Им могла быть только нейтронная звезда, уже давно, в 30-е годы возникшая «на кончике пера» в трудах Ландау, Бааде и Цвикки, Оппенгеймера и Волкова как результат естественной эволюции звезды с плотностью, большей, чем допустимая для белых карликов.

Для дальнейшего изложения удобно сделать небольшое отступление. Сжатие любой звезды препятствует внутреннее давление. Согласно классическому уравнению состояния давление газа пропорционально его плотности и температуре. При ограниченной плотности только высокие температуры могут обеспечить большие давления.

Однако еще в начале XX века астрономы столкнулись с явлением, которое противоречило этим физическим представлениям. В двойной системе Сириуса один из компаньонов («невидимая звезда» Бесселя, впервые заподозрившего двойственность Сириуса) оказался чрезвычайно компактным объектом. «Измерение» его плотности астрономами привело к чудовищному по тем временам значению — в триста тысяч раз превосходящему плотность недр Солнца. Сам по себе удивительный, этот факт приводил к противоречию: чтобы противостоять давлению внешних

слоев, температура в центре карликовой звезды такой плотности должна была быть неизмеримо выше той, которая следовала из наблюдений ее светимости.

Парадокс был разрешен только после создания квантовой механики. Давление в белых карликах, как стали называть такие звезды, обязано не температуре, а чисто квантовым эффектам в системе электронов.

Вспомним, что с молекулярно-кинетической точки зрения давление P в газе определяется скоростью, с которой импульс переносится частицами (через единичную площадку). Поэтому давление пропорционально характерной скорости частиц v , их импульсу p и плотности числа частиц n : $P \sim vnp$. Для классического газа характерные скорости и импульсы частиц — средние тепловые: $v \approx v_T$, $p \approx mv_T$, где $mv_T^2/2 \approx T$. Отсюда сразу же следует классическое уравнение состояния $P \sim nT$. В квантовом случае, соответствующем большим плотностям n , на каждую частицу приходится очень малый объем $a^3 \approx 1/n$. При этом согласно принципу неопределенности Гейзенберга характерный импульс частиц не меньше чем $p_F \sim \hbar/a$. Поэтому как импульсы, так и скорости частиц будут очень велики — пропорциональны $n^{1/3}$ даже при низкой температуре. Основной вклад в давление дадут не ядра, а электроны, масса которых мала (и у которых поэтому велики скорости). Это электронное давление быстро растет с ростом плотности: $P \sim v \cdot p \cdot n \propto n^{1/3} \cdot n^{1/3} \cdot n = n^{5/3}$.

Посмотрим теперь, как это квантовое давление способно противостоять силам тяготения. Если последние преобладают, то звезда сжимается и плотность ее растет. Из постоянства массы звезды следует, что радиус убывает как $n^{-1/3}$. Ньютонова гравитационная энергия единичного объема массы $\pi m_{\text{яд}}$ обратно пропорциональна ее радиусу и поэтому растет как $n \cdot n^{1/3} = n^{4/3}$. Видно, что при сжатии квантовое давление $P \sim n^{5/3}$ растет быстрее, чем ньютонова энергия. Поэтому при некоторой плотности наступит механическое равновесие и сжатие прекратится. Плотность эта пропорциональна квадрату массы звезды. Но при очень больших массах и соответственно плотностях скорости электронов возрастают настолько, что становятся близкими к предельной скорости — скорости света — и перестают расти с ростом плотности. Давление такого квантового релятивистского электронного газа $P_{\text{рел}} \sim n^{4/3}$. Видно, что давление растет при сжатии совершенно так же, как и ньютонова энергия. Плотность выпадает из условия равновесия. Это значит, что для больших плотностей равновесие уже не может быть достигнуто при любой массе. Возникает предельное значение массы (найденное Ландау и Чандрасекаром) $M_{\text{крит}} \cong 1,43 M_{\odot}$ (уточненное значение). Поэтому условие $M < M_{\text{крит}}$ обязательно для устойчивости белых карликов. Заметим, что приведенная оценка $M_{\text{крит}}$ соответствует давлению идеального газа ферми-частиц, но не зависит от их массы, т. е. для нейтронов она такая же, как для электронов.

Таким образом, в белых карликах сжатию противостоит квантовый эффект — давление вырожденного электронного газа, не исчезающее даже при абсолютном нуле температур. Но если масса больше $M_{\text{крит}}$ (либо если звезда «проскочила» положение равновесия, например из-за взрыва сверхновой, даже при меньшей массе), средние расстояния могут оказаться столь малыми, что электроны как бы «вдавливаются» в протоны. Начинается

нейтронизация вещества, сопровождающаяся сжатием до таких расстояний между нейтронами, когда уже давление вырожденного нейтронного газа останавливает коллапс. Свойства такого газа аналогичны рассмотренным выше, но в области существенно больших плотностей (10^{14} – 10^{16} г/см³). Значение критической массы (с учетом взаимодействия нейтронов) для нейтронной звезды иное, чем для белых карликов: $M_{\text{крит. нейтр.}} (0,4\text{--}3) M_{\odot}$ (в зависимости от состояния внутренних слоев).

Но хотя существование нейтронных звезд было предсказано, совершенно неожиданной оказалась возможность их наблюдения в виде пульсаров. И это несмотря на весьма проникательные заключения о быстром вращении и сильном магнитном поле нейтронных звезд и других компактных объектов, возникших в результате сжатия! Рост угловой скорости Ω — следствие закона сохранения момента; рост поля — следствие закона сохранения магнитного потока. Поскольку должно оставаться постоянным произведение поля на площадь, то при сжатии поле растет, достигая на поверхности пульсара ($R \sim 10$ км) величины $H \sim 10^{12}$ гс.

Итак, пульсары явились в лаборатории сами, без предсказаний. Излучение их в принципе было объяснено моделью «маяка» (рис. 4.18) (Голд, Пачини), прочерчивающего своим лучом просторы Галактики. Когда луч пересекает Землю, наши приборы

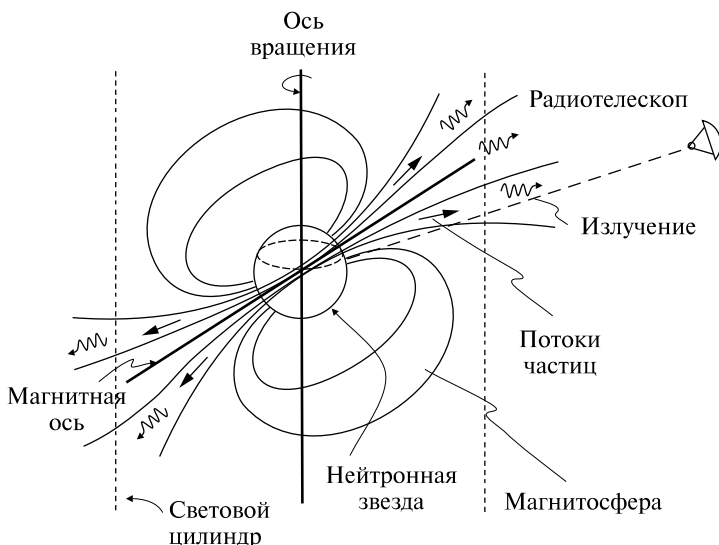


Рис. 4.18. Схема магнитосферы пульсара и модель «маяка»

отмечают импульс. При этом сам луч привязан к магнитным полюсам (или другим особым точкам) магнитосферы пульсара и порождается происходящими там процессами генерации и усиления волн. Многие детали этих процессов, порождающих радиоизлучение, неизвестны и в настоящее время. (Более просто — излучением кривизны, во многом подобным синхротронному излучению, достаточно адекватно объясняется более жесткое излучение пульсара в оптике и рентгене.) Пульсар оказался крепким орешком.

Важной характеристикой пульсаров является (рис. 4.19), наряду с периодом $\Pi = 2\pi/\Omega$, замедление его вращения $\dot{\Pi}$, которое позволяет определить их возраст. В среднем он составляет 10^6 – 10^7 лет. На плоскости $\dot{\Pi}$ (нс/сут), Π (с) экспериментальные точки, изображающие различные пульсары, группируются слева

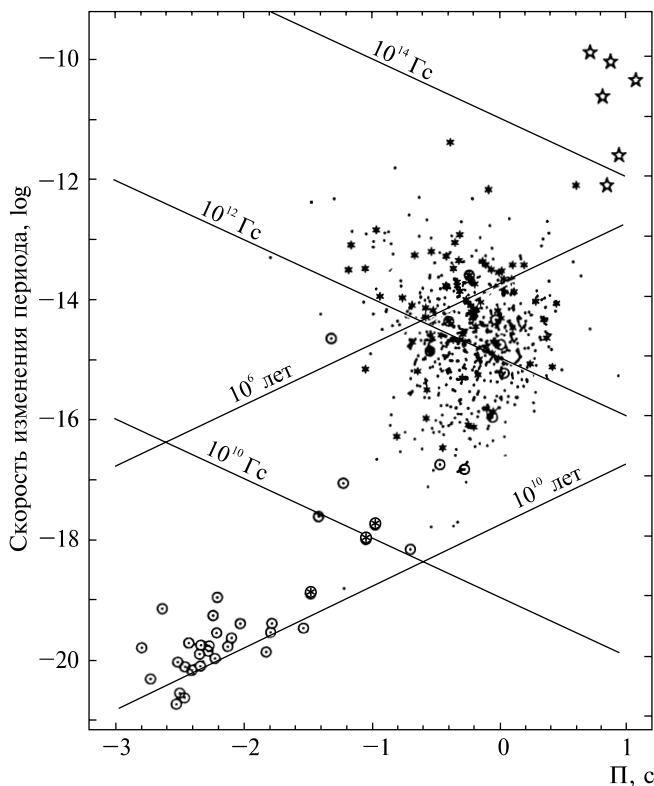


Рис. 4.19. Экспериментальные значения замедления $\dot{\Pi}$ и периода вращения Π для пульсаров: * — парковский обзор пульсаров, . — другие радиопульсары, ☆ — аномальные рентгеновские пульсары, ⊙ — двойные системы

от некоторой линии «прекращения излучения». Эта «линия смерти» отделяет полуплоскость, где «живут» пульсары, от полуплоскости, где они не встречаются. В процессе эволюции пульсары перемещаются в этой плоскости, приближаясь к «линии смерти». Вблизи от нее периоды максимальны, у пульсаров наблюдаются «замирения» — пропуски отдельных импульсов и даже целых серий, связанные, возможно, со срывами механизма генерации. Заметим, что в модели, где потери энергии пульсара связываются с магнитодипольным излучением, положение этой линии определяется величиной магнитного поля на «световом цилиндре» радиуса $r_c = c/\Omega$. Последнее может означать, что именно там формируется радиоизлучение. Впрочем, есть другие основания считать, что оно формируется, напротив, в глубине магнитосферы, либо вблизи поверхности звезды у ее магнитных полюсов.

Удивительными свойствами пульсаров являются постоянство и индивидуальность средней формы импульса (рис. 4.20), проявляющих замечательное разнообразие. Усредненный по большому числу периодов импульс как «отпечатки пальцев» характеризует каждый пульсар. Именно по этим средним импульсам

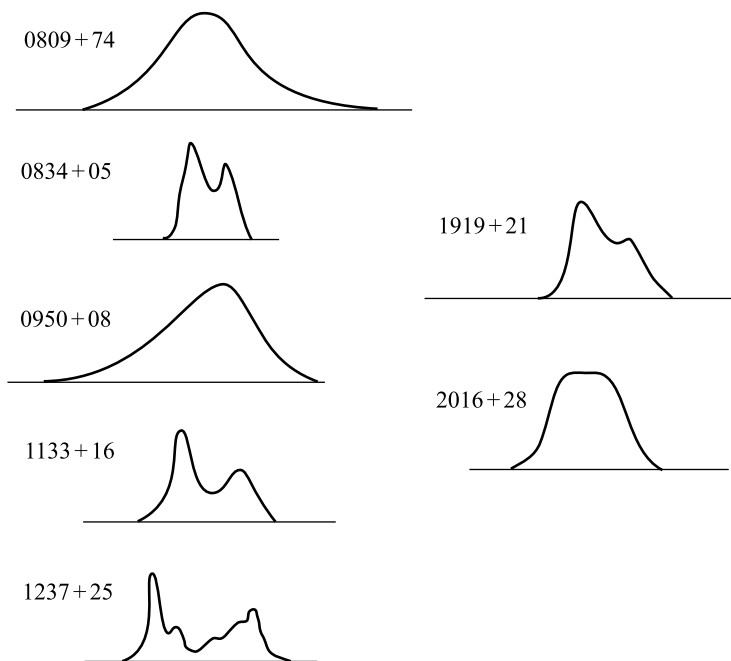


Рис. 4.20. Средние импульсы пульсаров. Приведены импульсы семи пульсаров, наблюдаемых также и в декаметровом диапазоне

фиксируются период пульсара и его изменение. При высоком временном разрешении проявляется тонкая структура импульсов некоторых пульсаров. Субимпульсы, проявляющиеся при этом, у ряда пульсаров обнаруживают регулярный дрейф, направление которого отличается у разных пульсаров. Вся картина подвержена очень сильным флуктуациям и тем не менее приводит к замечательному постоянству в средних.

Для двух пульсаров наблюдались внезапные скачки периодов (для Краба и Велы), причем в обоих случаях период уменьшался. Считают, что это результат «пульсаротрясения», связанного с разломом твердой верхней коры за счет возникновения напряжений при остывании пульсаров. Строение твердой коры может быть очень необычным по земным меркам. Из-за сверхсильного магнитного поля преобладающей симметрией «атомов» является цилиндрическая, а не сферическая, так как энергия взаимодействия электрона с полем превышает кулоновскую связь с ядром. Поэтому кора может состоять из «полимерных» цепочек, вытянутых вдоль магнитного поля.

Более глубокие (нейтронные) слои находятся в жидком и, по-видимому, сверхтекучем, а за счет примеси протонов и электронов в верхних слоях — и в сверхпроводящем состоянии. Сверхтекучесть может быть ответственна за релаксационные свойства пульсара, проявившиеся при возвращении его в обычное состояние после пульсаротрясения. Чрезвычайно интересные модельные эксперименты, проводившиеся в Институте физики АН Грузинской ССР с вращающимся сверхтекучим гелием, навеяны аналогией с пульсарами. Впрочем, вполне вероятно, что свойства сверхтекучести нейтронов скорее напоминают сверхтекучесть He^3 с ее еще более экзотическими свойствами благодаря существованию в обоих случаях магнитного момента.

Но как ни интересны недра пульсара, для радиоизлучения они вряд ли существенны. Процессы излучения происходят в магнитосфере. Первые представления о ней восходят к модели Гольдрайха и Джулиана, по существу, представляющей собой схему униполярного индуктора. Световой цилиндр разделяет силовые линии на замкнутые (внутри цилиндра) и незамкнутые, открытые, отходящие от магнитных полюсов. Предполагается, что в области замкнутых силовых линий заполняющая ее электрон-позитронная плазма вращается как целое вместе со звездой. Вращение с угловой скоростью $\Omega \approx 1$ рад/с в поле $H \approx 10^{12}$ гс индуцирует сильнейшее поперечное электрическое поле $E \approx \frac{v}{c} H \approx \frac{\Omega R}{c}$. Ему соответствует плотность заряда плаз-

мы $\rho_{GJ} = -\frac{\Omega H}{2\pi c}$, такая что дрейф заряженных частиц в скрещенных полях как раз соответствует твердотельному вращению. В области открытых силовых линий вблизи от поверхности звезды существует область, свободная от плазмы — вакуумный зазор. В нем возникает направленное вдоль магнитного поля продольное электрическое поле того же порядка величины. Это причина, по которой, как было показано Старроком, Рудерманом и Сазерлендом, в зазоре возникают (вырываясь с поверхности) заряженные частицы, которые, ускоряясь полем до ультрарелятивистских скоростей, излучают в магнитном поле жесткие гамма-кванты и, в конце концов, за счет рождения электрон-позитронных пар образуют плазму, заполняющую магнитосферу. Ускоренные в зазоре пучки являются источником индивидуального некогерентного излучения частиц, приводящего к оптическим, рентгеновским, гамма-импульсам, а коллективные процессы в пучках и порожденной ими электрон-позитронной плазме, по-видимому, ответственны за радиоизлучение. Теория еще далека от того, чтобы объяснить в деталях все свойства радиоимпульсов пульсаров, полученные к настоящему времени многочисленными измерениями, однако она интенсивно развивается. В частности, возможно, что вакуумный зазор ведет себя как резонатор, в котором раскачиваются мощнейшие электромагнитные колебания, ответственные за радиоизлучение пульсаров.

Чувствительность импульсов к свойствам межзвездной плазмы, с одной стороны, предъявляет требования к методике измерений, с другой — дает ряд уникальных возможностей для изучения самой межзвездной среды. Обычно, чтобы уменьшить роль распылывания импульса из-за дисперсии (различия скоростей распространения на разных частотах, что особенно чувствительно на самых низких частотах), излучение пульсаров принимают с помощью многоканальных узкополосных устройств. В каждой полосе частот импульс запаздывает по-своему, но если должным образом сместить времена приходов, то в суммарном сигнале в значительной мере исключается эффект дисперсии. Важную роль при этом играет строгая периодичность следования импульсов. На самых низких частотах именно это обстоятельство позволяет получить просуммированный по большому количеству импульсов сигнал пульсара, извлечь его из-под шумов.

Анализ запаздывания, поворота плоскости поляризации, линий поглощения $\lambda = 21$ см в сигналах пульсаров дает сведения прежде всего об электронной концентрации и магнитных полях, а также о свойствах поглощающих облаков H II на луче зрения.

Кстати, по запаздыванию грубо может быть оценено и расстояние до пульсаров.

Важным является распределение пульсаров в Галактике. Они тяготеют к плоскости ее диска, но благодаря большим скоростям успевают достаточно далеко от него удалиться. Сами по себе эти скорости составляют одну из загадок пульсаров. Возможно, они приобретаются при взрыве сверхновой.

Поскольку нейтронная звезда является звездным остатком сверхновой, естественно было искать пульсары именно в этих остатках. И такие поиски, как мы уже знаем, увенчались успехом. Но только в трех (или, может быть, четырех) случаях из ста. В чем же причина того, что в большинстве остатков пульсары не найдены? Во-первых, многие из них могут быть не видны на Земле из-за очень узкой — карандашной — диаграммы направленности излучения. Во-вторых, часть из них может выйти за пределы остатка за счет энергии «отдачи», полученной при взрыве сверхновой. Наконец, при ряде всплесков остатком может оказаться нейтронная звезда, не обладающая свойствами пульсара (например, нужного типа магнитосферой или значительным магнитным полем). Не исключено возникновение более массивных остатков, которые могут сколлапсировать в черные дыры. Нецентральное положение пульсара в туманности может объясняться также сплыванием самого остатка в неоднородной межзвездной среде. Словом, есть ряд возможных объяснений, но проблема остается. Любопытно, что около Краба обнаружен второй пульсар, который не имеет отношения к взрыву сверхновой 1054 г. Наличие «бездомных» пульсаров неудивительно, так как пульсар живет значительно дольше, чем туманность. Последняя должна рассеяться, а пульсар может быть еще виден.

Мир пульсаров оказался весьма разнообразным. Если типичные периоды большинства из них лежат вблизи 1 секунды, то имеется весьма представительная группа миллисекундных пульсаров и быстро вращающихся молодых пульсаров, к которым относится и знаменитый пульсар в Крабовидной туманности, а также группа пульсаров со сверхсильным (даже по пульсарным меркам) магнитным полем. Важную группу составляют рентгеновские пульсары, также связанные с нейтронными звездами, но в двойных системах. Указанные группы достаточно четко обособлены на плоскости период–скорость изменения периода (рис. 4.19).

Заметим, что, хотя излучение радиопульсаров в оптике и рентгене в принципе получило достаточно ясное объяснение (это излучение «кривизны», возникающее из-за движения ультрарелятивистских электронов (и позитронов) вдоль искривлен-

ных линий магнитного поля звезды), радиоизлучение до сих пор является предметом споров и областью догадок. Ясно только, что это так называемый «когерентный» механизм, когда излучают не отдельные частицы, а целые коллективы. Форма импульса отчасти отражает структуру излучающей области. Двугорбая форма импульса хорошо согласуется с моделью полого конуса излучения, соответствующего пучку открытых силовых линий магнитного поля в области магнитных полюсов пульсара. Луч зрения «прокалывает» этот конус в разных пульсарах по-разному, что приводит к большому разнообразию и, в конце концов, к индивидуальности пульсаров, четко различающихся по форме импульсов. Возможно также излучение вдоль магнитной оси (за счет уже другого, возможно, пучково-плазменного механизма), еще более усложняющее картину импульса.

Хотя значительное число звезд в Галактике входит в кратные, например двойные, системы, большинство оптических и радиопульсаров одиноки.⁹

Крупнейшим общенаучным результатом исследования пульсаров за последнее двадцатилетие является открытие и изучение двойных пульсаров. Первый пульсар, входящий в двойную систему, открыт Р. Халсом и Дж. Тэйлором в 1974 г. Удивительно само существование подобной двойной системы, так как нейтронные звезды возникают в результате сильнейших взрывов, и, казалось, должны были бы вследствие этого разлетаться. Но еще более замечательной оказалась динамика этой системы. Измеренное Халсом и Тэйлором смещение со временем периастра (аналог перигея для земной орбиты) с высокой точностью укладывается на зависимость, следующую из общей теории относительности Эйнштейна благодаря потерям на излучение гравитационных эйнштейновских волн¹⁰. Это первое надежное, хотя и косвенное подтверждение их существования.

⁹ Напротив, рентгеновские пульсары — типично двойные объекты. Они «светят» благодаря сопровождающемуся разогревом перетеканию вещества с одной звезды на другую в тесной двойной системе.

¹⁰ Эти предсказанные А. Эйнштейном волны переносят гравитацию (или, что то же, кривизну пространства-времени) совершенно подобно тому, как электромагнитные волны переносят электрическое и магнитное поля. В отличие от последних, их еще никто не наблюдал. Антенны для таких волн еще только строятся и представляют собой исключительно дорогие, насыщенные современной электроникой и лазерной техникой сооружения. Наблюдения Халса и Тейлора были первым надежным указанием (хотя и косвенным) на существование таких волн, а значит, и подтверждением верности всей теории, являющейся в настоящее время основой современного научного мировоззрения.

К моменту, когда пишутся эти строки, уже известно 6 таких двойных систем. Открытая в самое последнее время подобная двойная система (в хвосте Большого Пса), где обе нейтронных звезды оказались пульсарами (первым в этой паре был открыт пульсар PSR 0737–3039 с интервалами между вспышками 1/45 секунды), обещает быть еще лучшей релятивистской лабораторией: расстояние между нейтронными звездами в ней всего лишь вдвое превышает расстояние от Земли до Луны. В этой системе звезды приближаются друг к другу, двигаясь по спирали со скоростью около 20 м/год, в то время как для пульсара Халса–Тэйлора эта скорость была «всего лишь» 3 м/год. Через 85 млн лет нейтронные звезды сольются, по-видимому, образовав черную дыру. Эту катастрофу будет сопровождать не только мощный всплеск жесткого излучения (гамма-всплеск), но и всплеск эйнштейновского гравитационного излучения. Гравитационные волны, подобно электромагнитным, способны отрываться от породивших их источников и существовать самостоятельно, распространяясь со скоростью света в виде изменений метрики (локальной геометрии) пространства–времени. В свое время они заполняли горячую Вселенную подобно излучению (см. гл. 6). В современную эпоху такие волны, порождаемые движениями масс, изменяющими их конфигурацию, должны возникать при многих экстремальных явлениях (например, взрывах сверхновых, коллапсе звезд, образовании черных дыр и т. п.) в Галактике. Но методы их наблюдения только разрабатываются, и еще никому не удалось их «увидеть» и «записать». Оценка частоты встречаемости в Галактике (вероятности) подобных процессов вдохновляет на освоение этого нового типа и диапазона волн, которые смогут быть зарегистрированы уже в ближайшие несколько лет строящимися гравитационно-волновыми детекторами.

Особую популяцию составляют рентгеновские пульсары. Они возникают в тесных двойных системах, где один из компаньонов является компактным объектом, в частности нейтронной звездой, а другой — обычной звездой на поздней стадии эволюции, когда она расширилась настолько, что ее вещество перетекает на перетягивающего его соседа. Это перетекание осуществляется через точку Лагранжа, где силы притяжения к обоим звездам равны. Струя вещества, попадая на поверхность нейтронной звезды, раскаляет место падения, которое становится источником рентгеновского излучения. Из-за вращения это «горячее пятно» излучения появляется строго периодически в поле «зрения» рентгеновских телескопов, образуя феномен пульсара.

Богатейшая область исследования тесных двойных систем интересна еще и потому, что в роли компактного объекта может выступать и «черная дыра». Отсутствие физической поверхности в этом случае приводит к совершенно иной картине явлений и излучения. Именно в тесных двойных системах определены претенденты на «звание» черной дыры. Кроме того, эволюция звезд в тесных двойных системах протекает весьма особым и драматическим образом. Перетекание вещества приводит к превышению критической массы и взрыву одного из компаньонов. В результате таких взрывов и может возникнуть компактный объект. Какая-то доля двойных систем при этом не распадается и эволюция в новых условиях приобретает новые черты. По-видимому, именно тесные двойные с белым карликом в качестве одного из компаньонов являются предшественниками сверхновых типа Ia. Эти сверхновые представляют собой популяцию с одной и той же энергией, выделяющейся при взрыве и играющей, таким образом, роль «стандартной свечи». Видимая с космологических расстояний, эта свеча привела к революционному открытию ускоренного расширения Вселенной (см. гл. 6).

Приведем ссылку на постоянно обновляющийся каталог Jodrell Bank (Тэйлор, Манчестер и Лейн): 558 пульсаров, координаты, плотности потоков, параметры импульсов, собственные движения, расстояния (<ftp://pulsar.princeton.edu/pub/catalog>).

МИКРОКВАЗАРЫ

Замечательным достижением явилось открытие Ф. Мирабелем и И. Родригесом микроквazarов в нашей Галактике. Так же как и в квазарах, в этих звездных объектах формируются видимые в радиодиапазоне струи (джеты), причем в некоторых из них наблюдаются сверхсветовые движения. Так же как и в квазарах, выбросы формируются в аккреционных дисках возле компактного объекта (в данном случае, нейтронной звезды или черной дыры звездных масштабов). Сам аккреционный диск образуется при перетекании вещества от одного компаньона к другому в тесных двойных системах. К микроквazarам сейчас принято причислять и уже давно исследуемый экзотический объект SS433, в котором струи прецессируют, а ускорение, возможно, происходит в линиях за счет лучистого давления.

Эти «игрушечные» квазары (их уже открыто более десятка) могут оказать неоценимые услуги при распутывании сложной «квazarной» физики. Ведь все процессы в них протекают значительно быстрее, а сами они расположены значительно ближе

от нас. Уже обнаружены интереснейшие смены режимов радио и рентгеновского излучения в микровкварах. В настоящих кварах такие процессы могут занять тысячи и десятки тысяч лет.

ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ

Идея активности ядер галактик, совершенно новая для классической астрономии, но подтверждаемая открытиями последних десятилетий и питаемая зачастую почти фантастическими гипотезами, не могла не возродить интереса и к ядру нашей звездной системы — Галактики.

Еще Шепли, исследуя распределение шаровых скоплений, указал на существование массивного ядра Галактики в направлении на созвездие Стрельца, концентрирующего, как теперь считают, до 5 % общей массы Галактики и удаленного от Солнца на 10 тыс. пк. К сожалению, эта область скрыта гигантскими пылевыми облаками в созвездии Стрельца и практически недоступна оптическим наблюдениям. Ситуация представлялась безнадёжной, типа «никогда не узнаем...». Между тем были подозрения, что чрезвычайно яркое облако в Стрельце к югу от плоскости Галактики представляет собой часть звездного ядра, закрытого пылью. Мы не имеем возможности касаться здесь остроумных и тонких оптических методов, с помощью которых астрономы пытались пробраться через пылевую завесу. Положение изменилось только с появлением современных неоптических методов, главным образом инфракрасной (ИК) и радиоастрономии. Для этих длинноволновых диапазонов поглощение и рассеяние пылью мало, облака прозрачны — и загадочная центральная область доступна исследованию (рис. 4.21).

Уже первые наблюдения К. Янского свидетельствовали о существовании сильного радиоизлучения из области Галактического Центра, а в 1951 г. Пиддингтон и Миннет открыли там мощный дискретный источник нетеплового радиоизлучения — Стрелец А (рис. 4.22).

Но остановимся вначале на звездной составляющей ядра. Здесь ранние предположения подтвердились. Снимки в ИК-лучах, которые впервые удалось выполнить советским астрофизикам В. И. Красовскому, В. Б. Никонову, А. А. Калиняку в 1949–1950 г. с помощью электронно-оптического преобразователя, показали, что оба облака в Стрельце — видимое (южное) и невидимое (северное) — образуют единое эллиптическое ядро размером $4,8 \times 3,1$ кпк, разделенное мощной пылевой полосой

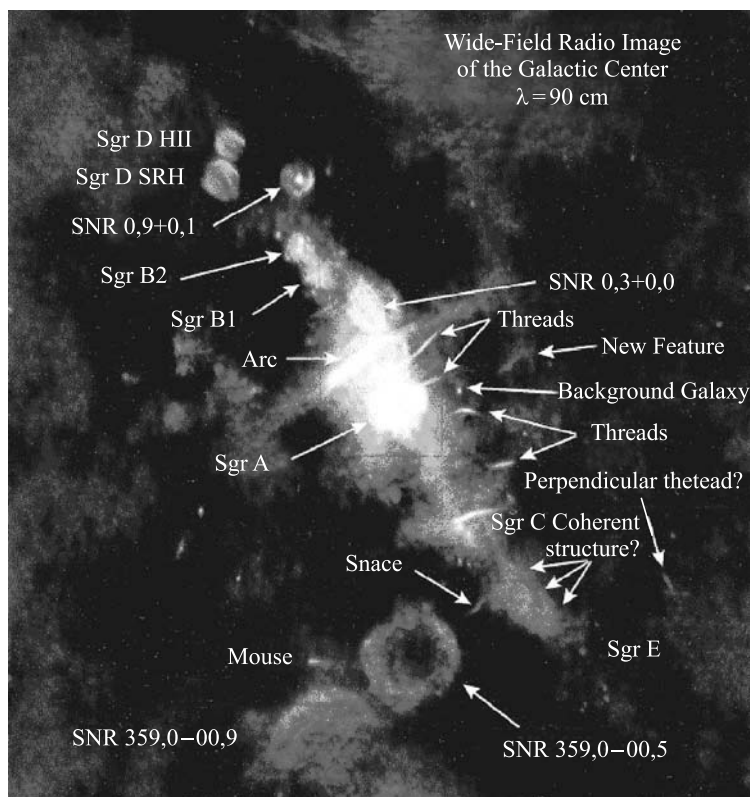


Рис. 4.21. Область Центра Галактики на длине волны 90 см

и напоминающее аналогичные области в спиральных галактиках типа Sd или Sbc.

Более детальные исследования, проводимые с использованием все более высоких разрешений, позволили шаг за шагом воссоздать сложную картину строения Центра Галактики. По измерениям в ИК диапазоне на длинах волн 2–20 мкм, как можно было ожидать по аналогии с ядром туманности Андромеды, удалось обнаружить малое эллиптическое звездное ядро размером 15–30 пк. Из анализа спектра следовало, что в нем преобладают красные гиганты и богатые металлами звезды поздних спектральных классов.

Однако дальнейшие исследования ядра начали приносить неожиданные результаты. Радиоастрономические данные по измерениям в линиях $\lambda = 21$ см нейтрального водорода показали, что на расстояниях 3 кпк от центра есть расширяющийся спи-

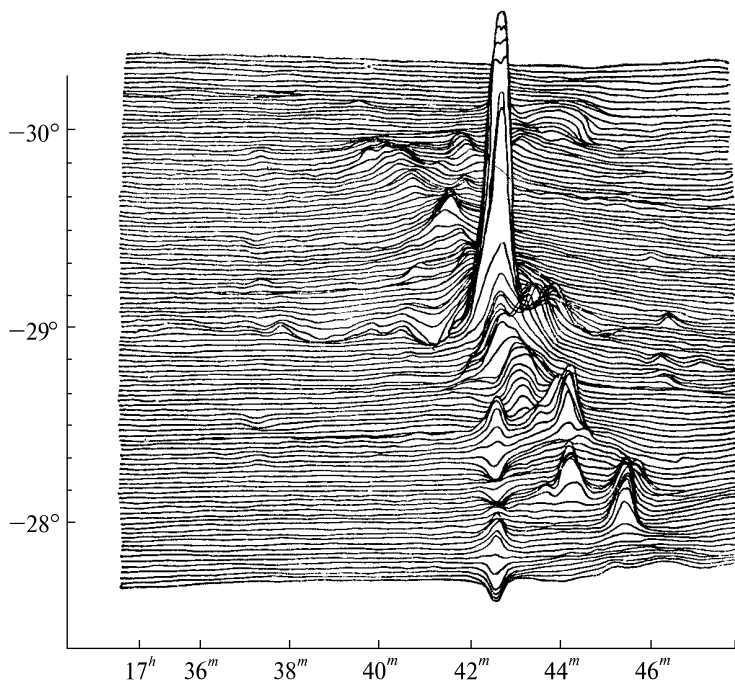


Рис. 4.22. Источники радиоизлучения в области Центра Галактики

ральный рукав, по которому газ движется от центра в направлении Солнца со скоростью 50 км/с, а в обратном направлении — по другой, хуже прослеживаемой ветви, со скоростью 135 км/с. В этом и подобных образованиях сосредоточен газ массой около миллиона масс Солнца, причем много элементов движется под углом к галактической плоскости. Аналогичные явления (выброс вещества, истечение из центра) известны для многих галактик и обычно сопровождаются их активностью и связаны со взрывами в ядрах либо с выделением энергии при аккреции — более или менее регулярным падением вещества на центр. В связи с этим и некоторыми другими данными (об отдельных из них сейчас пойдет речь) Оорт высказал предположение о взрывной активности ядра Галактики. Впрочем, сейчас считают, что происхождение трехкилопарсекового рукава (рис. 4.23) связано с резонансными явлениями и не имеет взрывной природы.

В дальнейшем измерения на $\lambda = 21$ см позволили обнаружить тонкий быстро вращающийся газовый диск с радиусом около 800 пк, по-видимому, соединенный с трехкилопарсековым рукавом перемычкой. Возможно, что диск несколько наклонен

к галактической плоскости, как бы подчеркивая автономность центральной области ядра.

Как уже писалось выше, Центр Галактики отличается исключительным богатством молекулярных радиолиний. Молекулярные облака расположены в области 300 пк от центра и совершают относительно медленные движения. Выделяется вращающееся и расширяющееся со скоростью 150 км/с кольцо молекулярных облаков радиусом 190 пк. Гигантское молекулярное облако, по-видимому, совсем недавнего происхождения, расположено в непосредственной близости от Центра и движется со скоростью 40 км/с. Общая масса облаков составляет около ста миллионов масс Солнца.

Были обнаружены также в зоне радиуса 40–50 пк горячие области ионизованного водорода, представляющие собой тепловые ИК-источники, невидимые в оптике лишь из-за мощного поглощения пылью. Таков, в частности, источник Стрелец В (рис. 4.24).

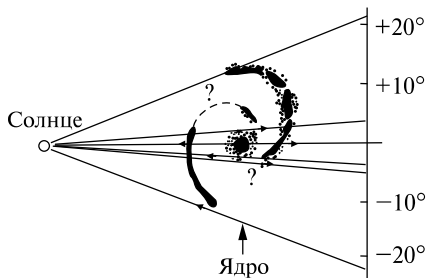


Рис. 4.23. Расширяющийся спиральный (трехкилопарсекковый) рукав (по Ругору и Оорту)

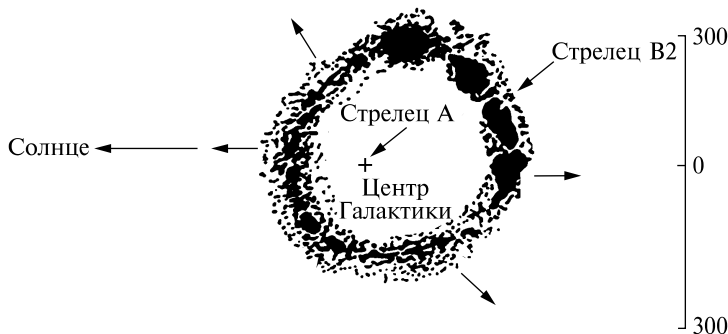


Рис. 4.24. Расширяющееся от Центра кольцо молекулярных облаков (по Р. Сковиллу)

В результате кропотливых исследований были построены карты радио- и ИК-источников в области Центра.

Для того чтобы проникнуть непосредственно в окрестность Центра, были использованы измерения на интерферометрах со

сверхдлинными базами. Но для дальнейшего проникновения в центральную область потребуются уже космические интерферометры. Еще раньше Даунс и Мартин на Кембриджском одномильном радиотелескопе установили, что Стрелец А содержит нетепловую восточную и тепловую западную компоненты, совпадающие с Центром. В этом источнике в 1974 г. Бэлик и Браун с помощью 35-километрового интерферометра НРАО обнаружили локальный нетепловой источник размером менее $0,1''$. Разрешение в $0,02''$ на волне $3,7$ см с использованием сверхдлинной базы между 40-метровым радиотелескопом в Оуэнс-Вэлли и 64-метровой антенной НАСА в Калифорнии позволило Ло, Шилици, Коэну и Россу в 1976 г. измерить от него поток, равный $0,6 \pm 0,1$ янских, и яркостную температуру, превышающую 300 млн градусов. Наконец, рекордные измерения группы Келлермана в 1977 г. с использованием трех антенн в Вестфорде (37 м), Грин-Бэнк (43 м) и той же антенны НАСА позволили достичь разрешения в семь десятитысячных угловой секунды дуги и выделить ядрышко размером менее одной тысячной секунды (десять астрономических единиц!), в котором сосредоточена четверть всего потока локального источника (что соответствует светимости, в сотню раз большей, чем у мощнейших квазаров), и «гало» — внешнюю корону размером в сотую секунды (170 а.е.). Этот поразительный результат может означать, что в ядре Галактики (рис. 4.25) есть компактный источник той же природы, что и в ядрах активных галактик или в квазарах. В частности, таким источником может служить массивная черная дыра (как это предполагали Линден-Белл и Керр, Шкловский), приводящая за счет аккреции к интенсивному энерговыделению и взрывной активности. В пользу концентрации чрезвычайно большой массы $8 \cdot 10^6 M_{\odot}$ в радиусе $0,5$ пк от Центра говорят результаты, полученные коллективом американских ученых во главе с Ч. Таунсом. Лэси, Баас, Таунс и Гебалле наблюдали ИК-излучение в линиях неона на длине волны $\lambda = 12,7$ мк с разрешением в $20''$ в фокусе 2,5-метрового телескопа обсерватории Лас-Кампанас в Чили и обнаружили быстро движущиеся сильно турбулизированные облака ионизованного водорода. Это позволило определить центральную массу. При этом ось вращения системы облаков оказалась наклоненной к оси вращения Галактики под углом $60-90^\circ$.

Подобная картина (также в масштабах парсека) была обнаружена незадолго до этого у туманности Андромеды. Соответствующего углового разрешения $0,2''$ Лайту, Даниэльсону и М. Шварцшильду удалось добиться, поднимая аппаратуру на

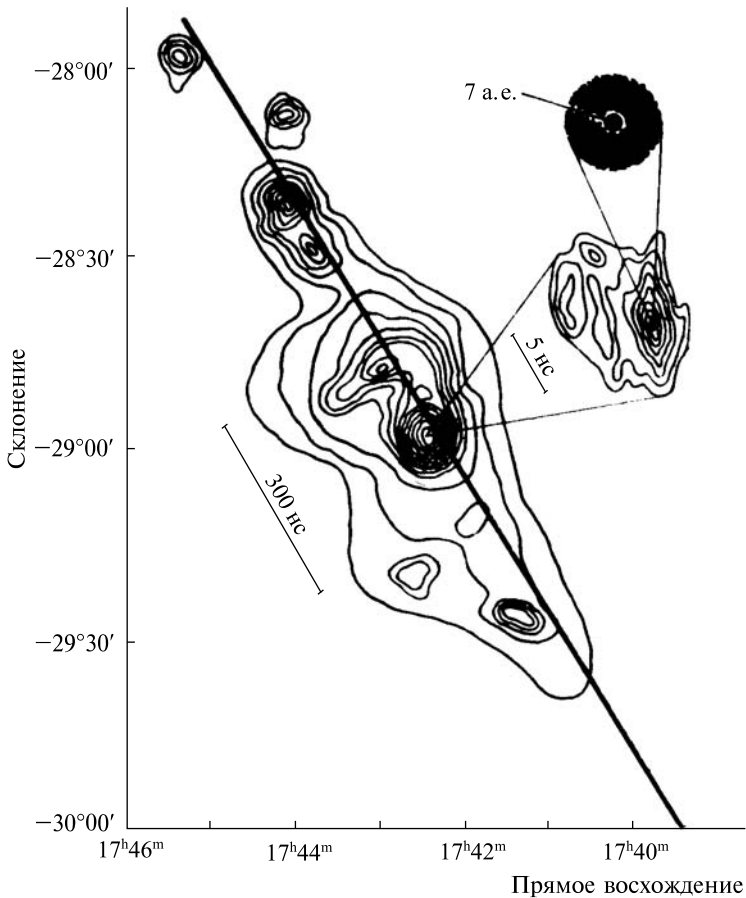


Рис. 4.25. Радиокарта Центра Галактики (по К. Келлерману)

аэростатах в стратосферу. Дальнейшие исследования используют самую современную наземную и космическую технику.

Приведем иерархию объектов вокруг ЦГ, схематически изображенную на рис. 4.26, взятом из статьи Н. С. Кардашева.

В иерархии объектов (рис. 4.27) последние два, видимо, «самые главные». Где-то здесь находится динамический центр, возможно черная дыра с массой $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

Подтверждение того, что радиоисточник Sgr A* является динамическим центром Галактики, получено прецизионными многолетними (проводящимися уже более десяти лет) наблюдениями

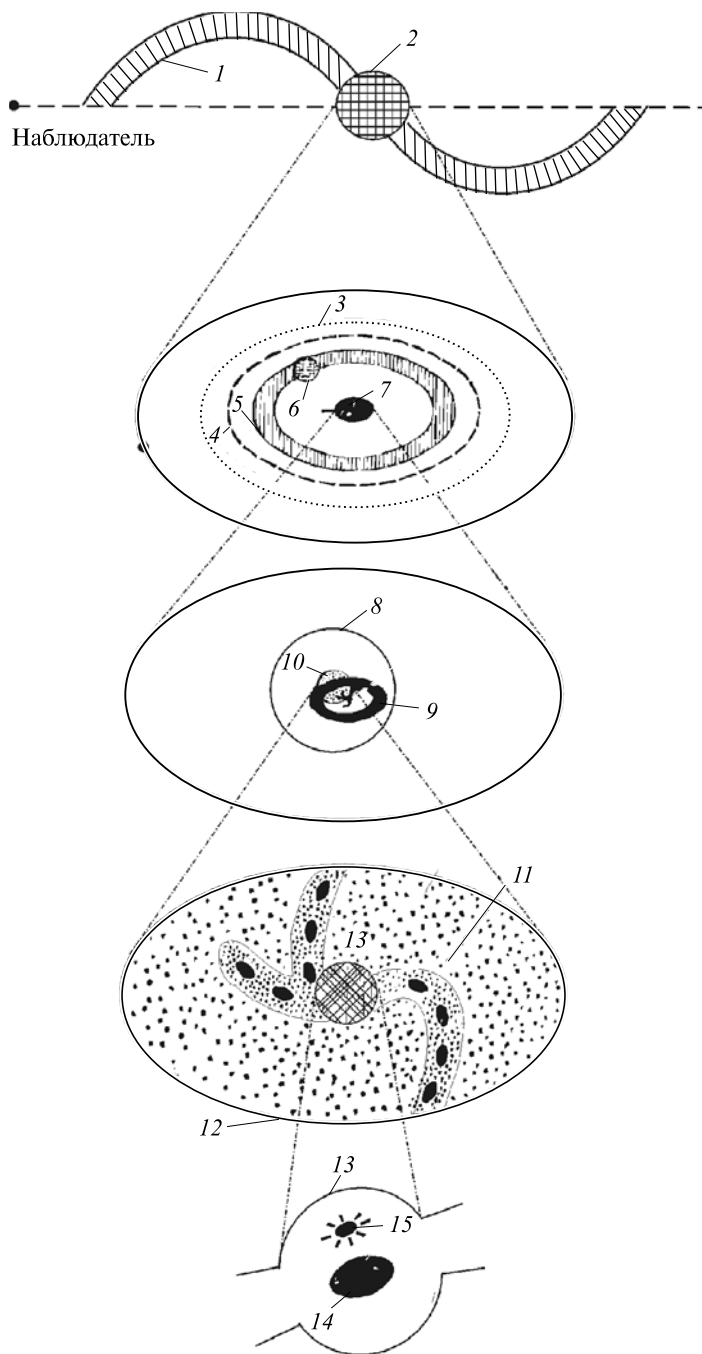


Рис. 4.26. Иерархия структур в районе Центра Галактики (по Н. С. Кардашеву): 1 — «трехкилопарсековые» спиральные рукава, вращающиеся и удаляющиеся от ЦГ; 2 — центральное звездное скопление в виде эллипсоида вращения с круто растущей концентрацией к центру радиусом 700 пк (4°) и массой около $10^{10} M_\odot$; 3 — вращающийся молекулярный газовый диск с массой около $10^8 M_\odot$ (4°); 4 — граница области возникновения молодых звезд с радиусом 350 пк (2°); 5 — вращающееся и расширяющееся молекулярное кольцо с радиусом 190 пк (1°); 6 — крупнейшее в галактике компактное образование из газа, пыли и молодых звезд (Sgr B2) на расстоянии 120 пк от центра с массой $3 \cdot 10 M_\odot$; 7 — район повышенного рентгеновского излучения; 8 — центральное пылевое облако радиусом 14 пк ($5'$); 9 — пылевое кольцо радиусом 1,6 пк ($0,5'$); 10 — Sgr A (East) — оболочка сверхновой. Расстояние от центра 2,5 пк ($50''$); 11 — Sgr A (West) — район высокого темпа звездообразования ($2 \times 3,6$ пк, $40'' \times 75''$), являющийся также источником синхротронного излучения на электронах, поставляемых центральным объектом. Содержит семь молодых звезд высокой светимости — красных гигантов, которых во всей Галактике меньше 80; 12 — ядерная спиральная структура ($1,2 \times 3$ пк, $25'' \times 60''$), состоящая из трех (?) рукавов ионизованного газа. Есть точка зрения (А. М. Фридман), что спираль однорукавная. Неясно, газ вытекает или втекает в ЦГ; 13 — центр симметрии спирального узора; 14 — Центральная перемычка ($0,3 \times 0,7$ пк, $6'' \times 14''$); 15 — Sgr A*

в инфракрасном диапазоне за движением полутора десятка звезд в непосредственной близости от него. Эти наблюдения ведутся с помощью 3,5-метрового телескопа NTT, 10-метрового телескопа Кек на Гавайях и 8-метровых телескопов VLT в Атакеме. В оболочках некоторых ИК-звезд из ближайшего звездного окружения Sgr A* наблюдается мазерное излучение окиси кремния, что позволяет уточнять координаты объектов. Движение звезд оказалось идеально кеплеровским (они описывают эллипсы) в поле чрезвычайно компактной центральной массы $3,6 \cdot 10^6 M_\odot$ (рис. 4.28). Это серьезный аргумент в пользу существования сверхмассивной черной дыры в Центре Галактики.

Обнаружение инфракрасных вспышек излучения с периодом 17 минут при времени нарастания 5 минут, по-видимому, означает, что наблюдались события на ближайшей к Центру устойчивой орбите вокруг черной дыры. В свое время работавший во Львове замечательный астрофизик С. А. Каплан доказал, что для невращающейся шварцшильдовской черной дыры радиус такой орбиты равен трем гравитационным радиусам. Наблюдаемый период для данной массы возможен лишь при вращении черной дыры. Такие дыры, называемые Керровскими, характеризуются, наряду с массой, своим угловым моментом. Момент вращения нашей черной дыры должен составлять половину от максимально возможного при данной массе (см. подробнее гл. 6).

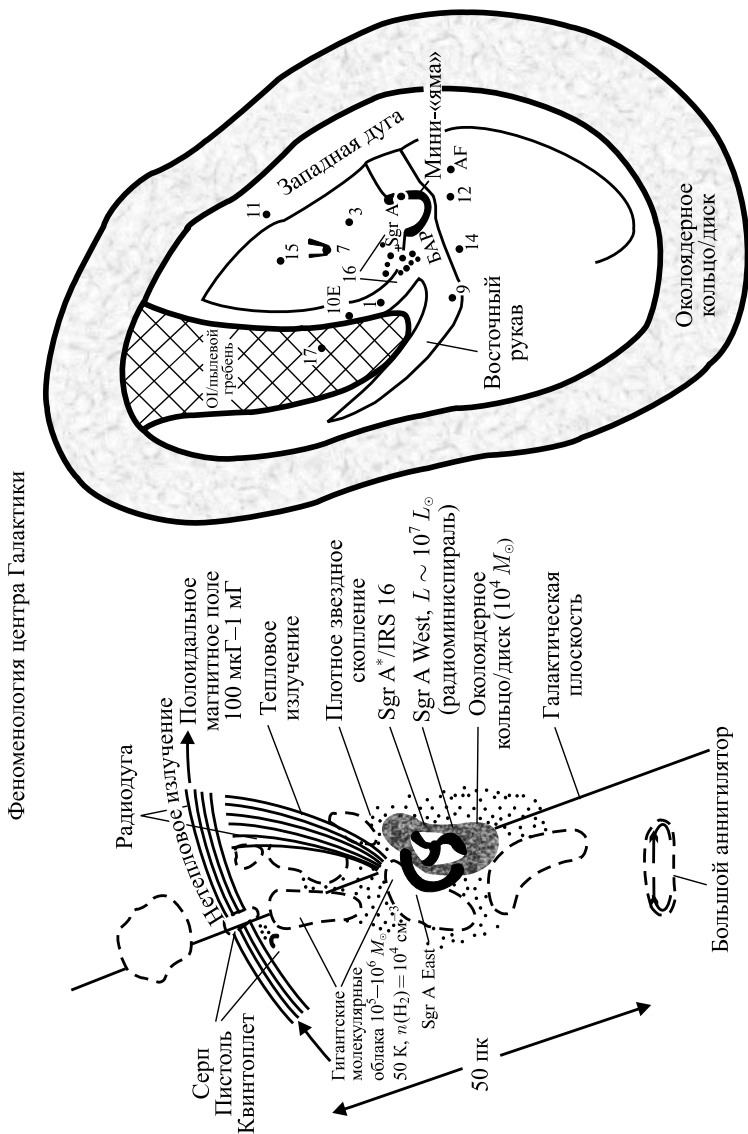


Рис. 4.27. Феноменология Центра Галактики (по Юсуф-Заде)

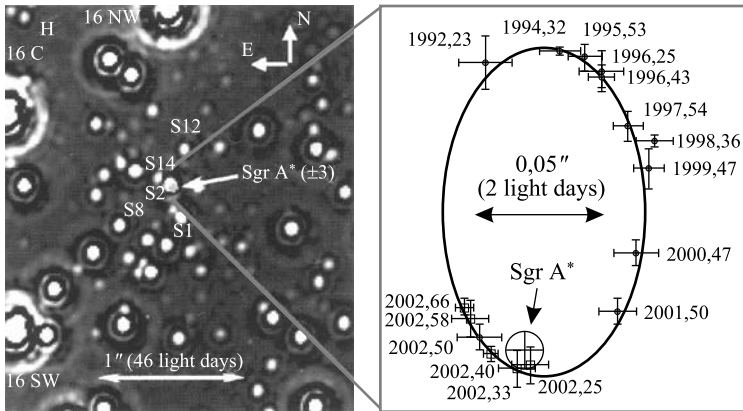


Рис. 4.28. Траектория одной из гигантских звезд вблизи от динамического центра Галактики, ИК-диапазон, 10-метровый телескоп, Южная Европейская обсерватория

Труднейшие и увлекательные исследования Центра Галактики и центров ближайших галактик продолжают. Они касаются проблем, от решения которых зависит понимание самых грандиозных явлений в звездной Вселенной.

Общая причина особого поведения ядер галактик, скорее всего, связана с действием сил тяготения, приводящих к интенсивному превращению и выделению энергии за счет аккреции, разрушения звезд и других явлений, возникающих вблизи центра притяжения больших масс вещества.

Вопрос об исключительной роли ядер галактик и их активности был поставлен известным советским астрофизиком В. А. Амбарцумяном, который придерживался особой точки зрения на природу активности, считая, что к ядрам галактик могут быть неприменимы известные законы физики.

Глава 5

ДРУГИЕ МИРЫ

Уже в первой половине XX века было установлено, что в видимой Вселенной, кроме нашей, существует еще много других галактик, совокупность которых называют Метагалактикой. Для того чтобы представить соотношение Галактики и Метагалактики, воспользуемся численным примером, приведенным английским астрономом А. Эддингтоном в его книге «Расширяющаяся Вселенная»: «Одна Галактика — это сто миллиардов звезд, Вселенная — это сто миллиардов галактик».

Хотя эти слова были произнесены более полувека тому назад, статистические исследования, проведенные астрономами, подтверждают их и в наше время. Не удивительно, что и многие радиоастрономы заняты изучением космических объектов внегалактической природы. Видимая материя во Вселенной распределена неравномерно. Большая часть ее сконцентрирована в звездах. Больше половины звезд — двойные объекты, значительная часть наблюдается в звездных скоплениях. В еще больших масштабах звезды собраны в галактиках, которые также, в свою очередь, образуют скопления. На масштабах порядка пятидесяти мегапарсек проявляется ячеистая, крупномасштабная структура Вселенной. Пустоты («войды») разделены относительно тонкими стенками, в которых сосредоточены галактики и их скопления. Кроме 2-мерных стенок, иногда классифицируемых как сверхскопления, в изобилии наблюдаются одномерные «филаменты». Войды отличаются не отсутствием вещества, а отсутствием ярких массивных объектов. Наконец, в еще больших масштабах, измеряемых в тысячах Мпк, во всех направлениях скопления видны вплоть до пределов, доступных самым крупным телескопам, причем средняя плотность этих объектов неизменна. Это позволяет утверждать, что в самых больших масштабах Вселенная однородна.

Наиболее близкими к нам галактиками являются Магеллановы Облака, находящиеся на расстоянии 70 кпк. Наиболее далекие галактики, которые сейчас научились наблюдать (прав-

да, через гравитационные линзы), расположены при красных смещениях $z \geq 7$. Рекорд — галактика с $z \approx 7,6$, обнаруженная космическим инфракрасным телескопом SPITZER с помощью как инфракрасного, так и оптического телескопов HST (рис. 5.1).

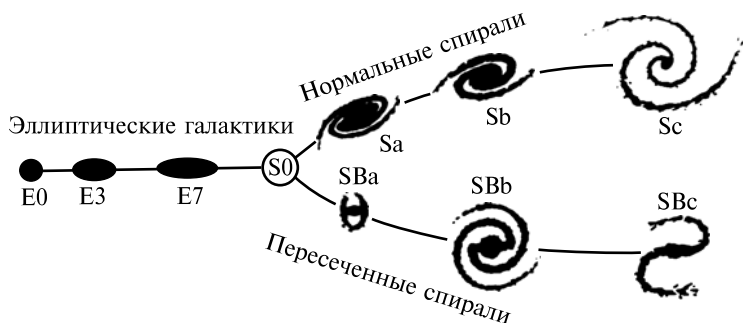


Рис. 5.1. Типы галактик («камертон» Э. Хаббла). Классификация справедлива вплоть до $z \leq 0,5$, при $z \geq 1$ появляются иные морфологические типы, возрастает число взаимодействующих галактик, видны следы происходящей эволюции

Кроме звезд и пыли, в галактиках содержится газ. Количество газа в разных галактиках различное. Так, в эллиптических галактиках его меньше 0,1% их массы, в других типах оно может достигать 10–15%. Около 70% массы газа составляет водород и около 30% — гелий. Галактики могут очень сильно отличаться друг от друга по массе: от 10^8 до $10^{13} M_{\odot}$. Самые легкие карликовые галактики приближаются по массам к шаровым скоплениям (10^6 – $10^7 M_{\odot}$). Последние измерения столь слабых объектов показали, что число их непропорционально велико. Возможно, в них заключена значительная часть всей барионной массы Вселенной. Наша Галактика, хотя она и не является рекордной по массе, достаточно «весомая» — около $10^{11} M_{\odot}$. Светимость галактик пропорциональна их массе, зависит от их типа и также изменяется в широких пределах по абсолютным величинам от -24^m (яркие сверхгиганты с массой $10^{13} M_{\odot}$) до -8^m (пигмеи с массой $10^6 M_{\odot}$). Наша Галактика имеет светимость -20^m (яркий гигант).

Большая часть галактик входит в скопления. Так называемые регулярные скопления содержат до 10 тыс. галактик. Для них характерна сферическая симметрия, и плотность галактик в них убывает от центра вдоль радиуса скопления. Наиболее яркие галактики такого скопления относятся к типам E и SO.

Часто в центре скопления находятся одна или две сД-галактики, которые представляют собой наиболее яркие (одну или две) эллиптические галактики, окруженные протяженной короной, — гало. Регулярным скоплением является, например, скопление, расположенное в созвездии Волосы Вероники (Coma). Нерегулярные скопления часто состоят из отдельных сгущений и имеют несферическую форму. Примером может служить скопление в созвездии Девы (Virgo), в котором находится около тысячи галактик. Размеры скопления в Волосах Вероники — около 4 Мпк, а скопления в Деве — около 3 Мпк.

Одной из наиболее сложных в астрономии является проблема определения расстояний. Для этой цели используется целый ряд методов — начиная от триангуляции, где в качестве базы используется орбита, по которой движется Земля вокруг Солнца, и кончая законом Хаббла, связывающим расстояние с красным смещением. В промежутке между этими крайними методами для измерения расстояний используются в качестве «стандартной свечи» цефеиды (у которых период пульсаций зависит от блеска), новые звезды с постоянным блеском, сверхгиганты, ярчайшие звезды в скоплениях звезд и ярчайшие галактики в скоплениях. Чем дальше от нас, тем менее точными становятся эти методы. Открытие в последние годы новой «стандартной свечи», видимой с больших расстояний, — сверхновых типа Ia — сыграло революционную роль: позволило уточнить закон расширения Вселенной и выяснить антигравитирующую роль вакуума (см. гл. 6). Пользуясь шкалами расстояний для близких звезд и галактик, Хаббл установил в 1929 г. пропорциональность между расстоянием r до галактик и красным смещением $z = \Delta\lambda/\lambda$ их спектральных линий по отношению к земным измерениям:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = H \frac{r}{c}.$$

Здесь c — скорость света, а H — постоянная Хаббла, которая в настоящее время принимается равной примерно $70 \text{ (км/с)} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, или $2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Формула пригодна при z , лежащих в пределах $3 \cdot 10^{-3} < z < 1$. При $z < 3 \cdot 10^{-5}$ это соотношение выполняется плохо, что связано с наличием собственных скоростей галактик, а при $z > 1$ нужно, в зависимости от модели Вселенной, использовать более сложные формулы. Как следует из приведенной формулы, закон Хаббла можно трактовать, используя принцип Допплера, так как космические тела, удаляющиеся со скоростью $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$, приведут

к аналогичному смещению спектральных линий. Таким образом, можно на основании закона Хаббла говорить об увеличении с течением времени расстояний между галактиками. В своей общей форме закон Хаббла состоит в установленной им связи между скоростью удаления галактик v и расстоянием $v = H \cdot r$, и применим в случае однородной Вселенной при любых красных смещениях. В настоящее время у ряда галактик и других космических объектов измерены красные смещения, величины которых изменяются в пределах от 10^{-4} до 7,6 (рекордное значение!).

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ, ИЗЛУЧАЮЩИЕ РАДИОВОЛНЫ

Оказалось, что многие галактики являются источниками радиоизлучения. Обычно такие галактики делят на две большие группы; нормальные и радиогалактики. Нормальные галактики излучают в радиодиапазоне мощность порядка 10^{30} – 10^{32} Вт, а мощность, излучаемая радиогалактиками, 10^{35} – 10^{38} Вт. В свою очередь радиогалактики делятся на менее мощные яркие к центру FR-I и более мощные яркие к краю FR-II. У них существенно отличается пространственная структура. Примерами нормальных галактик являются наша Галактика, Туманность Андромеды. К радиогалактикам относятся самый яркий внегалактический дискретный источник радиоизлучения Лебедь А, находящийся на расстоянии 170 Мпк; уже упоминавшийся нами источник Центавр А. (Первый из них является примером FR-II, второй — FR-I.) В то время как мощности излучения нормальных и радиогалактик на радиоволнах сильно отличаются друг от друга, на оптических волнах мощность этих объектов примерно одинакова и составляет около 10^{37} Вт.

Радиоволны излучают также галактики с активными ядрами (АГЯ) и квазизвездные объекты — квазары, об уникальных свойствах которых мы еще расскажем. У галактик с активными ядрами, наиболее распространенным примером которых являются сейфертовские галактики, почти все излучение в оптическом диапазоне частот исходит из компактного ядра, богатого эмиссионными линиями, в то время как квазары вообще имеют вид точечных, не разрешаемых телескопом звездообразных объектов, также излучающих эмиссионные линии. В настоящее время можно считать доказанным, что квазары являются разновидностью активных галактических ядер. Удалось наблюдать даже «хозяйские» галактики квазаров. В некоторых из них видны

признаки слияний, возможно ответственных за возникновение активности. Масса квазаров, оцениваемая по их светимости, может достигать от 10^7 до $10^9 M_{\odot}$. В оптических спектрах квазаров наблюдаются эмиссионные линии, часто с большими красными смещениями $z \cong 1-3,5$. В силу этого квазары как популяция в течение довольно долгого времени считались самыми удаленными известными объектами во Вселенной. Однако число ярких квазаров растет с ростом красного смещения до значения порядка 2,5, после чего начинает убывать. У галактик еще не так давно величина красного смещения z обычно оказывалась много меньше единицы. Но с помощью современных крупнейших телескопов, а также с помощью космического телескопа Хаббла наблюдаются не только галактики с $z \sim 1$, но и галактики с z , превышающими значения красного смещения квазаров. Это вполне укладывается в современные представления о том, что многие массивные галактики возникают в результате слияния менее массивных, а галактики с активными ядрами (и квазары) являются результатом «недавних» слияний.

По своим радиосвойствам квазары очень похожи на мощные радиогалактики. Существуют аргументы в пользу того, что и квазары, и радиогалактики — это объекты одной природы, но разной мощности и видимые под разным углом. Толстые аккреционные диски или затеняющие торы закрывают от глаз и приборов наблюдателей центральную часть ядра в случае радиогалактик и позволяют проникнуть в нее в случае квазаров. Такая унифицированная модель была надежно установлена для близких к нам сейфертовских галактик по анализу испускаемых ими линий излучения (см. конец главы).

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Нормальные галактики

Поток радиоизлучения этих объектов невелик. Большинство из них принадлежит к спиральным — типа Sb или Sc — и неправильным (иррегулярным) галактикам, причем (для заданной оптической величины) интенсивность радиоизлучения возрастает от галактик типа Sb до иррегулярных. Нормальные галактики, как правило, сохраняют постоянным отношение мощности, излучаемой на радиоволнах, к оптическому излучению. Эта мощность составляет лишь миллионную долю оптического излучения этих же галактик. Следует, однако, учесть, что радиодиапазон

составляет всего 10^{-4} оптического диапазона и поэтому, если излучаемую мощность отнести на полосу в 1 Гц, интенсивность излучения радиоволн будет выглядеть очень внушительно.

Радиогалактики

У этих объектов доля излучения, приходящаяся на радиоволны и на оптический диапазон, примерно одинакова. В основном это сфероидальные системы. Большинство из них связано с так называемыми D-галактиками, имеющими протяженную оболочку со слабой концентрацией яркости к центру. Такие объекты составляют около 90% радиогалактик. В остальные 10% входят N- и сейфертовские галактики, являющиеся объектами с активными ядрами, способными выбрасывать потоки плазмы и релятивистские частицы.

Основной признак большинства радиогалактик — двойная структура, отличающаяся тем, что радиоволны излучаются не из оптической галактики, а из областей, лежащих по обе стороны от нее и не видимых в оптические телескопы. Эти области удалены от оптической галактики на громадные расстояния — в десятки и сотни килопарсек, а в некоторых случаях — до мегапарсека. Их называют по-разному — радиооблака, радиолепестки (lobes), радиоуши. Центральный источник в ядре галактики связан с ними космическими струями или джетами — наисовершеннейшей во Вселенной линией передачи энергии. У некоторых радиогалактик таких областей не две, а больше. Например, у радиогалактики Центавр А, оптическая фотография которой приведена на рис. 1.5, таких областей четыре. Эти области расположены примерно перпендикулярно темной пылевой полосе, хорошо видной на фотографии. У радиогалактик наблюдается и другая структура — так называемое ядро-гало, когда радиоизлучение идет как из компактной детали, так и от радиокороны (рис. 4.3), окружающей галактику. Существуют и радиогалактики с нерегулярной структурой. Общим свойством радиогалактик является то, что их радиоизлучение поляризовано. Этот факт связывают с нетепловым синхротронным излучением в магнитном поле галактики.

Квazarы

Открытие этого типа дискретных источников происходило довольно драматически. В начале 60-х годов XX века один из обнаруженных в Кембридже радиоисточников, носивший название 3C 48, был отождествлен с небольшой относительно слабой звездой 16-й величины (16^m), которая была окружена размытой

туманностью. Когда был получен спектр этой звезды, оказалось, что линии его не удается расшифровать. Такая ситуация продолжалась около трех лет, и выход из нее нашли лишь после того, как в 1962–1963 гг. была решена аналогичная загадка, возникшая в связи с отождествлением уже другого кембриджского источника — 3С 273. Было установлено, что одна из компонент этого источника совпадает с относительно яркой звездой 13^m. Более богатый ряд эмиссионных линий в ее спектре также сначала не удалось идентифицировать, как и у источника 3С 48. Однако в этом случае американскому астроному М. Шмидту, который изучал спектр звезды, пришла в голову блестящая догадка, заключающаяся в том, что линии неизвестного спектра представляют собой хорошо известные линии бальмеровской серии водорода, сильно смещенные к красному концу спектра, аналогично красному смещению спектра у галактик. Догадка Шмидта полностью оправдалась. У источника 3С 273 красное смещение линий было равно 16 %, а у источника 3С 48—37 %. Но это означало, что они являются очень далекими (и, следовательно, очень мощными), внегалактическими объектами. Таким образом, родился новый класс дискретных источников, которые были названы квазизвездными объектами (QSO). Оказалось, что примерно один процент этих объектов излучает радиоволны — эти источники космического излучения и носят название квазаров. Остальные 99 % QSO, хотя и не излучают радиоволны, ничем другим от квазаров не отличаются.

Изучение оптических спектров квазаров показало, что для них характерны те же физические условия, что и для галактик с активными ядрами. У многих объектов в ядрах бывают «выбросы», из которых исходит нетепловое излучение. Мощность, излучаемая квазарами в диапазоне радиоволн, необычайно велика — она составляет около 10^{37} – 10^{41} Вт и сравнима с мощностью радиогалактик. К вопросу о мощном излучении квазаров мы возвратимся в дальнейшем, а пока отметим, что в оптическом диапазоне квазары излучают также огромную мощность — около 10^{34} Вт. Следует отметить, что поток излучения квазаров переменен во времени в оптическом, радио- и инфракрасном диапазонах, что свидетельствует о небольших размерах объектов. Масштабы временной переменности различны у разных квазаров и на разных диапазонах. Так, на радиоволнах наблюдается изменение принимаемой интенсивности до десяти и более раз за время, которое может изменяться от нескольких лет до нескольких часов. На волнах оптического диапазона есть изменения до 1^m (величина, равная 4 децибелам) с характерными

периодами, длящимися годы и месяцы. Наряду с огромной мощностью излучения переменность, т. е. изменение интенсивности излучения со временем, является одной из основных особенностей квазаров.

По мере того как открывались новые квазары, количество которых в настоящее время превышает 5000, и изучались их свойства, все большее внимание уделялось сходству квазизвездных объектов с АГЯ — галактиками с активными ядрами. Была установлена непрерывная цепочка перехода свойств ядер от сейфертовских к N-галактикам, а затем и к квазарам. Структура протяженных компонент радиоизлучающих областей в них тоже сходна. Несомненно, существует единство в механизмах, обуславливающих нетепловое излучение в радиогалактиках, ядрах сейфертовских галактик и квазаров, хотя, конечно, масштабы активности в этих объектах количественно сильно различаются.

Лацертиды

К перечисленным нами галактикам и квазарам следует присоединить еще один класс внегалактических тел — объектов типа BL Ящерицы (BL Lacertae). Канадские астрономы Мак Леод и Эндрю обнаружили среди ряда дискретных источников необычный объект VRO 42.22.01. М. Шмидт — тот самый ученый, который первым расшифровал оптический спектр квазаров, отождествил этот источник с переменной звездой BL Лас в созвездии Ящерицы. Необычность поведения этого источника заключалась в том, что его поток и линейная поляризация отличались очень быстрыми временными вариациями. Детальное изучение оптических инфракрасных и радиоданных как этого источника, так и ряда других с аналогичными свойствами показало, что объекты типа BL Лас также представляют собой особый класс квазизвездных источников, называемых лацертидами или блазарами. Отсутствие эмиссионных линий в ядре источника резко затрудняет определение расстояния до объектов, так как неизвестно их красное смещение. Наиболее яркие и обладающие большей переменностью лацертиды, в отличие от многих квазаров, не связаны с большими, протяженными радиоисточниками; у них самые быстрые временные изменения плотности потока и поляризации. Особенно быстрые изменения плотности потока происходят в оптическом диапазоне — они составляют дни и даже часы. Изучение этих объектов на интерферометрах со сверхдлинными базами показало, что их угловые размеры около миллисекунды и эти размеры изменяются со скоростью 1 мс

в год. Такие особенности лацертид привели астрономов к мысли, что они представляют собой квазары с направленным прямо на наблюдателя джетом, излучение которого и наблюдается. Что касается непрерывного излучения, то, по-видимому, и у квазаров, и у сейфертовских галактик, и у лацертид оно обусловлено в радиодиапазоне нетепловым синхротронным излучением релятивистских электронов в магнитных полях.

Все перечисленные объекты, излучающие радиоволны, встречаются в Метагалактике отнюдь не часто. Так, в кубическом мегапарсеке нормальных галактик примерно от 0,1 до 1, сейфертовских галактик примерно от 10^{-2} до 10^{-3} , радиогалактик 10^{-6} , а квазаров 10^{-8} . Как видим, радиоизлучающие тела в Метагалактике очень редкие явления.

ДИСКРЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В каталоге десять миллионов
Номеров небесных телефонов,
Десять миллионов номеров
Телефонов марев и миров,
Полный свод свечения и мерцанья,
Список абонентов мироздания.

А. Тарковский

Обзоры и каталоги

Обнаружены уже сотни тысяч дискретных источников космического радиоизлучения, и их количество непрерывно увеличивается по мере ввода в эксплуатацию радиотелескопов со все возрастающей эффективной площадью и разрешающей способностью.

Как обычно принято в астрономии, в радиоастрономии полученные данные также сводятся в каталоги. Каталоги бывают систематическими, в которых исследуются все объекты, доступные для наблюдения того или иного инструмента, или выборочные, в которых приводятся данные об изучаемых объектах, находящихся в заданной площадке небесной сферы. Первые систематические каталоги дискретных источников Северного неба были составлены в Кембридже (Англия), а для Южного неба — в Австралии.

В настоящее время систематические обзоры составлены или составляются в широком диапазоне частот от 10 до 10 000 МГц.

В этих обзорах плотность источников на стерадиан для длинных волн доходит до 10^3 , а на коротких сантиметровых волнах — до 10^5 . Эти цифры относятся к наблюдениям, охватывающим существенную часть неба. При наблюдениях же в ограниченной части неба удастся достичь плотности источников до 10^6 на стерадиан. Обычно данные, приводимые в каталогах источников, содержат координаты и ошибки, с которыми они измерены; плотности потоков и их ошибки; оптическое отождествление, красные смещения. Наиболее распространенными систематическими каталогами являются: Кембриджские, которые обозначаются буквой С (Англия), Парковские — PKS (Австралия), Болонские — В (Италия), Огайские — О (США), Двинглоу — DW (Голландия), Граковские — GR (Украина). Кроме того, есть еще ряд несистематических каталогов, полученных в различных странах. Есть новые обзоры всего Северного неба (и каталоги), полученные на VLA.

В радиоастрономии уже выработалась общепринятая система наименований и отождествления источников, которая впервые была применена в Парксе. В такой системе первыми ставятся буквы, определяющие обсерваторию, где произведены измерения, затем следуют координаты источника — часы и минуты прямого восхождения и потом градусы и минуты склонения. Так, например, источник, измеренный в декаметровых волнах в Граково и имеющий прямое восхождение $RA_{1950} = 07^h 52^m 46^s$ и склонение $\delta_{1950} = -1,56^\circ$ (обе координаты отнесены к эпохе 1950 г.), обозначается так: GR 0752-01.

Приведем список важнейших каталогов с указанием их основных параметров (мы опустили входящую в каталоги область небесной сферы).

Каталог УТР-2: (GR) 2302 источника на частотах 10–25 МГц, чувствительность 3–5 Ян на 25 МГц. Самый низкочастотный и наиболее полный по покрытию ($\sim 70\%$ Северного неба). Работа над ним продолжается.

Каталог Кларк Лейк на 30,9 МГц Галактической плоскости: 702 источника, чувствительность 2–5 Ян, синтезированный луч $13,0' \times 11,1'$ в зенит.

Кембриджский 8С на 38 МГц: 5859 источников, область на небе: $\delta > 60^\circ$, чувствительность около 1 Ян, луч $4,5'$. Каталог с наилучшим разрешением на низких частотах, имеются контурные карты.

Каталог VLSS на 74 МГц с использованием VLA: ~ 70 тыс. источников, чувствительность 0,7 Ян/луч диаграммы направленности телескопа.

Каталог Пушино на 102,5 МГц: 920 источников, чувствительность 3 Ян. Обзор выполнен на телескопе БСА Физического института им. П. Н. Лебедева.

Кулгурский (Австралия) каталог на 80 МГц и 160 МГц: 2213 источников, Южное небо, чувствительность 4 и 2 Ян, разрешение $3,70'$ и $1,85'$ соответственно.

Кембриджский 6С на 151 МГц: 34 415 источников, чувствительность 120 мЯн, разрешение 4,2'. Самый чувствительный каталог в метровом диапазоне, имеются контурные карты.

Вестерборкский (Westerbork) каталог Северного неба (WENSS): 229 420 источников на 92 см (330 МГц) и около 60 000 на 49 см, 30–50% Северного неба на 49 см; чувствительность 18 мЯн, разрешение 54" на 92 см, точность определения координат источников 1,5".

Техасский каталог на 365 МГц: 66 841 источников, чувствительность до 0,25 Ян, точность около 1".

Болонские (Италия) каталоги на 408 МГц: 23 577 источников, чувствительность 70 мЯн.

Каталог Аресибо (Пуэрто-Рико), 1000 футовый рефлектор на 611 МГц: 3122 источника, чувствительность до 0,35 Ян, разрешение 12,6'.

Каталог FIRST на 1,4 ГГц: 811 000 источников, 9033 квадратных градусов Северного (8422) и Южного (611) неба с использованием VLA, чувствительность 1 мЯн, разрешение около 5". Самый чувствительный с рекордным разрешением и самый полный по покрытию каталог сантиметрового диапазона. Работа над каталогом продолжается и сейчас.

Каталог NVSS на той же частоте (1,4 ГГц), все небо выше -40° , но с меньшим разрешением. Обзор содержит доступные для пользователей интернета изображения и каталожную информацию о более чем 1,8 млн радиисточников.

Каталог Грин Банк (GB6) на 4,85 ГГц (6 см): 75 162 источников, чувствительность 18 мЯн, разрешение 10,5'. Использовался 92-метровый телескоп НРАО (сейчас не существующий).

Паркский каталог (PMN) на 4,85 ГГц: 50 814 источников, Южное небо, чувствительность 20–70 мЯн, разрешение $\sim 4,2'$. Использовался Паркский 64-метровый радиотелескоп. Предыдущий каталог (PKS) был на частоте 2,7 ГГц.

Зеленчукский каталог на 3,9 МГц (РАТАН-600): 8511 источников, разрешение $70'' \times 50''$. Глубокий обзор с хорошей чувствительностью (50 мЯн), есть данные и на частотах 4,8 и 11,2 ГГц для более ярких источников (≥ 200 мЯн).

Полную информацию о существующих на сегодняшний день каталогах в радиодиапазоне можно получить в интернете по адресу <http://cdsweb.u-strasbg.fr/cats/VIII.htm>

В современных каталогах точность определения координат довольно велика — по прямому восхождению доли временной секунды, а по склонению — доли угловой секунды. Еще более высокие точности, как уже указывалось выше, обеспечивает использование данных, полученных на интерферометрах со сверхдлинной базой. Такая точность позволяет в ряде случаев проводить отождествление дискретных источников космического излучения с оптическими объектами. Обычно для этих целей используется всемирно известный Паломарский атлас оптических объектов, состоящий из большого количества карт (фотографий) отдельных участков небесной сферы. Теперь уже используют атлас нового поколения — Sloan Digital Sky Survey (SDSS) <http://www.sdss.org/>. Однако далеко не все радиисточники надежно отождествлены с оптическими объектами. Причина такого большого разрыва между радио- и оптическими данными связана

с тем, что точность определения месторасположения того или иного объекта по радиоданным часто оказывается недостаточной, чтобы выбрать нужный объект из большого числа оптических объектов, которые лежат внутри площадки, определенной по радиоданным с учетом ошибки измерений. Задача усложняется еще и тем, что в ряде случаев оптический объект и связанный с ним радиоисточник находятся не в одном и том же месте небесной сферы. Как мы уже отмечали ранее, радиоизлучающие облака радиогалактик и квазаров в большинстве случаев расположены вне оптического объекта, который с ними генетически связан (по обе стороны от него в случае классических двойных радиоисточников). В случае протяженных радиоисточников со сложным распределением яркости на площади, которую занимает такой объект, может размещаться несколько галактик или квазаров. Кроме того, оптический объект может быть недостаточно ярким для того, чтобы его можно было наблюдать даже с помощью самых крупных телескопов.

Вместе с тем задача отождествления радиообъектов с оптическими объектами чрезвычайно важна. Расстояние можно определить только по оптическим данным, в частности по красному смещению спектральных линий. Если дискретный источник отождествлен с галактикой или квазаром, то, пользуясь законом Хаббла, можно по красному смещению оптического объекта определить расстояние и до дискретного источника. Знание расстояния необходимо для определения светимости дискретного радиоисточника и его линейных размеров по измеренным угловым. Однако получение таких данных не является единственной задачей отождествления. Не менее важна возможность сопоставления физических процессов, происходящих в одном и том же космическом теле в разном диапазоне частот.

У подавляющего большинства внегалактических источников, внесенных в те или иные каталоги, угловые размеры меньше нескольких минут дуги, а размер примерно половины всех источников меньше десяти секунд дуги. Как уже отмечалось, в источниках встречаются компактные компоненты, угловые размеры которых могут быть меньше 10^{-4} угловой секунды.

К ним относятся, в частности, джеты, их «узлы» и «горячие пятна», являющиеся местом ускорения электронов, ответственных за синхротронное излучение. Таким образом, угловые размеры различных источников могут изменяться в широком диапазоне от 10^2 до 10^{-4} угловых секунд. Естественно, что для измерения как угловых размеров, так и других параметров дискретных источников приходится прибегать к различным ме-

тодам, используя для этих целей радиотелескопы с карандашным лучом и — главным образом — интерферометры и апертурный синтез.

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ

Для большинства дискретных источников наблюдается степенная зависимость плотности потока принимаемого радиоизлучения S от частоты в широком интервале частот (см. рис. 4.15):

$$S(\nu) \sim \nu^{-\alpha}.$$

Есть веские основания считать, что так же как и для остатков сверхновых, излучение большинства внегалактических дискретных источников представляет собой синхротронное (магнитотормозное) излучение релятивистских электронов с кинетической энергией $E \gg mc^2$, движущихся со скоростями, близкими к скорости света в космических магнитных полях H , согласно

$$\omega \sim \omega_H \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2, \quad \frac{E}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \gg 1,$$

где $\omega_H = eH/(mc)$ — циклотронная частота.

Степенное распределение электронов по энергиям

$$n(E) \propto E^{-\gamma}$$

приводит к степенному спектру излучения с индексом $\alpha = (\gamma - 1)/2$. Степенные спектры характерны для частиц, входящих в состав космических лучей. Поэтому в свое время была высказана гипотеза о том, что такое распределение может возникать и для релятивистских электронов в дискретных источниках космического излучения, которые также могут быть родной космических лучей. Эта гипотеза блестяще подтвердилась. В подавляющем большинстве случаев наблюдаемый частотный спектр дискретных источников имеет средний спектральный индекс $\alpha = 0,8$, откуда следует $\gamma = 2,6$, и это значение хорошо согласуется со спектром космических лучей в окрестностях Земли. Этот экспериментальный факт — серьезный аргумент в пользу того, что релятивистские электроны в дискретных источниках связаны с электронной компонентой космических лучей. Синхротронный механизм излучения дискретных источников подтверждается также и тем, что в соответствии с теорией у ряда этих источников наблюдается линейная поляризация.

Должна быть какая-либо общая причина формирования столь универсальных существенно неравновесных распределений, какими являются степенные распределения в космосе. В колоссальном энергетическом интервале этому закону подчиняются космические лучи; радио-, рентгеновские и гамма-излучения также часто имеют степенные спектры. К степенным спектрам приводят некоторые механизмы ускорения частиц (Э. Ферми), в том числе ускорение на ударных волнах. Подобные спектры характерны для турбулентности, давно изучаемой в гидродинамике и физике плазмы. Образом турбулентности может служить известная каждому картина волнения поверхности моря. Как показал советский математик А. Н. Колмогоров, такие системы характеризуются потоком по спектру из той области энергий, где возбуждаются вихри или волны, в ту область, где они затухают. В ряде случаев степенные спектры частиц и излучения формируются наподобие колмогоровских спектров турбулентности.

Нелинейные электронные спектры

На сантиметровых и дециметровых волнах в ряде обсерваторий наблюдались существенные отклонения частотных спектров от степенного закона. Оставаясь в рамках синхротронной теории, рассмотрим некоторые явления, которые могут привести к деформации частотного спектра дискретных источников в области низких (дециметровые волны) и высоких (сантиметровые и миллиметровые волны) частот. Следует отметить, что эти деформации частотных спектров как в области низких, так и в области высоких частот могут быть использованы для изучения свойств самих дискретных источников, определения таких важных параметров, как угловые размеры или магнитные поля в них, а также свойств среды, расположенной между ними и наблюдателем.

В отличие от света, поглощаемого, в основном, пылью, радиоволны поглощаются главным образом ионизованным газом — плазмой, и тем сильнее, чем меньше их частота. Это должно приводить к появлению низкочастотных «завалов» в спектрах источников либо за счет поглощения на пути к наблюдателю в областях II в диске Галактики, либо из-за ионизованного водорода в источнике. Аналогичные «завалы» могут возникать также из-за синхротронного поглощения радиоизлучения релятивистскими электронами в самом источнике либо из-за влияния тепловой плазмы на коэффициент преломления радиоволн (эффект Разина—Цытовича). В дискретных источниках могут существовать условия, при которых в энергетическом спектре

релятивистских электронов будут отсутствовать частицы с энергией ниже некоторой величины. Это может быть следствием как механизма ускорения, так и пространственной ограниченности источника. В этом случае также будет наблюдаться излом частотного спектра, и на низких частотах плотность потока будет убывать, но не медленнее, чем по закону $v^{1/3}$, что обусловлено вкладом более энергичных частиц при синхротронном излучении. В обоих случаях частотный спектр будет иметь отрицательную кривизну. Однако существуют механизмы деформации энергетического спектра электронов, вследствие которых частотные спектры могут иметь положительную кривизну (когда кривая обращена выпуклой частью к оси абсцисс). Кривизна частотного спектра может быть либо положительной, либо отрицательной при различном значении некоторого дополнительного параметра. Например, если источник имеет структуру ядро-гало и энергетические спектры электронов в ядре и гало будут степенными функциями с различными показателями γ_1 и γ_2 , то и частотный спектр всего источника будет суммой двух степенных функций со спектральными индексами α_1 и α_2 :

$$S = A v^{-\alpha_1} + B v^{-\alpha_2},$$

где $\alpha_{1,2} = (\gamma_{1,2} - 1)/2$.

Если $\alpha_1 > \alpha_2$, то на достаточно низких частотах $S \approx A \cdot v^{-\alpha_1}$, а на достаточно высоких $S \approx B \cdot v^{-\alpha_2}$, и, следовательно, частотный спектр будет иметь положительную кривизну. Если же $\alpha_1 < \alpha_2$, то ситуация будет обратной. Подобная картина может быть следствием диффузии электронов из ядра в гало. Отклонения от степенного закона возникают также из-за неоднородности магнитного поля, неоднородности распределения релятивистских электронов. Последнее может быть связано с локализацией мест ускорения электронов на ударных волнах в узлах или горячих пятнах джетов. Даже если в местах ускорения (инжекции) электронный спектр чисто степенной («линейный» в логарифмическом масштабе), то в результате распространения по источнику при наличии потерь на излучение электронный спектр видоизменяется и становится нелинейным, а вместе с ним нелинейным становится и спектр излучения источника.

На высоких частотах, соответствующих максимальным энергиям ускоренных электронов, спектр синхротронного излучения также обрывается. Положение этого обрыва зависит от физических свойств источника и приходится обычно на миллиметровый или еще более коротковолновый диапазон длин волн. Здесь (для типичных показателей спектра $\alpha \approx 0,8$) сосредоточена

основная энергия электромагнитного излучения источника. При большой плотности энергии излучения возникают дополнительные (по сравнению с синхротронными) комптоновские потери энергии электронов за счет их рассеяния на фотонах (рис. 5.2).

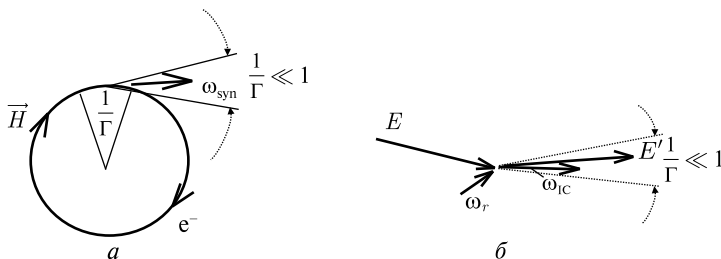


Рис. 5.2. Синхротронный (а) и комптоновский (б) механизмы излучения релятивистских электронов

При больших мощностях излучения этот процесс становится основным и ограничивает мощность источника (так называемый комптоновский предел).

Но роль комптоновского рассеяния этим не ограничивается. Замечательным образом оно приводит к излучению синхротронных источников в рентгеновском диапазоне. При столкновении с релятивистскими электронами с большим Лоренц-фактором $\Gamma \gg 1$ фотоны, имеющие частоту ω_r , приобретают значительную энергию, что и переводит их в рентгеновский диапазон согласно условию (напоминающему условие синхротронного излучения, см. выше):

$$\omega \approx \omega_r \Gamma^2, \quad \Gamma \equiv \frac{E}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \gg 1.$$

Этот процесс аналогичен известному эффекту Комптона и отличается от него тем, что здесь энергия передается в обратном направлении — от электронов к фотонам. Благодаря обратному Комптон-эффекту источники синхротронного излучения являются и рентгеновскими источниками¹. С помощью современных орбитальных рентгеновских телескопов они в настоящее время интенсивно исследуются (рис. 5.3, см. вклейку), что дает богатейшую информацию и для радиоастрономии, так как ответ-

¹ Впрочем, ответственным за рентгеновское излучение является и чрезвычайно горячий газ ($T \sim 10^7$ К), создаваемый дующим из галактик «галактическим» ветром и составляющий значительную массу скоплений галактик.

ственными за излучение в обоих диапазонах оказываются одни и те же релятивистские частицы.

Реликтовое излучение также существенно влияет на частицы высоких энергий, в том числе на релятивистские электроны, ответственные за радиоизлучение. Для источников с большим красным смещением подобные эффекты существенно возрастают из-за большой в прошлом плотности реликтового фона. Целый ряд родственных эффектов проявляется в рентгеновском и гамма-диапазонах, а через спектры релятивистских электронов — и в радиодиапазоне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРАХ

В связи с тем что используемый в радиоастрономии диапазон охватывает частоты от 10^7 до 10^{11} Гц, невозможно производить измерения во всем диапазоне с помощью одного инструмента. Поэтому для получения частотного спектра того или иного источника необходимо использовать наблюдения на многих радиотелескопах. Использование различных инструментов для измерения плотности потока дискретных источников требует проведения подчас весьма сложных калибровок, с тем чтобы можно было с необходимой точностью производить измерения на различных частотах и получать «абсолютные» значения измеряемых величин. К этому добавляются возрастающие трудности отождествления источников с понижением частоты. Сейчас плотность потока дискретных источников удается измерить с точностью до нескольких процентов, что в большинстве случаев вполне достаточно для построения частотных спектров, отражающих физические процессы в источниках.

Наблюдаемые спектры удобно разделить на две части — низкочастотные, в диапазоне от 10 до 1000 МГц, и высокочастотные — в диапазоне от 1 до 100 ГГц. Как высокочастотные, так и низкочастотные спектры можно разделить на четыре группы: линейные в логарифмическом масштабе (S), с положительной (C_+), отрицательной (C_-) или знакопеременной (C_{\pm}) кривизной.

На рис. 5.4 приведены примеры всех четырех типов спектров. У источников 3C 187 (галактика) и 3C 2 (квазар) спектры линейны — первый в низкочастотной, а второй и в низко- и высокочастотной областях. Для линейных спектров средний спектральный индекс в низкочастотной области $\alpha = 0,85$, а диапазон изменения этого индекса для разных объектов от 0,6 до 1,5. Для высокочастотных линейных спектров средний спектральный ин-

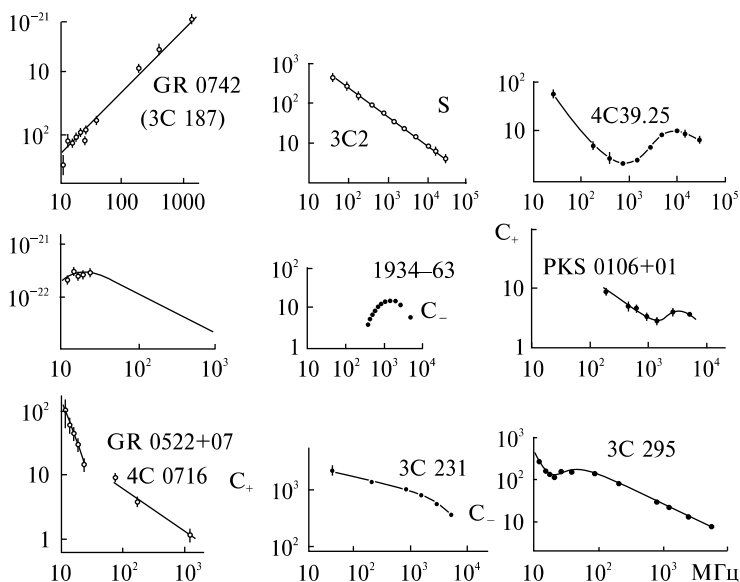


Рис. 5.4. Примеры различных спектров дискретных источников

декс равен 0,8. В области низких частот (менее 1 ГГц) линейные спектры преобладают — они составляют более 80 %. В области высоких частот по причинам, изложенным ниже, количество линейных спектров резко падает — их число снижается до 40 %.

На том же рисунке приведены два спектра C_- : радиогалактики Лебедь А (3C 405) и источника 1934–63. У 3C 405 максимальная величина потока наблюдается вблизи 20 МГц, а у источника 1934–63 — вблизи 2 ГГц. Для обоих этих источников характерен резкий завал спектра на низких частотах. Спектры такого типа сравнительно редки в низкочастотной области — примерно 5 % общего числа. Столь малое количество спектров с отрицательной кривизной весьма неожиданно, ибо существует достаточно много различных физических механизмов, связанных с поглощением либо дисперсией волн в электронной плазме на низких частотах, которые должны были бы приводить именно к таким типа спектрам. Возможно, что «завалы» происходят на более низких частотах, не пропускаемых ионосферой.²

² Но возможна и другая причина, связанная со значительно большими трудностями измерений на низких частотах. Точным измерениям здесь мешает ионосфера, а надежному отождествлению — широкая диаграмма направленности радиотелескопа. Кроме того, мешает эффект «спутывания», когда через боковые лепестки диаграммы направленности радиотелескопа вклад в при-

У источников с положительной кривизной спектра C_+ средний низкочастотный спектральный индекс в диапазоне частот 10–25 МГц составляет 1,9. На рис. 5.4 приведен низкочастотный спектр источника 4C 0716 (GR 0522+07) класса C_+ , который отождествлен с галактикой. Спектральный индекс этого источника в области низких частот $\alpha_{н.ч.} \approx 2,57$. Обнаружены источники, у которых $\alpha_{н.ч.} \approx 5$ (однако источников со столь крутыми спектрами немного). Средние значения спектрального индекса у источников этого класса на более высоких частотах меньше, чем у источников с линейными спектрами. Так, в диапазоне частот от 25 до 1400 МГц их средний спектральный индекс равен только 0,66. Спектры типа C_+ наблюдаются также в высокочастотной области, однако лишь в низкочастотной области их обнаружено довольно много — до 10% общего числа спектров (см., впрочем, сноску 2). Физической причиной укрупнения синхротронного спектра в сторону низких частот может быть нарастание магнитного поля к периферии источника, куда попадают электроны, уже «растратившие» свою энергию и излучающие, в соответствии с этим, на более низких частотах.

Приведены спектры со знакопеременной кривизной C_{\pm} в низкочастотной (3C295) и высокочастотной (4C39.25) областях. Заметим, что галактика 3C 295 при более точных последующих измерениях оказалась источником типа C_- . В то время как в низкочастотной области спектры типа C_{\pm} встречаются крайне редко — их менее 0,5%, в высокочастотной области таких спектров довольно много — около 50% общего числа. Это, по-видимому, обусловлено тем, что спектры типа C_{\pm} в высокочастотной части связаны со вкладом компактных источников, которыми являются ядра активных галактик.

Для того чтобы охарактеризовать распределение спектральных индексов дискретных источников, приведем соответствующие графики (гистограммы) для каталога GR на рис. 5.5. Анализ подобных гистограмм для различных каталогов используется, в частности, для того, чтобы сделать выводы или хотя бы высказать какие-то догадки о природе неотожествленных объектов. Для галактик характер распределения на низких и высоких частотах не сильно различается, хотя на более высоких частотах функция распределения спектральных индексов более широка,

нимаемый поток дают другие источники, что может приводить к появлению спектров типа C_+ вместо спектров C_- . Полностью решить эту проблему смогут лишь телескопы следующего поколения (автор благодарен за это замечание В. Шепелеву).

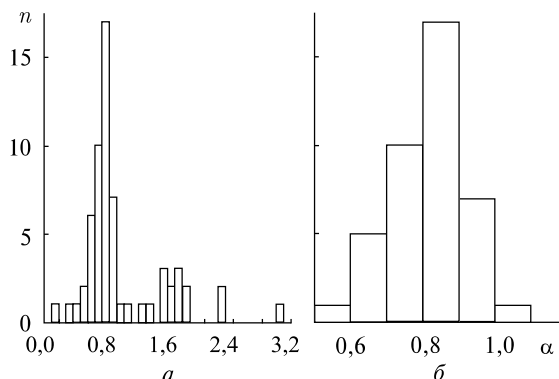


Рис. 5.5. Распределение спектральных индексов дискретных источников каталога GR: *а* — все источники, *б* — источники с линейными спектрами

чем на низких. Для квазаров ситуация оказывается иной. Здесь на высоких частотах распределение спектральных индексов отражает большую дисперсию (разброс), связанную с переменностью излучения квазаров. Типичен плоский спектр. Последнее связано с компактностью источников и характерной для них реабсорбцией — поглощением собственного излучения. В низкочастотной части спектра, напротив, практически отсутствуют плоские спектры. Вплоть до декаметровых волн, подавляющее большинство спектров линейны вне зависимости от того, являются ли источники радиогалактиками, квазарами или неотожествленными объектами.

Распределение яркости

Распределение яркости, т.е. портрет источника на разных частотах, несет о нем богатую информацию. Прошедшее тридцатилетие ознаменовалось созданием богатейшей галереи таких портретов на разных частотах. В настоящее время изображение с точностью, или, как говорят астрономы, разрешением, порядка долей угловой секунды может быть получено в сантиметровом радиодиапазоне (VLA), в оптике (HST), в рентгене (Chandra). Этого разрешения уже достаточно, чтобы увидеть килопарсекковые джеты и протяженные облака квазаров и радиогалактик с их тонкой структурой в виде «узлов» и «горячих пятен» у значительного числа источников. Бóльшее разрешение достигается с помощью радиотелескопов апертурного синтеза и интерферометрических систем (MERLIN, VLBA, VLBI) и позволяет получить изображение парсековых выбросов в непосредственной близости

от галактического ядра. Многие из них проявляют необычные с точки зрения земной физики свойства. Например, в них наблюдаются «сверхсветовые» движения, свидетельствующие об ультрарелятивистских макроскопических движениях плазмы со скоростями чрезвычайно близкими к скорости света. Такие скорости удобно характеризовать с помощью Лоренц-фактора Γ , являющегося отношением энергии частиц к их энергии покоя: $\Gamma = E/(mc^2)$. Наблюдаемые движения в сверхсветовых парсековых джетах соответствуют значениям $\Gamma \gg 1$ (порядка 10 и более). Еще большие разрешения удастся получить с помощью космических радиоинтерферометров. Один такой эксперимент уже был удачно осуществлен с помощью японского спутника HALCA. Ведется работа по проекту космического интерферометра «Радиоастрон» с базой до $4 \cdot 10^5$ км. Это позволит вплотную приблизиться к масштабам гравитационных радиусов в активных ядрах галактик.

Разрешенные протяженные источники редко имеют простую структуру, состоящую из одной компоненты. Наиболее часто встречается двойная структура, причем обе компоненты имеют примерно одинаковые размеры и светимость. Эти компоненты расположены симметрично относительно отождествленного с ними оптического объекта (галактики или квазара), причем полный размер источника в среднем в три раза превосходит размер оптической галактики. В месте расположения оптического объекта имеется и слабая радиокомпонента. Типичный пример такого источника — радиогалактика Лебедь А, радиокарта которой была впервые получена Райлом с сотрудниками и приведена на рис. 5.6 и рис. 5.7 (см. вклейку). Как видно из рисунка, радиокомпоненты, размеры которых около 20 угловых секунд, расположены вне оптической галактики по обе стороны от нее. Расстояние между ними составляет две угловые минуты. На удаленном конце каждой из компонент видно яркое образование — «горячее пятно». Такие источники получили название «яркие к краю» или FR-II по классификации Фанарова и Райли. На месте расположения радиокомпонент нет ни обычного газа, ни звезд. За синхротронное радиоизлучение компонент ответственны только релятивистские электроны (электронная часть космических лучей), ускоренные на ударных волнах и плазменной турбулентности, и магнитные поля.

В источнике Лебедь А горячие пятна имеют тонкую структуру. Так, ядро западной компоненты (горячее пятно) оказывается двойным, причем отдельные детали раздвинуты на расстояние, составляющее пять угловых секунд, а их расположение таково, что угол между линиями, соединяющими эти детали и обе

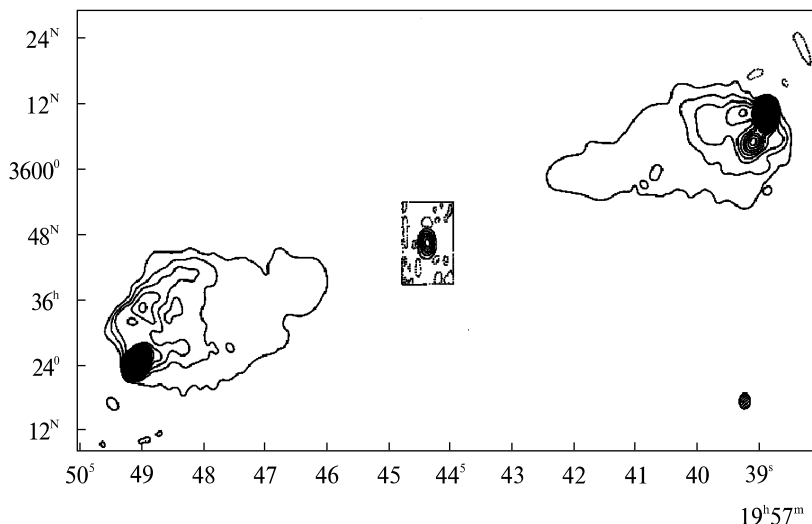


Рис. 5.6. Распределение яркости в радиогалактике Лебедь А. Классический силуэт мощного двойного радиоисточника, видны горячие пятна (по М. Райлу)

главные компоненты, составляет 20° . Строение восточной компоненты отличается от западной. Хотя и в этом горячем пятне также имеются две детали с размерами около угловой секунды, расположенные на расстоянии в несколько секунд друг от друга, однако линия, соединяющая их, перпендикулярна линии, на которой лежат главные компоненты. Для объяснения этих особенностей привлекается предположение о прецессии джета, что в свою очередь означает сложные движения аккреционного диска в ядре галактики.

Энергия, выделяемая различными компонентами протяженных источников, поставляется им по струям (джетам) из ядер родительских галактик или квазаров. Наблюдаемые компоненты протяженных источников — результаты выбросов плазмы, магнитных полей и потоков частиц (джеты) из компактных деталей, произошедших много миллионов лет тому назад благодаря активности ядер. (Эту активность связывают с процессами в окрестности сверхмассивных черных дыр.) Как удалось установить с помощью интерферометров со сверхдлинной базой, у ядер галактик или квазаров обнаруживаются радиоизлучающие детали в 10^5 – 10^6 раз меньшие, чем протяженные источники. Эти детали и составляют второй класс космических образований — компактные источники, связанные непосредственно с активностью ядер галактик. Как правило, они обладают переменностью,

т. е. излучаемый ими поток энергии изменяется во времени, в радиодиапазоне — в течение нескольких лет. Время жизни этих компонент (1–100 лет) мало и нужно их постоянное (регулярное или нерегулярное) образование для снабжения энергией протяженных компонент со временем жизни (10^6 – 10^8 лет), причем ядра галактик или квазаров должны при этом выделять энергию со скоростью около 10^{52} – 10^{54} эрг в год.

Размеры компактных источников невелики — от нескольких тысячных долей парсека до нескольких парсек. Из-за реабсорбции они оказываются непрозрачными для собственного радиоизлучения, зачастую даже на сантиметровых волнах. Однако излучаемая ими энергия весьма значительна: для большинства таких источников это 10^{38} – 10^{44} эрг/с (в некоторых случаях она бывает и не очень большой — 10^{33} эрг/с для источника в центре нашей Галактики, а для удаленных квазаров, напротив, превышает энергию 10^{45} эрг/с). Физические механизмы проясняются при изучении радиокарт таких источников. С помощью интерферометров со сверхдлинной базой удалось установить ряд важных особенностей структуры компактных источников и проследить за движением компонент, из которых строится джет. Так, было установлено, что в некоторых источниках существуют односторонние выбросы из ядра, направленные с высокой точностью на горячие пятна в радиооблаках. Некоторые из этих компонент демонстрируют (кажущееся) движение со сверхсветовой скоростью, что свидетельствует о релятивистском характере движения. В галактике 3C 111 выброс нацелен на горячее пятно с точностью 1° , а в галактиках 3C 390.3, 3C 405 — с точностью 4 – 6° . Но имеются примеры, когда парсековый выброс направлен под значительным углом к оси симметрии.

Если построить распределение яркости компактного источника на различных частотах, то оказывается возможным определить из этих данных распределение магнитных полей в источнике, а, зная расстояние до него, вычислить энергию как этих полей, так и релятивистских электронов, обуславливающих радиоизлучение. Такие измерения позволяют определить средние параметры компактных радиоисточников. Оказалось, что радиояростная температура таких источников очень высока и достигает 10^{11} – 10^{12} К, а угловые размеры составляют от 10^{-3} угловой секунды (коротковолновая часть сантиметрового диапазона) до 10^{-2} угловой секунды (дециметровые волны). Компактные источники обладают пологими частотными спектрами со спектральными индексами, близкими к нулю. Такие спектры характерны для

источников с неоднородной структурой как магнитного поля, так и функции распределения релятивистских электронов. Заметим также, что структура компактных источников слабо зависит от того, расположены эти источники в квазарах или в ядрах галактик того или иного типа.

Структуре центра Галактики посвящен отдельный раздел гл. 4.

Структура радиогалактик в скоплениях

В качестве примера рассмотрим ядро сверхгигантской эллиптической галактики NGC 1275, с которой связан один из наиболее интенсивных радиоисточников Персей-А — 3С 84 (см. карту на рис. 5.8). Галактика находится в центре богатого скопления Персея. Двум другим галактикам скопления NGC 1265 и IC 310 также соответствуют радиоисточники. Галактика NGC 1265 является радиоисточником 3С 83.1В. Его структура очень сложна и своеобразна. Она представлена на рис. 5.9. Это галактика типа «голова-хвост». Из центра галактики выходят две радиоветви с интенсивным излучением (галактика относится к типу ярких к центру FR I), которое оканчивается двумя почти параллельно идущими «хвостами». К этому же типу «голова-хвост» относится и радиогалактика IC 310. «Хвосты» могут иметь весьма причудливую форму, отклоняясь к оси симметрии.

Такая конфигурация связана со взаимодействием источника и межгалактического «ветра» в скоплении, а именно, с движением галактик через невидимый в оптике горячий газ со скоростями около нескольких тысяч километров в секунду. Наличие такого газа независимо установлено по измерению рентгеновского излучения скоплений. Структуры типа источников «голова-хвост» характерны и для других скоплений.

Многие богатые скопления содержат расположенную в центре сверхгигантскую галактику, окруженную протяженным гало, и обычно связанную с мощными источниками космического радиоизлучения. Эволюция скопления в значительной мере состоит

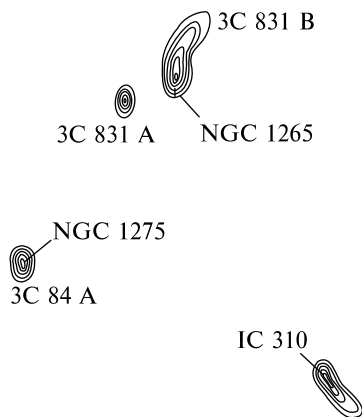


Рис. 5.8. Распределение радиояркости в скоплении Персея

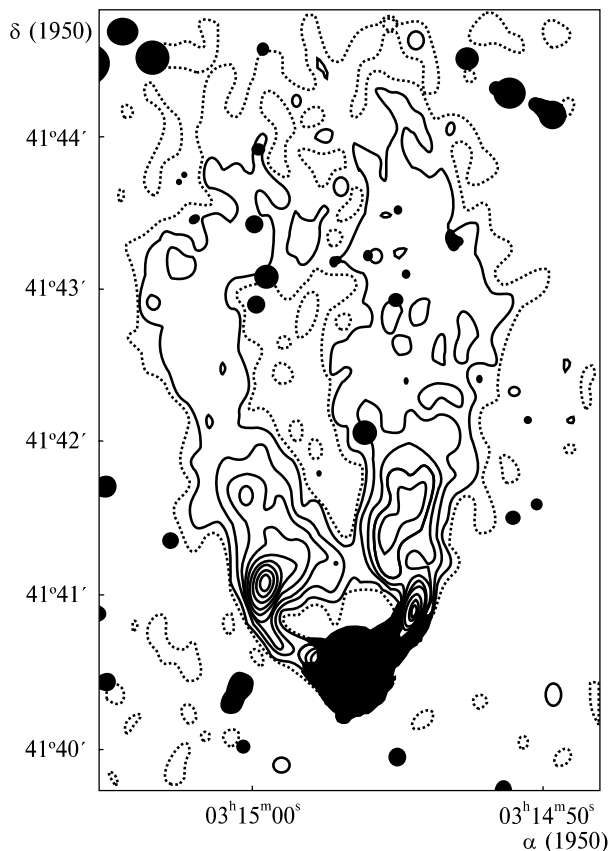


Рис. 5.9. Распределение радиояркости в галактике NGC 1265, наложенное на негатив паломарского атласа

в поглощении центральной галактикой менее массивных галактик. В скоплении Персея такой сверхгигантской галактикой является Галактика NGC 1275, ядро которой интенсивно излучает также в оптическом и рентгеновском диапазонах. Его излучение в радиодиапазоне является одним из самых мощных на сантиметровых волнах. Другим примером может служить мощная радиогалактика Дева А — центральная галактика в скоплении Дева. Килопарсекový джет этой гигантской галактики виден и в оптике. Он был открыт еще в 1919 г. Наблюдается он и в рентгене. Для него, как и для большинства джетов радиогалактик и квазаров, характерна неоднородная, «узельная» структура. Горячие пятна, о которых мы уже упоминали, могут рассматриваться как наиболее яркие представители узлов. Воз-

можная схема образования горячих пятен как мест ускорения частиц на ударных волнах представлена на рис. 5.10.

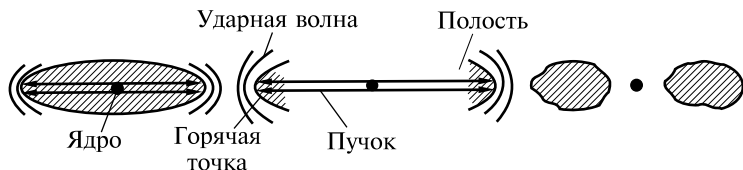


Рис. 5.10. Возникновение горячих точек в дискретных источниках (по М. Лонгейру)

Как показывают наблюдения, скопления галактик являются гравитационно связанными системами. Но масса, необходимая для гравитационной связи галактик, определяемая по их скоростям, примерно в десять раз превышает наблюдаемую массу скопления (галактик и газа). Этот парадокс, отмеченный Цвикки еще в 30-е годы прошлого века, служит и сегодня одним из важных аргументов в пользу существования невидимой «темной материи».

«СВЕРХСВЕТОВЫЕ» ИСТОЧНИКИ

Измерения, выполненные с помощью интерферометров со сверхдлинной базой, показали, что существуют радиоисточники, у которых радиоструктура «переменна», т.е. со временем радиокарта источников существенно изменяется. На основании этих измерений, которые ведутся уже десятки лет, было сделано два весьма важных вывода. Оказалось, что компактные компоненты движутся друг относительно друга так, что расстояние между ними увеличивается, причем иногда это увеличение очень значительно. Так, для компактных компонент галактики 3C 120 наблюдалось десятикратное увеличение углового расстояния за год. Однако самым ошеломляющим результатом этих измерений было то, что разлет компонент происходил со скоростью, в несколько раз превышающей скорость света! Объяснение этому парадоксу было сразу же дано на основе СТО. При этом движение должно быть релятивистским и направленным на наблюдателя. Одна из схем, объясняющая эффект сверхсветовых скоростей аналогией со световым «зайчиком», состоит в следующем. Пусть из ядра со скоростью света c исходит сферический импульс излучения, попадающий на рассеивающий экран. Тогда скорость V освещенной точки, движущейся вдоль экрана, будет равна $c \sin \Theta / (1 - \cos \Theta)$, где Θ — угол зрения в радианах, или для

малых значений угла $2c/\Theta$, откуда следует, что $V > c$. Роль экрана может играть слой газа, окружающий ядро. Другая модель

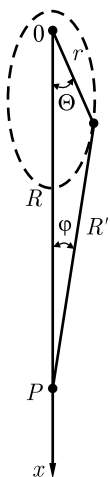


Рис. 5.11. Траектории релятивистских частиц и волн, приводящие к эффекту «сверхсветовых» скоростей (по В. Л. Гинзбургу)

рассматривает сгустки плазмы, выброшенные из ядра со скоростью V в противоположные стороны. Кажущаяся скорость вылета из ядра равна $V \sin \Theta / (1 - V \cos \Theta / c)$, а кажущаяся скорость разлета этих компонент друг относительно друга $W = 2V \sin \Theta / (1 - V^2 \cos^2 \Theta / c^2)$. Нетрудно убедиться, что при малых углах Θ , когда скорость сгустка V стремится к скорости света c , величина W оказывается сверхсветовой. Это не противоречит тому известному утверждению СТО, что сигнал не может распространяться со сверхсветовой скоростью, так как W не есть скорость сигнала, как и скорость «зайчика» в предыдущем примере. Сказанное поясняется рис. 5.11, взятом из книги В. Л. Гинзбурга, которому принадлежит одно из первых объяснений эффекта. Итак, наблюдаемая сверхсветовая скорость связана с выбросом из ядра компонент со скоростью, близкой к скорости света и под

малым углом к лучу зрения, что и определяет чисто «геометрический» релятивистский эффект сверхсветового разлета. Приведенное объяснение сверхсветовых скоростей требует, чтобы из ядер выбрасывались компоненты со скоростью, близкой к световой. Как отмечалось в ряде работ, начиная с работы ленинградских астрономов М. Бабаджаньянца и Е. Белоконь, существует связь между появлением новых сверхсветовых компонент джетов со вспышками в ядре, наблюдаемыми по резкому, и как считают некоторые ученые, почти периодическому (с периодами в несколько лет) возрастанию яркости ядра. Возможно, эти процессы свидетельствуют о развитии неустойчивостей и взрывном выделении энергии вблизи сверхмассивных черных дыр в центрах активных галактик и квазаров.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В заключение обратимся к поляризации излучения дискретных внегалактических источников. Как мы уже говорили, большинство внегалактических источников являются нетепловыми

и механизм их излучения магнитотормозной. Это излучение линейно поляризовано, причем направление колебаний электрического поля перпендикулярно направлению магнитного поля. Степень поляризации магнитотормозного или синхротронного излучения теоретически может достигать значительных величин — около 70%. Однако обычно из-за наличия эффекта Фарадея, приводящего к вращению плоскости поляризации в протяженных радиоисточниках, может иметь место деполяризация излучения. Это связано с тем, что излучение, исходящее из различных областей источника, проходит различные пути. Угол поворота плоскости поляризации пропорционален величине пути (а также напряженности магнитного поля на этом пути). При разных длинах пути в различных областях источника возникают различные углы поворота, в результате чего от всего источника может наблюдаться меньшая степень поляризации, чем от его отдельных областей. Изучение распределения поляризации по источнику позволяет определить структуру и величину магнитного поля в нем. На рис. 5.12 приведена карта юго-восточной компоненты гигантской радиогалактики ЗС 236. Направление и величина штрихов на рисунке характеризуют магнитное поле в радиогалактике. Данные, приведенные на рис. 5.12, получены на Ве-

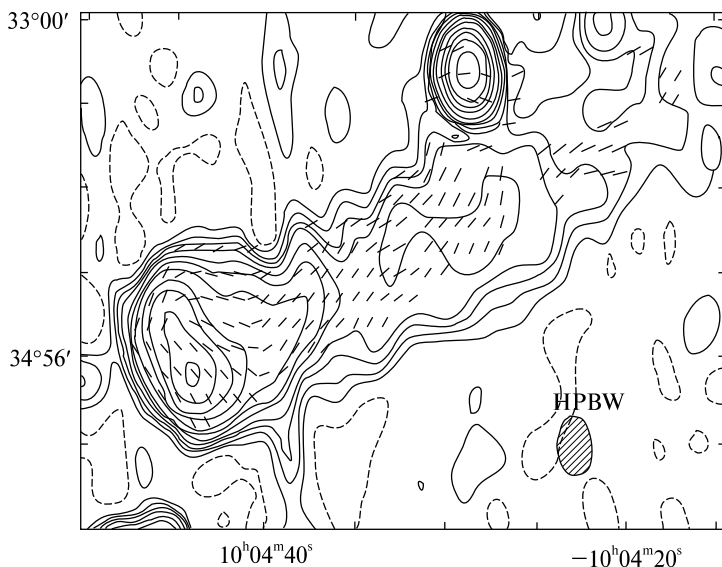


Рис. 5.12. Радиокарта юго-восточной компоненты гигантской радиогалактики ЗС 236. Измерение поляризации излучения позволило построить распределение по источнику магнитного поля

стерборковском радиотелескопе на волне 21 см с разрешением 23 угловые секунды по прямому восхождению и 40 угловых секунд по склонению. Структура магнитного поля в источнике оказывается довольно сложной. Как величина, так и направление магнитного поля внутри источника значительно изменяются, однако при этом существуют довольно большие области, в которых вектор магнитного поля оказывается достаточно постоянным, чтобы можно было говорить о наличии в источнике областей с регулярным полем. Уже обнаружены области, где степень поляризации достигает 40–50% (эти данные получены на сантиметровых волнах, где эффект Фарадея сказывается наименее сильно). Это означает, что более половины магнитной энергии может содержаться в регулярной компоненте магнитного поля. Отметим, что в горячих точках степень поляризации значительно ниже — порядка 10%. Статистические данные по поляризации дискретных источников показывают, что магнитное поле ориентировано, в основном, параллельно главной оси этих источников, однако вблизи горячих точек оно ориентировано перпендикулярно главной оси (рис. 5.12, левый нижний угол). В целом магнитное поле почти везде параллельно изофотам в распределении яркости по полному потоку.

ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ

Самая важная часть бублика — это дырка,
Потому что, когда бублик съедают,
Ничего, кроме дырки, не остается.

О. Мандельштам

В настоящее время известно несколько типов галактик, различных по численности и с различной мощностью активности ядер, но обладающих, по всей видимости, значительной общностью структуры и образующих единый ряд объектов. В этом смысле говорят об унифицированной модели, к описанию которой мы позднее и перейдем.

Но начнем с наиболее слабых в этом ряду, но наиболее многочисленных и открытых значительно раньше других активных объектов — с сейфертовских галактик. Американский астроном Сейферт обнаружил в 1942 г. галактики с очень яркими ядрами, в которых наблюдались серии эмиссионных линий ряда элементов. Причем, в части из них (Sy I) наблюдались как широкие (с доплеровской шириной в тысячи км/сек), так и узкие (в том числе запрещенные) линии. В другой части галактик (Sy II)

широкие линии не наблюдались. Впоследствии оказалось, что широкие линии обладают переменностью, в том числе коррелирующей с интенсивностью непрерывного спектра ядра галактики. Это означало, что они формируются в относительно небольшой области и значительно ближе к ядру, чем узкие линии, которые такой переменностью не обладают.

Впоследствии оказалось, что подобный эмиссионный спектр характерен и для неизмеримо более мощных излучателей, расположенных уже на космологических расстояниях — квазаров. От них, казалось бы, принципиально отличались радиогалактики, где столь яркое ядро и серии эмиссионных линий не наблюдались. Зато по свойствам радиоизлучения от «вынесенных» за пределы оптической галактики радиооблаков (lobes — долек, лепестей³), связанных с ядром галактики джетами — космическими струями, поставляющими в облака вещество и энергию, радиогалактики и квазары очень сходны. От них, правда, отличаются лаццертиды. Но унифицированная модель, основанная на замечательных идеях радиоастрономов и решающем эксперименте Д. Миллера и Р. Антонуччи в оптике, смогла внести в эту многоплановую картину завидную ясность. Миллер и Антонуччи начали проводить изучение Sy II в поляризованном свете. И они увидели на уровне 18% от полного излучения широкие эмиссионные линии, которых в Sy II до этого никто не наблюдал. Объяснение не заставило себя ждать. Дело в том, что поляризованным излучение обязательно становится при рассеянии. Действительно, электромагнитная волна поперечна: векторы поля лежат в плоскости, ортогональной направлению распространения. Соответственно при рассеянии, когда волна меняет направление распространения, выживает только та проекция поля, которая ортогональна новому направлению. То, что в прямом свете от сейфертовского ядра второго типа широкие линии не были видны, а в поляризованном свете они проявились, стало сенсацией. Обнаруженное явление означало, что от глубоко лежащей области вблизи ядра, где образуются широкие линии, свет дойти не может, он закрыт каким-то препятствием. Но это не сплошная преграда, а с отверстием, через которое выходит излучение от области широких линий и, после рассеяния, изменив существенно направление распространения, попадает в земные телескопы. Так появилась идея «бубликов» — «затеняющих торов». Этим же, согласно сразу ставшей популярной «унифицированной модели»,

³ Некоторое время тому назад был популярен термин «радиоуши».

радиогалактики отличаются от квазаров: ядро в них закрыто тором от наблюдателя. Идея затеняющих торов нашла прямое наблюдательное подтверждение на снимках с космического телескопа Хаббла. И, более того, затеняющие торы были обнаружены по их ИК-излучению с помощью оптического интерферометра из двух 8-метровых телескопов Южной европейской обсерватории и ИК-камеры MIDI наблюдениями В. Джаффе, К. Мезенхаймера и их коллег в 2005 г.

Через отверстия в «бублике» из ядра вырываются в окружающее пространство джеты (рис. 5.13, рис. 5.14–5.17, см. вклейку,

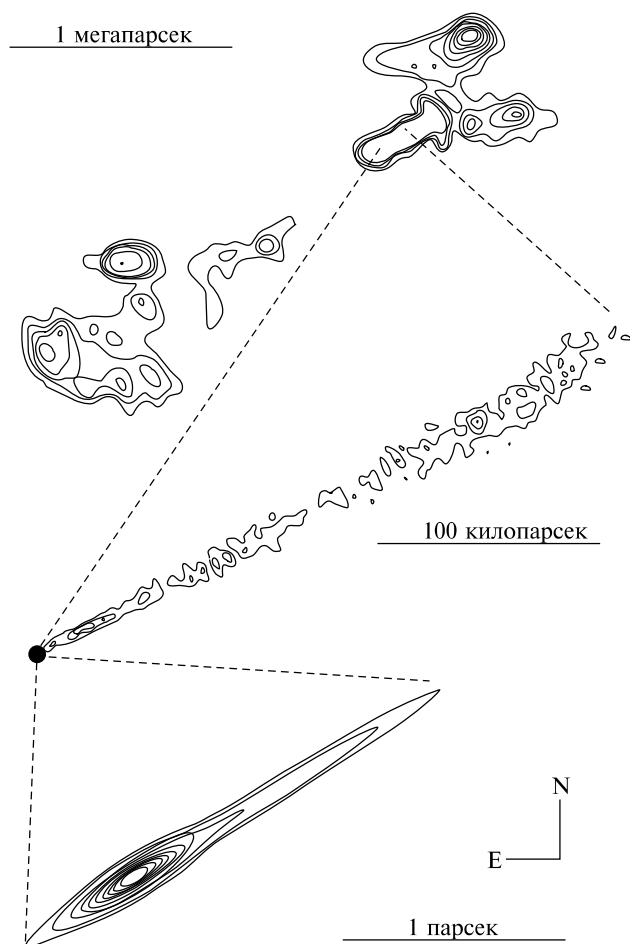


Рис. 5.13. Космические струи (джеты) радиоисточника NGC 6251

а также рис. 5.22) Последние образуются либо в аккреционном диске, окружающем «черную дыру», либо в ее непосредственной окрестности. Затеняющие торы не полностью непрозрачны. Через них просачиваются слабое рентгеновское, инфракрасное и радиоизлучение, обнаруживая в радиогалактиках скрытый от прямого наблюдения «мини-кварз».

Образование джетов при аккреции наблюдается не только в ядрах галактик, но и при возникновении звезд. Примером может служить комплекс HH-34, где символ HH обозначает объекты Херbiga–Харо (рис. 5.16, см. вклейку). Комплекс HH-34 включает в себя центральный источник, видимый в ИК-диапазоне (протозвезду), джет протозвезды, самый большой из известных джетов молодых объектов — около 6 пк, головные ударные волны, ограничивающие область истечения. Узлы джета (собственно HH-объекты) светятся в оптике в запрещенных атомных линиях (высвечивание ударно-возбужденного газа низкой плотности). Ударная волна светится в линиях молекулярного водорода. В миллиметровом диапазоне наблюдается излучение аккреционного диска, плоскость которого перпендикулярна оси джета. Узлы HH-34 движутся вдоль джета от источника со скоростью (в проекции на небо) около 100 км/с вблизи источника и до 300 км/с вблизи от ударной волны. Возможно, что при образовании джета весьма эффективно уносится вращательный момент из аккреционного диска, что способствует быстрому падению вещества, вращающегося в диске, на центральный объект (черную дыру в случае АГЯ или центральную (прото) звезду) и, в результате, возникновению более мощного излучения.

МЕГАМАЗЕРЫ

Мазерные источники в Галактике изучались уже более 10 лет, когда в 1977 в М33 был открыт первый внегалактический H_2O -мазер. Он, как и ожидалось, ассоциировался с областью звездообразования, характеризовавшейся мощным ИК-излучением. Вскоре в NGC 4945 был открыт первый мазер в ядре одной из наиболее ярких в дальней ИК-области галактик, что вполне укладывалось в предыдущую концепцию. Кстати, являясь индикатором звездообразования, мазеры, таким образом могут служить важным инструментом изучения слияний галактик. Но все же последующие VLA- и VLBI-исследования указывали на более компактную структуру, чем давала бы область звездообразования.

Существенный сдвиг произошел, когда Накаи, Ину и Миуоши в 1992 г. открыли симметричные высокоскоростные лазерные линии в NGC 4258, что указывало на связь излучения с вращающимся (аккреционным) диском. В целом H_2O мегамазеры оказались и обычными (области звездообразования) и необычными (аккреционные диски вблизи сверхмассивных черных дыр, парсековые джеты и т.п.) в одно и то же время. В отдельных случаях (NGC 4258) они позволили «заглянуть» через окошки прозрачности в фотосфере глубоко внутрь околоядерной области и провести уникальные по точности измерения.

СЛИЯНИЯ ГАЛАКТИК КАК ПРИЧИНА АКТИВНОСТИ

Долгое время преобладало мнение, что галактики, как многие звезды, образуются путем «дробления», фрагментации из более крупных объектов. Что касается звезд, это возможно, остается правильным. Но сейчас уже имеется множество подтверждений не измельчения, а укрупнения масштабов при эволюции галактик.

Хотя в настоящее время слияния массивных галактик относительно редки, имеются замечательные, хорошо известные примеры (Антенны, Играющие мышки) (рис. 5.15, см. вклейку). В то же время связь слияния галактик с активностью дала новые возможности поиска сливающихся галактик. Так, сверхяркие ИК-галактики (все без исключения!) при детальном изучении на больших телескопах продемонстрировали такие возмущения их структуры, морфологии, которые однозначно указывают на произошедшие в их недавнем прошлом катастрофические процессы взаимодействия (хвосты, множественные ядра и т.п. (рис. 5.18).

Менее яркие инфракрасные объекты также показывают корреляцию с подобной морфологией. Так были найдены «Суперантенны», кроме приливных хвостов — «усиков» антенны — обладающие двойным ядром (рис. 5.19). Само инфракрасное излучение связано с интенсивным звездообразованием при прохождении по газовому компоненту столкнувшихся галактик ударных волн. Падение вещества на центр является последующим актом этой драмы, в результате чего возникает уже и ядерная активность. Возможно, результат слияния и само появление активности ядра зависит от величины и взаимной ориентации угловых моментов сталкивающихся галактик. С этим же может быть связано формирование различных морфологических типов, определяемых вращением и «пережитками» слияний.

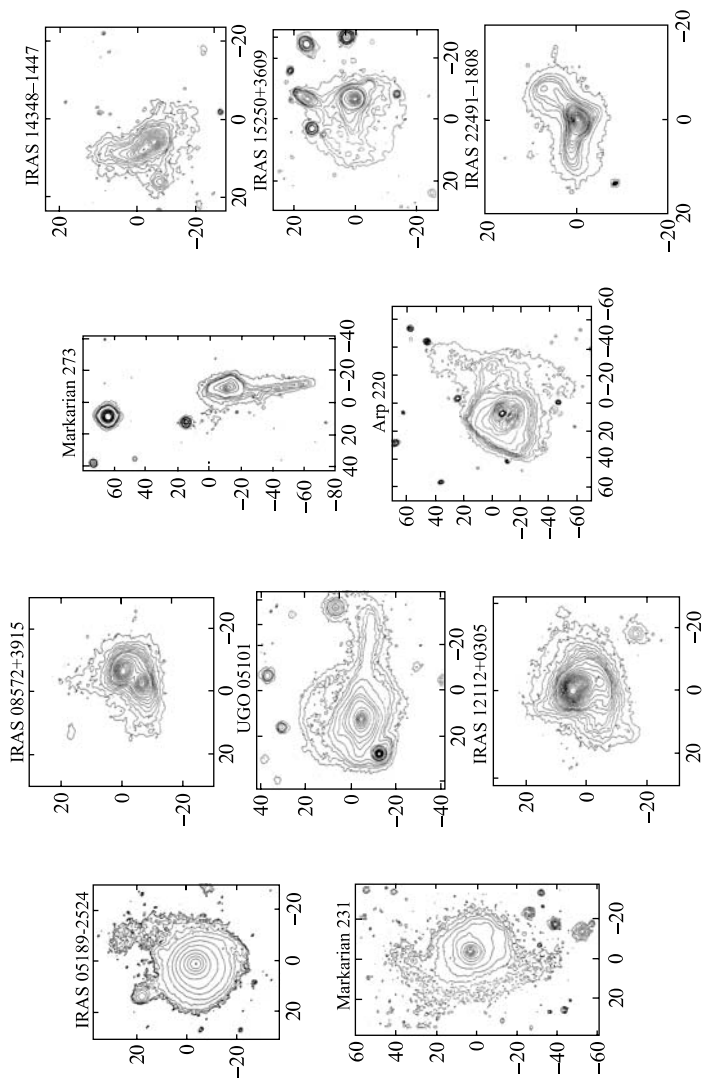


Рис. 5.18. Морфология ярчайших ИК-галактик. Все они демонстрируют следы взаимодействий и слияний

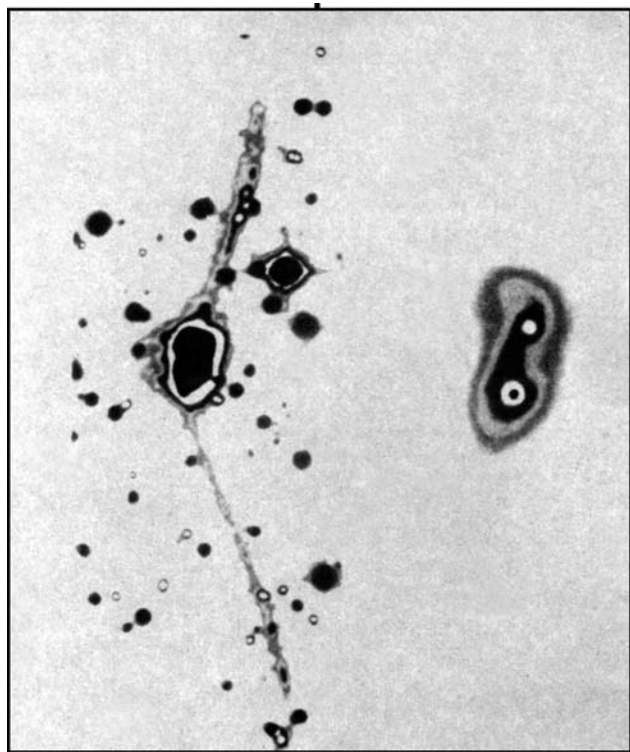


Рис. 5.19. Суперантенны (по Мирабелю и др.). Приливные «усики», справа — двойное ядро в центральной части. Эти взаимодействующие галактики были найдены на месте сильного ИК-источника из списка инфракрасного спутника IRAS

Заметим, что приводить к активности ядра может и каннибализм — поглощение крупной галактической своих не столь больших соседей. Подобная картина была продемонстрирована для квазара PKS 2349–014 Дж. Бакаллом и его соавторами С. Киракас, Д. Шнайдером.

Не составляет исключения и наш Млечный Путь. К не столь давно обнаруженной погружающейся в него карликовой галактике в созвездии Стрельца (в труднонаблюдаемой области за Центром Галактики) буквально «на днях» добавилась еще одна «съедаемая» карликовая галактика в Большом Псе неподалеку от направления на Сириус.

В рамках модели слияний нетрудно понять и «взлет и падение квазаров» по образному выражению А. Кавальери. Как было впервые показано М. Шмидтом, число ярких квазаров быстро

растет в прошлое. Так же, как и число ярких радиогалактик. Это легко понять в модели слияний, ибо в прошлом расстояния между галактиками были значительно меньше и вероятность слияний достаточно велика. Однако на красных смещениях, превышающих $z = 2,5$ (по некоторым данным $z = 3$) начинается резкое уменьшение числа квазаров. Аналогичный спад демонстрируют и радиогалактики (рис. 5.20). Максимум по z в этом

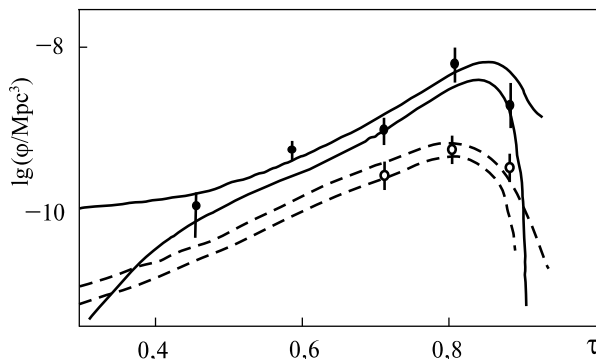


Рис. 5.20. Рост в прошлое $\tau(z)/H = 1 - (1 + z)^{-1,5}$ числа ярких радиоисточников, сопровождающийся обрывом на больших красных смещениях. Аналогичным образом ведут себя квазары. Обрыв, скорее всего, соответствует эпохе рождения квазаров и других активных галактик (по-видимому, за счет слияний галактик между собой)

распределении весьма вероятно может соответствовать эпохе возникновения квазаров за счет слияния галактик. Уменьшение числа квазаров к нашему времени может быть связано как с уменьшением числа слияний, так и с исчерпанием газа, способствующего активности при слияниях. Последние данные подсчетов числа далеких галактик в сверхглубоких полях Хаббла и Субару, а также наблюдения очень далеких галактик с помощью гравитационных линз (рис. 5.21), показывают резкое уменьшение числа массивных галактик с ростом z при $z = 6$. Этому же красному смещению соответствует резкое увеличение концентрации нейтрального водорода, что естественно связать с окончанием процесса вторичной ионизации, сопровождающего образование галактик и звезд. Возможно, что эпохи рождения квазаров и массивных галактик связаны, а сдвиг по красному смещению между ними отвечает естественному запаздыванию процесса аккреции в ядрах галактик по отношению к моменту максимального числа слияний.

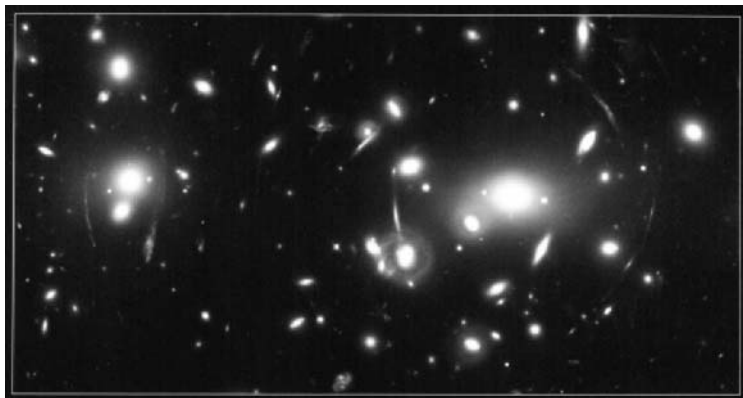


Рис. 5.21. Гравитационная линза. Вытянутые фрагменты «кольца Эйнштейна» представляют собой изображения одного и того же далекого объекта, в данном случае квазара

ОТ СВЕРХНОВЫХ К ГИПЕРНОВЫМ

В семидесятые годы США запустили серию спутников VELA с приемниками гамма-излучения на борту для слежения за ядерными взрывами в атмосфере. Диаграмма направленности у них была очень широкой, но по запаздыванию сигнала на разных спутниках можно было определить направление на источник излучения. Однако, к моменту запуска спутников вступило в силу соглашение о запрещении ядерных испытаний в атмосфере. Тем не менее спутники VELA начали обнаруживать всплески гамма-излучения. Эти результаты были подтверждены и советскими измерениями. Оказалось, что источники подобных гамма-всплесков имеют внеземное происхождение. На этом дело с выяснением природы всплесков застопорилось на долгие четверть века. За это время был накоплен колоссальный наблюдательный материал. Всплески приходили случайно и совершенно равномерно со всех направлений, но определение их координат было очень медленным и очень неточным. Что не давало возможности поставить им в соответствие какой-либо определенный объект на небе. В области локализации всплеска оставались тысячи объектов, а к моменту определения даже этих неточных координат всплеска все переходные процессы успевали давно завершиться. Даже камера БЭТСИ на Комптоновской гравитационной обсерватории, обнаруживавшая по всплеску в день, не изменила ситуации. Изотропное распределение гамма-всплесков на небесной сфере могло означать, что их источник расположен либо очень близко

в нашей галактике (но за пределами Солнечной системы), либо, напротив, очень далеко, на космологических расстояниях. И тогда это взрывные процессы колоссальной, ни с чем не сравнимой мощности.

Подлинную революцию совершила итало-голландская космическая обсерватория Бэппо-Сакс, запущенная в 1996 г. Уже 28 февраля 1997 г. наблюдался всплеск, получивший название GRB 970228 (Gamma Ray Birst, год, месяц, число). За 80 с наблюдения всплеска его положение было определено с невиданной ранее точностью (до нескольких угловых минут). Через несколько часов на эту же область был наведен рентгеновский телескоп, с помощью которого успели заметить быстро угасающий источник рентгеновского излучения, положение которого уже было определено с точностью до угловой минуты. Получив по электронной почте сообщение об этом, астрономы с помощью 4-метрового оптического телескопа Уильяма Гершеля получили изображение области неба в районе всплеска через 21 час после его обнаружения. Через 8 дней они повторили съемку и обнаружили «транзиент» — исчезнувший за это время один из персонажей предыдущей фотографии. 13 марта с помощью «телескопа новых технологий» NTT в Ла Силла, а затем и космического телескопа Хаббла, были проведены тщательные исследования этой области и также обнаружены слабые остатки оптического транзиента, но что это такое, тогда установить не удалось. Тем не менее это был колоссальный скачок вперед. Было решено срочно созвать в мае специальную конференцию для обсуждения проблемы. Участников конференции ждал невероятный сюрприз: всплеск GRB 970508, который удалось сопоставить с оптическим транзиентом, достигшим максимума свечения через несколько дней после гамма-всплеска прежде чем он начал угасать. А еще через несколько дней на радиотелескопе VLA было обнаружено и радиоизлучение от остатка всплеска. На крупнейшем в то время в мире 10-метровом телескопе Кек-II на Гавайях был получен спектр оптического свечения всплеска. Астрономы так волновались, что не полностью открыли защитную крышку телескопа и, по сути, он эффективно работал как 4-метровый инструмент. (Это вдохновляло последующих исследователей на не столь крупных телескопах.) В спектре оказались линии поглощения железа и магния со значительными красными смещениями $z = 0,835$ и $z = 0,767$. Это означало, что источник всплеска лежал дальше, чем объекты, вызвавшие поглощение в линиях.

Гамма-всплеск оказался космологическим объектом! А взрыв, его породивший, — на порядок более мощным, чем взрыв сверх-

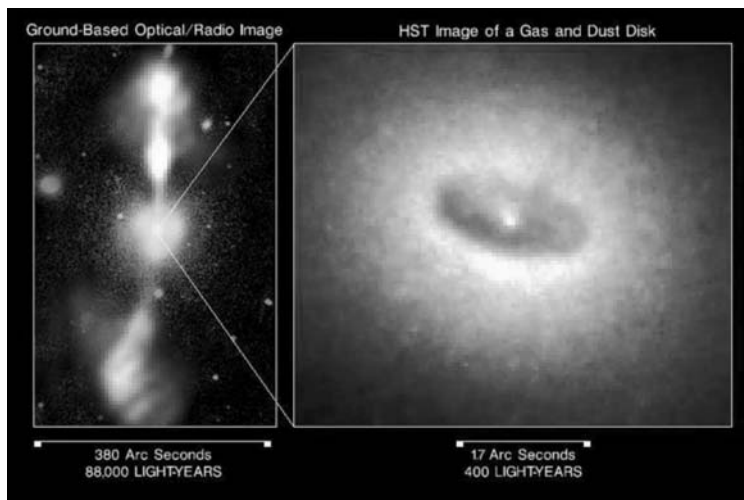


Рис. 5.22. Прямые наблюдения ядра активной галактики. Слева — наземные радионаблюдения, видна струя (джет). Справа — оптические наблюдения с помощью космического телескопа «Хаббл», виден диск или тор, окружающий центральную часть ядра

новой. Такие объекты впоследствии получили название гиперновых. В настоящее время отождествлено уже несколько десятков всплесков. На месте транзиев в большинстве из них удалось обнаружить родительские галактики. Они оказались в одних случаях очень далекими, в других довольно близкими. Никакой специальной экзотикой эти галактики не отличаются, кроме, пожалуй, того, что их видимые свойства близки к свойствам галактик, испытывающих фазу мощного звездообразования. Всплески не связаны с центральными частями этих галактик и происходят, скорее, на периферии. Интересно выяснить, нет ли связи между всплесками и процессами слияния галактик, инициирующих звездообразование? Тем не менее, мы вынуждены прервать эту занимательную историю и вернуться к радиоизлучению. Оказалось, что его характер с течением времени существенно изменялся, а именно: вначале наблюдались очень сильные флуктуации радиоизлучения, которые через некоторое время стихли, и излучение сделалось плавным (рис. 5.23). Естественное объяснение такого поведения радиоизлучения сродни объяснению того, почему звезды мерцают, т. е. демонстрируют сильные флуктуации яркости, а планеты нет. Вначале источник радиоизлучения, связанный с гамма-всплеском, был очень малым, практически точечным. Но с течением времени он расширился и вскоре стал столь

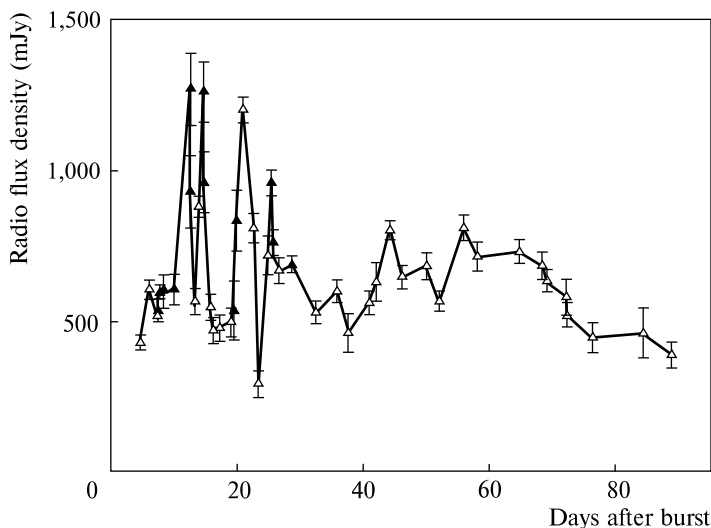


Рис. 5.23. Послесвечение гамма-всплеска в радиодиапазоне. По мере расширения излучающего источника исчезают сильные флуктуации интенсивности (мерцания) (по работе Фрайла и др.); ▲ — VLBI, △ — VLA

большим, что излучение от его разных участков, складываясь в антенне (глазе наблюдателя), начало усредняться, благодаря чему, мерцания исчезли. Это наблюдение не только доказало взрывной характер процесса — наличие быстро расширяющегося излучающего объекта, но и позволило оценить его размер. Последний в момент прекращения мерцаний оказался порядка размеров Солнечной системы.

Соответственно, по оценкам скорости и времени расширения первоначальный размер области всплеска был, скорее всего, порядка звездного. Колоссальное выделение энергии может быть связано с особым характером взрыва, сопровождающем, например, прямой коллапс массивной звезды в черную дыру, слияние нейтронных звезд, и другие экзотические события. Интенсивные теоретические исследования предусматривают несколько сценариев с участием релятивистских ударных волн. Возможно, однако, что процесс излучения при гамма-всплесках является сильно анизотропным (за счет вращения либо магнитного поля) и ультрарелятивистским и мы видим лишь те всплески, выброс от которых и, соответственно, диаграмма направленности излучения «смотрит» на нас. Тогда энергии, выделяемые при взрыве, оказываются значительно меньше и могут соответствовать энергиям мощных сверхновых, связь гамма-всплесков с которыми

представляется все более и более вероятной. Исследования этих удивительных явлений продолжаются.

Примечательно, что очень далекие галактики (равно как и многие квазары) наблюдаются через предсказанные Эйнштейном гравитационные линзы (рис. 5.19), роль которых могут играть оказавшиеся на пути к наблюдателю галактики или даже скопления галактик. Благодаря уменьшению числа квазаров на больших красных смещениях абсолютный рекорд по дальности постепенно переходит от них к галактикам.

Что касается близких объектов с активными ядрами — удаётся все более детально рассмотреть их тонкую структуру, в частности выделить «затеняющий тор» или диск (рис. 5.20), окружающий центральный компактный объект.

В этой главе мы пытались нарисовать общую картину излучения радиоволн внегалактическими источниками. Хотя многие детали этой картины уже выяснены, остается множество вопросов, на которые пока еще нет ответа. Пожалуй, наименее ясным остается детальный механизм преобразования гравитационной энергии в электромагнитную энергию излучения и механическую энергию космических струй в ядрах галактик и квазаров, объектах относительно небольших размеров, обладающих огромными запасами энергии — до 10^{60} эрг, а также ее транспортировки по джетам на колоссальные, превышающие размеры галактик расстояния.

Глава 6

МИР В ЦЕЛОМ

Какое чудо, если есть
Тот, кто затеплил в нашу честь
Ночное множество созвездий.
А если все само собой
Устроилось, тогда, друг мой,
Еще чудесней!

А. С. Кушнер

С помощью радиоастрономии человеку удалось, как мы видели, проникнуть в наиболее отдаленное прошлое и в наиболее удаленные наблюдаемые сейчас части Вселенной. Наша последняя глава посвящена вкладу радиоастрономии в космологию — науку о Вселенной в целом — точнее, о той ее части, иногда называемой Метагалактикой, которая уже доступна исследованиям.

Мир в целом требует для своего описания хотя бы беглого знакомства с идеями теории относительности. Классическое описание по Ньютону приводит к противоречиям. С этим связаны родственные парадоксы Ольберса и Неймана–Зеелигера. Один из них утверждает, что небо должно быть равномерно залито ярким звездным светом, так как убывание освещенности с расстоянием точно компенсируется ростом числа звезд (уместнее было бы сказать — скоплений галактик). Второй — что по аналогичным причинам сила тяготения в безграничной однородной в среднем Вселенной должна быть бесконечно большой в каждой точке.

Но так же, как разрешение этих парадоксов требует привлечения лишь самых общих идей релятивистской теории, а в остальном может опираться на классическую физику, так и в изложении космологии нам достаточно будет подобного подхода.

ГЕОМЕТРИЯ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ МИРА

Специальная (частная) теория относительности (СТО) родилась из попытки примирить два величайших творения человеческого разума — механику Ньютона и электродинамику Максвелла. Принцип относительности Галилея, идея «движения по

инерции», законы Ньютона, в которых сила, взаимодействие тел являются причиной их ускорения, — все это в свое время было абсолютно непривычно современникам, противоречило общепринятым умозаключениям древних философов и, казалось бы, каждодневному опыту. Но в действительности эта классическая физика следовала из наблюдений и экспериментов той эпохи. «Гипотез не строю» — это принцип не только Ньютона, но и всей науки нового времени. Сами законы Ньютона ничего не говорят о природе сил. Но и закон Кулона, и идентичный ему по форме закон Всемирного тяготения устанавливают вид сил, и эти силы являются дальнодействующими, т. е. действующими на расстоянии, и притом «мгновенно». С точки зрения электродинамики Максвелла все это уже становится непонятным. В электродинамике основная идея — это идея близкодействия и поля. Электромагнитная волна, осуществляющая взаимодействие, распространяется с конечной скоростью, от точки к точке. Взаимодействие оказывается запаздывающим, а отнюдь не мгновенным. От конечной скорости распространения света прямой путь к предположению о конечной скорости распространения любого сигнала. И, следовательно, к существованию предельной скорости сигнала. Эксперименты Майкельсона доказали, что

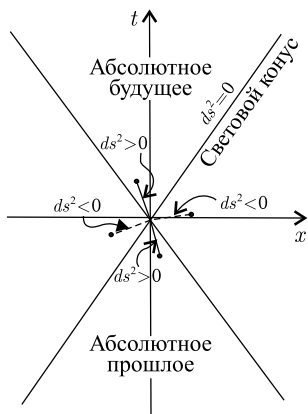


Рис. 6.1. Световой конус в xt -плоскости

свет распространяется так, как должен распространяться такой предельный сигнал. Анализ, проведенный Эйнштейном (с 14 лет ему не давал покоя вопрос о том, что будет, если «оседлать» световую волну), удивителен по ясности и глубине. Он показал, что конечность и, главное, независимость предельной скорости от движения измеряющего ее наблюдателя приводят к относительности промежутков времени. Неизбежность при этом синхронизации часов в разных точках пространства световыми сигналами влечет за собой пересмотр таких понятий, как одновременность, «раньше» и «позже», которые, напротив, могут зависеть от движения наблюдателя (рис. 6.1). Условие постоянства скорости света Майкельсона (совершенно независимо!), положенное Эйнштейном в основу новой механики, меняет привычную для XIX века картину мира при скоростях v , сравнимых со скоростью света. Таков мир элементарных частиц. Для нас в конце

XX — начале XXI века теория относительности давно стала реальностью. Количество экспериментальных подтверждений ее неисчислимо. А такие следствия, как «эквивалентность» энергии и массы, известны сейчас каждому школьнику. Нас будет интересовать в дальнейшем не столь широко известная общая теория относительности (ОТО), или релятивистская теория тяготения. Но предварительно познакомимся с тем геометрическим языком, который используется в теории относительности.

Поскольку время относительно и будет преобразовываться при переходе от одной движущейся системы координат к другой, удобно прибавить к трем пространственным координатным осям временную ось и «перейти» таким образом в четырехмерное пространство–время. Но временная координата, конечно, отличается от пространственной физически. Нетрудно понять сходство и различие между направлениями направо и налево, с одной стороны, и направлениями в прошедшее и в будущее — с другой. Это проявляется, в частности, в том, что если записать теорему Пифагора для близких точек в мире Эйнштейна–Минковского, то, в отличие от обычного вида этой теоремы в трехмерном пространстве, квадрат временной «длины» войдет в нее с обратным знаком. (Чтобы полностью добиться формального совпадения, иногда удобно ввести «мнимое» время $x_4 = it$ — в этих осях теорема Пифагора выглядит совершенно подобной обычной трехмерной.) Но не будем этого делать. «Расстояние» в четырехмерном мире называется интервалом, а точки — событиями. Происхождение этих названий довольно очевидно. Итак, локально, для близких событий, разделенных временем dt и расстоянием dl , интервал

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2$$

(теорема Пифагора для пространства–времени). При $ds^2 > 0$ говорят о времениподобном интервале, при $ds^2 < 0$ — о пространственноподобном. События, которые могут быть связаны световым пучком, лежат на световом конусе $ds^2 = 0$. Общий знак выбран так, чтобы с помощью интервала удобнее было переходить ко времени, а не к расстоянию.

Постоянство предельной скорости c (скорости света) при переходе к равномерно движущимся друг относительно друга (инерциальным) системам отсчета выражается в постоянстве (инвариантности) интервала. Это и приводит к знаменитым релятивистским формулам СТО.

Разумеется, дальное действие закона тяготения Ньютона противоречит релятивистским идеям. Но чтобы построить реляти-

вистскую теорию тяготения, Эйнштейну пришлось отказаться от ограничений СТО, в которой рассматриваются только инерциальные системы отсчета. Так как в поле тяжести все тела движутся совершенно одинаково независимо от их масс, возникает искушение представить это поле как результат действия «сил инерции». Например, всем хорошо известны явления в ускоряемом самолете или лифте. Силы, возникающие при ускорениях, способны полностью имитировать силу тяжести. Более того, локально, в малом они неотличимы. В падающем лифте, как и в движущемся по орбите спутнике, достигается состояние невесомости.

В неинерциальных системах координат интервал уже нельзя одновременно во всех точках привести к виду, свойственному обычной теореме Пифагора: обязательно будут оставаться зависящие от «координат» коэффициенты, а в общем случае — и «перекрестные» слагаемые, а не только «суммы» квадратов длин и промежутков времени. Если в предыдущей записи интервала эти коэффициенты (их принято обозначать g_{ik}) были постоянны — коэффициент при $(c dt)^2$ $g_{00} = 1$, а коэффициенты при dx_1^2 , dx_2^2 , dx_3^2 : $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$, то теперь это некоторые функции координат и времени. Но описание поля тяжести при помощи имитации его силами инерции ограничено. Следующий важнейший шаг — формулировка принципа относительности при переходе уже к произвольным системам координат. Набор десяти величин g_{ik} и позволяет описать гравитационное поле. Выражение для интервала задает метрику пространства-времени. Эйнштейн в 1915 г. получил уравнения для метрики, которая определяется веществом. Но эта метрика, вообще говоря, соответствует уже не плоскому, а искривленному пространству, что в свою очередь влияет на движение тел. Таким образом, массы вызывают искривление пространства, которое воспринимается как тяготение (или действие сил инерции). Теория тяготения становится теорией поля (для величин g_{ik}) с присущими таким теориям свойствами локальности, близкодействия. Но уравнения этого поля значительно сложнее уравнений электродинамики. Они должны быть записаны для большого числа величин g_{ik} и существенно нелинейны.

Решать эти уравнения очень трудно. Но зато полученные решения описывают исключительно важные и интересные закономерности, относящиеся к нашей Вселенной.

Как показывает опыт, в очень больших масштабах наш мир изотропен и однороден. Это значит, что все направления в нем равноправны, а все точки находятся в одинаковых условиях.

Правда, все это должно проявляться в очень больших масштабах, превышающих размеры сверхскоплений галактик, но еще малых в сравнении с общим масштабом Метагалактики. Но с математической точки зрения это самый простой предельный случай, и естественно, что с него началось исследование уравнений. Сам Эйнштейн вначале искал не зависящие от времени статические решения, но оказалось, что написанные им уравнения не имеют таких решений. Это вынудило его пересмотреть исходные уравнения. Оказалось, что общие принципы, с помощью которых они были получены, допускают добавление слагаемого (оно получило название космологического, или Λ -члена), которое подобно материи могло служить источником кривизны пространства–времени. При этом уравнения допускали и статические решения.

Природа космологического члена исключительно глубокая и уводит в нерешенные проблемы квантовой природы вакуума — «пустого», не содержащего реальных частиц, но флуктуирующего и могущего «поляризоваться» пространства–времени.

Рассмотрим вначале ситуацию без Λ -члена. Геометрия пространства определяется находящейся в нем материей. В силу однородности мира «в среднем» он оказывается нестатичным.

Впервые это показал А. А. Фридман, который в 1922 г. нашел решения, соответствующие расширению Вселенной. В полуголодный Петроград только-только были привезены научные журналы из-за рубежа, не поступавшие в годы войны и революции. В них были и статьи Эйнштейна, где формулировались уравнения ОТО. Грандиозность проблемы соответствовала духу времени.

Впоследствии теоретические предсказания Фридмана прекрасно согласовались с наблюдениями и выводами Э. Хаббла. И уже в «эру Хаббла», в 30-е годы, нестационарные решения вновь получил и подробно исследовал Леметр. В расширяющемся мире Фридмана «возраст» τ Вселенной конечен. Его оценка по постоянной Хаббла $\tau \sim H^{-1}$ приводит к значению 13–18 млрд лет. Это согласуется с независимыми оценками ядерной физики, геологии, космогонии и т. п. Сразу же разрешаются и те парадоксы, с которых мы начали. Действительно, в данную точку электромагнитные и гравитационные поля приходят теперь из слоя конечной толщины ct , испытывая, кроме того, красное смещение. Поэтому ни сплошного яркого фона, ни бесконечных сил тяжести возникнуть не может.

Если в современную нам эпоху (при $\tau = 10^{10}$ лет)

$$\rho < \rho_{\text{кр}} = \frac{3}{8\pi G} H^2 \approx 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3,$$

то пространство обладает отрицательной кривизной, расширение будет продолжаться неограниченно долго (рис. 6.2).

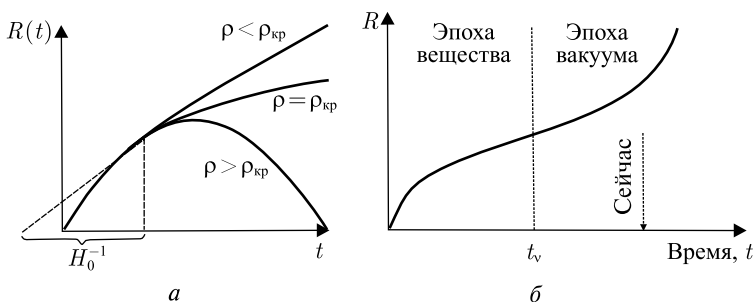


Рис. 6.2. Зависимость расстояний между телами от времени в расширяющейся Вселенной: *a* — в открытых и закрытой фридмановских моделях с преобладанием вещества; *б* — в мире с преобладанием вакуума (рис. из книги А. М. Черепашука и А. Д. Чернина)

При $\rho = \rho_{\text{кр}}$ кривизна пространства равна нулю. Расширение неограничено, но темп его замедлен. Об этих мирах говорят, что они открыты. При $\rho > \rho_{\text{кр}}$ мир замкнут. Пространство обладает положительной кривизной, напоминая сферу, но не двух, а трех измерений. Расширение в таком гравитационно связанном мире в отдаленном будущем должно смениться сжатием.

Вклад вакуума, обладающего антигравитацией, существенно изменяет картину. Но об этом — ниже.

Все три случая могут быть описаны метрикой

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \frac{R^2(t)}{(1 + kr^2/4)^2} [dr^2 + r^2 (d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\phi^2)].$$

Здесь r , Θ и ϕ — полярные координаты; $R(t)$ — меняющийся во времени (растущий в открытых моделях; вначале растущий, а затем убывающий в закрытых моделях) масштаб. Коэффициент k характеризует кривизну трехмерного пространства, которая в модели Фридмана не зависит от времени. При $k = 0$ трехмерное пространство не искривлено. Это «привычное» евклидово пространство, правда растягивающееся во времени из-за расширения. При $k < 0$ это гиперболическое пространство отрицательной кривизны (пространство Лобачевского). Наконец, при $k > 0$ это сферическое замкнутое пространство Римана. Представить себе его свойства легче всего, поскольку здесь можно провести аналогию с поверхностью сферы. Например, очевидно, что отношение длины окружности (параллели) на сфере к радиусу (части

меридиана) меньше, чем 2π . Расширяющийся мир в этом случае подобен такой сфере, увеличивающейся как надуваемый шар.

Решение Фридмана соответствует тому, что мир начинает расширяться из точки; начальная плотность при этом бесконечно велика. Это особое (сингулярное) состояние, конечно, находится далеко за пределами применимости классической теории. Уже при огромных, но конечных плотностях порядка $\rho_{Pl} = c^5/hG^2$ станут существенными квантовые эффекты, не учитываемые уравнениями ОТО. Но независимо от этого крайне интересен вопрос об особенностях в решении уравнений Эйнштейна. Можно думать, что появление сингулярности — следствие той идеализации (однородности мира), которая заложена в решение Фридмана. Однако Р. Пенроуз и С. Хокинг показали, что сингулярность обязательно должна присутствовать в решениях, соответствующих расширяющейся Вселенной, хотя о виде ее в общем случае нельзя сделать каких-либо заключений. Ни неоднородность, ни анизотропия не могут полностью бесследно «размыть» особенность решения.

Вблизи от сингулярности оказывается возможным построить общее решение уравнений Эйнштейна. Его нашли В. А. Белинский, Е. М. Лифшиц и И. М. Халатников. Оказывается, что решение представляет собой сильно анизотропное нелинейное гравитационное поле, быстро изменяющее направление наибольшего сжатия. При этом могут быть возбуждены и нелинейные гравитационные волны. Никакого влияния на поведение всех величин вещество при этом не оказывает (в отличие от решений Фридмана, где, напротив, оно все определяет).

Во фридмановском мире на малых временах, когда колоссальна кинетическая энергия расширения, равно как и потенциальная энергия поля тяжести, легко найти зависимость от времени для плотности и радиуса мира. Из соображений размерности для $\rho(t)$ следует

$$G\rho \approx t^{-2} \quad (t \text{ малó}),$$

где t — время, отсчитанное от сингулярности. Если давлением можно пренебречь (холодная «пылевая» материя, причем роль пылинок могут играть галактики), то из постоянства суммарной массы пылинок ρR^3 следует

$$R(t) \sim t^{2/3} \quad (t \text{ малó}, P = 0).$$

Роль давления двояка. Оно может противостоять гравитации, как, например, в звездах, служить причиной разлета при взрывах. Но эти силы вызываются перепадом давлений, которого

нет в однородной Вселенной. В ОТО давление само создает гравитационное поле и вблизи от сингулярности этот эффект преобладает. При расширении ультрарелятивистского (например, фотонного) газа из-за совершаемой за счет давления работы уменьшается энергия и связанная с ней масса газа, и величина ρR^3 уже не постоянна. Но, как мы увидим дальше, станет постоянной ρR^4 . Поэтому, например, если Вселенная заполнена излучением, то

$$R(t) \sim t^{1/2} \quad (t \text{ малó, } P = \rho c^2/3).$$

Даже в открытых моделях наличие вещества приводит к замедлению расширения из-за сил тяготения. Так же как и постоянная Хаббла, параметр замедления может быть определен из наблюдений достаточно удаленных объектов (для которых становятся заметными отклонения от закона убывания интенсивности обратно квадрату расстояния). Но для этого нужна подходящая «стандартная свеча», видимая с таких расстояний, и очень высокая точность измерений, стоящая на пределе возможностей аппаратуры. Поэтому экспериментальное значение параметра замедления долго не удавалось получить. Когда же его удалось измерить, ученый мир пришел в крайнее возбуждение: вместо ожидавшегося замедления оказалось, что мир при своем расширении ускоряется! Ни в одном из перечисленных вариантов устройства Вселенной подобное поведение невозможно. Из-за притягивающего влияния вещества расширение может происходить только с замедлением.

Теперь самое время вспомнить о космологическом члене в уравнениях Эйнштейна и об описываемом им вакууме, обладающем свойством антигравитации. На этом еще в 80-е годы XX в. А. Гуттом, П. Стейнхардом в Америке, А. Старобинским, А. Линде в СССР и другими учеными была построена теория так называемой инфляции Вселенной. Она опирается на идею Э. Глинера об антигравитации вакуума.

Источником гравитационного поля в уравнениях Эйнштейна (без Λ -члена) является вещество. Уравнения имеют очень простой символический вид

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} = \kappa T_{ik}.$$

Но в действительности, это очень сложные уравнения. Тензор R_{ik} (тензор Риччи) и скалярная кривизна R , входящие в них, являются известными, но весьма сложными функциями метрики g_{ik} и ее первых и вторых производных по координатам и времени. Сам тензор Риччи — это упрощенный во вполне определенном математическом смысле тензор кривизны пространства-времени. Тензор T_{ik} — так называемый тензор энергии-импульса вещества, включающий и электромагнитное поле, — имеет в сопутствующей веществу системе

отсчета также очень простой вид: его ненулевые компоненты — это лишь временная компонента $T_{00} = \epsilon$ (где ϵ — плотность энергии) и пространственные компоненты $T_{11} = T_{22} = T_{33} = p$ (где p — давление).

Из известных общих математических соображений в правой части уравнения Эйнштейна может фигурировать еще одно слагаемое вида Λg_{ik} , где Λ произвольная константа. С точки зрения физики, этот член, однако, принципиально отличается от слагаемого T_{ik} , так как никак не связан с имеющимся во Вселенной веществом. В то же время, так же как и член с веществом, он является источником метрики g_{ik} (гравитационного поля), но уже от наличия вещества не зависящим. Как сейчас уже стало ясно, это, тем не менее, физически очень важный член. Он описывает вклад и влияние вакуума¹. Последнее можно пояснить, в частности, следующим способом. Представим слагаемое Λg_{ik} в том же виде, что и член с веществом, т. е. в виде некоторого T_{ik}^Λ . Очевидно, что соответствующая плотность энергии $\epsilon_\Lambda = \kappa^{-1}\Lambda$, а давление $p^\Lambda = -\kappa^{-1}\Lambda$ (напоминаем, что $g_{00} = 1$, $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$). Последнее, в свою очередь, означает, что «среда», порождающая такие плотность энергии и давление, должна обладать свойством $\epsilon + p = 0$. Но такая связь может осуществляться только для вакуума. В частности, это видно из преобразований Лоренца в движущиеся инерциальные системы отсчета: условие $\epsilon + p = 0$ обеспечивает неизменность любых величин при таких преобразованиях. Только вакуум совершенно нечувствителен к подобным переменам и не реагирует на движение. Впрочем, тот факт, что при таком уравнении состояния мы имеем дело с вакуумом, можно обосновать, исходя и из других физических соображений, которыми мы не будем затруднять читателя. В то же время это свойство означает, что $p = -\epsilon$.

В отличие от обычного вещества, при положительной плотности энергии вакуум обладает отрицательным давлением, т. е. *антигравитацией*. Действительно, отрицательное давление приводит к тому, что любые две частицы будут удаляться, «отталкиваться» друг от друга (а не притягиваться, как при обычной гравитации).

К антигравитации может приводить не только вакуум, но и гипотетическое вещество с уравнением состояния $p = -q\epsilon$ («квинтэссенция» при $1/3 < q < 1$, «фантомное» вещество при $q > 1$). Некоторые ученые считают, что именно такое еще не открытое (а, возможно, и несуществующее) вещество предпочтительней вакуума при объяснении ускоренного расширения Вселенной и предсказании совершенно необычных свойств пространства–времени, которые могут ему сопутствовать. В частности, даже малая примесь фантомного вещества может приводить к существованию «кратовых нор», связывающих удаленные обла-

¹ В первоначальных классических исследованиях эта сторона дела совершенно не обсуждалась. Первым на связь космологического члена с физическим вакуумом обратил внимание ленинградский физик Э. Глинер в 50-е годы. Но тогда эта идея не нашла поддержки.

сти Вселенной и даже различные вселенные в соответствующих моделях «мультиверса».

Согласно теории инфляции, в ничтожно малые дофридмановские времена после Большого Взрыва отрицательное давление вакуума привело к столь быстрому (экспоненциальному во времени) расширению, что его, чтобы не путать с последующим, значительно более медленным Фридмановским расширением, даже и назвали другим словом — раздувание. Оно описывается решением де Ситтера уравнений Эйнштейна, когда Λ -член, обладая планковскими параметрами, безраздельно господствует над веществом. Сама инфляция, как фаза эволюции Вселенной, покоится на представлениях о мире элементарных частиц при совершенно недостижимых в лабораториях энергиях. Ее основным результатом (для космологии) является то, что к концу своей стадии она поставляет для дальнейшей эволюции заполненный веществом практически совершенно плоский мир, в котором все элементы причинно связаны с другом, так как возникли из одного и того же микроскопического объемчика планковских масштабов² — $l_{Pl} \sim 10^{-33}$ см за счет его почти мгновенного «раздувания» (от планковского времени до 10^{-36} с!).

В современную эпоху для объяснения ускоренного расширения также был привлечен вакуум. Но прежде чем обсудить эту загадку, сделаем важное для нас отступление.

ПЕРВОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ — ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Не грезится,
Я этого не выдумал,
А то и дело в руки лезут мне
Предметы, вещи тяжести невиданной,
Не соответствующей их величине.

Л. Мартынов

Проблема сингулярности, кроме космологического аспекта, относящегося к миру в целом, к большой Вселенной, имеет и локальный аспект. Он связан с судьбами звезд и проявляется

² Из размерных констант, характеризующих физические теории (G — гравитация, c — релятивистская теория, \hbar — квантовая теория), можно составить величины размерности длины $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$, времени t_{Pl} , массы m_{Pl} , плотности $\rho_{Pl} = m_{Pl}/l_{Pl}^3$. Считается, что классическая теория пространства-времени, а значит и ОТО, справедлива для масштабов, значительно превышающих планковские. На планковских масштабах уже существенны квантовые эффекты в том числе квантовые флуктуации.

при гравитационном сжатии. Мы уже говорили, что при определенных условиях такое сжатие становится катастрофическим. Происходит коллапс. После открытия нейтронных звезд — пульсаров — ни у кого нет сомнений в его реальности. Как следствие, должны возникать объекты совершенно необычной природы — черные дыры. Критическая масса, необходимая для этого, не так уж велика — она составляет не более трех масс Солнца. Черная дыра — типичный объект ОТО. Это особая область пространства-времени, где ярко выражены эффекты релятивизма и тяготения. В мощнейших гравитационных полях частицы с необходимостью разгоняются до световых скоростей.

Но понять существо дела можно на очень простом классическом примере. Удивительно, что этот пример принадлежит еще П. Лапласу. (Несколько ранее крупный ученый англичанин Митчел также обсуждал эту проблему. Отношения между Англией и Францией в тот период были, мягко говоря, неважные и, скорее всего, Лаплас просто не знал об этом.) В первых двух изданиях своей «Системы мира» (за 1796 и 1799 гг.) Лаплас писал: «Светящееся небесное тело, обладающее плотностью Земли и диаметром, в двести пятьдесят раз превосходящим диаметр Солнца, из-за силы своего притяжения не дает своему свету достигнуть нас. Таким образом, возможно, что самые большие светящиеся тела во Вселенной именно по причине своей величины остаются невидимыми» (цитируется по книге Ч. Уитни «Открытие нашей Галактики»). Современному читателю все это станет очевидным, если сказать, что у черной дыры первая космическая скорость больше скорости света. Поэтому никакие тела, даже свет, не смогут покинуть ее «поверхность». Ниже мы увидим, что и поверхности в обычном смысле у нее не может быть.

Космическая скорость получается, если приравнять кинетическую энергию частицы $mv^2/2$ ее потенциальной энергии на поверхности звезды радиуса r и массы M : mGM/r . Отсюда для так называемого гравитационного радиуса r_g , на котором космическая скорость $v = c$, получаем

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Это выражение в точности совпадает с тем, которое следует из ОТО, несмотря на неправомерность его «вывода» в релятивистской области.

Но в отличие от того, что представлял себе Лаплас, звездные черные дыры — это компактные объекты, так как при массе порядка нескольких солнечных их гравитационный радиус

составляет около десятка километров. Чудовищные невидимые звезды Лапласа не могли бы существовать — их раздавила бы собственная тяжесть. Тем не менее возможность существования сверхмассивных черных дыр с массой 10^{11} – $10^8 M_\odot$ в центрах галактик, по-видимому, доказуемая реальность современной астрофизики.

Однако не следует преувеличивать возможностей классической физики при изучении черных дыр — это область ОТО. Любопытно, что для сферически симметричного гравитационного поля, создаваемого точечной массой M , решение уравнений Эйнштейна было найдено еще в 1916 г. К. Шварцшильдом. Метрика эта имеет вид (при $r > r_g$)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 + r^2 (d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\varphi^2) - \frac{dr^2}{1 - r_g/r}.$$

Поверхность $r = r_g$ называется горизонтом событий. Согласно сказанному раньше, никакая информация не может быть получена внешним наблюдателем о процессах, происходящих внутри горизонта. Множитель при $c dt$ описывает замедление хода часов для внешнего наблюдателя с приближением часов к горизонту. Этому соответствует гравитационное красное смещение

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}} \quad (r > r_g).$$

Множитель при последнем слагаемом описывает искривление пространства. Кратчайшими расстояниями — так называемыми геодезическими, по которым движется свет, — в таком пространстве также являются «кривые» линии. Отклонение света обычной звездой с радиусом $R \gg r_g$ происходит на угол $\Delta\varphi = 2r_g/l$, где l — наименьшее («прицельное») расстояние, на котором свет прошел бы мимо звезды, двигаясь по прямой. Для Солнца при $l = R_\odot$ отклонение $\Delta\varphi = 1,75''$. Вблизи от поверхности горизонта черной дыры искривление лучей очень велико. Они многократно обходят поверхность дыры, в конце концов бесследно в ней исчезая. Все это должно создавать фантастические картины. Но наблюдать их можно, только падая на поверхность горизонта либо проносясь мимо на большой скорости, так как в непосредственной близости от черной дыры уже нет устойчивых орбит. На самой поверхности горизонта сила тяжести, действующая на любое покоящееся тело, стала бы бесконечно велика. Поэтому все тела падают, делая то или иное количество витков, на центр притяжения, где имеется сингулярность — особенность пространства–времени. Раньше думали, что она возникает уже при

$r = r_g$, и считали, что для $r \leq r_g$ просто неприменимо полученное решение. Тем более что при переходе через эту поверхность из-за изменения знаков пространственная и временная координаты как бы меняются местами. Времениподобный интервал превращается в пространственноподобный, и наоборот. На деле, как оказалось, на поверхности горизонта нет физических особенностей. Просто становится невозможной стационарная, жесткая система отсчета. Но можно связать ее с падающим лифтом. Тогда внутри поверхности горизонта существует нестационарная метрика. И физическая особенность в «центре», в смысле которой еще предстоит разобраться науке.

При коллапсе звезда уходит под свою поверхность горизонта (рис. 6.3). При этом для внешнего наблюдателя теряется почти

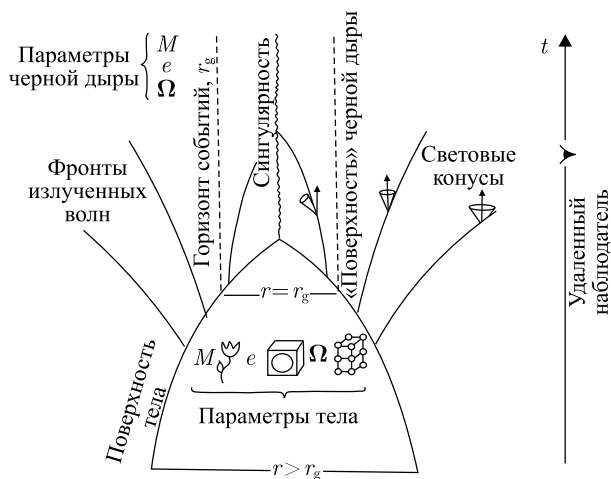


Рис. 6.3. Гравитационный коллапс

вся информация о ней: о ее химическом составе, движении ее частиц и т.п. При коллапсе, как показали В. Л. Гинзбург и Л. М. Озерной, от звезды «отрывается» ее магнитное поле. «Черные дыры не имеют шевелюры», — такой итог подвел известный американский исследователь Дж. Уилер. Кроме массы M , гравитационное поле черной дыры зависит от ее вращения и электрического заряда. Вращение уменьшает горизонт (так как центробежная сила препятствует силе тяжести). «Радиус» горизонта теперь (согласно решению уравнений Эйнштейна, полученному Керром)

$$R_g = \frac{1}{2} \left(r_g + \sqrt{r_g^2 - 4a^2} \right) \quad (r_g > 2a),$$

где a — момент вращения, имеющий в выбранных единицах размерность длины. У керровской черной дыры есть еще одна (большая) поверхность — эргосфера с «радиусом»

$$R_э = \frac{1}{2} \left(r_g + \sqrt{r_g^2 - 4a^2 \cos^2 \Theta} \right).$$

Внутри этой поверхности уже невозможна статическая система отсчета, но некоторые тела могут еще выйти из-под нее

во внешнюю среду. При этом возможен так называемый процесс Пенроуза, при котором от черной дыры отбирается та часть ее энергии, которая связана с вращением (рис. 6.4). Керровская дыра способна усиливать падающее на нее излучение, ускорять частицы.

Замечательный результат связан с термодинамикой черных дыр. Во всех процессах, происходящих в природе, согласно второму началу термодинамики происходит лишь увеличение общего беспорядка, характеризуемого энтропией. Но на первых порах казалось, что здесь этот принцип нарушается. Действительно, проваливаясь под горизонт событий, любое тело уносит с собой «свой беспорядок», свою энтропию. При этом порядок в доступной, «контактной» части мира должен расти.

Возник вопрос, нельзя ли с помощью черных дыр в принципе создать вечный двигатель «второго рода» — передавать энергию от холодного к тепловому без затраты работы.

Но действительность оказалась еще интересней. Как показали Бекенштейн и Хокинг, во всех процессах с участием черной дыры ее площадь (площадь поверхности горизонта) может только расти, подобно энтропии. Оказалось, что можно ввести аналог энтропии черной дыры, связанный с ее площадью. А там, где есть энтропия, возникает и температура. Сначала формально, по аналогии, а затем с полной ясностью было понято, что каждой черной дыре свойственна своя температура, в отсутствие вращения определяемая только ее массой. Эта температура определяет

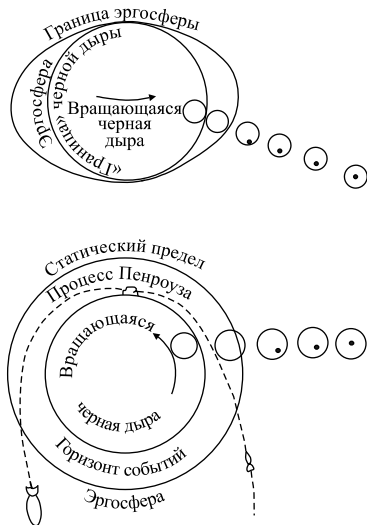


Рис. 6.4. Вращающаяся черная дыра: а — вид «сбоку»; б — вид «сверху». Кружочки — волновые фронты, точки — источники излучения

равновесное излучение, такое, что максимум его теплового распределения приходится на длину волны, равную гравитационному радиусу, т.е. в обратных сантиметрах T — это просто r_g^{-1} . Температура черной дыры обратно пропорциональна массе:

$$T_g = 10^{-6} \frac{M_\odot}{M} \text{ К.}$$

Таким образом, черная дыра оказалась весьма активным элементом космоса. За счет излучения она теряет массу, и в соответствии с этим температура ее повышается. Поэтому растут и излучение (по закону Стефана–Больцмана пропорционально четвертой степени температуры), и потеря массы. Для легких черных дыр этот процесс неудержимо ускоряется и заканчивается взрывным образом их полным испарением. Все «накопленное» дырой излучается в окружающий мир, причем не только в виде волн, но — для очень больших температур, до которых в конце концов разогревается дыра, — и в виде частиц.

Это приводит к сложным проблемам, связанным, в частности, с сохранением тяжелых элементарных частиц — барионов. Первоначальная точка зрения (приведем ее в формулировке Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова) была довольно спокойной: «Исчезновение сигналов частиц, погребенных при коллапсе, не есть гибель частиц: ведь мы не предполагаем гибели человека, когда он скрылся за углом здания». Теперь же возникли реальные физические трудности. Словом, хотя нет оснований сомневаться в реальности существования столь необходимых объектов, как черные дыры, но далеко не на все вопросы может быть дан однозначный ответ. А это характерно для кризиса в физике. Ответ на вопрос о сингулярности необходим для устойчивости всего здания физической науки.

Возвращаясь к черным дырам, можно утверждать, что процесс испарения не существен для дыр с массой $M > 10^{16}$ г, так как при этом время испарения больше хаббловского — времени существования Вселенной.

Однако и стабильные черные дыры очень активны благодаря своему мощному гравитационному полю. Межзвездный газ, падая на дыру, разогревается, создавая вокруг нее светящийся ореол. Но особенно интересные явления происходят в тесных двойных системах, встречающихся довольно часто. Если один из компонентов двойной системы компактный источник — нейтронная звезда или черная дыра, то мощный газовый поток на него со стороны звездного компаньона приводит к образованию быстро вращающегося диска аккреции, в котором вещество, прежде чем

упасть на притягивающую его звезду, разогревается до высоких температур. Прямо по Державину: «Скользим мы бездны на краю, в которую стремглав свалимся». Этот разогрев и приводит, в свою очередь, к характерному и интенсивному рентгеновскому излучению.

Исследование космического рентгеновского излучения вначале на ракетах, а затем на спутниках (в особенности на спутнике «Ухуру» и на работавшей до 1981 г. космической лаборатории имени Эйнштейна³) привело к замечательному открытию рентгеновских пульсаров, а возможно, и к открытию входящей в двойную систему черной дыры. Одним из первых кандидатов в черные дыры оказался затменный рентгеновский источник Лебедь X-1, в котором масса невидимого компонента составляет 4–8 M_{\odot} , затем Циркуль X-1, звезда V 861 в созвездии Скорпиона и другие. Теперь же этот список насчитывает несколько десятков претендентов. Основная трудность состоит в поиске однозначных тестов, которые дали бы возможность исключить другие физические ситуации, привлекаемые «адвокатами дьявола», например аргументы в пользу того, что перед нами не двойная, а тройная система и т.п. Наряду с этим появились в большом числе кандидаты в супермассивные черные дыры. Мы уже упоминали о гипотезах Шкловского, Линден-Белла и Риса, относящихся к ядру Галактики, в связи с открытием там мощного компактного нетеплового источника радиоизлучения. Анализ распределения яркости в центре галактики М 87, являющейся мощным радиоисточником Дева А, привел американского астрофизика Сарджента к предположению о существовании в ее ядре аномально большой массы ($5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ в области 100 пк). Сейчас интервалы локализации компактных масс уменьшены более чем на порядок, уточнены и значения самих масс. В центрах некоторых шаровых скоплений обнаружены промежуточные между звездными и супермассивными компактные массы. Все чаще о них прямо говорят как о черных дырах.

ВТОРОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ — КОСМОГОНИЯ XX ВЕКА

Казалось бы, о раннем периоде жизни Вселенной, о ее первых секундах, минутах, часах немисливо получить информацию се-

³ Сейчас мы являемся свидетелями нового триумфального периода в развитии рентгеновской астрономии, которую, возможно, будут называть эпохой «Чандры». Не случайно создателю рентгеновской астрономии Р. Джиакони присуждена Нобелевская премия по физике.

годня. И тем не менее о многих ее мгновениях у нас есть вполне достоверные данные. Именно в эти первые минуты создавались ядра наиболее легких элементов — водорода, дейтерия, гелия⁴ и лития. Они возникают при ядерных превращениях в реакциях синтеза. И их относительное количество очень чувствительно к скорости остывания Вселенной, определяемой темпом расширения.

Собственно, сама модель Большого Взрыва была предложена Гамовым как схема происхождения элементов⁵. Претерпев ряд превращений, она дает свои современные предсказания на основе анализа более чем сотни ядерных реакций в различных космологических схемах с помощью ЭВМ. Эти результаты для модели Фридмана приведены на рис. 6.5, взятом из доклада американского астрофизика Р. Вагонера. Видно, в частности, какое важное космологическое значение имеет знание распространённости дейтерия. Он наблюдается как при внеатмосферных ультрафиолетовых измерениях, так и радиоастрономическими методами (переход на частоте 327 МГц, аналогичный линии $\lambda = 21$ см для водорода, обнаружен Цесарским и Моффетом в направлении и галактический Центр, наблюдаются радиолинии дейтерированных межзвездных молекул, см. рис. 4.11).

Итак, на довольно раннем этапе Вселенная состояла из ядер водорода (и сейчас он составляет свыше 90% частиц Метагалак-

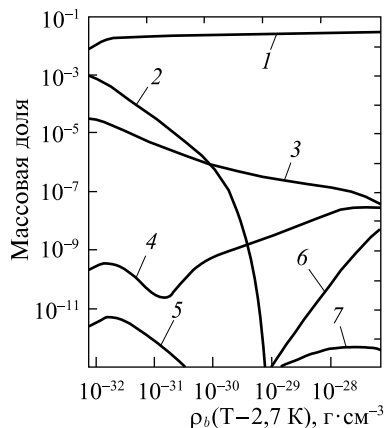


Рис. 6.5. Зависимость концентрации легких элементов от средней плотности вещества во Вселенной (по Р. Вагонеру) 1 — He^4 ; 2 — H^2 ; 3 — He^3 ; 4 — Li^7 ; 5 — Li^6 ; 6 — $A \geq 12$; 7 — B^{11}

⁴ Конечно, гелий и другие элементы создаются и при ядерном горении в звездах, но в отличие от тяжелых элементов звезды не в состоянии произвести наблюдаемое в природе количество гелия.

⁵ Любопытно заметить, что стимулом послужили неправильные оценки возраста Вселенной, опиравшиеся на завышенное значение постоянной Хаббла, принятое в то время, не позволявшие элементам образоваться в звездах! С другой стороны, само название Big Bang означает не Большой Взрыв, как уважительно мы понимаем его сейчас, а ироническое Большое Хлопок, как назвал его Ф. Хойл, сторонник стационарной Вселенной.

тики) и нейтронов, погруженных в море излучения и легчайших частиц — нейтрино. Позднее соединением протонов и нейтронов образовалось основное количество дейтерия и гелия — второго по числу частиц (8 % всех атомов) элемента во Вселенной. Однако образование элементов тяжелее лития затруднено тем, что не существует устойчивых ядер с массовым числом, равным пяти.

Проскочить этот барьер Вселенной в ее раннем возрасте практически не удастся. Более тяжелые элементы образуются уже в ядерном синтезе в недрах звезд, протекающем не минуты, а миллиарды лет. (Впрочем, элементы тяжелее железа также образуются при взрывах — в оболочках сверхновых звезд.)

Пока температуры были столь велики, что средние энергии частиц и фотонов превышали потенциал ионизации и водорода, и гелия, все вещество находилось в ионизированном состоянии, образуя водородно-гелиевую плазму. При этом оно интенсивно обменивалось энергией с равновесным излучением, температуры у них совпадали.

Вклад излучения в термодинамические величины был преобладающим. Рассмотрим, например, плотность энергии, которая для вещества и излучения меняется при расширении по разным законам. В веществе энергия на интересующих нас временах заключена, в основном, в энергии покоя частиц mc^2 . Ее плотность $\epsilon_{\text{вещ}}$, очевидно, падает с ростом объема по закону

$$\epsilon_{\text{вещ}} \approx n_{\text{вещ}} \cdot mc^2 \sim \frac{1}{R^3(t)},$$

где $R(t)$ — «радиус мира». Плотность энергии излучения убывает еще и потому, что из-за красного смещения энергия $\hbar\omega$ каждого фотона убывает как $1/R(t)$. Поэтому

$$\epsilon_{\text{изл}} \approx n_{\text{изл}} \cdot \hbar\omega \sim \frac{1}{R^4(t)}.$$

Отсюда видно, что при достаточно малых $R(t)$ излучение преобладает над веществом, но на определенном этапе расширения должно будет уступить ему место. Видно также, что плотность числа фотонов $n_{\text{изл}}$ изменяется так же, как $n_{\text{вещ}}$. Их отношение не зависит от времени и является характеристикой нашей Вселенной, в которой, как уже говорилось, фотонов в 100 млн раз больше, чем частиц⁶.

⁶ По-видимому, столько же существует и реликтовых нейтрино. Заметим, что нейтрино при массе покоя порядка 10 эВ при $z \gg 10^5$ ведет себя как излучение, а при $z \ll 10^5$ — как вещество.

Замечая, что температура характеризует среднюю энергию кванта, сразу получаем, что она убывает с ростом R , так же, как и частота:

$$T_{\text{изл}} \sim \frac{1}{R(t)}.$$

В ионизованном состоянии такова же и температура вещества. Но начиная с красного смещения $z \sim 1000$, когда температура падает ниже 3000 К, вещество становится нейтральным. С этого момента оно уже практически не взаимодействует с излучением (впрочем, за исключением одного довольно существенного более позднего периода, о котором еще будет речь впереди). Излучение, остывнув в тысячи раз (примерно во столько раз увеличивается «радиус мира» с момента $z = 1000$), сохранило к настоящему времени равновесный характер спектра и охладилось до температуры 3 К. Это и есть, как мы уже знаем, реликтовое излучение.

Что касается вещества, то, отделившись от излучения, оно начинает остывать быстрее:

$$T_{\text{вещ}} \propto \frac{1}{R^2(t)}.$$

Такой закон характерен для одноатомного идеального газа при адиабатическом охлаждении. Однако в настоящее время вещество значительно горячее, а не холоднее излучения. Это свидетельствует о вторичном разогреве вещества, который мог произойти, скорее всего, в эпоху образования галактик.

Сами галактики, их скопления, как и звезды и скопления звезд, образовались в результате развития гравитационной неустойчивости. В отличие от джинсовой неустойчивости, которая развивается экспоненциально быстро с характерным временем $1/\sqrt{G\rho}$ в расширяющемся мире неустойчивости также могут развиваться, как это показал Е. М. Лифшиц, но они значительно медленнее — по степенному закону — нарастают во времени. Судьба этих возмущений сейчас внимательно изучается, так как они должны дать начало галактикам, тому миру, в котором мы живем. Стремление построить достоверную схему образования галактик и их скоплений — характерная черта современной космогонии. Последние надежные данные, относящиеся к параметрам Вселенной, получены с помощью радиоастрономических методов при исследовании флуктуаций реликтового излучения, о чем мы расскажем ниже.

РАДИОАСТРОНОМИЯ И КОСМОЛОГИЯ

Вклад радиоастрономии в космологию можно разделить на связанный с открытием реликтового излучения, который мы рассмотрим в следующем разделе, и не связанный с ним.

Радиоастрономические измерения в линии $\lambda = 21$ см исключают возможность существования больших масс межгалактического нейтрального водорода. Если бы такой водород был в достаточном количестве, то на пути от квазаров с большими красными смещениями z линия поглощения размылась бы в полосу от λ (из-за вклада водорода, находящегося вблизи нашей Галактики) до $\lambda + \lambda z$ (из-за вклада водорода вблизи от квазара). Такого размытия, однако, не наблюдается, что и накладывает ограничение на концентрацию водородных атомов.

Еще более жесткие ограничения появились после открытия рентгеновского космического излучения. Они вытекают из обнаруживаемого в наблюдениях отсутствия поглощения изотропного рентгеновского фона, способного ионизировать атомы водорода. Если допущение о том, что этот фон имеет внегалактическое происхождение и формируется на космологических расстояниях, правильно, то концентрация водорода не может превысить доли процента от критической.

И, наконец, самое жесткое ограничение дает наблюдение лаймановской линии водорода, которое в спектрах квазаров с большим красным смещением $z \approx 2$ переходит из ультрафиолета в оптическую область. Так же как и в случае радиолнии $\lambda = 21$ см, здесь отсутствует размытие линии в полосу, откуда следует, что $n_{\text{H}} < 10^{-12} \text{ см}^{-3}$, что в 10 млн раз меньше критического значения.

Однако эти ограничения не затрагивают горячий ионизованный газ — водородную или водородно-гелиевую плазму. Между тем мы уже упоминали о возможности разогрева газа (например, ультрафиолетовым излучением звезд, потоками ускоренных релятивистских частиц) в эпоху образования галактик. В частности, не приходится сомневаться в существовании горячего газа внутри скоплений галактик. Косвенным свидетельством его существования могут служить наблюдения «хвостатых» радиогалактик (см. рис. 5.7). За счет их движения через газ радиооблака у этих галактик «сдуваются» встречным «ветром» в сторону, противоположную движению.

Поскольку образование галактик происходит при $5 < z < 100$, то при близких к критическим значениям плотности горячей плазмы возникают наблюдательные ограничения на температуру газа. Она должна быть близка к миллиону градусов, ина-

че за счет тормозного излучения этого газа как в эпоху его разогрева, так и в настоящее время возникло бы существенное превышение наблюдаемого радиофона в дециметровой области и рентгеновского фона в области энергий порядка килоэлектрон-вольт. Высокая температура газа приводит к мягкому рентгеновскому излучению, которое действительно присутствует и в фоне, измеряемом при внеатмосферных экспериментах на спутниках, и в рентгеновском излучении от скоплений галактик.

Поскольку коэффициент поглощения электромагнитных волн в ионизированном газе пропорционален квадрату длины волны, то важную информацию о существовании горячей межгалактической плазмы могли бы дать исследования фона и спектра космологических объектов на самых низких частотах. Здесь недостаточны измерения даже на декаметрах и необходим выход за пределы ионосферы.

При переменности источников на достаточно низких частотах наличие плазмы может быть выявлено по исследованиям дисперсии, которая проявила бы себя в запаздывании сигналов на разных частотах. К сожалению, переменность с нужными характерными временами обнаружена пока что только на высоких частотах.

В присутствии достаточно сильных межгалактических магнитных полей плазма могла бы проявить себя в эффекте вращения плоскости поляризации радиоизлучения внегалактических источников.

Наконец, горячая плазма является причиной весьма эффективного рассеяния электромагнитных волн. К некоторым связанным с таким (томсоновским) рассеянием эффектам мы еще вернемся.

На раннем этапе развития радиоастрономии, когда появились первые каталоги источников, позволявшие проводить статистический анализ, были сделаны попытки получить космологическую информацию о геометрии Вселенной. Действительно, если подсчитать число источников $N(S)$, плотность потока излучения от которых (на данной частоте) больше чем S , то в евклидовой Вселенной при стационарном и однородном пространственном распределении источников это число будет расти с уменьшением потока по закону «трех вторых»:

$$N(S) \sim S^{-3/2}.$$

Этот закон следует из падения потока с удалением от источника обратно пропорционально квадрату расстояния. Ясно, что в число $N(S)$ войдут только те источники с фиксированной

светимостью L , которые лежат внутри сферы, чей радиус равен $\sqrt{L/S}$. Число их пропорционально объему сферы, т. е. как раз $S^{-3/2}$. Сумма по разным светимостям L , очевидно, не отразится на этом результате.

Учет красного смещения, уменьшающего измеряемый поток, уменьшает скорость роста N с уменьшением потока. Что касается нестационарности Вселенной, то в расширяющемся мире плотность источников должна возрасти, поскольку удаление в прошлое приводит нас в более плотный мир.

Результаты подсчета источников, которые со все возрастающей точностью ведутся и поныне, приводят к существенному отклонению от закона трех вторых при средних значениях потоков в сторону увеличения N , а при самых малых потоках — в сторону уменьшения (рис. 6.6). Этот результат очень важен

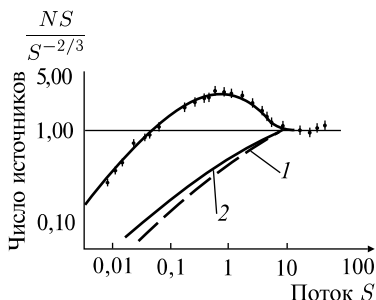


Рис. 6.6. Результаты подсчета радиоисточников со светимостью, большей заданной, свидетельствующие об их эволюции (по К. Келлерману): 1 — стационарная Вселенная; 2 — фридмановская модель при $r = r_{кр}$

для космогонии. Он свидетельствует о сильной эволюции самих радиоисточников, что вполне согласуется с современными представлениями. Поэтому, хотя из-за эволюционного эффекта узнать что-либо о геометрии мира из подсчетов источников не удастся, сама по себе эволюция радиоисточников представляет чрезвычайный интерес.

В искривленном пространстве–времени свет движется по геодезическим линиям, благодаря чему должна наблюдаться зависимость угловых размеров источников от красного смещения. Сначала угловой размер, естественно, падает с расстоянием, т. е. с ростом красного смещения. Но на больших расстояниях искривление вначале близких лучей приводит к тому, что они начинают расходиться. При этом угловой размер источника должен расти с ростом z . Минимум углового размера по красному смещению приходится для $r = r_{кр}$ на доступные в настоящее время значения $z \leq 2$.

Однако большой разброс размеров самих источников не позволяет пока получить какие-либо результаты для космологии из

этого теста, который представляется, тем не менее, чрезвычайно привлекательным для будущих исследований. В частности, он может дать информацию и о неоднородности распределения вещества во Вселенной.

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И КОСМОЛОГИЯ

И так прозрачна огней бесконечность,
И так доступна вся бездна эфира,
Что прямо смотрю я из времени в вечность...

Я ль несея к бездне полуночной,
Иль сонмы звезд ко мне неслись?

А. А. Фет

Реликтовое трехградусное излучение не только несет важнейшую информацию о прошлом Вселенной. Даже в галактиках его энергетический вклад сравним по величине с энергией космических лучей, света звезд, магнитных полей. В межгалактической среде это преобладающая форма материи и энергии⁷. Поэтому его роль в процессах, происходивших и происходящих во Вселенной, чрезвычайно велика. Мы остановимся здесь на обеих сторонах проблемы: и на информации, заключенной в нем, и на его динамической роли.

В сантиметровом диапазоне реликтовое излучение преобладает над другими фоновыми излучениями и описывается классическим равновесным распределением Рэлея–Джинса. Но уже в миллиметровом диапазоне достигается максимум и согласно планковской кривой происходит экспоненциальный спад интенсивности (см. рис. 1.7).

Равновесный характер спектра реликтового излучения связан не с тем, что существуют быстрые процессы релаксации, устанавливающие этот спектр, а, напротив, с тем, что излучению, после эпохи рекомбинации $z = 1000$, стало не с чем взаимодействовать. Вторичный разогрев и реионизация газа должны отпечататься на реликтовом спектре в виде тонких деталей, не превышающих десятитысячных долей градуса, причем наиболее существенно именно на его субмиллиметровой ниспадающей ветви. Так что от точных экспериментов в этой области ожидают многого.

⁷ Наряду с нейтрино, имеющим конечную массу покоя. Мы не говорим о других, еще не известных нам видах темной материи.

Реликтовое излучение играет роль некоторой «абсолютной» системы отсчета, связанной со Вселенной в целом. Поэтому исследование его изотропии позволяет, с одной стороны, проверить «космологический принцип», согласно которому Вселенная однородна и изотропна, с другой — выделить анизотропию, связанную, в частности, с «абсолютным» движением Земли. Из-за эффекта Допплера, связанного с таким движением, должна возникать анизотропия «дипольного» вида с периодом 24 ч (из-за вращения Земли). Температура фона T , измеряемая на движущейся относительно изотропного фона Земле, должна быть равна

$$T_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \Theta \right),$$

где Θ — угол между скоростью и лучом зрения. Поиски 24-часовой анизотропии были начаты в Принстоне Партриджем и Уилкинсоном. В 1975 г. баллонный эксперимент Кори и Уилкинсона на частоте 19 ГГц, а в 1977 г. эксперимент Смута, Горенштейна и Мюллера на частоте 33 ГГц при высотных полетах специально оборудованного самолета У-2 продемонстрировали существование косинусоидальной анизотропии с амплитудой три тысячных градуса (рис. 6.7). Оказалось, что скорость Солнца по отношению к фону составляет 390 ± 60 км/с (данные Смута) и направлена к созвездию Льва.

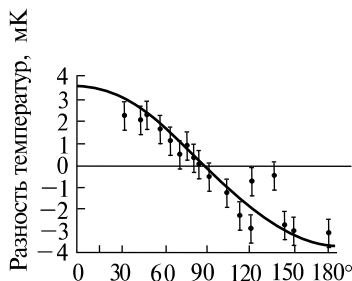


Рис. 6.7. Дипольная анизотропия реликтового фона, доказывающая движение относительно него нашей Галактики. По оси абсцисс — угол между направлением антенн и положением максимума температуры

Этот результат удивителен. Само по себе значение скорости примерно такое же, как и характерная орбитальная скорость Солнца в Галактике. Но они направлены в разные стороны. И поэтому для Галактики значение «абсолютной» скорости уже составляет примерно 600 км/с. Приблизительно такой же оказывается и скорость всего скопления галактик Девы, к которому принадлежит наша Галактика, и относительно других галактик которого она движется с небольшими скоростями.

Чрезвычайно интересно изучение мелкомасштабной анизотропии. Как показали Зельдович и Сюняев, томсоновское рассе-

яние реликтового излучения на горячем межгалактическом газе скоплений должно приводить к уменьшению температуры фона в направлении на скопление.

Этот эффект был обнаружен в ряде экспериментов (Парийский, Беркиншоу и Галл и др.). В принципе, он позволяет измерить плотность межгалактического газа в скоплениях, а также определить «абсолютную» (относительно реликтового фона) скорость скоплений. Для последнего нужны измерения ослабления фона рассеянием на двух частотах. Это позволяет определить его дипольное искажение, связанное с движением скопления.

Взаимодействие с горячим газом, несколько ослабляя реликтовый фон в сантиметровой области, увеличивает его в миллиметровой и субмиллиметровой. В связи с этим, как отмечают Зельдович и Сюняев, скопления должны быть очень яркими источниками в субмиллиметровом диапазоне.

САХАРОВСКИЕ ПИКИ

Итак, мир в очень больших масштабах однороден и изотропен. Но уже в масштабах скоплений (и даже сверхскоплений) галактик, не говоря уже о меньших масштабах, он чрезвычайно неоднороден. Согласно нашим представлениям об эволюции Вселенной, эти неоднородности должны были развиваться из первоначальных флуктуаций.

Совершенно уникальная возможность наблюдать флуктуации⁸ связана с реликтовым излучением. В эпоху рекомбинации водорода, отрываясь от ставшего нейтральным вещества, излучение свободно распространяется в расширяющемся пространстве, ни с чем существенно не взаимодействуя, и храня информацию о моменте рекомбинации в своем спектре.

Поиск флуктуаций реликтового излучения продолжался долгие годы. В конце концов, сам факт существования (крупномасштабных) флуктуаций был установлен на уровне $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ на специализированном спутнике COBE в 1992 г. В аппаратуре, установленной на COBE (Cosmic Background Exploer), использовались измерения одновременно на трех частотах (32, 53 и 90 ГГц), что позволяло однозначно измерять температуру с угловым разрешением в несколько градусов, исключая постоянный, не связанный с реликтом фон. Антенны, разнесенные на 60°, позволяли находить разность температур реликта в этих направ-

⁸ Разумеется, это флуктуации значительно больших масштабов, чем даже те, которые порождают сверхскопления галактик.

лениях. Данные COBE встречены были одновременно и с энтузиазмом, и недоверием. Но подтверждение от независимых, в том числе и наземных групп, аэростатных измерений переломили ситуацию. В настоящее время результаты COBE общепризнанны, а руководители проекта Дж. К. Мазер и Дж. Ф. Смут удостоены Нобелевской премии.

К этому времени было выполнено несколько важных теоретических работ, из которых следовало, что в области разности угловых направлений порядка десятка минут должны наблюдаться осцилляции, несущие важную информацию. Еще в замечательной работе 1965 г. А. Д. Сахаров показал, что при таком фазовом переходе, каким является рекомбинация, в спектре флуктуаций должна сохраняться богатая информация (в виде характерных пиков в угловом распределении) о предыдущих дорекомбинационных флуктуациях вещества.

Подобно тому, как на побережье северных морей иногда можно увидеть застывшие ледяные волны, схваченные внезапным морозом (по ним можно воссоздать картину последнего шторма), так и в сегодняшнем реликтовом излучении сохранились отпечатки последнего «шторма», который пришелся на момент рекомбинации водорода. «Штормили» в дорекомбинационную эпоху вместе ионизованное вещество (водородно-гелиевая плазма) и излучение. А волны, вздымавшиеся в этом шторме, были релятивистские: звуковые и гравитационные. Эти волны распространялись со скоростями порядка скорости света, а достаточно короткие из них затухали. Кроме того, были в этом шторме и волны, которые не распространялись, а переносились потоками плазмы: вихревые и температурные (точнее, энтропийные колебания). Подобно тому как в ледяных глыбах запечатлелись отнюдь не все свойства морского волнения, так и в излучении, оторвавшемся от ставшего нейтральным вещества, сохранились лишь те свойства дорекомбинационных флуктуаций, которые отразились на температуре (и поляризации) реликтового излучения. Гравитационные волны повлияли на температуру (эффект Сакса–Вольфа) благодаря своему влиянию на частоту квантов (известное эйнштейновское красное смещение). Напомним, что частота квантов определяет их энергию, а температура излучения — мера его средней энергии. Акустические же волны влияли на температуру через изменение частоты при эффекте Допплера, а также через создаваемое ими давление (эффект Силка). Сами же параметры застывшего «шторма» зависели от спектра начальных флуктуаций, оставшихся еще от стадии инфляции, и от их нарастания из-за развития гравитационной неустойчивости

в расширяющемся мире. В итоге положение и высота Сахаровских пиков зависят от многих важных параметров: постоянной Хаббла, средней плотности вещества во Вселенной и доли вакуума в ней, количества барионов и невидимой «скрытой», или «темной» (не «вакуумной») материи. Эти расчеты, требовавшие большой эрудиции и мастерства, были выполнены несколькими группами ученых в Америке и Советском Союзе (Д. Пиблззом, А. А. Старобинским и др.).

Для наблюдений анизотропии флуктуаций было организовано несколько проектов. Один из них был осуществлен из района Южного Полюса, куда была доставлена специальная высокочастотная аппаратура. В подобном эксперименте не нужны большие антенны, но требуется высочайшая стабильность и низкий уровень шумов. Полюс выгоден еще и потому, что направленная по оси мира антенна смотрит в одну и ту же часть небесной сферы. Вторая антенна, составляя с первой требуемый угол, сканирует шаг за шагом изучаемый участок небосвода.

И, действительно, искомые осцилляции были уверенно обнаружены разными группами исследователей. В июне 2001 г. в США запустили специально для картографирования анизотропии флуктуаций реликтового излучения космический аппарат МАР. Эта аббревиатура названия «Microwave Anisotropy Probe» означает в переводе на русский язык КАРТА. И действительно, с помощью МАР была получена самая подробная карта как флуктуаций реликта, так и его поляризации (в честь Уилкинсона, руководившего проектом, теперь он называется WMAP). Эти данные не только подтверждают наличие Сахаровских осцилляций, но и дают обширный наблюдательный материал с наивысшей достигнутой к настоящему времени точностью. В настоящее время измерены положения и форма трех сахаровских пиков (рис. 6.8). Сравнение с теорией с помощью специально разработанных программ для ЭВМ. дает почти весь набор важнейших космологических параметров, от значения которых они зависят. И вот оказалось, что получить хорошее согласие можно лишь с помощью введения Λ -члена, т. е. вакуумного слагаемого, причем такого же, какой следует из измерений ускоренного расширения Вселенной.

КОСМИЧЕСКИЙ ВАКУУМ

Для того чтобы обнаружить особенности расширения Вселенной, необходимо иметь способ достаточно точного определения расстояния до очень далеких объектов. Тогда можно будет

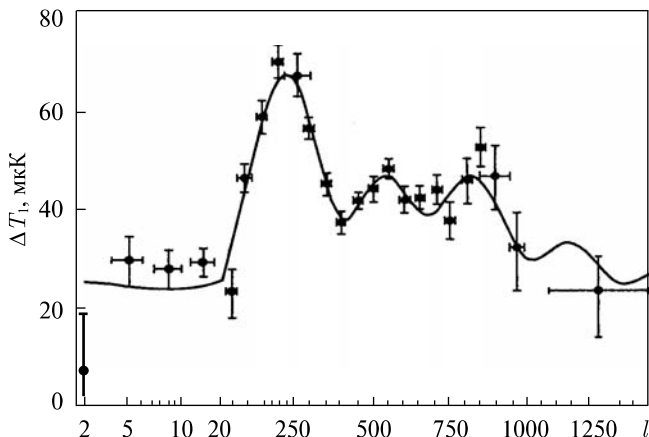


Рис. 6.8. Спектр анизотропии реликтового излучения в области малых углов $\theta < 1^\circ$ как функция номера мультиполя l . Видны сахаровские осцилляции, выход на плато Зельдовича–Харрисона со стороны малых l . Сплошная линия соответствует $\Omega = 1$, $\Omega_L = 0,7$, $\Omega_b = 0,02$, $\Omega_d = 0,12$ (данные Евстатию).

Рисунок из книги П. Д. Насельского, Д. И. Новикова и И. Д. Новикова

надеяться обнаружить отклонения от закона убывания интенсивности излучения обратно пропорционально квадрату расстояния в плоском ньютоновском мире. Для близких объектов эти отклонения очень малы и не могут быть обнаружены. Ускоренное расширение было обнаружено по сверхновым Ia типа, представляющим собой очень яркие объекты приблизительно одинаковой светимости, находящиеся в области красных смещений, близких к $z \approx 1$. Оказалось, что преобладание вакуума началось с $z \approx 0,7$ и продолжается в настоящую эпоху. Именно при $z \approx 0,7$ плотность вакуума, которую не затрагивает расширение, сравнялась с плотностью материи, убывающей при расширении. Это означает, что при еще больших значениях z , когда мы окажемся в прошлом, где преобладала материя, должно наблюдаться замедленное «привычное» фридмановское расширение мира. Предварительные результаты говорят в пользу этого вывода (рис. 6.9).

Удивительно, на первый взгляд, но вакуум проявляет себя и в непосредственной близости от нашей Галактики, точнее от нашей локальной группы галактик. Оценки плотности материи в этой области (данные И. Д. Караченцева) показывают, что она здесь меньше, чем плотность вакуума. Поэтому расширением управляет также вакуум. Возможно, как указывает А. Д. Чернин, это решает «загадку Хаббла», объясняя, как мог он обнаружить свой великий закон расширения в доступной ему в то время об-

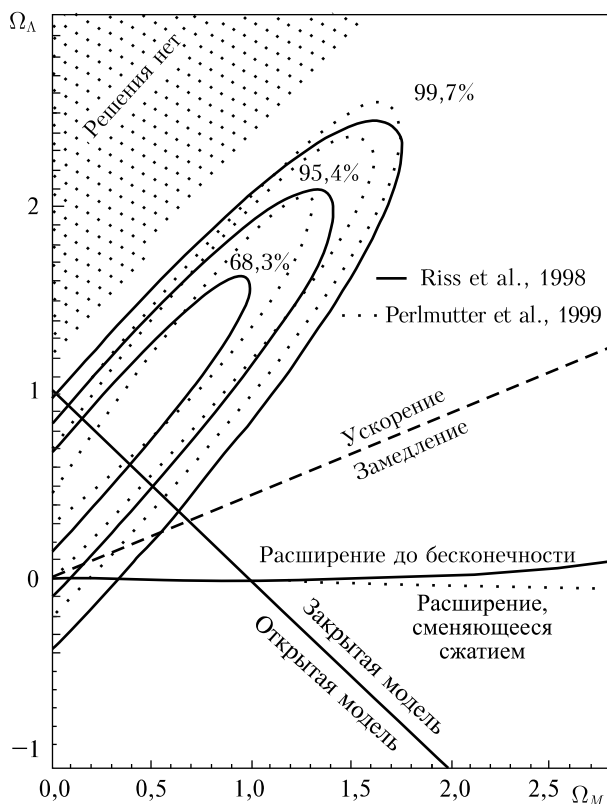


Рис. 6.9. Результаты подсчетов галактик с использованием сверхновых Ia типа в качестве «стандартной свечи». На плоскости $\Omega_\Lambda - \Omega_M$ приведены разграничительные линии, соответствующие данным наблюдений и различным космологическим следствиям для расширения Вселенной (по работе Перлмуттера)

ласти Вселенной. Ведь закон Хаббла отражает ее однородность и изотропию, в то время как в этой (и даже большей) области распределение масс существенно неоднородно и неизотропно. Достаточно вспомнить о концентрации галактик к супергалактической плоскости, наличии таких значительных флуктуаций плотности, как Большой Аттрактор, Великая Стена, Великая Пустота, названия которых говорят сами за себя (см. рис. 6.10). Мы уже говорили об их обнаружении по дипольной анизотропии реликтового излучения. Существование Большого Аттрактора (грандиозного центра притяжения вещества) было подтверждено последующим скрупулезным определением скоростей движения галактик. Они действительно приводят к отклонениям от закона Хаббла в направлении на аттрактор на расстояниях порядка

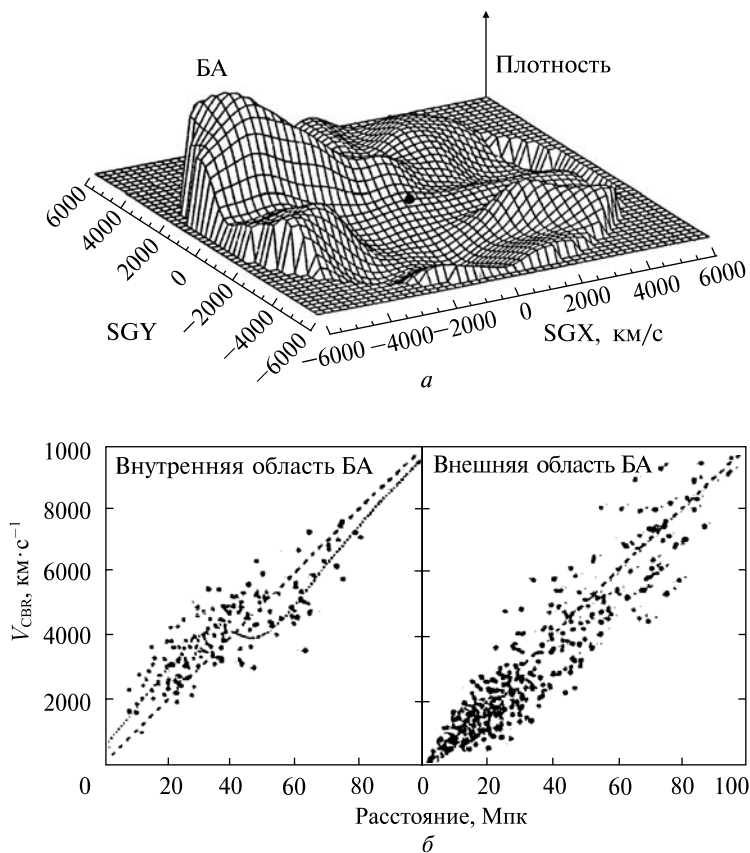


Рис. 6.10. Распределение вещества в супергалактической плоскости в «дальней» окрестности Галактики. Виден Большой Аттрактор (БА) и другие области повышенной плотности (а). Внизу показана диаграмма Хаббла в направлении на БА и мимо него (б). Ясно видно притяжение галактик к аттрактору (по данным А. Дресслера и др.)

40–60 Мпк, где он расположен. Но даже на более близких расстояниях закон Хаббла не должен был выполняться, если бы не роль вакуума. Именно он, по-видимому, определяет разбегание галактик, в области, исследовавшейся Хабблом, обеспечивая требуемую однородность и изотропию в окрестности локальной группы уже начиная с расстояний порядка 2–3 Мпк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоастрономия прочно вошла в золотой фонд астрономической науки. Ее достижения отмечены Нобелевскими премиями по физике. Ее методы привлекаются для решения важнейших астрономических задач. Напомним, что уже на заре своего возникновения радиоастрономия указала на возможные источники космических лучей — места ускорения частиц до релятивистских энергий. Число таких объектов множилось по мере открытия остатков сверхновых и пульсаров, квазаров и радиогалактик, наконец гиперновых, а открытое методами радиоастрономии реликтовое излучение стало важнейшим инструментом исследования Вселенной.

Наряду с радиоастрономией и вслед за ней в последней трети XX века открылись и другие новые окна во Вселенную. Прежде всего это рентгеновская астрономия, позволяющая следить за жестким космическим излучением непосредственно. В ряде своих проявлений она теснейшим образом связана с радиоастрономией, о чем мы уже упоминали.

Нейтринная астрономия также открывает захватывающие перспективы. Несоответствие со стандартной моделью Солнца, обнаруженное Р. Девисом при наблюдении солнечных нейтрино, было блестяще преодолено представлением о конечной массе и трех сортах взаимно превращающихся друг в друга нейтрино. В качестве дальней перспективы можно указать проблему реликтовых нейтрино, несущих информацию о значительно более раннем этапе развития Вселенной, чем дает нам реликтовое излучение.

На подходах — гравитационно-волновая астрономия. Воистину мы являемся свидетелями (а некоторые и участниками) бурного и поддерживаемого мировым сообществом процесса познания мира. Инструменты, доставляющие нам эту возможность, уже столь дороги, что их изготовление и эксплуатация не под силу отдельным государствам, создавая предпосылки для их кооперации, примером чему служит Южная Европейская Обсерватория, о которой мы писали выше. Окончание бессмысленной «холодной войны» позволило выделить ресурсы и средства, что склоняет нас к некоторому оптимизму. Украина занимает достойное место в этом процессе, являясь признанным центром низкочастотных радиоастрономических исследований. Их будущее

зависит от интереса со стороны молодежи, для которой написана эта книга, и внимания со стороны нашего общества, которое может дать дополнительный импульс, а может и упустить шанс, представленный уникальным стечением обстоятельств, реалий и идей.

Среди открывающихся захватывающих перспектив дальнейших исследований одно из центральных мест займут поиски жизни в космосе и проблема внеземных цивилизаций, несмотря на то, что «мир бытия — досадно малый штрих среди небытия пространств пустых», — как пишет Гёте в «Фаусте».

Проблема эта, разумеется, не нова. Но недавние открытия планет и целых планетных систем у многих звезд Галактики (их уже известно несколько сотен) ставят эти поиски на прочный фундамент. Современная самая высокоточная аппаратура еще не позволяет «увидеть» эти планеты «воочию». Их существование обнаруживается по влиянию на движение звезды, вместе с которой они вращаются вокруг общего центра тяжести. Поэтому обнаружены, в первую очередь, планеты-гиганты, по своим размерам сходные с Юпитером, причем находящиеся намного ближе к звезде, чем в нашей Солнечной системе. Всерьез заняться поисками проявлений жизни можно будет лишь после обнаружения значительно менее массивных планет, типа тех, которые принадлежат к земной группе и находятся на устойчивых орбитах. Но это требует значительного (примерно на один-два порядка) увеличения точности наблюдений и может быть осуществлено инструментами следующего поколения. Впрочем, никто из специалистов теперь не сомневается, что такие планеты существуют в Галактике во множестве и задача их обнаружения будет успешно решена. Уже получено сообщение об открытии экзопланеты с массой, превышающей земную всего лишь в пять раз.

Что касается поисков внеземных цивилизаций, в самом широком плане эта тема блестяще освещена в сборнике «Проблема СЕТИ»¹, на обложке которого изображена уже знакомая нам галактика М 51. Сборник издан по материалам международной конференции (практически советско-американской), проходившей в Бюроканской обсерватории в 1974 г. Прекрасные воспоминания об этом содержатся в книге И. С. Шкловского «Эшелон»².

¹ SETI — Search of Extra Terrestrial Intellect.

Проблема СЕТИ / Под ред. С. А. Каплана. — М.: Мир, 1975. — 342 с.

² Шкловский И. С. Эшелон (невыведенные рассказы). — М.: Новости, 1991. Разум, жизнь, вселенная. — М.: Янус, 1996. — 432 с.

Позволим себе добавить одно замечание. Никакие проявления внеземной цивилизации в настоящее время не известны. (Многочисленные, иногда очень красочные спекуляции на эту тему — не в счет.) Но нельзя исключить того, что отсутствие сигналов от внеземного разума как раз и является проявлением этого разума.

Мы постарались обрисовать общие контуры величественного здания. Обрисовать, используя наше сегодняшнее представление о мире. Стремилась показать, какой широчайший фронт работ развернула перед исследователями вторая великая революция в астрономии. Последние достижения в этой области неоспоримо подтверждают, что эта революция продолжается.

СЕМЕН ЯКОВЛЕВИЧ БРАУДЕ (1911–2003)

Семен Яковлевич начал свою научную карьеру в замечательном научном учреждении — Украинском Физико-техническом институте (УФТИ), куда он по-



Семен Яковлевич Брауде

ступил в 1933 г. через год после окончания физфака государственного Физико-химико-математического института, позднее влившегося в Харьковский университет. В УФТИ тех лет была удивительная творческая атмосфера. Там работало много молодежи, составившей впоследствии цвет советской науки. Достаточно упомянуть лишь имя Л. Д. Ландау. Но сейчас ясно, сколь это было непростое время, наука развивалась не только под «Марш энтузиастов» (достаточно вспомнить «Дело УФТИ»).

Угроза войны была недвусмысленной. Наука и техника рассматривались как основа обороноспособности СССР. Радиолокация и связь — вот те направления, которым долгие годы будет отдавать силы С. Я. Брауде.

В лаборатории электромагнитного излучения под руководством А. А. Слуцкого Семен Яковлевич занимается созданием мощных генераторов на магнетронах. Интерес к ним Семен Яковлевич сохранил на долгие годы. Уже в 80-х годах он, наконец,

решил долго не дававшееся ему уравнение описывающее движение электрона в неоднородных скрещенных полях, разработав «обратный» подход с помощью нелинейных преобразований известных (линейных) уравнений. Чем-то это напоминает

современный бурный натиск на нелинейные уравнения в частных производных методом «обратной задачи». Эта одержимость в достижении цели очень характерна для Семена Яковлевича. Другая характерная черта деятельности Семена Яковлевича, проявившаяся уже в те годы, — это сочетание экспериментальных и теоретических исследований. Причем высокий уровень демонстрировался в обоих подходах.

Участие С. Я. Брауде в создании первых советских радиолокаторов, его испытаниях и совершенствовании открыли новую страницу в его деятельности. Он был откомандирован в Институт связи РККА, его интересы постепенно переключаются на исследование распространения радиоволн над земной, а впоследствии над морской поверхностью. В послевоенном УФТИ руководимые им отделы тесно связаны с военными моряками, организуются экспедиции на Балтику, на Черное море. Эти исследования, которые привели к обнаружению резонансного рассеяния радиоволн морской поверхности, становятся основой для первых теоретических работ. Формируется работоспособный коллектив.

В рамках УФТИ, все более ориентированного на ядерную программу, радиофизике и электронике становится тесно. Вместе с А. Я. Усиковым Семен Яковлевич организовал в составе Украинской академии наук Институт радиофизики и электроники — ИРЭ, где Семен Яковлевич начинает новую грандиозную программу — создание низкочастотной (декаметровый) радиоастрономии, которая продолжается и по сей день.

Вначале в центре внимания была солнечная радиоастрономия и тогда еще не апробированная задача радиолокации Солнца.

Другую конкретную идею подает И. С. Шкловский: никем еще не обнаруженные линии сверхтонкого расщепления основного состояния азота (аналог линии 21 см водорода, в котором изучается Галактика) лежат в декаметровом диапазоне. С. Я. Брауде со своим коллективом строит декаметровый радиотелескоп — фазиремую антенную решетку, масштабы которой и сейчас поражают: размеры антенного поля — 1 км × 2 км. Разработанный проект исключительно экономичен. Строится минимальный вариант — Т-образная антенна, которая впоследствии получит название УТР — сначала 1-й, а затем 2-й вариант. Аппаратура предельно удешевлена. Используются стандартные узлы. Вибраторы сваривают вручную в мастерских ИРЭ. Кабели достают, используя бюджет академии. Работа на УТР — отдельная страница в биографии Семена Яковлевича Брауде. До сих пор, уже более четверти века, это единственный серьезный декаметровый

радиотелескоп в мире. Коллектив блестящих радиофизиков и радиоинженеров переучивается на радиоастрономов. Поиск линии азота оборачивается замечательным открытием Л. Г. Содиным и А. А. Коноваленко дециметровых рекомбинационных радиолиний. Инструмент становится известным в мире. Теперь уже рамки ИРЭ сдерживают размах и планы С. Я. Брауде. Вместе с Л. Н. Литвиненко он организует первый в мире Институт радиоастрономии. Предполагается развивать также миллиметровую радиоастрономию на базе опыта работы с этим диапазоном в ИРЭ.

Ограниченные возможности одного радиотелескопа заставляют Семена Яковлевича сделать еще один шаг. С присущим ему размахом разрабатывается и строится (коллективом во главе с ближайшим соратником Семена Яковлевича еще по УТР-2 А. В. Менем) целая система дециметровых радиотелескопов в Украине, образуя единый радиоинтерферометр УРАН.

Низкочастотная радиоастрономия заняла свою достойную нишу в мировой науке. На телескопе часты иностранные гости, ведутся совместные проекты с учеными многих стран.

Семен Яковлевич, несмотря на увеличивающийся груз лет, предельно активен. Он осваивает английский (вместо немецкого — языка науки его молодости), выступает с яркими докладами. Его деятельность — достойный пример не только выдающегося научного творчества, но и борьбы с недугами возраста.

С. Я. Брауде удостоен многих государственных и научных наград. Он член ученых обществ Европы и мира, автор множества статей, обзоров, нескольких книг.

Постановлением Президиума Национальной академии наук Украины в феврале 2004 г. радиоастрономической обсерватории РИ НАНУ присвоено имя С. Я. Брауде. Его именем назван кратер на поверхности Луны.

ЛИТЕРАТУРА ¹

К ВВЕДЕНИЮ

- Гинзбург В. Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно интересными в начале XXI века // О науке, о себе и о других. Сб. науч. ст. — М.: Физматлит, 2003. С. 11.
- Решетников В. П.* Астрономические задачи начала века или 23 проблемы Сэндиджа // Природа. 2003. № 2. С. 32.
- Физика космоса. Маленькая энциклопедия / Под ред. Р. А. Сюняева. — М.: Советская энциклопедия, 1986. — 784 с.
- Засов А. В., Постнов К. А.* Общая астрофизика. — Фрязино: Изд-во Век-2, 2006. — 496 с.

К ГЛАВЕ 1

- Величкий Космос.* Дослідження Всесвіту від околиць Сонця до найдальших галактик // Світ Науки. 2001. № 2(8). — 132 с.
- Горбацкий В. Г.* Лекции по истории астрономии. — СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2003. — 256 с.
- Рудницкий Г. М.* Конспект лекций по курсу «Радиоастрономия». — Нижний Архыз: Изд-во CYGNUS, 2001. — 56 с.
<http://comet.sai.msu.ru/~gmr/course/index.htm>
- Чернин А. Д.* Звезды и физика. — М.: Изд-во Эдиториал УРСС, 2001. — 256 с.
- Шустов Б. М.* Большие оптические телескопы будущего // Земля и Вселенная. 2004. № 2. С. 3.
- Щеглов П. В.* Оптические телескопы сегодня и завтра. — М.: Знание, 1980. — 64 с.

К ГЛАВЕ 2

- * *Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н.* Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1972. — 360 с.
- * *Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Физматлит, 2003. — 624 с.

К ГЛАВЕ 3

- Гибсон Э.* Спокойное солнце. — М.: Мир, 1977. — 408 с.
- Рябов Б. Л., Герасимова Н. Н.* Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера. — Киев: Наук. думка, 1990. — 240 с.

¹ Звездочкой отмечена более специальная литература.

- * Solar Radio Physics // Eds. D. J. McLean et al. — Cambridge: Cbg. Univ. Press, 1985. — 440 p.
- * Physics of the Sun. V. 2 / Eds. P. A. Sturrok et al. — London: D. Reidel, 1986. — 385 p.

К ГЛАВЕ 4

- Бескин В. С.* Радиопульсары // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, № 11. С. 1169.
- * *Бочкарев Н. Г.* Основы физики межзвездной среды. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — 352 с.
- Кадомцев Б. Б.* На пульсаре. — М.: Изд-во УФН, 2001. — 128 с.
- Коноваленко А. А.* Декаметровая астроспектроскопия // Земля и Вселенная. 1986. № 5. С. 26.
- * *Лозинская Т. А.* Сверхновые звезды и звездный ветер. — М.: Наука, 1986. — 440 с.
- Липунов В. М.* В мире двойных звезд. — М.: Наука, 1986. — 206 с.
- * *Липунов В. М.* Астрофизика нейтронных звезд. — М.: Наука, 1987. — 296 с.
 - * *Бескин В. С.* Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. — М.: Физматлит, 2006, 384 с.

К ГЛАВЕ 5

- * *Antonucci R.* Ullified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1993. — V. 31. P. 473.
 - * *Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л. и др.* Астрофизика космических лучей. — М.: Наука, 1984. — 360 с.
- Брауде С. Я., Мирошниченко А. П., Рашковский С. Л. и др.* Декаметровый обзор дискретных источников Северного неба // Кинематика и физика небесных тел. 2003. Т. 19, № 4. С. 291.
- Вильковиский Э. Я.* Квазары. — М.: Наука, 1985. — 174 с.
- * *Горбацкий В. Г.* Введение в физику галактик и скоплений галактик. — М.: Наука, 1986. — 256 с.
 - * *Комберг Б. В.* Разные типы АГЯ // <http://www.asc.ru>, educational center, 2004.
 - * *Конторович В. М.* Влияние слияний на динамические свойства галактик // Кинематика и Физика Небесных Тел. 1999. Приложение № 2. С. 47.
 - * Физика внегалактических источников радиоизлучения / Под ред. Р. Д. Дагкесаманского. — М.: Мир, 1987. — 364 с.
- Kontorovich V. M.* The connection between the interaction of galaxies and their activity // Astronomical and Astrophysical Transactions. 1994. V. 5. P. 259.

К ГЛАВЕ 6

- Виленкин А. Много миров в одном. — М.: Corpus, 2009. — 235 с.
- Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: теория горячего Большого взрыва. — М.: Изд. ЛКИ, 2008. — 552 с.
- * Зельдович Я. Б., Долгов А. Д., Сажин М. В. Космология ранней Вселенной. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 200 с.
- * Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975. — 736 с.
- * Линде А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. — М.: Наука, 1990. — 440 с.
- * Насельский П. Д., Новиков Д. И., Новиков И. Д. Реликтовое излучение Вселенной. — М.: Наука, 2003. — 392 с.
- Новиков И. Д., Фролов В. П. Черные дыры во Вселенной // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 3. С. 307.
- Сажин М. В. Анизотропия и поляризация реликтового излучения. Последние данные // Успехи физических наук. 2004. Т. 174, № 2. С. 197.
- Торн К. Черные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна. — М.: Физматлит, 2007. — 616 с.
- Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. — М.: Мир, 1990. — 168 с.
- Черепашук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. — Фрязино, Изд-во Век-2, 2003. — 320 с.
- Чернин А. Д. Космический вакуум // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 11. С. 1153.

К ЗАКЛЮЧЕНИЮ

- Брауде С. Я., Конторович В. М. Радиоволны рассказывают о Вселенной. — Киев: Наук. думка, 1982. — 236 с.; 2-е изд. — Киев: Академперіодика, 2005. — 282 с.
- Проблема СЕТИ (связь с внеземными цивилизациями) / Под ред. С. А. Каплана. — М.: Мир, 1975. — 342 с.
- Шкловский И. С.. Разум, жизнь, вселенная. — М.: Янус, 1996. — 432 с.

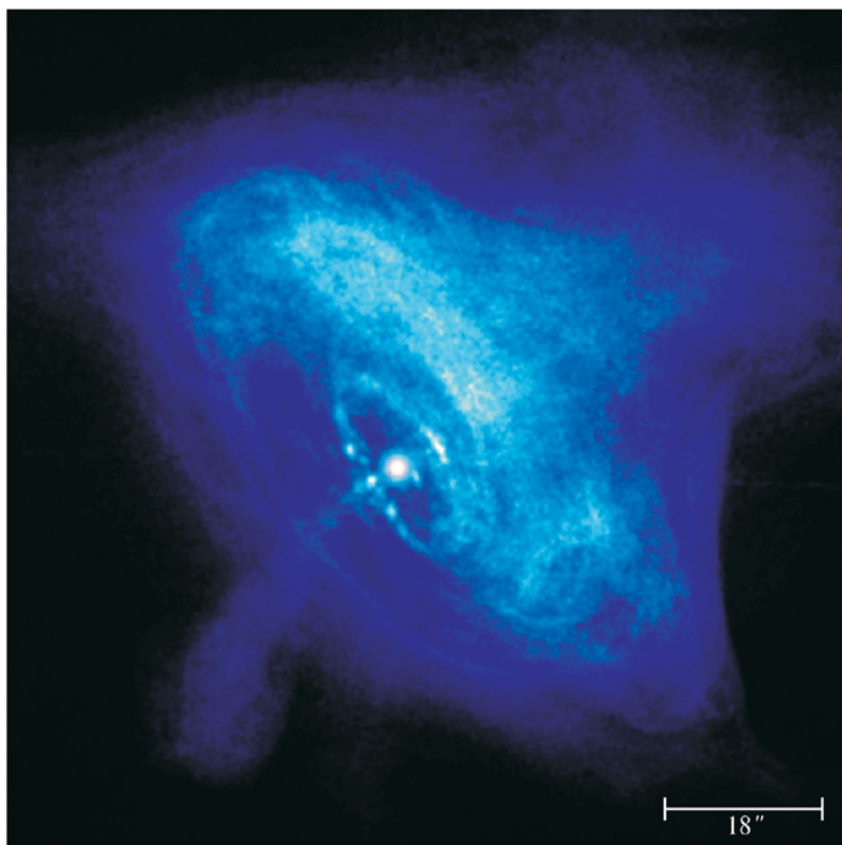


Рис. 1.10. Крабовидная туманность. Рентгеновское изображение, полученное «Чандрой». Изображение Краба в рентгене представляет собой потрясающую картину винтовой раскручивающейся спирали, по которой ускоренные пульсаром частицы проникают в окружающую пульсар туманность



Рис. 2.19. Радиотелескопы, входящие в систему РСДБ. Цветом выделены системы, работающие в сантиметровом и миллиметровом диапазонах

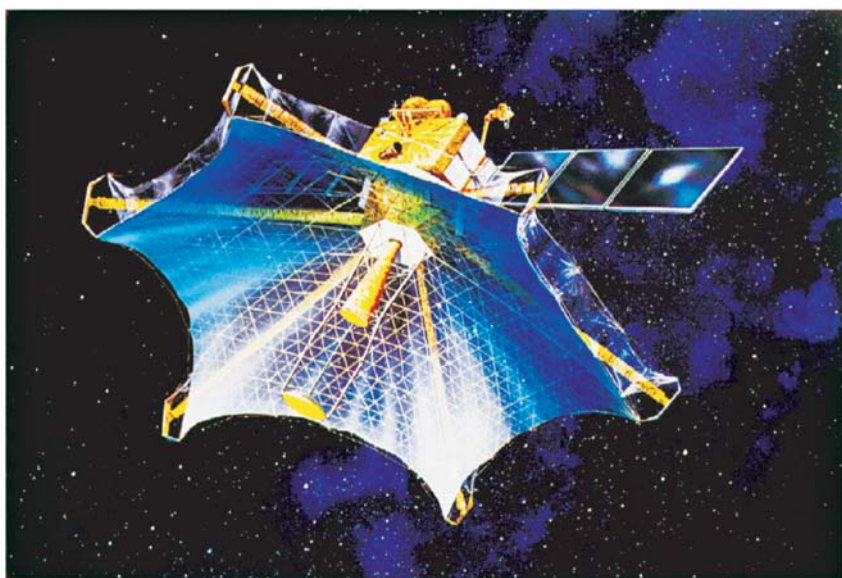


Рис. 2.20. Антенна космического радиотелескопа на японском спутнике HALCA. С благодарностью Х. Хирабаяши и Л. Гурвицу

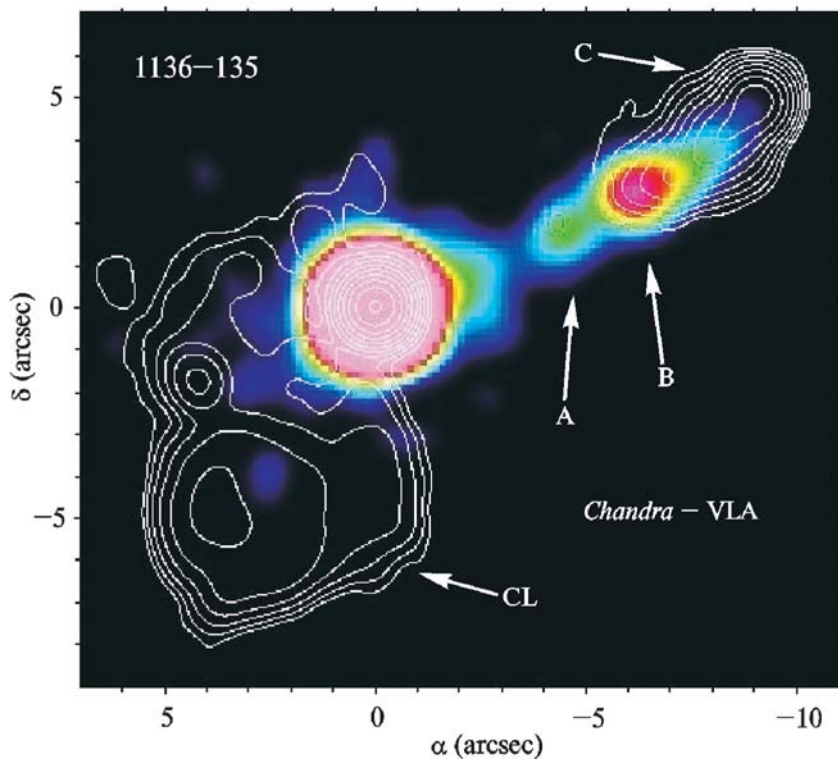


Рис. 5.3. Распределение интенсивности джета квазара PKS 1136–135 в радио- (изофоты, VLA) и рентгеновской областях спектра Чандра (по работе Р. Самбруны и др.)

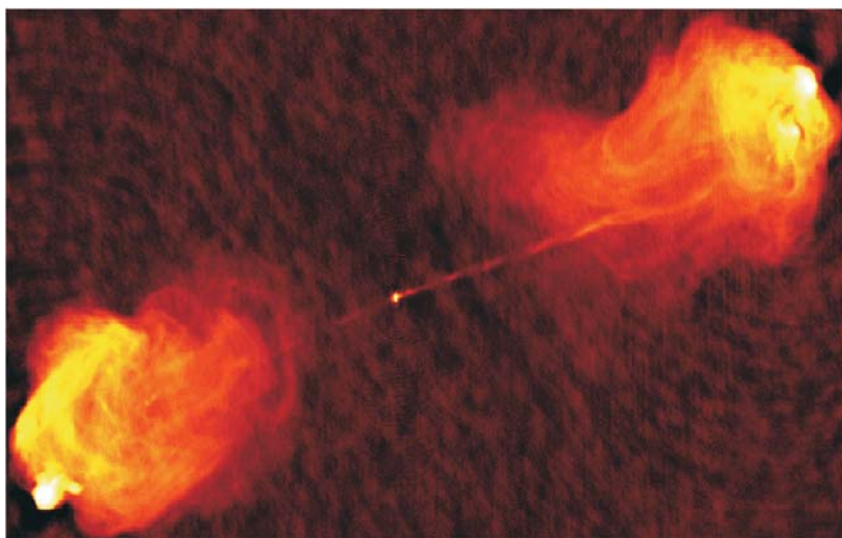


Рис. 5.7. Изображение радиогалактики Лебедь А при высоком разрешении (VLA), виден джет

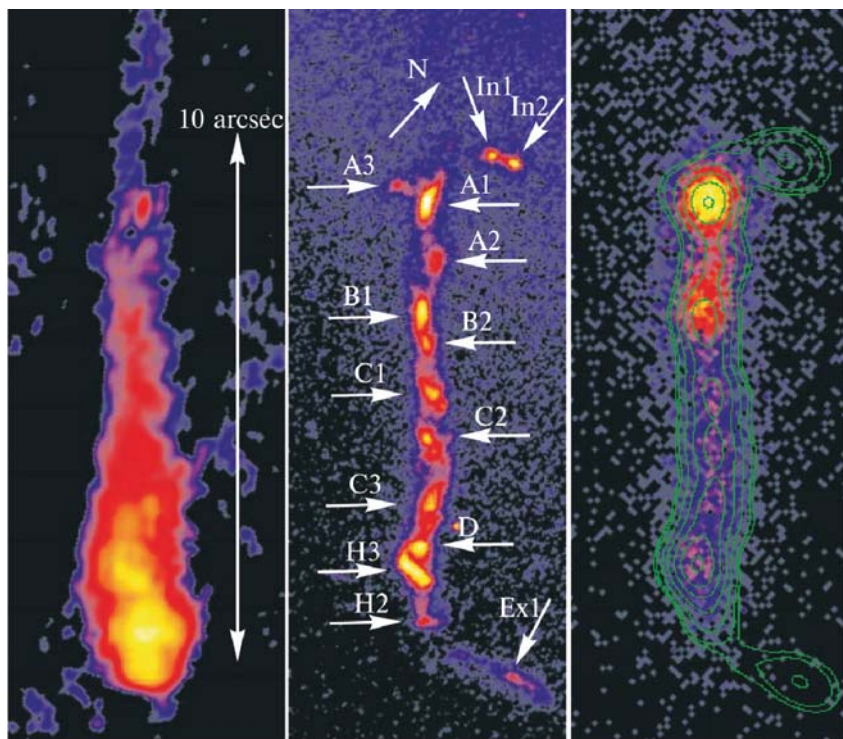


Рис. 5.14. Изображение джета квазара 3C273 в трех различных диапазонах: радио (VLA), оптике (HST) и рентгене (Чандра) с одинаковым разрешением

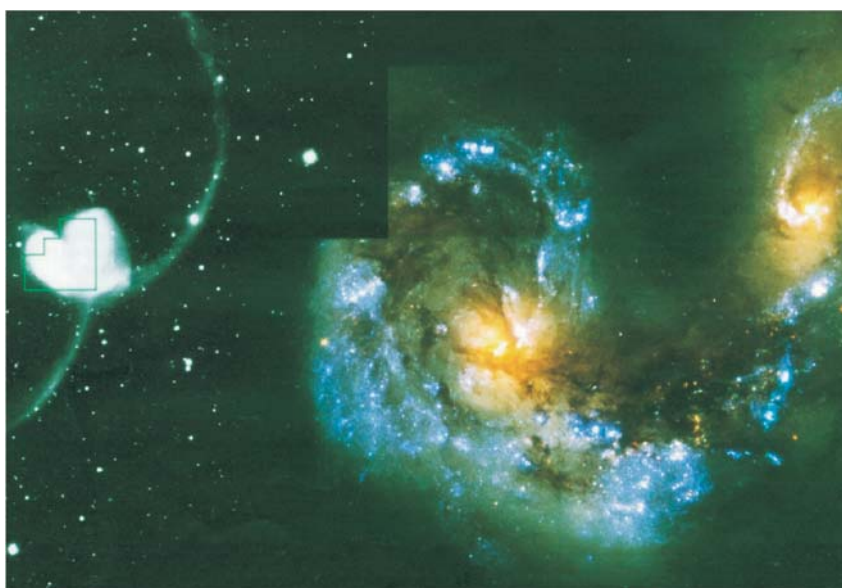


Рис. 5.15. «Антенны» — классический пример взаимодействующих галактик.
Слева — наблюдения в наземный телескоп, справа — наблюдения HST

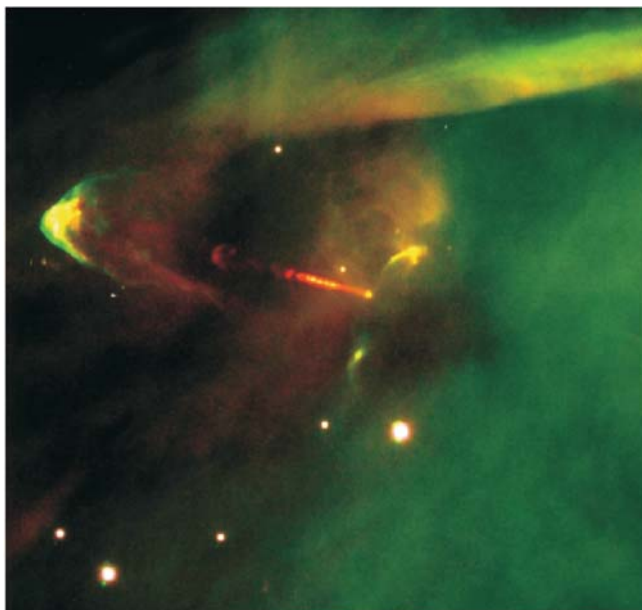


Рис. 5.16. Комплекс HH-34 из аккреционного диска, джета с движущимися узлами и системы ударных волн в окрестности протозвезды, видимых как в радио, так и в оптике. Измерения на VLT, ESO

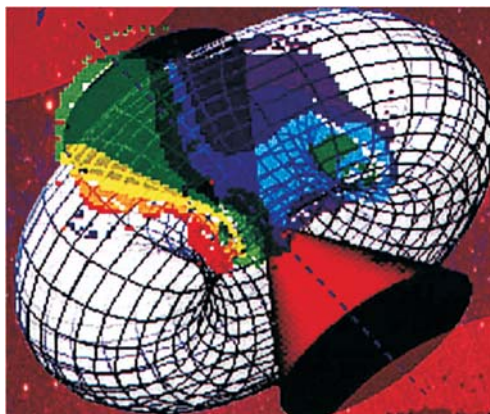


Рис. 5.17. Затеняющий тор и формируемый им конический джет в окрестности активного ядра галактики (реконструкция по наблюдательным данным, Клокнер и др., astro-ph/0302395)

Научное издание

БРАУДЕ Семен Яковлевич
КОНТОРОВИЧ Виктор Моисеевич

РАДИОВОЛНЫ РАССКАЗЫВАЮТ О ВСЕЛЕННОЙ

Редактор *Н.Б. Бартошевич-Жагель*
Оригинал-макет: *Д.В. Горбачев*
Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать 04.03.11. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15. Уч.-изд. л. 16,5. Тираж 500 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 978-5-9221-1262-8



9 785922 112628