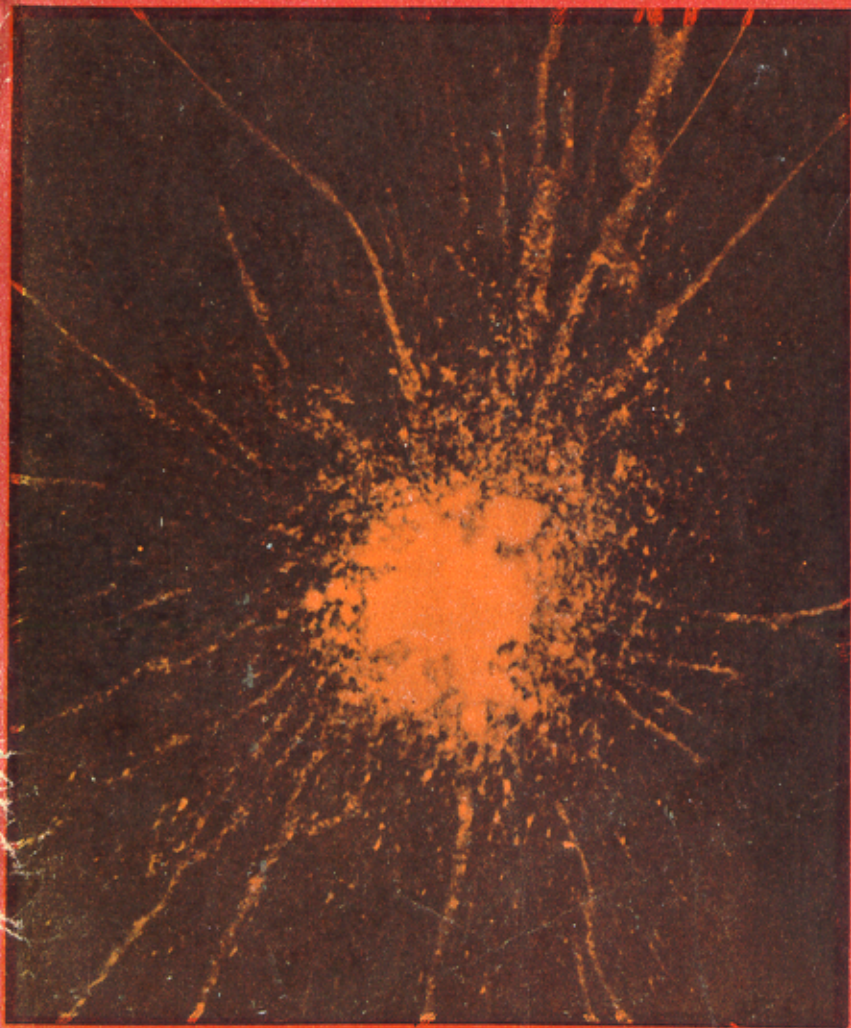
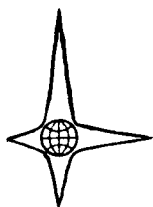


90-50
Р. 85 СВЕРХЗВЕЗДЫ





Издательство
«МИР»

15/184/5

91
17-85

СВЕРХЗВЕЗДЫ

Дж. Гринстейн

Х. Чу

Дж. Нарликар

Перевод с английского

В. А. УГАРОВА

Р О С С И Я

Министерство просвещения

Методический кабинет

ГОРОДСКОГО ОТДЕЛА

народного просвещения

СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

1965

196 г.

№ _____

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва 1965

инв. № 2285 ✓
ин. № 24

Предлагаемый сборник составлен из популярных статей трех видных астрофизиков Дж. Гринстейна, Дж. Нарликара и Х. Чу и посвящен сверхзвездам. С момента открытия сверхзвезд в 1963 г. эти загадочные объекты продолжают оставаться в центре внимания многочисленных исследователей. Сверхзвезды являются самыми мощными источниками излучения в известной нам части Вселенной, и для объяснения их природы физики ищут ответа на вопрос, откуда берутся колоссальные запасы их энергии. В качестве возможного источника энергии сверхзвезд предложен «гравитационный коллапс» — процесс катастрофического сжатия сверхзвезды под действием собственного поля тяготения. Этому явлению посвящены статьи Нарликара и Чу.

Сборник будет интересен многочисленным читателям, которых волнуют актуальные проблемы современной физики и астрономии.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

ОТ РЕДАКЦИИ

Сверхзвезды, должно быть, самые удивительные объекты среди всех известных астрономам. Они были открыты совсем недавно, в 1963 г., когда радиоастрономам удалось определить точное положение на небе нескольких радиоисточников и оказалось, что пять из них совпадают с оптическими объектами, которые считались прежде слабыми звездами нашей Галактики. Однако единственной звездой, радиоизлучение которой до сих пор удавалось наблюдать, является наше Солнце, а если можно было бы удалить его от нас хотя бы на расстояние ближайшей звезды, то его радиоизлучение стало бы в 100 миллиардов раз слабее и наблюдать его было бы невозможно.

Другое дело — радиоизлучение целых галактик с их сотнями миллиардов звезд (кстати, и галактики далеко не все являются радиоисточниками); самые яркие радиогалактики излучают 10^{45} эрг/сек.

Дальнейшее изучение этих объектов привело к новым загадкам: оказалось, что их оптическое излучение мощнее излучения всей нашей Галактики в целом. Если допустить, что источник излучает в течение 1 миллиона лет, а также учесть сравнительно невысокую эффективность процессов, ответственных за излучение, то оказывается, что за это время он должен выделить самое меньшее 10^{60} эрг энергии. Это равносильно полному сгоранию 100 миллионов солнц! Значит,

такой источник не может быть звездой, поскольку масса звезды не должна превышать массу Солнца более чем в 100 раз. Тогда, может быть, сверхзвезды — это галактики? Однако и это предположение отпадает: во-первых, размеры их в 5—10 раз меньше линейных размеров обычной галактики; во-вторых, в спектре целой галактики не может быть столь большого числа отдельных линий, какое наблюдается в спектрах сверхзвезд.

Наконец, оказалось, что у некоторых сверхзвезд может колебаться интенсивность оптического излучения с периодом около года, что очень трудно объяснить, так как свет внутри столь протяженного образования распространяется существенно большее время (тысячи лет).

Для объяснения колоссального выделения энергии в сверхзвездах Хойл и Фаулер предложили следующую схему: постулируется существование некоторого весьма массивного объекта (с массой порядка 100 000 солнечных масс); этот объект должен быть гравитационно неустойчивым, т. е. силы притяжения, действующие на составляющее его вещество, не будут уравновешиваться другими силами, обычно поддерживающими любое тело в равновесии (тепловое движение газа, электростатическое отталкивание одноименно заряженных частиц, наконец, ядерные силы), и за конечное время все тело будет «схлопываться» в точку. При этом пространство и время в окрестностях тела приобретают совершенно особые качества в соответствии с общей теорией относительности. В принципе высвобождающаяся при коллапсе гравитационная энергия может составить 10^{62} — 10^{64} эрг, т. е. достаточно большую величину для обеспечения наблюдаемого излучения сверхзвезд. Правда, пока не ясно, каким образом может сконденсироваться столь массивное тело. В 1964 г. в Далласе собрался симпозиум, специально посвящен-

ный гравитационному коллапсу, на котором рассматривались связанные с ним проблемы.

Предлагаемый читателю сборник содержит три статьи. В статье Гринстейна описывается история открытия сверхзвезд, их свойства, спектроскопические характеристики и рассматриваются возможные источники их энергии. В статьях Чу и Нарликара речь идет именно о гравитационном коллапсе и тех интересных явлениях, которые с ним связаны; в частности, рассмотрено космологическое применение идеи гравитационного коллапса. Все три популярные статьи написаны крупными специалистами, содержат прекрасные иллюстрации и будут интересны широкому кругу читателей, которых волнуют актуальные проблемы современной науки.

СВЕРХЗВЕЗДЫ

Дж. Гринстейн

В начале 1963 г. астрономы обнаружили, что пять небесных объектов, которые считались слабыми звездами нашей Галактики, хотя и несколько необычными, на самом деле являются, быть может, самыми удивительными и загадочными объектами, когда-либо наблюдававшимися человеком. Эти объекты оказались не слабыми звездами, а чрезвычайно мощными источниками радиоизлучения. Согласно оценкам мощности их светового излучения, не исключено, что эти объекты являются самыми яркими во Вселенной. Два объекта, о которых мы имеем более подробные данные, возможно, в сто раз ярче, чем вся наша Галактика с ее 100 миллиардами звезд. Тот факт, что эти объекты кажутся слабыми звездами, объясняется их огромным удалением от нас. Один из двух объектов, о которых идет речь, по расстоянию от нас занимает второе место среди наиболее далеких небесных тел. Расстояния до остальных трех еще не определены, но они могут оказаться еще большими. До сих пор единственными объектами, которые удавалось отождествить на столь больших расстояниях, были галактики. Новые объекты, к изучению которых мы только что приступили, по своим размерам почти наверняка меньше, чем галактики. Во всяком случае, их диаметры оцениваются не более чем в одну пятую, и, быть может, они составляют всего лишь около одной сотой диаметра типичной галактики.

Открытие этих необыкновенных объектов стало возможным в результате плодотворного сотрудничества радиоастрономов и астрономов, использующих обычные астрономические инструменты. В свое время

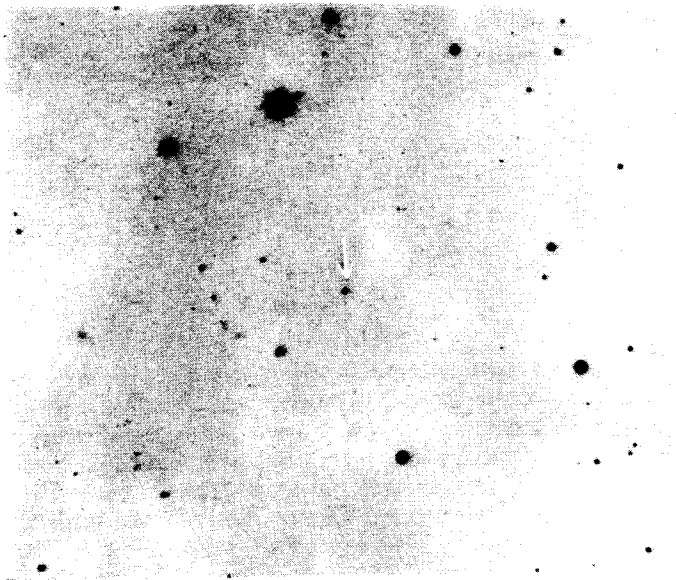


Рис. 1. Сверхзвезда 3С 48 — второй по удалению от нас из наблюдаемых источников — помечена стрелкой в центре фотографии, полученной с 200-дюймовым телескопом обсерватории Маунт Паломар. Чтобы лучше показать детали, воспроизведен негатив фотографии. До того как этот источник был признан сверхзвездой, он рассматривался как обычная звезда 16^m . Сейчас его считают сверхзвездой, потому что он почти наверняка не может быть обычной звездой. С другой стороны, если бы он был размером с типичную галактику, то его изображение на пластинке было бы диффузным (см. рис. 2).

точные положения пяти источников космического излучения, которые тогда же были отождествлены как объекты звездного типа, были определены на фотографиях, полученных на обсерваториях Маунт Вилсон и Маунт Паломар. Сначала эти объекты были приняты за звезды. Если исключить Солнце, то это были первые звезды, мощность радиоизлучения которых достаточна для того, чтобы его можно было обнаружить на Земле. Однако дальнейшее изучение этих объектов показало, что они вовсе не являются отдельными звездами, а оказываются объектами не известной до сих пор природы (рис. 1). Чтобы подчеркнуть небольшие размеры

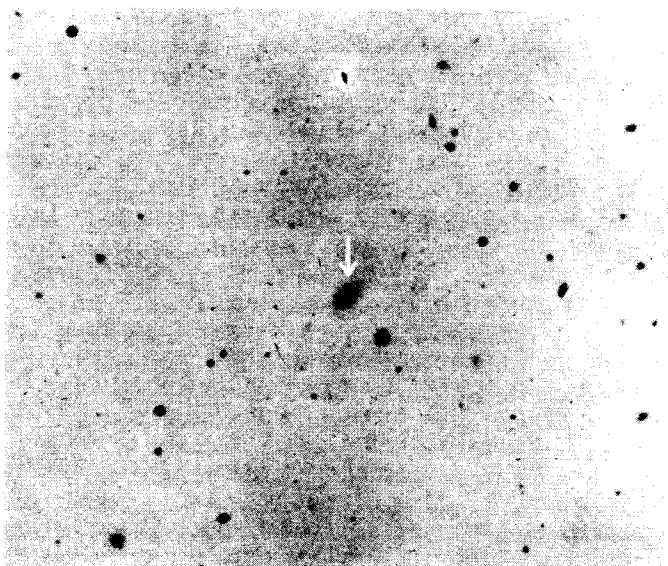


Рис. 2. Типичная радиогалактика М 23-112 (указана стрелкой). По видимой яркости она почти не отличается от ЗС 48. М 23-112 находится на расстоянии 0,8 млрд. световых лет, тогда как расстояние ЗС 48 равно 4 млрд. световых лет. На этой пластинке (также полученной на обсерватории Маунт Паломар) она выглядит ярче, чем ЗС 48 (на приведенном негативе — темнее), потому что экспозиция этой пластинки в три раза больше, чем пластинки, показанной на рис. 1, а при съемке использовалась контрастная пластинка. Такая же процедура, примененная к ЗС 48, не позволила обнаружить никаких намеков на галактическую структуру.

этих объектов, не подобрав для них лучшего названия, их назвали квазизвездными радиоисточниками. Вероятно, они получают другое название, когда будет выяснена их подлинная природа, но в этой статье нам не остается ничего другого, как придерживаться этой терминологии¹.

¹ В русском переводе термин «квазизвездный радиоисточник» переводится как «сверхзвезда», однако замечание автора вполне может относиться и к последнему названию. — *Прим. перев.*

В настоящее время известны следующие пять сверхзвезд: 3С 48, 3С 147, 3С 196, 3С 273 и 3С 286. Первые два значка — «3С» — соответствуют сокращенному названию Третьего кембриджского каталога источников (3d Cambridge) космического радиоизлучения, составленного в Кембриджском университете группой исследователей под руководством Мартина Райла.

Почти два десятилетия основной заботой радиоастрономов было составление каталогов и определение точного положения источников космического радиоизлучения; радиоастрономы надеялись, что в конечном счете эти источники будут отождествлены с объектами, которые обнаруживаются на фотографиях, полученных при помощи больших телескопов. Каталог 3С содержит положения нескольких сотен наиболее мощных радиоисточников. Некоторые из них группируются вблизи полосы Млечного Пути и отождествлены с газовыми туманностями. Энергия их радиоизлучения черпается от теплового движения частиц межзвездного газа. Немногие источники обладают значительными угловыми диаметрами и считаются остатками сверхновых звезд. Их радиоизлучение в основном является нетепловым и генерируется электронами с очень большими скоростями, захваченными магнитными полями. Радиоизлучение, создаваемое такими электронами, принято называть синхротронным излучением.

На более высоких галактических широтах, т. е. по мере удаления от плоскости Млечного Пути, большинство источников радиоизлучения, вошедших в каталог 3С, представляет собой далекие галактики (рис. 2). Примерно 50 из них сейчас отождествлены с объектами, наблюдаемыми в оптические телескопы. Нет сомнений, что видимая часть типичных радиогалактик представляет собой грандиозное скопление звезд с диаметром в десятки и тысячи световых лет. Радиоизлучение же зачастую наблюдается от двух значительно более протяженных невидимых областей, расположенных по обе стороны от видимой галактики. Угловой диаметр каждой из таких областей составляет 1—5', т. е. примерно в 10 раз превышает диаметр самой галактики. Изредка область радиоизлучения попадает в район оптической галактики, причем по своим размерам она оказывается меньше, чем галактика.

У галактик, которые являются сильными источниками радиоизлучения, нередко обнаруживаются удивительные свойства. Некоторые из этих радиоисточников выглядят как две (или даже больше) деформированные галактики, соприкасающиеся друг с другом. В других случаях наблюдается аномальное распределение свечения вдоль поверхности галактики. По своей форме большинство радиогалактик представляет собой эллипсоиды или сферы; в них совсем нет или мало межзвездного газа; звезды с высокой светимостью обнаруживаются в них очень редко. Но при всем этом сами по себе они исключительно ярки. Источниками радиоизлучения оказались также несколько необычных спиральных галактик с большим содержанием газа.

Но из какого бы газа ни состояла галактика, в большинстве радиогалактик этот газ оказывается в высокой степени ионизованным; это означает, что у большинства атомов газа удален один электрон или даже больше. Это ясно видно из спектрограмм, обнаруживающих сильные резкие линии испускания элементов, потенциалы ионизации которых достигают 100 эв. Обычные эллиптические галактики имеют в спектрах лишь слабые линии излучения элементов, потенциалы ионизации которых не превышают 15 эв. Высокие потенциалы ионизации указывают на то, что межзвездный газ сильно нагрет; это в свою очередь свидетельствует о том, что в галактиках происходили или даже еще происходят какие-то мощные возмущения.

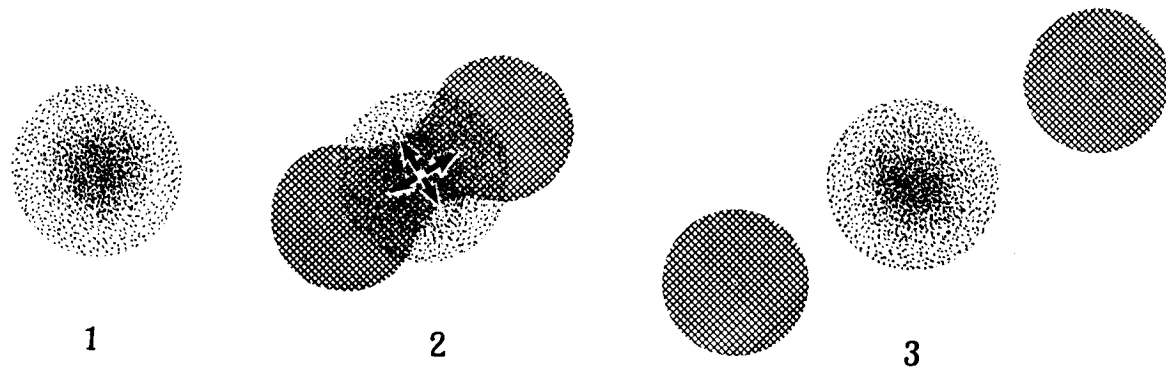
В некоторых случаях общее количество энергии, испускаемое в виде радиоизлучения яркими радиогалактиками, равно общему количеству световой энергии, излучаемой звездами, входящими в галактику, или даже превышает его. Сейчас считается, что эта энергия радиоизлучения возникает в основном за счет синхротронного излучения. На то, что этот процесс может обеспечить наблюдаемую мощность радиогалактик, было впервые указано советскими астрофизиками И. С. Шкловским и В. Л. Гинзбургом; эта точка зрения сейчас общепринята.

Однако механизм передачи электронам высокой энергии и создания магнитных полей совсем неясен. Обычно предполагалось, что электроны высоких энергий и магнитные поля образуются в результате гигант-

ских взрывов, происходящих внутри галактики. Возможная последовательность развития радиогалактики изображена на рис. 3. Вслед за начальным взрывом электроны высоких энергий и магнитные поля выбрасываются из галактики, заряженные частицы захватываются магнитными полями в ненаблюдаемых областях, откуда и наблюдается радиоизлучение. Если допустить, что эти области удаляются от галактики примерно со скоростью света, то можно подсчитать, когда произошел первоначальный взрыв.

Наиболее интенсивные радиоисточники излучают в пределах радиодиапазона с мощностью около 10^{45} эрг/сек и неизвестное количество инфракрасного, ультрафиолетового, гамма- и рентгеновского излучений. Если допустить, что источник излучает в течение миллиона лет (минимальное значение, определяемое по расстоянию невидимой области радиоизлучения от своей галактики), то энергия взрыва превышает 10^{58} эрг. Поскольку процесс превращения энергии частиц и магнитного поля в излучение не может быть очень эффективным, полная энергия, первоначально заключенная в движущихся частицах и поле, должна составлять 10^{60} — 10^{61} эрг. Для сравнения укажем, что ядерная энергия, которая выделяется при полном превращении в гелий массы водорода, равной массе Солнца, составляет всего 10^{52} эрг. Это означает, что энергия первоначального взрыва, необходимого для образования мощной радиогалактики, равна по крайней мере полной ядерной энергии, заключенной в 10^8 или 10^9 солнц!

Вопрос, сильно озадачивающий теоретиков, состоит в следующем: каким образом может быть вызвана детонация 10^8 или 10^9 солнечных масс водорода в одном взрыве? В условиях обычных термоядерных процессов на Солнце выделение 10^{52} эрг энергии потребовало бы времени 10 миллиардов лет. Однако еще более загадочным является то, что последовательность событий, приводящих к возникновению радиоизлучения, представляется противоречащей второму началу термодинамики. Действительно, согласно второму началу, энергия в замкнутой системе может переходить только от высшей формы к низшей. На первый взгляд в радиогалактиках происходит прямо противоположное. Ядерная энергия первоначального взрыва (если действитель-



Р и с 3. Рождение радиогалактики может начинаться с гигантского взрыва, который высвобождает энергию, эквивалентную энергии, выделяемой при синтезе массы водорода, составляющей от 10 миллионов до 1 миллиарда солнечных масс. До взрыва галактика может иметь типичную эллиптическую или сферическую форму (1). Взрыв (указан стрелками) образует источник радиоизлучения в области, напоминающей по своей форме гантель (2). Радиоисточник часто распадается на две области, которые могут отойти от оптически наблюдаемой галактики на сотни тысяч световых лет (3) (два красных круга).

но имел место ядерный взрыв) вызывает появление быстро движущихся частиц и γ -лучей, причем и те и другие обладают энергией в несколько миллионов электронвольт. Соударения и взаимодействие с окружающим веществом должны были бы очень быстро приводить к тому, что энергия частиц и γ -лучей быстро превращалась бы в тепло. Вместо этого в результате действия какого-то таинственного механизма эта энергия появляется в высокоорганизованной форме, а именно в виде электронов с энергией около 100 Бэв и магнитных полей огромной протяженности. Можно лишь сказать, что в природе, по-видимому, имеется подходящий механизм преобразования энергии!

Главным препятствием к отождествлению радиоисточников с видимыми объектами является то, что у радиотелескопов низкая разрешающая способность; поэтому при радионаблюдениях довольно трудно установить точное положение источника радиоизлучения. 60-метровая параболическая антенна, используемая без дополнительных приспособлений, позволяет определить координаты радиоисточника с точностью не выше нескольких минут дуги. Но в области такого диаметра на фотографии расположены десятки различных объектов.

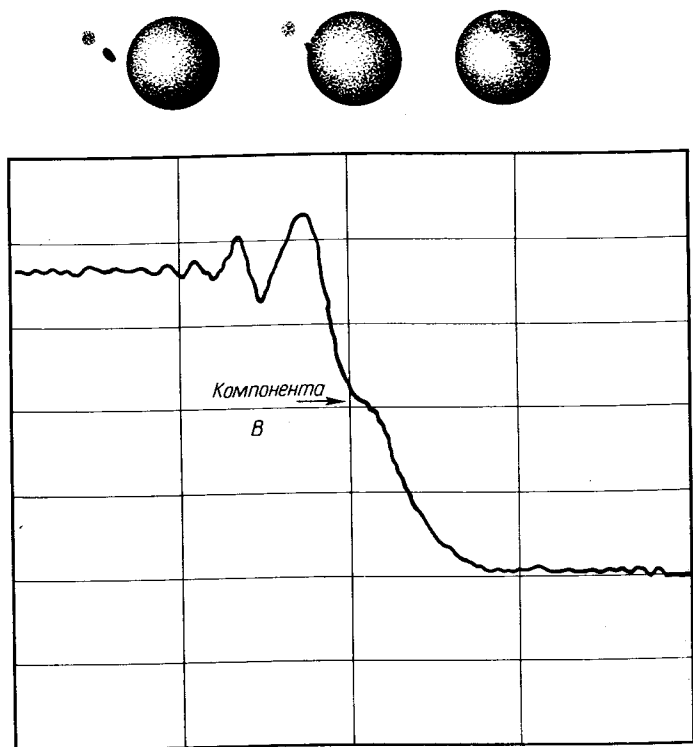
Чтобы увеличить разрешающую способность радиотелескопов, можно применять антенны, состоящие из нескольких элементов, например из двух параболических антенн, удаленных на расстояние в несколько тысяч метров друг от друга. Волны, идущие от радиоисточника, достигают этих параболоидов с небольшим различием по фазе; в результате образуются интерференционные максимумы и минимумы, по которым можно значительно точнее рассчитать размеры и положение источника, чем в случае одной только антенны.

Используя такой радиоинтерференционный метод, наблюдатели из Манчестерского университета (Аллен, Андерсон, Конвей, Палмер, Реддиш и Робсон) и из Калифорнийского технологического института (Мелтби, Меттьюс и Моффет) изучили структуру наиболее сильных радиоисточников. Манчестерская группа зарегистрировала излучение около 200 радиоисточников с длинами волн свыше 1 м. Применяв радиоинтерферо-

метр с простыми передвижными элементами, удаленными друг от друга на расстояние до 61 000 длин волн (т. е. примерно 120 км), им удалось добиться предельного разрешения около 1". Как выяснилось, среди 200 исследованных источников оказались четыре сверхзвезды. Две из них состоят из маленькой яркой сердцевин, по своим размерам находящейся на пределе разрешения, окруженной слабым «галом», по-видимому, имеющим в диаметре около 20". Две другие сверхзвезды представляют собой яркие точки с угловым диаметром менее 1", одна из них — объект ЗС 48, который интенсивно изучается в настоящее время.

Весьма энергично исследуется также другой источник — сверхзвезда ЗС 273; ее точное положение было определено в начале 1963 г. австралийскими наблюдателями Хазардом, Макки и Шимминсом. Австралийцы пользовались великолепным 70-метровым параболическим радиотелескопом, расположенным вблизи Сиднея. Им удалось воспользоваться тем, что в природе существует большой естественный диск, проходящий через значительную часть неба и закрывающий некоторые радиоисточники. Этот естественный диск — речь идет о Луне — большинство астрономов, работающих с оптическими приборами, склонно считать помехой; однако для радиоастрономов он открывает возможность с большой точностью определять положение радиоисточников, а также исследовать мелкие детали их строения.

Диск Луны можно рассматривать как экран, дифракция света на краю которого дает обычные дифракционные полосы в те моменты, когда светящийся объект исчезает за краем диска или появляется из-за него (рис. 4). Более того, поскольку положение Луны в любой момент известно с высокой степенью точности, можно точно указать моменты покрытия и появления источников. Австралийские наблюдатели исследовали некоторые из источников каталога ЗС, о которых известно, что они обладают малыми угловыми диаметрами; им удалось подтвердить, что эти источники действительно имеют малые размеры, а также уточнить их положение. Среди этих источников был один из пяти небольших объектов, известный теперь как сверхзвезда ЗС 273.



Р и с. 4. Покрытие радиоисточника Луной позволяет с высокой точностью определить его положение и строение. На кривой видно, как радиосигнал от двухкомпонентной сверхзвезды 3С 273 был прерван Луной 5 августа 1962 г.; запись принадлежит австралийским наблюдателям, работавшим с 70-метровым радиоте-

Располагая точными данными о положении радиоисточников, Меттьюс (радиообсерватория Калифорнийского технологического института) и Сэндидж (обсерватория Маунт Вилсон и Маунт Паломар) пересмотрели фотографии неба, пытаясь найти объекты, которые могли бы совпадать с небольшими по размерам источниками радиоизлучения. Но ни с одним из этих источников какая-либо необычная галактика не совпала. Однако Меттьюс и Сэндидж смогли найти звездообраз-



лескопом в Парк (близ Сиднея). Ступенька на спадающей части кривой отмечает момент, когда компонента *B* начинает исчезать из поля зрения. Расположение обеих компонент относительно Луны таково, что вновь они появляются одновременно.

ные изображения в пределах круга вероятной ошибки, подсчитанной для каждого источника. Эти изображения на первый взгляд казались неотличимыми от любой из сотен тысяч звезд на пластинке. Возможно, что совпадение было просто случайностью; возможно, что ни один из видимых объектов не имел никакого отношения к радиоизлучению. Такое предположение было вполне допустимым, потому что очень многие исследователи считали, что большинство радиисточников слишком далеки и слишком слабы, чтобы их можно

было уловить на фотопластинке даже с помощью 200-дюймового телескопа.

И все же я, как и многие другие наблюдатели, чувствовал, что исследование звезд, совпадающих по положению с радиоисточниками, является чрезвычайно важным. Мы думали, что они могут оказаться первыми настоящими «радиозвездами». На заре развития радиоастрономии считалось, что многие радиоисточники можно отождествить со звездами, однако более тщательные исследования сделали такое предположение маловероятным. Например, на том расстоянии, на котором находится от нас ближайшая звезда, радиоизлучение Солнца уменьшается в 10^{11} раз; это обстоятельство сразу ставит излучение звезды значительно ниже порога чувствительности современных радиотелескопов. Правда, известны сообщения о том, что были отмечены радиосигналы от некоторых близлежащих «вспыхивающих звезд» во время вспышки, но эти данные не очень надежны.

Во всяком случае, Сэндидж сделал новую серию фотографий на 200-дюймовом телескопе и обнаружил слабые следы в тех самых местах, где находятся две сверхзвезды и где раньше ничего не обнаруживали. На одной пластинке удалось заметить слабые красноватые волокна туманности размером около $12''$; эти следы окружали изображение звезды, совпадающей с радиоисточником ЗС 48. На другой фотографии можно было уловить еще более слабую туманность, примыкающую к объекту, который, возможно, отождествляется с ЗС 196.

Точное положение и характерная структура ЗС 273 дали возможность М. Шмидту (обсерватория Маунт Вилсон и Маунт Паломар) уверенно отождествить радиоисточник. Австралийские наблюдения во время покрытия источника Луной обнаружили, что источник ЗС 273 состоит из двух небольших компонент, обозначаемых А и В, центры которых отстоят друг от друга на $19'',5$ (рис. 5). Компонента В имеет форму чуть вытянутого эллипса и значительно слабее компоненты А, которая имеет вид сильно вытянутого эллипса. Шмидт получил фотографии, показывающие, что слабый выброс туманности совпадает с «радиоположением» компоненты А. В том месте, где расположена компонента В,

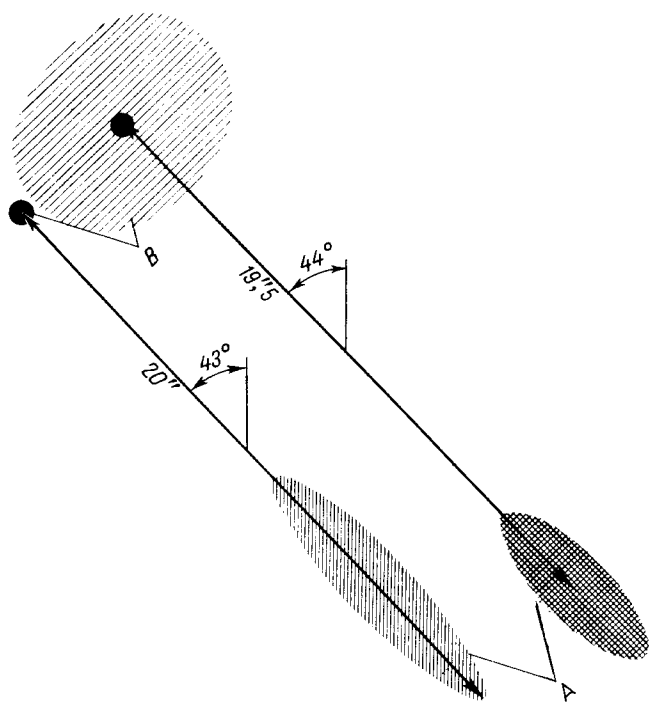


Рис. 5. Структура источника 3C 273, определенная М. Шмидтом по паломарским фотографиям (слева), очень близка к тому, что получено по лунному покрытию этого источника (справа).

на фотографии Шмидта обнаружился некоторый след, который можно приписать звезде 13^m . Нет сомнений в правильности отождествления этих двух компонент, потому что в этой части пластинки отсутствуют другие подходящие объекты.

Пока 3C 48 и 3C 273 остаются наиболее уверенно отождествленными и наиболее подробно изученными из пяти известных сверхзвезд. В оптической астрономии фотография объекта является лишь прелюдией к тщательному изучению его спектра; спектр объекта — это ключ, который позволяет нам получить доступ к данным о температуре, составе объекта и расстоянии до него. Первые спектры 3C 48, снятые с малой диспер-

сией, были получены Сэндиджем более четырех лет назад. На пластинке было обнаружено несколько диффузных линий излучения на фоне непрерывного спектра. Однако казалось, что положение каждой из этих линий не совпадало ни с одной твердо установленной линией атомных спектров.

Чтобы разобраться в этой загадке, были сняты спектры с высокой дисперсией (это означает, что спектральные линии оказываются на большем удалении друг от друга); впервые это сделал Мюнч (Маунт Вилсон и Маунт Паломар), а позже я. Объект настолько слаб, что требуется семичасовая выдержка для спектрографа с фокусным отношением $f/1^1$. При столь больших выдержках на спектрограммах преобладают линии излучения возбужденных атомов и молекул земной атмосферы. Самые слабые из этих линий ночного неба создают фоновый «шум», который, по существу, определяет предел для спектроскопии далеких или очень слабых объектов (это ограничение можно будет преодолеть, создав обсерватории за пределами земной атмосферы).

В результате тщательных измерений семи негативов, полученных различными наблюдателями, мне удалось установить положение шести линий, которые, по-видимому, действительно принадлежат ЗС 48. Эти линии располагались между длинами волн $3500 \text{ \AA}$ на ультрафиолетовом конце спектра и $6000 \text{ \AA}$ — на красном. Они не составляли какой-либо простой последовательности и совершенно не соответствовали линиям, наблюдаемым в обычных звездах или сверхновых; они не совпадали также с яркими линиями в спектрах туманностей.

Спектроскописты всегда ясно сознавали, что имеющийся атлас спектральных линий отнюдь не полон и что всегда можно обнаружить атомы, находящиеся в «экзотических» условиях возбуждения. Правда, атлас включает в себя почти все линии, которые можно получить в лабораторных условиях. Однако астрономические объекты зачастую обнаруживают «запрещенные» линии, которые в лаборатории возбудить довольно трудно. Такие линии возникают в атомах при очень

¹ Спектрограф со светосилой камеры 1 : 1. — *Прим. перев.*

редких переходах, которые происходят лишь тогда, когда атомы образуют газ ничтожной плотности. К счастью, длины волн запрещенных линий можно предсказать теоретически, и их атлас для типичных элементов также достаточно полон.

Попытка отождествить линии излучения объекта ЗС 48 заставила меня пересмотреть литературу по спектроскопии; в конце концов я пришел к убеждению, что эти линии могут испускаться сильно возбужденными ионами, скорее всего атомами гелия, потерявшими один электрон, и атомами кислорода, потерявшими пять электронов. Действительно, одна из этих линий совпала с линией, обнаруженной впервые в Бри-танском экспериментальном термоядерном центре, и это еще больше укрепило мое мнение. Линии, которые еще не отождествлены, рассуждал я, могут принадлежать пока еще не известному спектру, например спектру иона сильно возбужденного неона.

Ситуация сделалась еще более непонятной, когда Шмидт успешно выявил несколько слабых линий излучения от весьма слабых источников ЗС 147, ЗС 196 и ЗС 286. Он обнаружил, что ни одна из этих линий не совпадает с какой-либо линией в ЗС 48. Из всех возможных объяснений напрашивалось одно: все эти объекты — звезды необыкновенного состава и к тому же все разные; может быть, все они богаты редкими элементами и представляют собой остатки сверхновых, наблюдаемых в различных стадиях процесса образования элементов. Однако условие, чтобы никакие два объекта не имели ни одной общей спектральной линии, казалось мне весьма искусственным.

В таком состоянии положение сохранялось более двух лет, пока Шмидт не приступил к изучению спектра ЗС 273. На этот раз природа оказалась милостивее. Четыре из шести линий излучения ЗС 273 составляли простую гармоническую последовательность, причем расстояние между линиями и их интенсивность уменьшались в направлении к ультрафиолету. Эти линии, несомненно, принадлежали к серии того типа, который можно ожидать от водорода или другого атома, у которого удалены все электроны, кроме одного. Однако какому же атому принадлежат эти линии и какую серию они образуют?



3832

a

4575 4685

Рис. 6. а — на спектрограмме ЗС 48, полученной автором, обнаруживаются три слабые линии излучения: $\lambda\lambda$ 3832, 4575 и 4685 Å. Приведенная фотография получена наложением двух спектрограмм, чтобы слабые линии стали заметнее. Но даже при этом три отмеченные линии почти подавлены непрерывным фоновым излучением объекта. Заметно также некоторое число наиболее ярких линий свечения ночного неба, обусловленных свечением воздуха в верхней атмосфере Земли. Тщательное изучение как этой, так и других спектрограмм позволило обнаружить еще три очень слабые линии излучения: $\lambda\lambda$ 4066, 5098 и 5289 Å. Эти шесть линий излучения были отождествлены в предположении, что длина их волны в покоящемся источнике испытывает красное смещение на 37% (см. рис. 7).



б

б — спектрограмма ЗС 295, наиболее удаленного из всех наблюдаемых объектов, обнаруживает единственную и очень слабую линию излучения (указана стрелкой) около 5450 Å. Возможно, она возникла в результате красного смещения на 46% двух тесно примыкающих друг к другу линий излучения кислорода, которые в нормальных условиях находятся около 3727 Å. На этой спектрограмме излучение земной атмосферы вызывает появление множества ярких линий; самая яркая из них — зеленая линия свечения ночного неба (яркая горизонтальная линия, возможно, создается звездой). Если бы линия излучения ЗС 295 совпала с любой из ярких линий свечения ночного неба, нам никогда бы не удалось ее наблюдать. Поскольку наблюдается единственная линия излучения, ее отождествление с кислородной линией 3727 Å в лучшем случае правдоподобная догадка.

Почти сразу же Шмидт установил, что наблюдаемые длины волн не принадлежат излучению ни одного из известных атомов. Но если принять, что излучаемые атомом спектральные линии смещены к красному концу спектра на 16%, то четыре наблюдаемые линии совпадают с линиями излучения водорода. Одна из остающихся линий легко отождествлялась с запрещенной линией дважды ионизованного кислорода (т. е. атома кислорода, лишенного двух электронов), смещенной на ту же величину 16%. Последняя линия приходилась на длину волны 3239 Å вблизи ультрафиолетового конца спектра. Если бы не смещение к красному концу, она имела бы длину волны 2800 Å в ультрафиолетовой части спектра, обычно ненаблюдаемой. Мы вспомнили, что две линии ионизованного магния расположены вплотную к 2800 Å и что эти линии были сильнейшими линиями излучения, обнаруженными в спектре солнечного излучения, полученного на ракете за пределами земной атмосферы. Позже с помощью фотоэлектрического сканирующего спектрографа Оук обнаружил, что первая линия серии водорода H α , которая имеет длину волны «покоя» 6563 Å, сместилась в инфракрасную область к длине волны 7590 Å. Открытие Шмидта оказалось ключом к загадке.

Незамедлительно я пересмотрел свои спектрограммы ЗС 48, чтобы выяснить, не откроет ли красное смещение возможность интерпретации наблюдаемых линий (рис. 6). Самой сильной линией на моей спектрограмме ЗС 48 была линия с длиной волны около 3832 Å. Если бы она оказалась линией 2800 Å, смещенной более чем на 1000 Å, то это соответствовало бы красному смещению на 37%. Допустив то же самое смещение по всему спектру, Меттьюс и я смогли отождествить пять других линий, но ни одна из них не совпала с линиями водорода. Они оказались запрещенными линиями однократно ионизованного кислорода и линиями двукратно и четырехкратно ионизованного неона (рис. 7). Если линии водорода и присутствуют, то они слишком широки и слишком мало контрастны, чтобы выделяться на общем фоне.

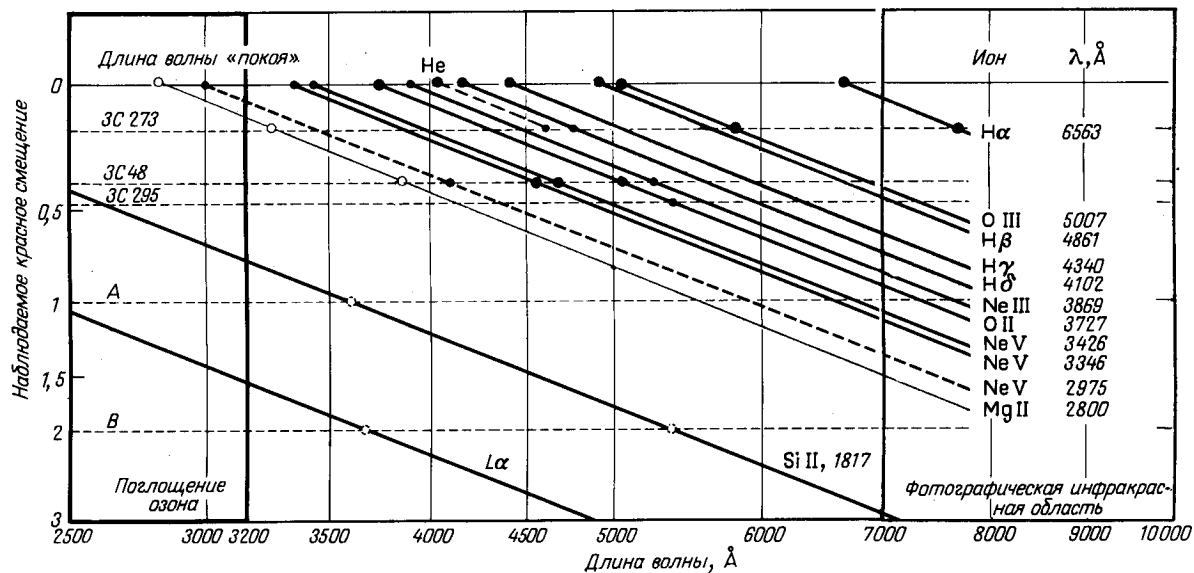


Рис. 7. Красное смещение спектральных линий от двух сверхзвезд 3C 273 и 3C 48 и наиболее удаленной галактики 3C 295.

Верхняя горизонтальная линия показывает длины волн «покоя» разрешенных линий водорода и ионизованного магния (красные кружки). Черные точки — это запрещенные линии ионизованного неона (Ne) и кислорода (O). Римские цифры указывают состояние ионизации элемента (на единицу больше числа электронов, удаленных из иона). Наклонные прямые соединяют спектральные линии, наблюдаемые в сверхзвездах, с предполагаемыми значениями длин волн покоя, ответственными за излучение. Горизонтальная прямая A соответствует красному смещению, равному единице, а линия B — красному смещению, равному двум, никогда еще не наблюдавшемуся. Спектры, обладающие такими красными смещениями, могли бы содержать линии однократно ионизованного кремния (Si II), который дает в ультрафиолете излучение с длиной волны покоя 1817 $\text{\AA}$. Спектр, имеющий красное смещение, равное двум, мог бы включать в себя Л α водорода, нормально расположенную в далеком ультрафиолете около 1216 $\text{\AA}$.

Для образования четырехкратно ионизованного атома неона необходима энергия 100 эв; это указывает на то, что газовые облака в ЗС 48 горячее и обладают меньшей плотностью, чем газовые облака в ЗС 273. Кроме того, Оук выяснил, что непрерывный спектр у этих двух объектов различный; это указывает на различие в происхождении «фона» спектров ЗС 273 и ЗС 48. Одинаков ли состав этих объектов или нет и напоминает ли вещество, из которого состоят эти объекты, обычное звездное вещество, — пока мы ничего этого не знаем.

Значительные «красные смещения» в спектрах ЗС 273 и ЗС 48, составляющие соответственно 16 и 37 %, явились полной неожиданностью. До сих пор красные смещения такой величины наблюдались только у наиболее удаленных галактик. Наибольшее известное красное смещение было измерено на Паломарской обсерватории Минковским в случае слабой галактики ЗС 295. Обнаруженная впервые как радиоисточник, галактика ЗС 295 имеет красное смещение 46 %. Уже из самой первой работы Хаббла (обсерватория Маунт Вилсон) в 1920 г. было ясно, что чем дальше расположена от нас галактика, тем больше ее красное смещение. Общепринятое объяснение этого смещения частоты состоит в том, что галактики непрерывно разбегаются друг от друга и удаляются от нас.

Красное смещение в спектрах галактик было связано со скоростью их разбегания и с расстояниями до них. Когда красное смещение невелико, его величина в процентах, грубо говоря, равна скорости разбегания, выраженной в долях скорости света. Но эта связь заведомо нелинейная, потому что скорость разбегания никогда не может достичь скорости света в пустоте, независимо от величины красного смещения. Соответствующая зависимость приведена на рис. 8. Из графика видно, что красному смещению в 46 % соответствует скорость разбегания, составляющая около 36 % от скорости света. Красным смещениям в 16 и 37 % для ЗС 273 и ЗС 48 соответственно сопоставляются скорости разбегания в 15 и 30 % скорости света. В принятой сейчас шкале галактических расстояний красное смещение в 46 % для ЗС 295 соответствует расстоянию око-

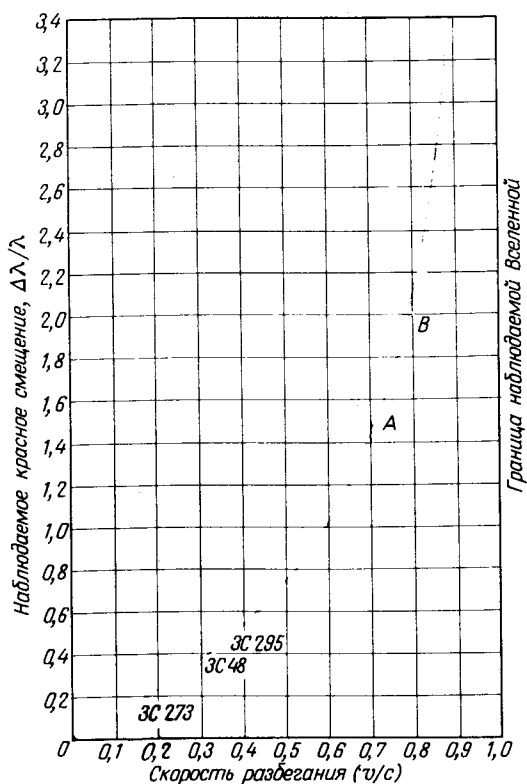


Рис. 8. Красное смещение далеких галактик интерпретируется как следствие их разбегания.

Кривая на графике показывает, как связано наблюдаемое красное смещение со скоростью разбегания, которая не может достичь скорости света. Радиогалактика 3C 295 удалена от нас на расстояние около 5 млрд. световых лет и является самым удаленным из всех наблюдаемых объектов. Сверхзвезда 3C 48 занимает по своему удалению второе место; 3C 273 — также сверхзвезда, находится примерно вдвое ближе, чем 3C 48. Точка А на графике указывает место, в котором спектральная линия, находящаяся в неподвижном источнике в ультрафиолетовой области (2800 Å), будет смещаться в инфракрасную область (7000 Å). Точка В на графике показывает место, где водородная линия $\text{H}\alpha$ $\lambda = 1216$ Å смещается в видимую часть спектра, вблизи ультрафиолета, с $\lambda = 3647$ Å.

ло 5 миллиардов световых лет. Расстояния для ЗС 273 и ЗС 48 составляют 2 и 4 миллиарда световых лет.

Но, возможно, самым удивительным у сверхзвезд ЗС 273 и ЗС 48 является то, что они вовсе не выглядят далекими объектами. Обычная яркая галактика на расстоянии в 4 миллиарда световых лет имеет видимую величину от 20 до 22^m, и ее можно наблюдать только с самыми большими телескопами. Видимая величина ЗС 48 равна 16^m, а ЗС 273 — 13^m. Звезда 13^m может наблюдаться в любой мало-мальски приличный самодельный телескоп. К тому же обычная галактика, достаточно близкая к нам, чтобы иметь звездную величину 16^m, не говоря уже о 13^m, всегда легко разрешается как сложная звездная система (см. рис. 2). Остается загадкой, как ЗС 273 и ЗС 48 могут находиться на таком удалении и казаться столь яркими. С другой стороны, если не считать их столь удаленными объектами, а принимать за обычные звезды 16 и 13^m, то в этом случае они оказываются в пределах нашей Галактики. Но как можно тогда объяснить столь большую величину красного смещения в их спектрах?

Однако красное смещение может возникнуть не только за счет расширения Вселенной. Согласно общей теории относительности, фотоны, проходя через гравитационное поле, совершают работу. Затрата энергии проявляется как уменьшение частоты или как смещение длин волн в красную сторону — красное смещение. Поэтому можно было бы допустить, что красное смещение в 37% для ЗС 48 может возникнуть в том случае, если этот источник чрезвычайно плотный или чрезвычайно массивный. Например, сверхплотная звезда с массой, равной массе Солнца, и радиусом меньше 10 км дала бы такое же красное смещение, как и звезда размером с Солнце и массой, равной 200 000 солнечных масс.

Самыми плотными объектами, известными в настоящее время, являются белые карлики; хотя их масса и меньше массы Солнца, но радиус составляет всего лишь около одной сотой солнечного радиуса. Давления плотно сжатых («вырожденных») электронов вполне достаточно, чтобы предотвратить дальнейший «коллапс» белого карлика даже при температуре абсолютного нуля. Возможно, что в некоторых экстрарди-

нарных условиях, о которых сейчас трудно сказать что-либо определенное, ядро массивной звезды может быть сжато до значительно более высоких плотностей, чем у белых карликов. Если внешняя оболочка такой звезды может затем испариться, то останется масса, равная по величине солнечной, с плотностью, в 10^7 — 10^{13} раз превышающей плотность белого карлика. При таких плотностях нейтроны и гипероны (частицы более тяжелые, чем нейтроны) представляют собой устойчивую форму вещества.

Однако имеются веские доводы в пользу того, что сверхзвезды — не нейтронные и не гиперонные звезды. Вкратце дело заключается в следующем. Газовая оболочка такой звезды не может быть толще нескольких сотен метров, потому что иначе в пределах оболочки будут существенно изменяться силы тяготения и это изменение вызовет значительное уширение линий испускания; указанная толщина оболочки соответствует фактически наблюдаемой ширине линий. Кроме того, в самой оболочке плотность не может превышать некоторую, сравнительно малую величину; в противном случае исчезли бы запрещенные линии излучения. Общее количество энергии, излучаемой такой небольшой оболочкой малой плотности, пренебрежимо мало с астрономической точки зрения. Фактически у далеких от нас нейтронных звезд вообще нельзя было бы заметить линии излучения.

Серьезные затруднения возникают также при рассмотрении другой возможности, состоящей в том, что наблюдаемые красные смещения создаются звездами, массы которых равны 10^5 масс Солнца или даже больше. Общепринятая теория внутреннего строения звезд предсказывает, что звезда с массой больше 100 солнечных масс будет неустойчивой и, следовательно, не может конденсироваться из межзвездного газа. Однако в самое последнее время Хойл (Кембриджский университет) и Фаулер (Калифорнийский технологический институт) рассмотрели условия в аномальных объектах с массами от миллиона до миллиарда солнечных масс.

Оставив в стороне вопрос о том, каким образом могли сформироваться столь большие массы, и благополучно миновав ряд неустойчивых конфигураций

в пределах от сотни до миллиона солнечных масс, Хойл и Фаулер надеялись сначала, что в очень массивных звездах может появиться тенденция к временной устойчивости. Последующее теоретическое исследование вопроса, проведенное Хойлом, Фаулером и их сотрудниками в Калифорнийском технологическом институте, показало, что объекты с очень большими массами подвержены гравитационному коллапсу, причем настолько быстрому, что устойчивые конфигурации могут вообще не существовать. Гравитационное красное смещение в таких массивных объектах может удерживать фотоны или нейтрино от «просачивания» наружу, так что в конечном счете звезда будет изолирована от нашей Вселенной, если не считать действия ее гравитационного поля.

Весьма маловероятно, что нам удастся «поймать» одну из таких сверхмассивных звезд в стадии коллапса в тот момент, когда она вот-вот должна исчезнуть из видимости. Но вместе с тем очень привлекательной чертой идеи Хойла — Фаулера является то, что, когда ядро такой звезды взрывается, высвобождается грандиозная гравитационная энергия, значительно большая, чем выделяемая при любых мыслимых ядерных взрывах. Возникающая при этом гравитационная энергия составляет, возможно, от 10^{62} до 10^{64} эрг; этого количества энергии достаточно, чтобы заставить двигаться значительную часть массы звезды со скоростью, приближающейся к скорости света. Источник частиц высокой энергии, несущих с собой энергию 10^{60} — 10^{61} эрг, у сильных радиогалактик долгое время представлял собой сложную теоретическую проблему. Сверхвзрывы, постулированные Хойлом и Фаулером, могут вызвать такие физические процессы, которые обеспечивают образование — хотя и различными путями — как протяженных интенсивных радиогалактик, так и сверхзвезд.

Но если сверхзвезды не сверхплотные и не сверхмассивные звезды, то тогда что же они такое? Допустим, что их большое красное смещение является следствием высокой скорости разбегания и что, следовательно, они являются объектами, удаленными от нас на миллиарды световых лет. Если исходить из этого допущения, легко вычислить по величине изображения

на фотопластинках, что звездные компоненты ЗС 48 и ЗС 273 имеют максимальные размеры порядка 16 000 и 3000 световых лет соответственно. Выброс ЗС 273 и слабые волокна около ЗС 48 имеют поперечные размеры около 299 000 световых лет. Выброс и волокна действительно имеют галактические масштабы: звездная компонента ЗС 48 занимает самое большее треть размера типичной галактики, а звездная часть ЗС 273 меньше одной десятой.

Очень мало сомнений в том, что их мощное радиоизлучение вызвано синхротронным механизмом. Однако их оптическое излучение невероятно осложняет задачу. Наличие резких линий излучения заставляет нас думать, что мы наблюдаем не галактический ансамбль звезд, который давал бы или небольшое число линий излучения, или они вообще отсутствовали бы, а имеем дело с массивным газовым облаком, нагретым до температуры свыше $10\,000^{\circ}\text{K}$. Именно такие температуры наблюдаются в ярких газовых туманностях в пределах нашей собственной Галактики.

Но еще более любопытно то, что Сэндидж и Метьюс обнаружили путем фотоэлектрических наблюдений: свет, исходящий от ЗС 48, изменяет свою яркость на 30% в течение года. Старые фотографии обсерватории Гарвардского университета, пересмотренные Хоффлейт и Смитом (Йельский университет), позволили установить аналогичные долгопериодные вариации яркости как у ЗС 48, так и у ЗС 273; не исключено, что некоторые вспышки яркости имеют продолжительность в пределах месяца.

Такие вариации было бы нетрудно объяснить, если бы ЗС 48 и ЗС 273 были простыми звездами, но если эти объекты имеют размеры в несколько тысяч световых лет, трудно понять, как может произойти общее увеличение яркости за крохотную долю того времени, которое необходимо свету для распространения от одного края объекта до другого. Иными словами, невозможно объяснить регулярные изменения яркости без какого-либо импульсного передаваемого сигнала; но такой сигнал не может передаваться со скоростью, большей скорости света. Предположение о том, что вариации яркости могут возникнуть из-за случайных флуктуаций яркости небольших отдельных компонент,

было рассмотрено Шмидтом и признано непригодным. Если бы в сверхзвезде существовало свыше нескольких сотен хаотично пульсирующих компонент, их индивидуальные колебания яркости усреднялись бы и никогда не могли бы вызвать значительного увеличения яркости всей сверхзвезды. Однако если флуктуирующих компонент около сотни — двух, то каждая из них должна была бы иметь яркость от одной десятой до одной пятой яркости нормальной галактики. Сам факт существования таких необычных объектов вызвал бы значительно больше теоретических проблем, чем позволил бы разрешить.

Возвращаясь к радиоизлучению ЗС 48 и ЗС 273, мы обнаруживаем новые загадки, помимо тех, которые связаны со всеми сильными радиоисточниками. Сделав определенные предположения, в частности, считая, что эти объекты имеют размеры около возможного верхнего предела, можно установить, что полная энергия магнитного поля сверхзвезд может составлять от 10^{56} до 10^{60} эрг. Из этой энергии примерно 10^{52} эрг в год уходит в пространство в форме синхротронного излучения. Но из этого следует, что максимальное время жизни сверхзвезды заключено в пределах от 10^4 до 10^8 лет. А поскольку совершенно ясно, что вовсе не вся магнитная энергия может быть превращена в излучение, верхний предел времени жизни уменьшается до 10^3 — 10^7 лет. С точки зрения временного масштаба Вселенной (13 миллиардов лет) сверхзвезды весьма недолговечны. Это обстоятельство позволяет, между прочим, объяснить, почему сверхзвезд так мало и почему их обнаруживают так редко.

Объяснение природы этих загадочных объектов было предложено Шмидтом и мною. В действительности они могут оказаться значительно более удивительными, чем нам это сейчас кажется. Я позволю себе изложить некоторые предварительные соображения. Согласно нашему анализу, диаметр ЗС 48 может заключаться в пределах от 1 до 6000 световых лет, а его полная масса — от 10^4 до 10^8 солнечных масс. Аналогичный анализ для объекта ЗС 273 дает размеры от 6 до 6000 световых лет, а массу 10^6 — 10^{10} солнечных. У меня создалось такое впечатление, что объект ЗС 48 крупнее, старше и менее ярк, чем ЗС 273, так что для

ЗС 48 лучше принимать верхние значения радиуса и массы. Спектр ЗС 48 напоминает спектр планетарной туманности вблизи очень горячей звезды, тогда как спектр ЗС 273 представляется более аномальным. Однако в обоих случаях можно думать, что линии излучения возникают в огромных массах в высшей степени ионизованного газа. Источник ионизации этих гигантских газовых облаков неизвестен, но он, по-видимому, не является звездным. Никаких заключений об избытке отдельных элементов в этом газе сделать нельзя; содержание элементов представляется нормальным, за исключением недостатка водорода в ЗС 48.

В качестве конкретной модели (которая заведомо не объясняет вариаций блеска) можно представить себе сверхзвезду как возбужденное газовое облако диаметром 600 световых лет с массой 10^9 солнечных масс. В настоящее время кажется весьма вероятным, что источником энергии сверхзвезды могут быть грандиозные взрывы, высвобождающие либо ядерную, либо гравитационную энергию. Совершенно не ясно, входят ли в состав сверхзвезд обычные звезды или нет. Если газ разлетается со скоростью 1000 км/сек, то для достижения наблюдаемых размеров сверхзвезд необходимо время 100 000 лет. Полная энергия, выделяемая при взрыве, составляла бы 10^{58} — 10^{59} эрг, что лишь немногим больше кинетической энергии разлета в настоящее время. Если взрыв носил ядерный характер, то он потребовал бы присутствия водорода в количестве 10^7 — 10^8 солнечных масс. Дж. Бербидж (Калифорнийский университет) высказал предположение, что быстрое выделение столь грандиозных количеств энергии может произойти за счет цепной реакции взрывов сверхновых звезд, расположенных в «густо населенных» звездами областях галактики. Другая возможность указана Хойлом и Фаулером: нужное количество энергии может выделиться при гравитационном коллапсе отдельной звезды с массой 10^8 солнечных масс. Наличие выброса у ЗС 273 свидетельствует в пользу того, что характерной особенностью взрыва был выброс небольшого количества вещества со скоростью, близкой к световой, тогда как значительно большая доля вещества (образующая центральную компоненту) двигалась

со скоростью, составлявшей всего лишь около трети скорости света.

В частности, у сверхзвезды ЗС 273 наиболее быстро движущаяся компонента — выброс — дает вклад в радиоизлучение в десять раз больше, чем центральная компонента.

Нет никаких прямых данных, опровергающих или подтверждающих гипотезу Бербиджа о многократных взрывах сверхновых звезд. Подобная цепная реакция взрывов сверхновых могла бы оказаться возможной в сверхплотном ядре гигантской эллиптической галактики, у которой расстояния между соседними звездами составляют всего лишь несколько световых месяцев. Если сердцевина галактики содержит звезды такого возраста, когда они достигают критической стадии эволюции, то взрыв одной из звезд может возбудить взрыв остальных. Однако у известных объектов фактическая населенность и полная масса центральных областей, по-видимому, недостаточны, что говорит не в пользу гипотезы Бербиджа.

Гипотеза Хойла — Фаулера еще в меньшей степени оправдана, потому что совершенно не известно, как может образоваться звезда с массой в 10^8 солнечных масс. Полная масса межзвездного газа, заключенного во всей нашей Галактике, немногим больше 10^9 солнечных масс, а наша спиральная Галактика богата межзвездным газом. У эллиптической галактики масса межзвездного газа очень редко превышает 10^8 солнечных масс. В быстро вращающихся спиральных системах газ обладает настолько значительным моментом количества движения, что трудно представить себе, как газ с массой в 10^8 солнечных масс может собраться в единый объект. Условия, необходимые для того, чтобы такая большая масса газа могла собраться воедино, едва ли могут быть обеспечены в пределах какой-либо галактики.

Одной из областей, где могут собраться большие массы газа, является межгалактическое пространство. Плотность газа там может быть относительно высокой (скажем, один атом на миллион кубических сантиметров), но при этом газ остается ненаблюдаемым и не влияет на расширение Вселенной. К тому же результирующий момент количества движения в протяжен-

ных областях может в среднем иметь очень небольшую величину. Если принять межгалактическую гипотезу, то сверхзвезды не могут иметь эволюционного родства с гигантскими радиогалактиками, хотя такая возможность подсказывается другими данными. С одной стороны, сверхзвезды меньше, чем радиогалактики, а с другой — обладают меньшим запасом энергии. Если бы сверхзвезды представляли собой раннюю стадию эволюции крупных радиогалактик, следовало бы ожидать наличия в них большей энергии.

Но как бы то ни было, мы столкнулись с самым загадочным видом астрономических объектов. Что таит в себе их загадочный блеск — какие-то новые неизвестные нам фундаментальные процессы или, быть может, просто пока недостаточно нашей фантазии для понимания их природы — это покажет будущее.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

Х. Чу

За исключением небольшого числа остатков сверхновых звезд, находящихся в пределах нашей Галактики, большинство космических радиоисточников является «радиогалактиками». Хотя вспыхивающие звезды временами испускают радиоизлучение, не было обнаружено ни одной обычной звезды, обладающей сильным устойчивым радиоизлучением. Мощность оптического излучения звезд обычно заключена в пределах от 10^{30} эрг/сек (белые карлики) до 10^{38} эрг/сек (сверхгиганты). Для сравнения укажем, что мощность оптического излучения Солнца составляет $4 \cdot 10^{33}$ эрг/сек. Типичная мощность радиоизлучения остатка сверхновой равна примерно 10^{36} эрг/сек. Для гигантской галактики, состоящей приблизительно из 10^{11} — 10^{12} звезд, с полной массой около $10^{11} M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца) оптическая мощность достигает 10^{44} эрг/сек. Радиоизлучение нормальной галактики, вообще говоря, слабее, его мощность лежит в пределах от 10^{37} до 10^{39} эрг/сек. Для некоторых особенных галактик, так называемых «радиогалактик», эта цифра значительно выше; мощность их радиоизлучения 10^{41} — $10^{44,5}$ эрг/сек.

Однако, начиная с 1960 г., были обнаружены удивительные объекты совершенно иного рода — сверхзвезды; именно они были в центре внимания на Международном симпозиуме по гравитационному коллапсу. Их мощность в радиодиапазоне равна примерно 10^{44} эрг/сек, а мощность в оптическом диапазоне — около 10^{46} эрг/сек; эта оптическая мощность в сто раз превышает полную мощность излучения гигантской галактики. К настоящему времени известно девять

таких объектов. На фотопластинках эти необычные радиоисточники выглядят как звезды, а у одного из них обнаруживаются неустойчивые вариации яркости с одним периодом около года и другим, более продолжительным, периодом около десяти лет. Самые скромные оценки полной энергии, заключенной в каждом из этих объектов (в виде кинетической энергии электронов, обладающих энергией $\sim 1 \text{ Бэ}$), дают как минимум 10^{60} эрг ; эта величина равна энергии покоя примерно 10^6 солнц¹.

Являются ли сверхзвезды звездами? Общепринятая теория строения звезд не допускает существования звезд с массой, превышающей $100 M_{\odot}$. Если масса звезды превышает указанный предел, то в ней преобладает давление излучения, и в силу термодинамических особенностей излучения в таких звездах возникают пульсации большой амплитуды. В результате пульсаций часть массы будет выброшена из звезды, и общая масса звезды уменьшится. Может быть, сверхзвезды являются галактиками? Но их угловые размеры оказываются меньше $0'',5$, тогда как обычные галактики на соответствующих расстояниях (определяемых по красному смещению) должны иметь угловые размеры порядка $3''$. Вариации яркости сразу исключают предположение о том, что сверхзвезды — это галактики, потому что у галактик не наблюдается изменений яркости.

Поскольку природа этих объектов пока совершенно неясна, довольно трудно придумать для них короткое название, в котором отражались бы их самые существенные свойства. Мы будем называть их сверхзвездами.

Мысль о том, что следует собрать конференцию, посвященную гравитационному коллапсу, возникла после того, как был обнаружен колоссальный энергетический выход сверхзвезд и выдвинута теория гравитационного коллапса для объяснения этого аномально высокого выхода энергии (Хойл и Фаулер). К моменту открытия симпозиума первоначальная гипотеза Хойла и Фаулера (о которой рассказала Маргарет Бербидж) уже была оставлена и заменена гипотезой, о которой

¹ Энергия покоя Солнца равна $E = M_{\odot} c^2$, где $M_{\odot}$ — масса Солнца, а c — скорость света. — *Прим. перев.*

речь пойдет ниже. Были также получены новые наблюдательные данные, которые тоже были представлены на конференцию. Без особых опасений можно сказать, что в настоящее время мы еще не понимаем ни физического механизма выделения энергии в сверхзвездах, ни их внутреннего строения.

Превращение водорода в тяжелые элементы обеспечивает выход энергии, составляющий 1% энергии покоя вещества. Если бы источник энергии сверхзвезд был бы ядерным по своей природе, нужно было бы массу $10^8 M_{\odot}$ водорода «сжечь» за время около 10^6 лет. Однако маловероятно, что можно равномерно высвобождать ядерную энергию за столь большой промежуток времени. Кроме того, ядерные реакции, как правило, идут во внутренних областях звезд; высвобождаемая энергия будет постепенно «просачиваться» наружу и в конце концов проявится как тепловое излучение абсолютно черного тела с максимумом излучения при энергии 2 эв. Каким образом можно повысить энергию электронов от нескольких эв до нескольких миллиардов эв, не нарушая второго начала термодинамики? Если использовать даже самый выгодный термодинамический цикл, то потребуется источник ядерной энергии с запасом энергии на много порядков больше. Поэтому у нас остается единственный источник энергии, который может что-то дать: гравитационная энергия. Благодаря чистой случайности гравитационное поле оказывается самым слабым полем в природе, но вместе с тем это единственное поле, которое позволяет (по крайней мере теоретически) извлечь до $\frac{8}{9}$ энергии покоя вещества.

После этого краткого введения я перехожу к изложению отдельных работ, представленных на симпозиуме; для связности изложения доклады будут излагаться не в порядке следования, а в их логической связи.

Описывая общие свойства радиоисточников, Метьюс (Калифорнийский технологический институт) указал, что радиоизлучение нормальных галактик значительно слабее их излучения в оптической области. Их радиомощность составляет примерно 10^{37} — 10^{39} эрг/сек, а оптическая мощность—около 10^{14} эрг/сек. Лишь немногие особенные спиральные галактики мо-

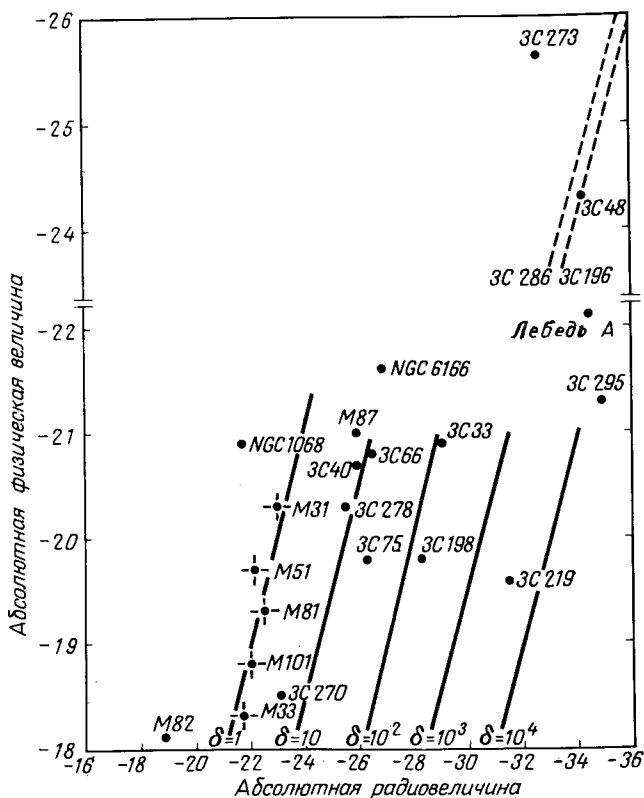


Рис. 1. Соотношение между абсолютными радио- и фотографическими величинами галактик и сверхзвезд. Абсолютная радиовеличина M_r определяется формулой $M_r = -54,1 - 2,5 \lg S$, где S — мощность радиоизлучения в ваттах на секунду на единичный интервал спектральной полосы на частоте 400 Мгц (кружки); в небольшом числе нормальных галактик S определяется на частоте 100 Мгц (крестики). Величина δ определяет отношение мощности радиоизлучения к мощности оптического излучения; это отношение принято за единицу в нормальной галактике. У других радиогалактик это отношение доходит до 10^4 . Сверхзвезды 3C 273 и 3C 218 находятся в той части графика, где никаких галактик нет. Расстояния двух других сверхзвезд (3C 286 и 3C 196) не определены, и их возможные положения на графике указаны пунктирными линиями.

гут иметь мощность радиоизлучения до 10^{40} эрг/сек. Сильные радиогалактики с мощностью 10^{41} — 10^{44} эрг/сек наиболее часто встречаются среди так называемых D-систем. Это — галактики с чрезвычайно ярким ядром (галактики Сейферта). Некоторые сильные источники были отождествлены также с эллиптическими галактиками. Мощность оптического излучения сверхзвезд составляет около 10^{46} эрг/сек, а мощность их радиоизлучения равна приблизительно 10^{44} эрг/сек (см. рис. 1, на котором приведены графики радио- и фотovelичин галактик и сверхзвезд).

На сегодняшний день отождествлено девять сверхзвезд из всех объектов, входящих в пересмотренный Третий кембриджский каталог (3С); в него входит около 470 радиоисточников, причем многие из них до сих пор не отождествлены оптически.

Для исследования формы некоторых сильных сверхзвезд сначала были использованы радиоинтерферометры с угловым разрешением в $1''$. Этот метод позволяет также с достаточной точностью определять положение этих источников. Такая работа была проведена в основном манчестерской группой и группой Калифорнийского технологического института. В точке, соответствующей радиоположению источника 3С 48, на фотографической пластинке был обнаружен объект, напоминающий звезду 16-й величины (16^m). Эта «звезда» была окружена туманностью размером $5 \times 12''$; туманность не была похожа ни на одну из известных галактик (рис. 2).

Примерно в то же время наблюдались покрытия радиоисточника 3С 273 Луной; эти наблюдения были проведены группой австралийских исследователей. Такой метод наблюдения позволил произвести оптическое отождествление 3С 273. При покрытии Луной радиоисточника возникает дифракционная картина, по которой можно судить о положении, форме и размерах этого источника. На рис. 3 представлены некоторые дифракционные картины, полученные при покрытии 3С 273. В частности, нетрудно обнаружить, является ли источник протяженным. Было найдено, что 3С 273 состоит из двух источников — А и В; они отстоят друг от друга на $19'',5$ (см. рис. 4). Компонента В имеет форму чуть вытянутого эллипса и в четыре раза слабее компоненты А.

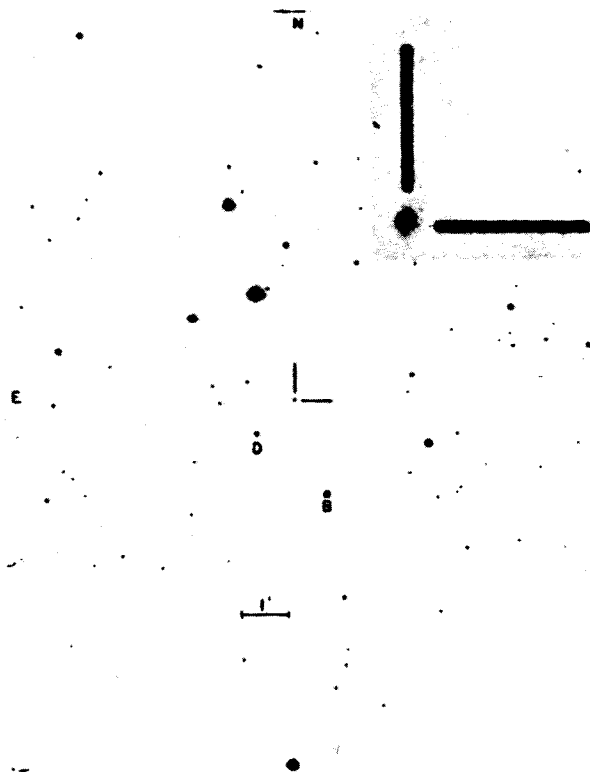


Рис 2. Подлинная фотография 3С 48 (в правом верхнем углу сверхзвезда показана в увеличенном виде). Объекты *D* и *B* являются звездами сравнения, по которым определяют яркость 3С 48. Слабая туманность видна очень плохо.

Используя 200-дюймовый телескоп, Сэндидж (обсерватория Маунт Вилсон и Маунт Паломар) получил фотографии, которые показывают, что в месте, соответствующем положению радиоисточника *A*, находится туманность в форме выброса, простирающаяся от звездообразного объекта 13^m , тип которой был назван компонентой *B*. Одна из фотографий Сэндиджа приведена на рис. 5.

Был получен радиоспектр обеих компонент источника ЗС 273 и спектр ЗС 48. В общих чертах механизм радиоизлучения и природа радиоспектра могут быть пояснены следующим образом. Оптическое излучение звезд и туманностей определяется главным образом ионами, возбужденными тепловым движением. Спектры звезд и туманностей богаты линиями излучения и поглощения; как правило, эти спектры соответствуют излучению абсолютно черного тела с максимумами в некоторых длинах волн в оптической области. Обычные радиоспектры можно разбить на две категории — соответствующие тепловому излучению и синхротронному. В тепловом спектре интенсивность, приходящаяся на единичный интервал частот, растет в сторону коротких волн. Спектр этого вида напоминает спектр длинноволнового конца теплового излучения абсолютно черного тела; этим и объясняется его название. Скорее всего, оно вызывается излучением электронов, возникающим, когда электрон проходит вблизи иона. В синхротронном спектре интенсивность убывает в сторону коротких волн, причем обычно интенсивность на единичный интервал частот пропорциональна $\nu^{-\alpha}$, где ν — частота, α — положительное число, обычно заключенное между 0,3 и 1,2 (для большинства источников оно равно $\sim 0,8$).

Траектории электронов в магнитном поле, как правило, не прямые линии, а искривленные. Но электроны, движущиеся по искривленным траекториям, испытывают ускорение. Эти «ускоряемые» электроны излучают поляризованные электромагнитные волны главным образом в области радиочастот. Такое излучение от моноэнергетических электронов впервые наблюдалось в электронных синхротронах; отсюда и возникло название этого излучения. Обычно наблюдаемый спектр космических лучей имеет вид

$$N(E) dE = E^{-k} dE,$$

где $N(E)dE$ — поток частиц в интервале энергий dE , а k — положительное число; для космических частиц высокой энергии $k = 1,5$. Можно допустить, что компонента космических лучей, представленная релятивистскими электронами, также подчиняется этому закону.

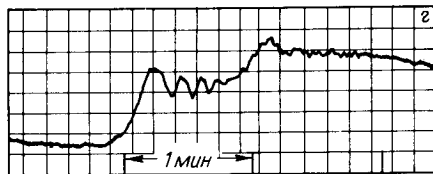
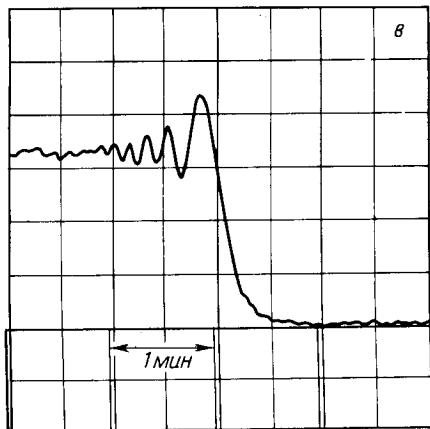
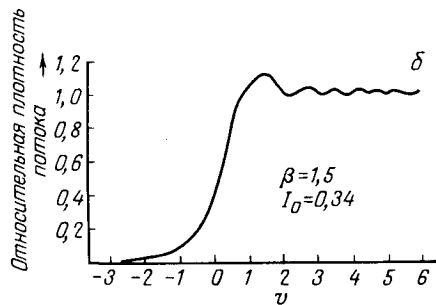
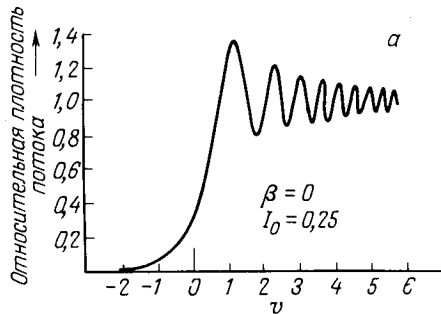


Рис. 3. Наблюдаемая интенсивность как функция времени в течение покрытия Луной. *а* — дифракционная картина, рассчитанная для точечного источника; *б* — дифракционная картина для протяженного объекта.

Следует обратить внимание на убывание амплитуды в случае протяженного источника. Угловой диаметр ω связан с величиной β соотношением $\omega = \beta/(\lambda/2d)^{1/2}$, где λ — длина волны, а d — расстояние до Луны: $v = 0$ соответствует геометрической тени; I_0 — относительная плотность потока на краю геометрической тени. Наблюдавшаяся 5 августа 1962 г. дифракционная картина ЗС 273 на частоте 410 Мгц приведена на рис. 3, *в*. Бросается в глаза сходство полученной картины с дифракционной картиной от точечного источника (рис. 3, *а*). Иммерсионная дифракционная картина от 26 октября 1962 г. на частоте 1420 Мгц воспроизведена на рис. 3, *г*. Видно, что ЗС 273 разрешается на точечный источник и протяженную область.

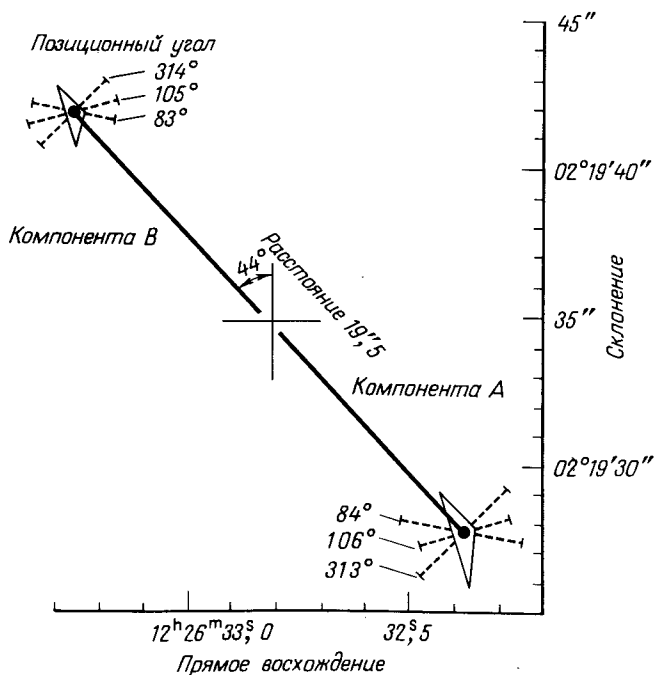
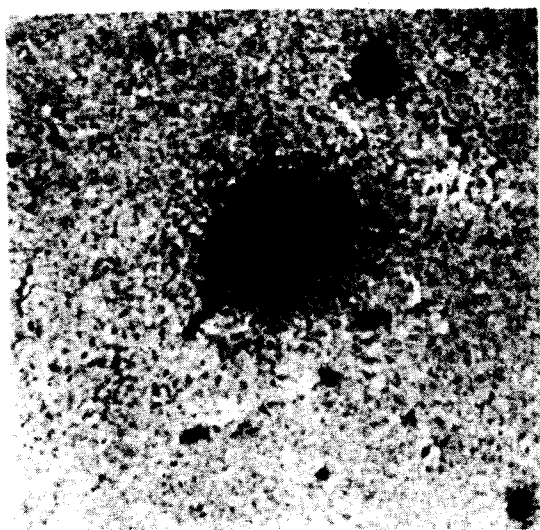


Рис. 4. Схема радиоисточника 3C 273. Стороны треугольников изображают положения краев Луны во время покрытия. Пунктирными линиями показана эквивалентная ширина источника на частоте $410 \text{ M}\mu$ для каждого из трех позиционных углов, отмеченных на схеме.

Тогда интенсивность синхротронного излучения, отнесенная к единичному интервалу частот, пропорциональна ν^{-2} .

Радиоспектр 3C 273, показанный на рис. 6, создается двумя источниками A и B; его можно разложить на составляющие, как показано на графике. Такое разложение было произведено во время покрытия Луной. Судя по всему, спектр компоненты A принадлежит синхротронному типу, а спектр B — тепловому. Однако такая интерпретация наблюдаемого спектра компоненты B требует температуры в источнике порядка 10^9°K .



Р и с. 5. Фотография ЗС 273. Виден выброс, исходящий из звездообразного объекта. Хотя расстояние до него составляет $1,8 \cdot 10^9$ световых лет, его легко наблюдать через самодельный шестидюймовый телескоп (фотография Сэндиджа, Маунт Паломар).

Столь высокая температура противоречит времени жизни, подсчитанному согласно современной теории. В оптическом спектре ЗС 48 было найдено несколько линий излучения, однако однозначного отождествления этих линий с линиями известных атомов или ионов произвести не удалось. Кроме того, Гринстейн выяснил, что спектры некоторых слабых сверхзвезд (ЗС 147, ЗС 196, ЗС 286), у которых также обнаруживаются слабые линии излучения, совершенно не похожи на спектр ЗС 48.

М. Шмидт исследовал спектр яркого объекта ЗС 273. Он обнаружил четыре линии излучения, которые образовывали простую гармоническую последовательность, причем расстояния между ними и интенсивности убывали по направлению к ультрафиолету. Единственная возможная интерпретация состояла в том, чтобы допу-

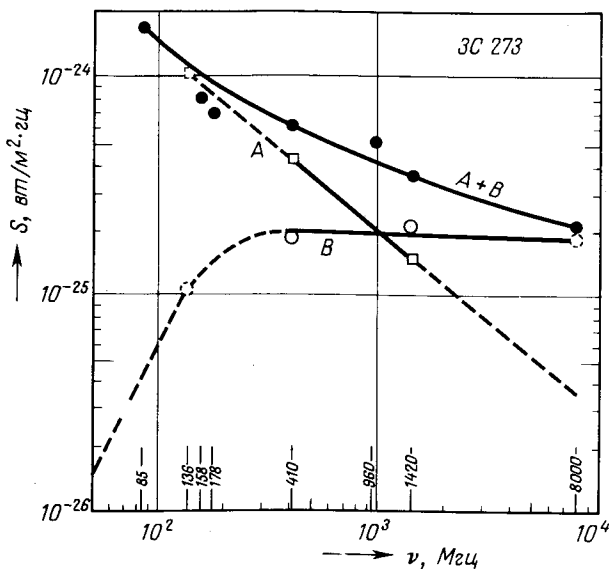


Рис. 6. Радиоспектр 3С 273. Линия, проведенная через светлые кружки (компонента В), показывает, как можно подогнать эти данные под тепловой спектр. Однако вся эта интерпретация представляется не слишком правдоподобной.

существование красного смещения линий $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,16$, а за излучающий элемент принять водород (нужно было допустить значительно большее красное смещение, если в качестве излучающих атомов принять другие водородоподобные атомы). Если принять эту интерпретацию, то линия водорода H α сместится от 6563 к 7590 Å в инфракрасную часть спектра. В самом деле, Б. Оук сумел обнаружить такую линию в инфракрасной части спектра. Как выяснилось, спектральные линии других сверхзвезд могут быть также интерпретированы как разрешенные или запрещенные линии излучения известных атомов с поправкой на красное смещение.

В сверхзвезде 3С 48 линии излучения были отождествлены как линии MgII, а запрещенные линии — как линии [OII], [NeIII] и [NeIV]. Красное смещение 3С 48

составляет 0,37. Соответствующие скорости (если интерпретировать красное смещение как доплеровский эффект) для ЗС 273 и ЗС 48 равны соответственно 0,15с и 0,3с¹. На рис. 7 приведены спектральные данные некоторых сверхзвезд с учетом их красного смещения.

Другой особенностью сверхзвезд является то, что они обнаруживают аномально сильное излучение в ультрафиолетовой части спектра даже при красных смещениях $\Delta\lambda/\lambda = 0,8$. Используя метод светофильтров, Сэндидж и Райл успешно выявили еще несколько сверхзвезд (ЗС 9, ЗС 216, ЗС 245) из группы объектов с избытком излучения в ультрафиолете.

Могут ли сверхзвезды оказаться звездами нашей Галактики, удаляющимися от нас с большими скоростями? Такое предположение в высшей степени маловероятно. Во-первых, поле тяготения нашей Галактики не в состоянии удерживать звезды, обладающие скоростями больше $10^{-3}c$. Во-вторых, собственное движение (кажущееся перемещение звезды относительно звезд, образующих неподвижный фон) представлялось бы нам весьма заметным по отношению к другим звездам, имеющим намного меньшие скорости.

Джеффри (Веслейский университет, Коннектикут) исследовал собственное движение ЗС 273. Поскольку сверхзвезда ЗС 273 достаточно ярка, ее можно обнаружить на многих фотопластинках небесного патруля, начиная с 1888 г. Пробные пластинки, полученные во многих обсерваториях с различными телескопами и охватывающие по времени последние пятьдесят лет, были использованы для установления собственного движения. В качестве системы отсчета был использован фундаментальный каталог FK-3. Собственное движение ЗС 273 составляет $0'',001 \pm 0,0025$ в год. По полученной величине собственного движения и значению скорости, определенному на основе дифференциального вращения нашей Галактики, расстояние до ЗС 273 превышает

¹ Допплеровское смещение определяется формулой $dv/v = (-v/c) (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, где v — относительная скорость источника и наблюдателя. Для той же самой скорости большинство космологических теорий дают для dv/v выражения, заключенные между $(-v/c) (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ и $(-v/c)$ (линейная зависимость).

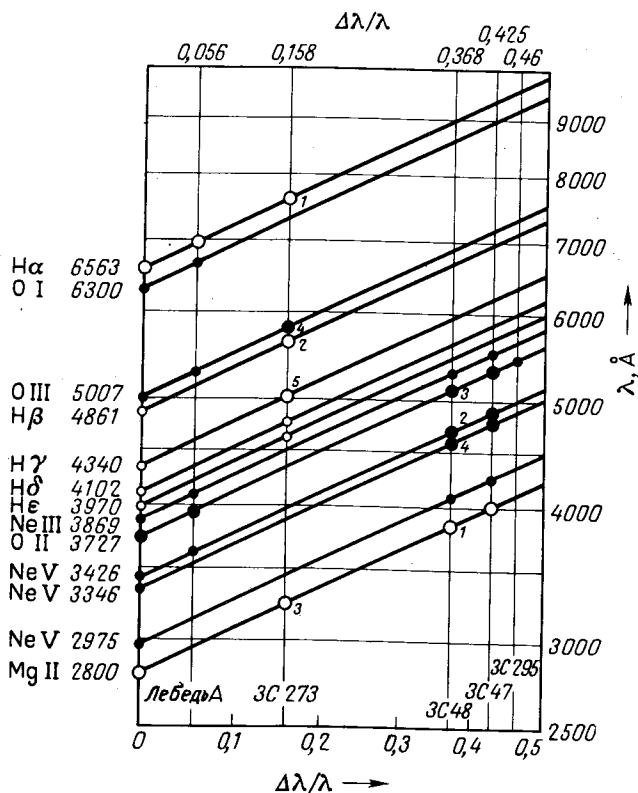


Рис. 7. Схематическое изображение спектров ЗС 273, ЗС 48 и ЗС 47, а также Лебедя А и ЗС 295. По оси ординат отложено красное смещение $\Delta\lambda/\lambda$. Запрещенные линии изображены черными точками. Числа сбоку от точек указывают относительные интенсивности линий; цифра 1 стоит около самой сильной линии спектра.

65 000 световых лет, и это отодвигает ЗС 273 на границу нашей Галактики (размеры нашей Галактики составляют около 10^5 световых лет). К аналогичному результату пришел и Лейтен, использовавший пластинки, полученные в последнее время.

Но, может быть, красное смещение обусловлено силами тяготения? Красное смещение, обусловленное

тяготеющим телом радиусом R и массой M , по порядку величины равно

$$\frac{GM}{Rc^2} = 10^{-6} \frac{M}{M_{\odot}} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1},$$

где $R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$ см — солнечный радиус. Для того чтобы получить величину красного смещения 0,1, необходимо, чтобы

$$\frac{M}{M_{\odot}} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1} \approx 10^5.$$

Для звезды, масса которой равна массе Солнца, с радиусом $R \approx 10^6$ см потребовалась бы плотность 10^{15} г/см³. Сальпетер рассмотрел равновесные конфигурации сверхплотных звезд и пришел к выводу, что невозможно существование сверхплотных звезд с массами, много большими, чем солнечная; кроме того, красное смещение от сверхплотных звезд не может превышать 0,3. Присутствие в спектре линий говорит о том, что температура на поверхности равна примерно 10^4 °К. По величине радиуса сверхплотной звезды можно найти полную мощность излучения и отсюда по величине наблюдаемого светового потока определить расстояние. Если бы сверхзвезда ЗС 273 была бы сверхплотной звездой, ее расстояние составило бы 0,3 световых года и она практически находилась бы внутри нашей солнечной системы! По интенсивности запрещенных линий Дж. Гринстейн вычислил, что расстояние должно быть даже еще меньше. Такие звезды были бы обнаружены еще Кеплером, поскольку законы движения планет оказались бы нарушенными.

Но можно предположить, что сверхзвезды имеют большие массы и большие радиусы, чем сверхплотные звезды. Например, примем, что ЗС 273 представляет собой звезду, находящуюся на расстоянии 1000 световых лет. Чтобы обеспечить необходимую мощность излучения, нужно принять радиус звезды равным 10^{13} см, а чтобы получить нужное красное смещение, следует положить массу звезды равной $10^7 M_{\odot}$. Фаулер указал, что такие звезды даже не могут сжечь свой водород, потому что они сожмутся за пределы гравитаци-

онного радиуса еще до того, как температура достигнет значения, при котором сможет «сгорать» водород (10^7 К).

Уильямс (Калифорнийский университет, Беркли) сообщил о наблюдениях линий межзвездного поглощения в спектре 3С 273. Когда радиоволны, идущие от далеких галактик, достигают Земли, часть энергии на волне 21 см поглощается водородом нашей Галактики. Очень слабая линия поглощения $\lambda = 21$ см была обнаружена в радиоспектре 3С 273; ее смещение соответствует скорости $1 \text{ км/сек} \pm 10 \text{ км/сек}$. Этот эффект, безусловно, лежит на пределе наших возможностей.

Поскольку никакой иной разумной интерпретации красного смещения нет, его можно отнести только за счет космологического красного смещения. Если использовать закон Хаббла, то расстояние 3С 273 получается равным $1,8 \cdot 10^9$ световых лет. Отсюда непосредственно следует, что мощность оптического излучения 3С 273 равна 10^{46} эрг/сек . Многие спрашивают, насколько надежно установлен закон Хаббла. Этот закон утверждает, что расстояние от нас до галактик линейно связано с величиной их красного смещения

$$\text{Расстояние} = \frac{\text{Скорость разбегания}}{H}.$$

Коэффициент пропорциональности $H \approx 100 \text{ км/сек} \cdot \text{Мпс}$ ($1 \text{ пс} = 3,25$ светового года) называется постоянной Хаббла. Величина c/H определяет размеры нашей Вселенной; на расстоянии cH^{-1} красное смещение максимально. Нередко приходится слышать, что астрономические данные не настолько точны, чтобы можно было отдавать предпочтение той или иной космологической модели; многие высказывают сомнения по поводу того, что применение закона Хаббла может дать расстояния неизвестных объектов по величине их красного смещения. Однако эти два вопроса неодинаковы.

Допустим, что локальная плотность галактик одинакова по всей Вселенной *в данный момент времени* и что кривизна Вселенной повсюду имеет одно и то же значение. Тогда различные космологические модели предскажут различные плотности галактик, зависящие от расстояния (эти галактические плотности наблюдаются из заданной точки пространства-времени), а рас-

стояния можно получить по значениям красного смещения из приведенного выше уравнения. Плотность галактик, наблюдаемая в точке пространства-времени, оказывается различной для разных космологических теорий из-за расширения Вселенной, потому что зависимость скорости расширения от расстояния в каждой модели своя. К сожалению, все космологические теории предсказывают измеримые различия плотностей галактик лишь на расстояниях, значительно превышающих пределы досягаемости самого лучшего телескопа в мире — 200-дюймового паломарского. Напротив, закон Хаббла вполне надежно обоснован для близких галактик; его обоснование опирается на соотношение между периодами изменения блеска и светимостью переменных звезд-цефеид. Наблюдая период и видимую яркость цефеид в других галактиках, можно уверенно вычислить расстояние до них. Абсолютная яркость наиболее далеких галактик связывается с их красным смещением путем довольно сложного статистического анализа, исключаяющего различия в довольно запутанных светимостях отдельных галактик. В результате такого анализа выявляется закон, на который при оценке расстояний можно полагаться с точностью до множителя, равного двум. Из всего сказанного следует, что мы можем использовать закон Хаббла при оценке расстояний до сверхзвезд и получить при этом достаточно надежные результаты.

Г. Смит, (обсерватория Макдональд) смело поставил вопрос: нет ли вариаций яркости у сверхзвезд? Фотопластинки небесного патруля обсерватории Гарвардского университета собираются с 1888 г. Хотя многие из старых пластинок находятся в таком состоянии, что на них положиться нельзя, часть пластинок сохранилась в достаточно хорошем состоянии. При измерении вариаций яркости нужно только сравнить изображение ЗС 273 с изображениями соседних звезд. Смит и Хоффлейт (Йельский университет) обнаружили заметные вариации яркости с амплитудой, доходящей до 50%, и квазипериодом в 15 лет (рис. 8). Сэндидж несколько позже исследовал сверхзвезды ЗС 273, ЗС 48 и ЗС 196 при помощи фотоэлектрического устройства и обнаружил случайные вариации, достигающие нескольких десятых. Согласно статистике, если бы ЗС 273 была га-

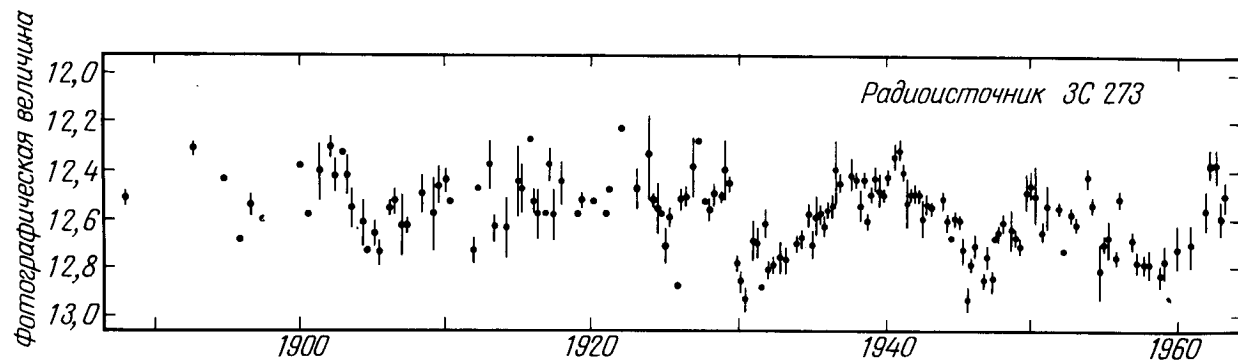


Рис. 8. Кривая вариации блеска 3С 273, полученная Смитом и Хоффлейт по старым пластинкам небесного патруля. Данные представляют собой статистическое среднее за несколько дней наблюдений; стандартные отклонения отмечены отрезками вертикальных прямых. (Смит установил, что резкое изменение оптического излучения 3С 273 происходило в конце октября 1929 г. В том году вообще было много подобных изменений блеска.)

лактикой с нормальным числом звезд ($\sim 10^{10}$), то ожидаемое изменение яркости за год было бы менее 10^{-5} от изменения яркости любой отдельной звезды. Этот предел получается в предположении, что все звезды, входящие в галактику, имеют один и тот же период изменения яркости. Из этого результата вытекает, что ни ЗС 273, ни другие сверхзвезды не могут быть компактными галактиками. Кроме того, для того чтобы свет такого объекта мог испытывать вариации с постоянной времени около одного года (самые короткие из наблюдаемых вариаций), физические размеры ЗС 273 не должны существенно превышать расстояние, которое может за это время пройти световой сигнал; другими словами, размеры ЗС 273 должны быть около светового года.

Поскольку сверхзвезды не могут быть ни близкими звездами, ни галактиками, следовало обратиться к подробному изучению их спектров. Гринстейн рассказал о том, что линии в спектре этих объектов отождествлены с запрещенными линиями OII, NeIII и NeV. Из некоторых возбужденных состояний атомы переходят из-за взаимодействия высоких порядков, вследствие чего времена их жизни в этих состояниях оказываются значительными (~ 1 сек). В условиях земных лабораторий плотности в разрядных трубках таковы ($> 10^{15}$ частиц/см³), что возбуждение ликвидируется вследствие столкновения до того, как атом успевает высветиться из возбужденного состояния; поэтому соответствующие линии обычно в лаборатории не наблюдаются (вот почему их и называют «запрещенными»). Появление запрещенных линий указывает на низкую электронную плотность ($< 10^7$ см⁻³); с увеличением плотности запрещенные линии постепенно исчезают.

Наблюдаемые запрещенные линии — это [OII], [OIII] и [NeIII]; линия MgII не является запрещенной. По случайному стечению обстоятельств значительная доля излучаемой энергии (20%) приходится именно на эти линии. Можно определить электронную плотность N_e по относительной силе этих линий в наблюдаемых спектрах. Определяя расстояние по красному смещению и абсолютную интенсивность по силе этих линий, можно определить полное число излучающих атомов. Гринстейн получил следующие результаты:

Сверхзвезда	$N_e, \text{ см}^{-3}$	Радиус, пс	M (излучающей части) / $M_{\odot}$
ЗС 273	10^7	0,6	$2 \cdot 10^5$
ЗС 48	10^6	5	$2 \cdot 10^6$

Если бы сверхзвезды были сверхплотными звездами, то дифференциальное красное смещение в различных слоях ограничивало бы толщину излучающего слоя до значения, соответствующего наблюдаемой ширине запрещенных линий. Но это ограничение влечет за собой ограничение полного числа излучающих ионов. Установив такой предел и используя наблюдаемую интенсивность запрещенных линий, Гринштейн заключил, что сверхзвезды должны были бы находиться от нас не дальше, чем Луна. Однако столь сильное гравитационное возмущение в солнечной системе вряд ли ускользнуло бы от острого взгляда Кеплера. Следовательно, наличие запрещенных линий дает нам хотя и не прямой, но сильный аргумент против предположения о том, что красное смещение имеет гравитационную природу.

Нижний предел масс для ЗС 273 и ЗС 48 может быть установлен следующим путем. По уширению линий можно определить скорость движения излучающих атомов. Она оказывается около 1500 км/сек . Для того чтобы эти атомы могли удерживаться силами тяготения на расстоянии около $0,6 \text{ пс}$, центр ЗС 273 должен иметь массу $\sim 10^8 M_{\odot}$. Эта величина и дает нижний предел масс сверхзвезд ЗС 273 и ЗС 48.

Значение массы может быть получено также и из энергетических оценок. Чтобы знать полную излученную энергию, нужно оценить возраст сверхзвезд. Излучаемая мощность равна $3 \cdot 10^{46} \text{ эрг/сек}$; эта величина эквивалентна выходу ядерной энергии при выгорании массы водорода, равной массе Солнца, за один день. У сверхзвезды ЗС 273 имеется выброс (компонента А), отстоящий на расстояние $150\,000$ световых лет от компоненты В. Весьма вероятно, что выброс А исходит от ЗС 273. Если встать на эту точку зрения, то возраст ЗС 273 окажется равным по крайней мере $150\,000$ лет.

Отсюда для полной излученной энергии получается величина 10^{59} эрг.

Однако этим не исчерпывается вопрос об энергетических ресурсах сверхзвезд. Можно считать, что оптическое излучение возникает в результате возбуждения столкновениями, причиной которого служит тепловое движение ионов. Из вида радиоспектра (см. рис. 6) с большой вероятностью следует, что механизм радиоизлучения синхротронный. Тепловое излучение с такой большой интенсивностью потребовало бы температуры порядка 10^9 °К, а при этой температуре время жизни сверхзвезды из-за ухода нейтрино не превышает нескольких дней. Релятивистские электроны, движущиеся в магнитных полях, должны излучать главным образом в радиодиапазоне. В настоящий момент мы не знаем никакого механизма ускорения электронов высоких энергий, обладающего достаточной эффективностью. По-видимому, не противоречит никаким известным фактам (например, наблюдениям Крабовидной туманности) утверждение о том, что около 1% энергии может приходиться на высокоэнергичные электроны. Энергия заключена также и в магнитном поле. Минимальная оценка полной энергии, согласующаяся с радионаблюдениями, дает по меньшей мере 10^{60} эрг.

Наличие магнитного поля подтверждается также поляризацией оптического излучения. На длине волны 4500 А были получены значения поляризации $0,45 \pm \pm 0,15\%$. Угол поляризации оказался равным $+5^\circ$. Это указывает на то, что в оптической области имеется небольшая доля синхротронного излучения.

Подведем теперь итоги нашего анализа наблюдаемых свойств сверхзвезд. Мы пришли к следующим выводам:

- 1) сверхзвезды представляют собой массивные объекты с массой $10^8 M_\odot$, заключенные в области пространства протяженностью около 1 пс;

- 2) по-видимому, сверхзвезды не состоят из отдельных звезд, а образованы единой массой;

- 3) время жизни сверхзвезд по меньшей мере 10^5 лет;

- 4) у сверхзвезд существует сильное радиоизлучение, но максимум излучения все же приходится на оптическую область;

5) поверхность сверхзвезд образована очень разреженным веществом: плотность частиц на поверхности порядка 10 см^{-3} ;

6) полный запас энергии сверхзвезд превышает энергию покоя $10^6 M \odot$.

Теперь я перехожу к некоторым теоретическим предположениям о сверхзвездах, опирающимся в основном на энергетические соображения. Полная энергия 10^{60} эрг (или $10^6 M \odot c^2$) находится в форме энергии магнитных полей и частиц высокой энергии; возможным ее источником является гравитационная энергия, которая может высвободиться в результате мощных катаклизмов (например, коллапса); таким образом, вся высвобождаемая энергия может оказаться в виде высокоэнергичных частиц. Наиболее общей теорией тяготения является общая теория относительности. Общая теория относительности предсказывает некоторые сингулярности, одну из которых — сингулярность Шварцшильда — мы рассмотрим ниже.

С точки зрения классической теории, если допустить возможность неограниченной статической концентрации некоторой массы, скорость ускользания с поверхности этой массы в конце концов превысит скорость света. В качестве любопытной исторической аналогии я напомним читателю, что в связи с корпускулярной теорией света Лаплас показал в 1795 г., что тело, размеры которого равны размерам орбиты Земли, а плотность равна плотности Земли, не позволило бы ни одному лучу света уйти от себя. Поэтому, заключил он, большинство светящихся тел во Вселенной могло бы оказаться невидимым.

К такому же выводу приходит и теория относительности. Предельная масса, рассчитанная на основе ньютоновской теории, в точности совпадает с предельной массой, определяемой общей теорией относительности. Свет, испускаемый на расстоянии R от сферы массы M , испытывает красное смещение, равное $(1 - 2GM/Rc^2)^{-1}$, которое и обнаруживает удаленный наблюдатель; для света, испускаемого на поверхности с радиусом $R^* = 2GM/c^2$, красное смещение становится бесконечным. Величина R^* называется гравитационным или шварцшильдовским радиусом. Множитель, определяющий замедление времени, также равен $(1 - 2GM/Rc^2)^{-1}$. Для

внешнего наблюдателя тело, падающее по направлению к сфере R^* , никогда ее не достигнет, поскольку при приближении к ней множитель, определяющий замедление времени $(1 - 2GM/Rc^2)^{-1}$, начинает безгранично возрастать, движение начнет замедляться и в конце концов прекратится (машина времени!). Сигналы, посланные падающим телом, будут испытывать все большее красное смещение и будут смещаться в область очень длинных волн. Для местного наблюдателя, падающего к центру, время падения окажется конечным. Например, для современного радиуса Солнца ($7 \cdot 10^{10}$ см) время падения к центру в предположении, что Солнце расположено внутри своего гравитационного радиуса, меньше одних суток. Для протона $R^* = 10^{-33}$ см, для Солнца $R^* = 2,6 \cdot 10^5$ см; для массивного объекта $M \approx 10^8 M_\odot$ величина $R^* \approx 10^{13}$ см. Для коллапсирующей звезды, для которой можно пренебречь давлением, этот результат остается справедливым; это было показано Оппенгеймером и Снайдером в 1939 г.

Хотя свет и не может проникнуть через гравитационный радиус, поле тяготения и электростатическое поле гравитационной сингулярности будут ощущаться внешним наблюдателем. Следовательно, шварцшильдовская сингулярность может быть обнаружена по создаваемому ею гравитационному полю, хотя сама она и невидима.

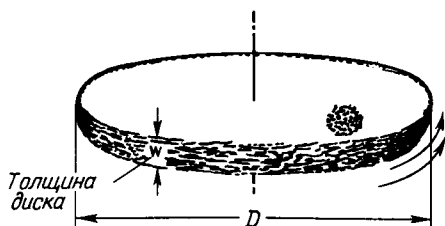
Поскольку движущихся вместе с шварцшильдовской сингулярностью наблюдателей, по-видимому, не существует, многие специалисты по теории относительности считают, что эта сингулярность возникает в результате введения специальной координатной системы для описания гравитационного поля. Были предприняты многочисленные попытки найти координатную систему, свободную от шварцшильдовской сингулярности; среди этих попыток было и видоизменение топологии пространственно-временного континуума. Однако во всех случаях в каком-то месте неизменно вновь возникала сингулярность.

Практически шварцшильдовская сингулярность устанавливает верхний предел, до которого может происходить гравитационный коллапс тела. Этот предел фактически достигается в модели, предложенной Хойлом и Фаулером. Хойл сделал смелую попытку проана-

лизировать условия образования чрезвычайно большой единой массы. Для образования большой единой массы имеются два препятствия: а) момент количества движения и б) преждевременный распад больших масс на отдельные мелкие массы. Период вращения пропорционален R^{-2} (R представляет собой размер объекта), однако все другие характерные времена (время свободного падения, время распространения магнитогиродинамических волн по телу) в нерелятивистском случае пропорциональны $R^{-3/2}$. Следовательно, вращение будет удерживать вещество от дальнейшей конденсации, когда скорость вращения на экваторе станет равной скорости ускользания. Для сравнения укажем, что при образовании Солнца вращение стало существенным, когда радиус протосолнца достиг величины, в 10—100 раз превышающей его современное значение.

В релятивистской области все характерные времена имеют одинаковую зависимость от R . Теперь уже другие физические характеристики тела (плотность, масса, магнитное поле и пр.) определяют, какое из характерных времен является наиболее существенным. Для того чтобы могла образоваться очень большая единая масса, наименьшим должно быть характерное гравитационное время. Сравнение характерного гравитационного времени $[\sim(3\pi/32 G\rho)^{1/2}]$ и характерного магнитогиродинамического времени $[\sim(4\pi\rho)^{1/2} R/H]$, где H — напряженность магнитного поля, показывает, что для магнитного поля 10^{-6} гс и плотности 10^{-21} г/см³ характерное гравитационное время меньше характерного времени магнитогиродинамических волн, если масса превышает $10^6 M_{\odot}$. (Для ориентировки укажем, что величина галактических магнитных полей лежит в пределах 10^{-6} — 10^{-5} гс, плотность межзвездной материи равна 10^{-24} г/см³, а плотность туманностей $\sim 10^{-21}$ г/см³.) Из аналогичного сравнения характерного вращательного времени (ω^{-1}) и характерного гравитационного времени можно найти при $\omega = 10^{-15}$ сек⁻¹ (угловая скорость вращения галактики) условие $\rho > 5 \cdot 10^{-23}$ г/см³. Следовательно, нет необходимости в какой-то сверхъестественной плотности, чтобы превзойти предел, обусловленный моментом количества движения.

Эта простая аргументация не учитывает передачу момента количества движения от одной части тела



Р и с. 9. Сплюснутый диск в теории Хойла.

к другой. Однако если это имеет место, то приведенные выше доводы утрачивают силу. Неизвестно, можно ли передавать значительную часть момента количества движения. Не теряя оптимизма, можно надеяться, что внутренние части могут пройти в своем падении значительный путь, прежде чем передача момента станет существенной.

Таким образом, вполне допустимо предположение, что большая масса ($\geq 10^6 M_{\odot}$) может сконденсироваться до плотности около 10^{-16} г/см^3 . При этой плотности вследствие вращения тело начнет заметно уплощаться (рис. 9). Пусть толщина диска равна W , а диаметр D . Характерное время для вертикального направления определяется величиной W , и характерное гравитационное время много больше характерного магнитогидродинамического времени. Во внешней части теперь может начаться фрагментация. Масса m каждого фрагмента определяется из соотношения $m/M \sim (W/D)^2$; если $W/D \sim 10^{-2}$, а $M = 10^6 M_{\odot}$, то $m = 10^2 M_{\odot}$.

Температуру газа можно подсчитать на основании теоремы вириала (равенство тепловой энергии сферы, на которую действуют внутренние силы тяготения, и гравитационной энергии этой сферы). Расчет дает для этого случая величину около $10^4 \text{ }^\circ\text{K}$, т. е. несколько меньше, чем температура ионизации водорода при соответствующей плотности. Дальнейшее сжатие (которое происходит теперь локально в отдельных областях) приведет к повышению температуры и, следовательно, будет ионизовать газ. Ионизация водорода требует приблизительно 10^{13} эрг/г энергии, а тепловая (и гравитационная) энергия равна примерно 10^{12} эрг/г при темпе-

ратуре 10^4 °К. Гравитационная энергия пропорциональна R^{-1} . Чтобы получить 10^{13} эрг/г энергии, требуется сжатие в 10 раз или увеличение плотности в 10^3 раз. В результате плотность возрастает с 10^{-16} г/см³ до 10^{-13} г/см³.

Газовое облако остается прозрачным для излучения вплоть до плотности $\rho \approx 10^{-11}$ г/см³. В течение фазы сжатия энергия должна передаваться полю излучения. Следовательно, сжатие не может прекратиться до тех пор, пока плотность не достигнет значения 10^{-11} г/см³. Как я уже упоминал, звезды с массой $100M_{\odot}$ неустойчивы по отношению к пульсациям. Термодинамическое рассмотрение механических свойств звезд с массой $100M_{\odot}$ показывает, что эти звезды находятся на границе устойчивого равновесия. Допустим, что происходит быстрое сжатие, почти коллапс, резко повышающее плотность с 10^{-16} г/см³ до 10^{-11} г/см³ за время, сравнимое с гравитационным временем свободного падения. Остановится ли коллапс? Мы уверены, что в звездах, обладающих массой, равной нескольким солнечным, коллапс остановится до того, как начнется бурное выделение ядерной энергии. Кинетическая энергия, связанная с коллапсом, будет рассеиваться в последующих колебаниях. В звездах с массой $100M_{\odot}$ коллапс, по видимому, пойдет гораздо дальше и возникающие колебания будут иметь очень большую амплитуду.

Самым эффективным механизмом затухания является нейтринная аннигиляция электрон-позитронных пар. Но этот механизм играет заметную роль при $T > 10^9$ °К; при более низких температурах затухания нет. Поскольку флуктуации температуры в звезде будут весьма велики, ядерные реакции (выгорание водорода) будут протекать довольно хаотичным образом. Оценка реального характеристического времени ядерного выгорания довольно сложна; однако для согласования полученного результата со спорадическими вариациями яркости в 3С 273 следует принять характеристическое время выгорания равным примерно 1 году. Такая скорость соответствует также и наблюдаемому потоку энергии ($3 \cdot 10^{46}$ эрг/сек).

Однако Колгейт (Лоуренсовская радиационная лаборатория) и Камерон (Годдардовский институт космических исследований) выяснили, что механизм, предло-

женный Хойлом, не поставляет частиц достаточно высокой энергии, способных обеспечить радиоизлучение.

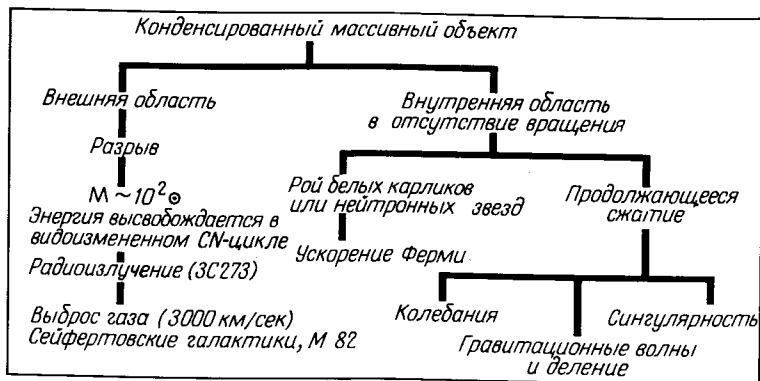
Ударные волны, возбуждаемые при вспышках сверхновых звезд, распространяются в очень разреженном межзвездном веществе и ускоряют частицы до релятивистских скоростей. Значительная доля гравитационной энергии будет высвобождаться во время коллапса сверхновых. Кроме того, ударные волны будут порождать во всей среде магнитогидродинамические волны, которые могут объяснить вариации светового блеска ЗС 273 с большим периодом (15 лет).

Остатки этих массивных звезд могут принять форму нейтронных звезд или шварццильдовских сингулярностей; и в том и другом случае они могут ускорять частицы до релятивистских скоростей. Именно этот механизм мог создать выброс в галактике М87. Идея ускорения была выдвинута Я. Б. Зельдовичем.

Другая идея, предложенная Хойлом, состоит в следующем. Внутренняя область большого тела может испытать гравитационный коллапс и дойти до чрезвычайно высокой плотности; вращение может быть либо подавлено силами тяготения, либо запас энергии вращения расходуется за счет радиальных гравитационных волн (в предположении, что в результате деления не возникли какие-либо образования цилиндрической формы). Дайсон заметил, что трудность, связанная с теорией гравитационного коллапса, состоит в том, что гравитационный коллапс окончился бы за одни сутки (локальное время, необходимое пробной частице, чтобы пересечь шварццильдовскую сингулярность для массы $100 M_{\odot}$). Как можно поддерживать состояние коллапса в течение более 10^6 лет, которые типичны для существования сверхзвезд?

Голд (Корнельский университет) указал, что при взрывах сверхновых выход светового излучения нарастает быстро, а убывает значительно медленнее; это противоречит тому, что наблюдается у сверхзвезд (см. рис. 8). Идеи Хойла иллюстрируются диаграммой, которую мы воспроизводим на рис. 10.

Фаулер рассмотрел аналогичный механизм для массивных объектов. Как только начинается конденсация, внутренняя часть приходит в быстрое вращение, и может начаться деление. Когда внутренняя часть в ре-



Р и с. 10. Схема возможных механизмов гравитационного коллапса (по Хойлу).

зультате бифуркации приобретает несимметричную форму, возникнет гравитационное излучение, уносящее заметную часть энергии вращения (сравнимую с полной энергией покоя). Это приводит к увеличению потенциальной энергии извне, и часть вещества приобретает положительную энергию связи. Масса будет выбрасываться. Трудность здесь, как это было отмечено многими, состоит в том, что нельзя избавиться от взаимодействия между внутренней и внешней частями, если существует быстрое несимметричное вращение.

Голд высказал мысль, что если звезды, возникающие в звездных скоплениях, могут уносить с собой достаточный момент количества движения, то звездные скопления могут коллапсировать и столкновения между звездами будут происходить гораздо чаще. Высвобождаемая при таких соударениях энергия довольно велика и может объяснить возникновение некоторых явлений в радиогалактиках.

На симпозиуме рассматривались и многие другие вопросы, не имеющие отношения к массивным объектам, но связанные с гравитационным коллапсом или структурой галактик.

М. Бербидж (Калифорнийский университет) перечислила несколько предложенных объяснений природы сильных радиоисточников. Сначала радиоисточник

в Лебеде был отождествлен с двумя сталкивающимися галактиками. Минковский (Калифорнийский университет, Беркли) постулировал, что столкновения между нормальными галактиками могут генерировать частицы высоких энергий, ответственные за радиоизлучение; однако эта мысль была впоследствии отвергнута, потому что высвобождаемая таким путем энергия оказалась слишком малой. Кроме того, число известных радиоисточников намного больше, чем этого следует ожидать из частоты столкновения галактик для большинства оптически отождествленных источников, не связанных со скоплениями галактик. Дж. Бербидж и Хойл предположили, что достаточное количество энергии могут дать столкновения между галактиками и антигалактиками (состоящими из антивещества). Однако в этом предположении есть много неясных моментов, в частности: почему вещество и антивещество были разделенными вплоть до нужного момента аннигиляции?

Другим механизмом излучения радиоволн может служить взаимодействие турбулентного магнитного поля с газами. Радиоизлучение M 82, может быть, и удалось бы объяснить за счет этого механизма, но в эллиптических галактиках практически нет газа! Наличие крупномасштабных сильных магнитных полей в эллиптических галактиках также весьма маловероятно.

Если принять, что остатки сверхновых являются единственными источниками радиоизлучения в галактиках, то требуется 10^8 сверхновых за 10^6 лет. И. С. Шкловский высказал предположение, что на ранних стадиях эволюции галактик происходило весьма быстрое формирование звезд, а активность сверхновых была значительно большей, чем сейчас. Камерон несколько видоизменил идею Шкловского, предположив, что в областях пространства с большим содержанием газа, но слабым магнитным полем массивные звезды могут конденсироваться одновременно. Пройдя свой нормальный эволюционный путь, они становятся сверхновыми — все в пределах 10^6 лет. Остатки этих сверхновых могут служить источниками радиоизлучения. У этой гипотезы то же самое слабое место, что и у гипотезы Дж. Бербиджа и Хойла: в эллиптических радиогалактиках газа очень мало.

Дж. Бербидж постулировал, что если расстояние между «досверхновыми» звездами составляет несколько световых дней, то взрыв одной из сверхновых в центре галактики может оказаться «нажатием спускового крючка» для превращения всех остальных звезд в сверхновые. Чтобы этот механизм мог осуществиться, требуется концентрация 10^7 звезд/пс³. Столь высокая плотность может существовать, оставаясь необнаруженной. Однако никому не известен необходимый «пусковой механизм».

Чу (Годдардовский институт космических исследований) рассказал об исследовании эволюции «досверхновых» звезд. Было установлено, что до того, как со звездой произойдет коллапс, в ней образуется очень плотное ядро. Почти вся энергия, освобожденная во время коллапса, рассеется в виде нейтрино, а плотное ядро превратится в нейтронное вещество.

Сальпетер сделал обзор исследований равновесных конфигураций нейтронных звезд. Когда плотность превышает 10^{12} г/см³, вещество состоит в основном из нейтронов, а при еще более высокой плотности ($> 10^{16}$ г/см³) могут существовать гипероны. Эти нейтроны не могут распадаться, поскольку все электронные состояния заполнены. Для нейтронной звезды существует определенное предельное значение массы и не существует статической равновесной конфигурации, если масса превосходит этот предел. Этот предел для идеального ферми-газа равен $0,76 M_{\odot}$ (предельная масса Оппенгеймера — Волкова). Если рассмотреть реальные газы, то этот предел несколько изменяется, но в любом случае он не превосходит $3M_{\odot}$.

Бонди (Королевский колледж, Лондон; доложено Сальпетером) строго вывел значение верхнего предела $\Delta\lambda/\lambda < 0,615$ для красного смещения излучения с поверхности нейтронных звезд. Был предложен и более правдоподобный предел около 0,3; этот результат, между прочим, исключил возможность того, что красное смещение ($> 0,3$) некоторых сверхзвезд является гравитационным. В принципе это верхний предел красного смещения для света, испущенного атомами любого тяготеющего тела.

Уилер (Принстон) рассмотрел другой вид гравитационной сингулярности. Он предположил, что можно

статически аккумулировать вещество до тех пор, пока временной метрический коэффициент g_{00} не обратится в нуль (это соответствует классической ситуации, когда гравитационный потенциал в центре тела равен энергии покоя этого тела). Любое вещество, падающее через «дыру» к центру, будет отдавать энергетический эквивалент энергии покоя тела, и таким образом полная гравитирующая масса (наблюдаемая внешним наблюдателем по эффекту тяготения) не может возрасти. Такая сингулярность действует как гравитационная машина, превращающая вещество в энергию. Так как число нуклонов сохраняется, Уилер постулировал существование нового класса бозонов, лишенных массы покоя δ -лучей, переносящих нуклонное число. Один из председателей заметил, что δ -лучи — если они существуют — можно использовать для того, чтобы переносить вещество с ненулевой массой покоя со скоростью света.

Однако неизвестно, можно ли действительно аккумулировать вещество статически до такого состояния, чтобы появилась требуемая гравитационная сингулярность. Все модели нейтронных звезд, предложенные до сих пор, указывают на возникновение динамического коллапса, когда масса превосходит некоторый критический предел (обзор исследований предельных значений массы был сделан Сальпетером).

В конце симпозиума возникла оживленная дискуссия, вновь возвратившая участников к некоторым вопросам, обсуждавшимся в ходе симпозиума. Шюкинг подчеркнул, что ряд вопросов, связанных с массивными объектами, космическими лучами и космическими рентгеновскими лучами и γ -излучением, не попал в поле зрения участников конференции. Бергман заметил, что до сих пор эффекты общей теории относительности наблюдались только в предельном случае слабых полей. Теперь в связи с успешным развитием астрофизики общая теория относительности становится более физической теорией. Он выразил надежду, что квантованный вариант релятивистской теории может сыграть важную роль для понимания природы массивных объектов. Минковский выразил удовлетворение тем, что в течение последних десяти лет техника оптического отождествления радиоисточников шагнула далеко впе-

ред. Однако теоретическое понимание строения массивных объектов еще явно недостаточно. В одной из своих статей Оппенгеймер, которому принадлежат первые работы по нейтронным звездам и релятивистскому коллапсу, заметил, что современная возможность интерпретации сверхзвезд напоминает положение квантовой электродинамики восемнадцать лет назад, когда было собрано много данных и царила полная растерянность. Если эта конференция и научила нас чему-нибудь, то прежде всего тому, что те два темных облачка на безоблачно чистом небе физической науки, о которых говорил Кельвин в конце прошлого века (имея в виду естественную радиоактивность и рентгеновские лучи¹), совсем не растаяли. Только сейчас их нужно искать уже на самом краю Вселенной.

¹ Автор допустил неточность: знаменитое высказывание Кельвина относится к теории излучения абсолютно черного тела и результату опыта Майкельсона. Но существа заключительных слов его статьи это обстоятельство несколько не изменяет.—
Прим. перев.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

Дж. Нарликар

Открытие мощных источников космического радиоизлучения за пределами нашей Галактики поставило перед современной астрономией множество интересных проблем. Ключевой вопрос заключался в следующем: откуда черпают эти источники свою фантастическую по величине энергию? Оценки указывают, что за «время жизни» радиоисточника расходуется энергия порядка 10^{60} эрг; эта величина соответствует ядерной энергии сотен миллионов солнц. Большинство теорий о происхождении и природе этого радиоизлучения оказалось бессильным найти источник столь большой энергии.

В 1963 г. Хойл и Фаулер высказали замечательную гипотезу, что источником этой энергии может быть гравитационный коллапс «сверхзвезды». Подобный объект должен быть очень массивным — в сотни миллионов раз массивнее Солнца — и должен был бы располагаться в центре галактики (рис. 1).

Вскоре после этого благодаря совместным усилиям радиоастрономов и астрономов, два радиоисточника были отождествлены с очень яркими звездообразными объектами. Одним из этих источников оказался объект 3С 273; он является самым ярким из всех известных объектов во Вселенной. Дальнейшая работа по оптическому отождествлению радиоисточников позволила выявить другие объекты подобного типа. К моменту написания этой статьи (начало 1964 г.) их было известно уже девять.

Прогресс в теории и увеличение материала наблюдений оказались настолько важными, что в декабре 1963 г. в Далласе был созван Международный симпо-



Р и с 1. Черная область в центре галактики М 82 — это место, где находится источник радиоизлучения. За время своего существования этот радиоисточник расходует энергию, эквивалентную ядерной энергии примерно ста миллионов солнц. Эта энергия может возникнуть за счет гравитационного коллапса — падения космической пыли к центру.

зиум по гравитационному коллапсу для обсуждения многочисленных следствий полученных результатов. Не являются ли эти необычные объекты результатом гравитационного коллапса? Какой механизм преобразует гравитационную энергию в радиоизлучение? И наконец, — хотя с теоретической точки зрения это отнюдь не последний вопрос — приводит ли гравитационный коллапс к неограниченному сжатию и возникновению «сингулярности» в самом пространстве-времени?

Последний вопрос я и хочу рассмотреть в этой статье. Возможность существования в природе столь массивных объектов, как сверхзвезды, принуждает теоретиков пересмотреть свои представления, опирающиеся на общую теорию относительности.

К бесконечной плотности

Представим себе сферическое облако пыли, частицы которого взаимно притягиваются по закону всемирного тяготения. Облако как целое начнет сжиматься и будет продолжать сжиматься до тех пор, пока не скажется действие каких-то других сил. Допустим на мгновение, что никаких других сил нет; несложные вычисления показывают, что облако сожмется *в точку* за конечное время. Если исходная плотность вещества в облаке составляет 1 г/см^3 , то потребуется примерно полчаса, чтобы все облако в результате коллапса приобрело бесконечно малые размеры.

Естественно, возникает вопрос, почему все объекты в природе не подвержены коллапсу, вызываемому силами взаимного притяжения их частей. Ответ очевиден: он состоит в том, что, кроме сил притяжения, существуют и другие силы. К тому же гравитационное взаимодействие очень слабо по сравнению с другими взаимодействиями. Например, сила электрического взаимодействия между двумя электронами в 10^{40} раз превышает силу притяжения между ними. Поэтому гравитационный коллапс обычно произойти не может.

Но ситуация совершенно меняется, когда речь заходит об очень массивных объектах, подобных тем, которые рассматривались Хойлом и Фаулером. Чем больше масса, тем сильнее сила тяготения. Для очень боль-

ших объектов гравитационные силы столь значительны, что ни одна из известных сил, по-видимому, не в состоянии предотвратить гравитационный коллапс.

Согласно ньютоновской теории, если процесс гравитационного коллапса ничем не ограничен, то все вещество концентрируется в точку, переходя в состояние с бесконечной плотностью. Но можно ли полагаться на теорию Ньютона вплоть до этой стадии сжатия?

Тяготение и теория относительности

Ньютоновская теория тяготения, несмотря на все ее успехи в описании гравитационных явлений как на Земле, так и в солнечной системе, далеко не свободна от логических затруднений. Так, например, по Ньютону гравитационное взаимодействие передается мгновенно; оно распространяется с бесконечной скоростью и его влияние ощущается незамедлительно. Однако это противоречит специальной теории относительности, которая утверждает, что не существует взаимодействий, распространяющихся быстрее, чем свет в пустоте. Вместе с тем уже около пятидесяти лет тому назад Эйнштейн предложил теорию тяготения, которая согласуется и со специальной теорией относительности, а во многих отношениях и с ньютоновской теорией тяготения. Эта теория тяготения называется общей теорией относительности.

Общая теория относительности исходит из замечательного свойства гравитации, состоящего в том, что гравитацию невозможно «выключить». Она всегда есть и всегда оказывает влияние на все материальные частицы. В этом смысле она отличается от всех известных в физике сил. Электрические силы оказывают влияние только на заряженные частицы. Электрон (обладающий отрицательным зарядом), протон (заряженный положительно) и нейтрон (вовсе лишенный заряда) будут вести себя в одном и том же электрическом поле по-разному. С другой стороны, в гравитационном поле они будут двигаться совершенно одинаково. Это обстоятельство понял еще Галилей более трехсот лет назад. Именно Галилей доказал, что все тела падают с одинаковым ускорением, независимо от их массы.

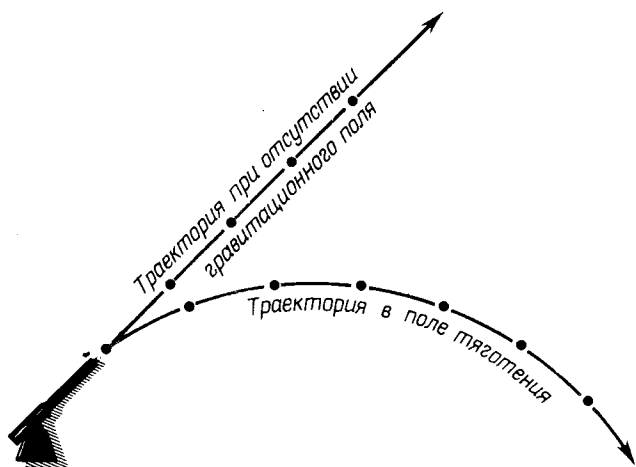
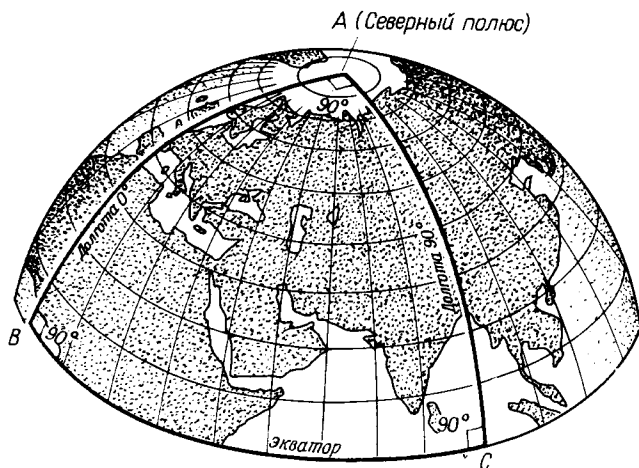


Рис. 2. Эйнштейн исходил из того, что силы тяготения теснейшим образом связаны с пространством и временем. Хотя траектория снаряда в поле тяжести представляет собой кривую линию (левый рисунок), общая теория относительности считает эту линию *прямой* в искривленном пространстве-времени.

Эйнштейн пришел к выводу, что это свойство гравитации указывает на теснейшую связь гравитации с природой пространства и времени. Первый закон движения Ньютона утверждает, что тело продолжает двигаться равномерно и прямолинейно до тех пор, пока на него не начнут действовать внешние силы. Представим себе артиллерийское орудие, стреляющее под углом 45° к вертикали. Если бы не было силы тяготения, снаряд продолжал бы свое движение по прямой, составляющей 45° с вертикалью (рис. 2). Наличие тяготения заставляет снаряд двигаться по искривленной параболической траектории. Поскольку от тяготения избавиться нельзя, бессмысленно рассматривать законы движения в отсутствие гравитации. Только что приведенный пример показывает, что тяготение — при отсутствии каких-либо других сил — приводит к тому, что частицы движутся не по прямым линиям, а по не-



Совершенно аналогично этому линии, проведенные на сфере (например, на Земле), представляются нам кривыми (правый рисунок), хотя по определению они являются «прямыми»: именно они представляют кратчайшее расстояние между двумя точками. Эти «прямые» выглядят искривленными, поскольку они изображены в неевклидовом пространстве.

которым кривым. Вместе с тем эти кривые линии можно назвать «прямыми», если изменить законы геометрии. Именно так и поступает общая теория относительности. Наличие сил тяготения приводит к тому, что геометрия пространства-времени становится неевклидовой; количественно этот вывод описывается уравнениями Эйнштейна.

Решение Шварцшильда

Уравнения Эйнштейна показывают, как искривление пространства-времени (другими словами, неевклидов характер пространства-времени) связано с распределением вещества. Хотя положенные в основу теории идеи просты и изящны, а уравнения могут быть записаны в очень компактной форме, решение любой конкретной задачи в общей теории относительности чрез-

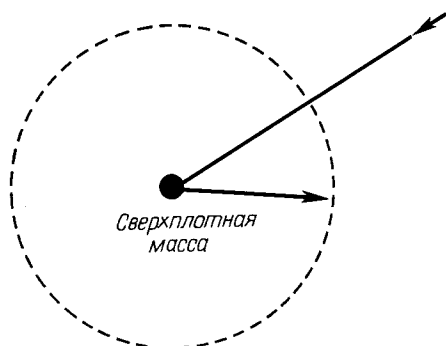


Рис. 3. Если тело сжимается так, что оказывается внутри своей сферы Шварцшильда, то ни радио-, ни оптический сигнал от тела не могут выйти за пределы сферы. Но чтобы погрузиться в свою сферу Шварцшильда, тело должно стать необычайно плотным, например для Солнца радиус Шварцшильда составляет всего 3 км.

вычайно затруднено главным образом из-за неевклидовости пространства-времени. Из-за этого лишь для немногих задач этой теории известны точные решения. Одно очень важное решение было найдено в 1916 г. К. Шварцшильдом.

Согласно этому решению, поле тяготения на больших расстояниях от тела, создающего это поле, более или менее совпадает с полем, определяемым ньютоновской теорией. Другими словами, оно очень хорошо описывается известным законом обратной пропорциональности квадрату расстояния. Однако по мере того как мы все ближе и ближе подходим к телу, отличия от ньютоновской теории становятся все более и более существенными. Как этого и следовало ожидать, гравитационное поле становится все сильнее и сильнее. Но сильное гравитационное поле сопровождается сильным искажением геометрии пространства-времени; это обстоятельство ни в какой мере не предсказывается ньютоновской теорией.

Представим себе крайний случай, когда тяготеющие массы сконцентрированы в точке. Искривление

пространства-времени ведет тогда к очень интересной ситуации, которую проще всего уяснить, пользуясь рис. 3. Вокруг тяготеющей массы можно построить сферу определенного радиуса, называемого шварцшильдовским, которая действует как своеобразный барьер для сигналов. Никакой физический сигнал не может выйти из этой сферы наружу; однако сигналы извне могут попасть внутрь нее.

Может ли такая ситуация возникнуть на самом деле? Оказывается такая ситуация возможна в том случае, если тело настолько мало, что лежит внутри своей шварцшильдовской сферы. Это условие не удовлетворяется ни для одного из тел вокруг нас. Так, шварцшильдовский радиус для Солнца составляет около 3 км, тогда как в действительности радиус Солнца равен примерно 700 000 км.

Но пусть в результате гравитационного коллапса тело сжалось до таких размеров, что оказалось внутри сферы Шварцшильда. То, что будет происходить тогда может служить превосходной темой для научно-фантастического романа.

Сингулярность пространства-времени

Вернемся снова к нашему примеру облака пыли, коллапсирующего под действием собственного тяготения. Эта задача может быть рассмотрена вполне строго в рамках общей теории относительности, однако ответ оказывается несколько озадачивающим. Допустим, что вначале мы поставили двух наблюдателей *A* и *B* для записи хода событий по мере сжатия облака. Пусть *A* остается на месте вне облака, а *B* находится на одной из частиц облака и движется вместе с ней. Наблюдатели *A* и *B* устанавливают между собой связь при помощи световых или радиосигналов (рис. 4).

Наблюдатель *A* обнаружит, что облако делается все меньше и меньше: однако он никогда не доживет до того, чтобы увидеть, как облако сжалось в точку. Причина столь удивительного результата кроется в искривлении пространства-времени. По мере сжатия облака поле тяготения вблизи него становится все сильнее и сильнее, а геометрия пространства-времени все

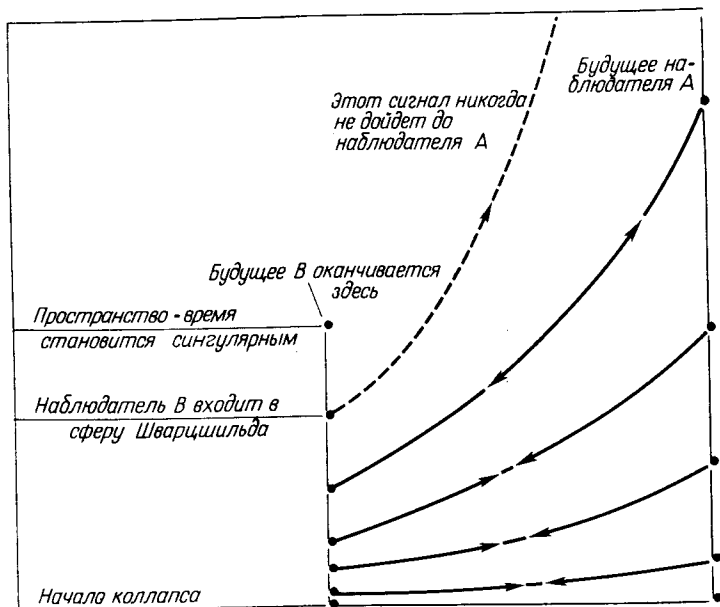


Рис. 4. Связь между наблюдателем *В*, находящимся внутри коллапсирующей галактики, и наблюдателем *А*, находящимся вне ее, возможна лишь до тех пор, пока наблюдатель *В* не попадет внутрь сферы Шварцшильда. Наблюдатель *А* никогда не узнает, что случилось с наблюдателем *В*, после того как последний пересек сферу Шварцшильда. Перед наблюдателем *В* за несколько секунд промелькнет все будущее наблюдателя *А*.

больше и больше отклоняется от евклидовой. Физически этот эффект проявляется следующим образом. Представим себе, что наблюдатель *В* посылает два сигнала через промежуток времени в 1 сек по своим часам. К наблюдателю *А* по его часам эти сигналы попадут вовсе не с интервалом в 1 сек; их прибытие будет разделено значительно большим интервалом времени! И этот интервал становится все больше и больше по мере того, как наблюдатель *В* приближается к шварцшильдовской сфере. Как только *В* пересечет сферу Шварцшильда и окажется внутри нее, ни один сигнал, посланный им, не достигнет наблюдателя *А*, даже если

бы *A* оказался бессмертным! Поэтому наблюдатель *A* видит, что тело приближается к своей шварцшильдовской сфере все медленнее и медленнее, но он никогда не обнаружит, что тело достигло сферы или, тем более, сжимаясь, вошло в ее пределы. В частности, он никогда не узнает, что случилось с наблюдателем *B* после того, как он пересек барьер.

То, что представляется наблюдателю *B*, оказывается еще более интересным. Если наблюдатель *A* обнаруживает, что события в том месте, где находится *B*, протекают все медленнее, по мере того как наблюдатель *B* приближается к сфере Шварцшильда, то *B* видит, что с наблюдателем *A* происходит совсем противоположное. Для него события в точке, где находится наблюдатель *A*, развиваются все быстрее, и в тот момент, когда он пересекает сферу Шварцшильда, он в течение нескольких мгновений видит все будущее *A*. Однако впереди его ждут еще большие испытания. Расчеты показывают, что время, необходимое телу (по часам наблюдателя *B*), чтобы сжаться в точку, совпадает с тем временем, которое получается из ньютоновской теории. Таким образом, если облако начинает сжиматься от плотности 1 г/см^3 , оно достигнет конечного состояния приблизительно за полчаса! Примерно за это же время наблюдатель *B* будет сжат в точку вместе с остатками коллапсирующего облака.

Состояния с бесконечной плотностью имеют куда более серьезные последствия для общей теории относительности, чем для ньютоновской теории по очень простой причине: в теории относительности тяготение весьма тесно связано с пространством-временем. Состояния с бесконечной плотностью приводят к бесконечности в геометрии самого пространства-времени. Это обстоятельство выражают иногда словами: «пространство-время становится сингулярным». Следовательно, общая теория относительности приводит к замечательному результату: для наблюдателя *B* пространство-время становится сингулярным примерно за полчаса!

На этой стадии рассмотрения можно, конечно, встать на ту точку зрения, что в приведенном выше примере сингулярность возникает лишь для наблюдателя *B*, который коллапсирует вместе с телом. Внеш-

ний наблюдатель А никогда этого не обнаружит; для него облако никогда не сожмется за пределы шварцшильдовского радиуса. С этой точки зрения окончательная судьба объекта, подверженного гравитационному коллапсу, не имеет значения.

Но мы должны рассмотреть все возможные следствия физической теории, и потому вполне законным является вопрос, действительно ли общая теория относительности приводит к сингулярностям пространства-времени для наблюдателей, подобных наблюдателю В. Можно ли избежать возникновения сингулярности, приостановив гравитационный коллапс любого объекта на какой-то его ранней стадии?

Можно ли предотвратить появление сингулярности?

Я уже отмечал раньше, что благодаря «слабости» гравитационного поля в обычных объектах другие силы в состоянии противостоять действию сил тяготения. Лишь для очень массивных объектов проблема гравитационного коллапса становится серьезной. Вплоть до недавних пор самыми большими объектами, для которых приходилось рассматривать равновесие, были звезды. Данные наблюдений, упомянутые в начале статьи, указывают с большой вероятностью на существование в природе объектов с массой, по крайней мере в сотни миллионов раз превышающей массу звезд. Поэтому весьма важно выяснить, могут ли силы, которые поддерживают равновесие обычных звезд, обеспечить равновесие и массивных сверхзвезд.

~~Силам тяготения в звездах противостоят силы внут-~~
реннего давления. Равновесие между давлением и силами тяготения должно поддерживаться очень точно, иначе звезда быстро сколлапсирует. Необходимое для равновесия давление в центре Солнца составляет около 10^{11} кг/см², величина по земным масштабам колоссальная. Если бы такого высокого давления не было, Солнце сколлапсировало бы в течение нескольких часов.

Высокие давления и высокие температуры внутри звезд создаются ядерными реакциями. В недрах Солнца энергия освобождается при превращении водорода

в гелий. Далее происходит выгорание гелия и т. д. В конце концов все ядерное «топливо» в любой звезде будет исчерпано и звезда начнет сжиматься. Расчеты показывают, что если масса звезды не превышает массу Солнца более чем в 1,44 раза, то внутри звезды возникает новый вид давления, способный остановить сжатие. Это давление называется давлением вырожденного электронного газа; его возникновение следует из квантовой теории. Квантовая теория утверждает, что электроны нельзя слишком сблизить друг с другом. Чем больше сжато вещество, тем выше это давление.

Массы сверхзвезд, рассмотренных Фаулером и Хойлом, значительно превосходят указанный предел. Никакое давление — ни тепловое, ни давление вырожденного газа — не может противостоять в этих объектах силам тяготения. Очевидно, в общую теорию относительности нужно внести некоторые коррективы, чтобы избежать развития сингулярности пространства-времени внутри этих массивных объектов, когда они подвергаются релятивистскому коллапсу.

Почему все же тяготение в конце концов оказывается победителем?

Можно пояснить это следующим образом. Когда мы растягиваем резиновый шнур, в нем создается запас потенциальной энергии. Если затем предоставить шнуру свободу, то он начнет сжиматься под действием упругих сил и запасенная энергия может быть использована для любых целей. Однако, когда эта энергия будет использована, силы, ответственные за сжатие, прекратят свое существование. Такая ситуация типична для всех известных сил, за исключением сил тяготения. В случае сил тяготения имеет место как раз противоположное. Когда система коллапсирует под действием сил тяготения, силы тяготения возрастают, а не убывают.

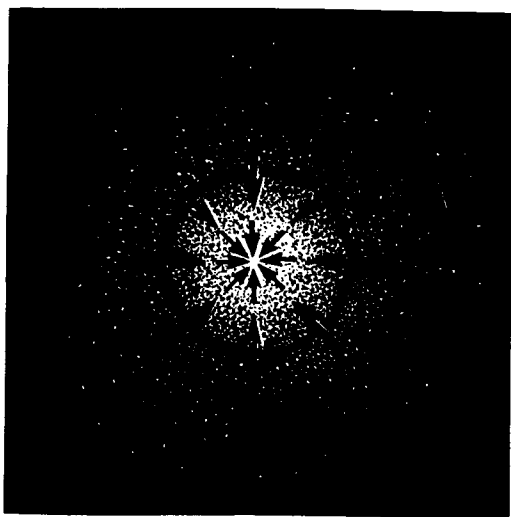
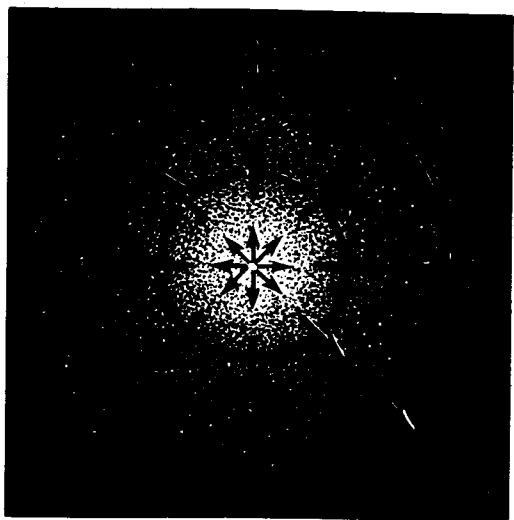
Можно подойти к этому вопросу и с несколько иной точки зрения. Будем считать, что тяготение обладает отрицательной энергией. Если от отрицательного числа отнять положительное, то отрицательное число увеличится (по абсолютной величине). Именно это происходит с гравитационной энергией коллапсирующего тела.

Это рассуждение подсказывает нам, что можно избежать коллапса до сингулярности пространства-времени путем введения поля с отрицательной энергией, которое возрастает быстрее, чем тяготение, когда объект начинает сжиматься. Но не приходилось ли физикам раньше рассматривать поле отрицательной энергии, обладающее таким свойством?

Космологическая аналогия

На последний вопрос мы должны ответить «да». Такое поле уже вводилось в космологии, чтобы обеспечить непрерывное образование вещества. Одна из трудностей теории стационарной Вселенной, когда она впервые была сформулирована, состояла в том, что нужно было дать количественное объяснение непрерывному образованию вещества. Ведь с расширением Вселенной плотность вещества в ней неизбежно должна убывать, если только вещество не возникает вновь. В стационарной Вселенной плотность вещества должна оставаться всегда неизменной, следовательно, необходимо непрерывное образование вещества.

Откуда берется это вещество? Оно не может возникнуть из излучения или какого-либо иного источника положительной энергии. Любой подобный источник будет быстро исчерпан за счет двух эффектов — образования вещества и расширения Вселенной. Поэтому Хойл выдвинул идею о том, что вещество создается за счет источника с отрицательной энергией. Если вещество возникает за счет такого источника, то сам источник становится еще более отрицательным. Однако, с другой стороны, он становится менее отрицательным при расширении Вселенной. Эти два противоположных эффекта могут уравновешивать друг друга и обеспечивать стационарное состояние Вселенной. Этот источник отрицательной энергии Хойл назвал «порождающим полем». В связи с этим очень поучительно провести космологическую аналогию. Простейшие модели расширяющейся Вселенной в общей теории относительности имеют сингулярное происхождение. Согласно этим моделям (рис. 5), Вселенная начала свое существование из бесконечно плотного состояния пу-



Р и с. 5. Схематическая диаграмма расширения после гигантского взрыва Вселенной. Стрелки изображают расходящиеся галактики (верхний рисунок). На нижнем рисунке изображена та же картина, но обращенная во времени — галактики подходят друг к другу все ближе и ближе до тех пор, пока не возникнет сингулярность.

тем взрыва. Наблюдаемые нами разбегающиеся галактики представляют собой фрагменты взрыва, удаляющиеся друг от друга. Вот почему иногда эти модели называют «моделями гигантского взрыва».

Допустим, что мы засняли на пленку расширение Вселенной после «гигантского взрыва» и теперь просматриваем пленку в обратном направлении. Мы увидим сжимающуюся Вселенную, в которой галактики сходятся ближе и ближе. В конце концов все вещество сконцентрируется в точку и его плотность обратится в бесконечность. Фактически это представляет собой гравитационный коллапс всей Вселенной. Вычисления показывают, что простой случай коллапса облака пыли формально совпадает со Вселенной «гигантского взрыва», обращенной во времени.

Сингулярность пространства-времени Вселенной «гигантского взрыва» не появляется в стационарной Вселенной за счет непрерывного образования вещества; стационарная Вселенная не имеет сингулярного начала. Если вернуться к аналогии, которая рассматривалась выше, то, обратив ход времени в стационарной Вселенной, мы обнаружим сжатие и непрерывное уничтожение вещества. Вселенная сама по себе никогда не подойдет к сингулярности пространства-времени. Не могут ли играть роль эти явления в массивных объектах, которые мы называем сверхзвездами?

Хойл и я всесторонне изучили этот вопрос и пришли к выводу, что соответствующее решение существует. По мере того как тело сжимается, величина поля, порождающего вещество в этом теле, растет, но в то же время это поле уничтожает вещество. Эти два процесса можно отрегулировать таким образом, что плотность вещества в теле будет оставаться постоянной. Таким образом, сингулярное состояние никогда не будет достигнуто. Однако это решение обладает двумя свойствами, которые, по всей видимости, не позволяют применить его для выяснения вопроса об окончательной судьбе интересующих нас массивных тел. Во-первых, процессы, о которых только что шла речь, идут лишь в том случае, когда плотность вещества внутри тела очень мала, примерно 10^{-29} г/см³. Такая плотность приблизительно соответствует плотности вещества в межгалактическом пространстве; следует ожи-

дать, что сверхзвезды должны быть значительно плотнее. Во-вторых, временной масштаб всего процесса оказывается порядка 10^{10} лет; процесс оказывается слишком медленным. Из наблюдений вытекает, что временные масштабы должны быть значительно короче.

Однако существует более интересная возможность, в которой поле, порождающее вещество, фактически не уничтожает его, а просто сжимает за счет гравитационных сил. Но по мере сжатия величина поля возрастает быстрее, чем поле тяготения, и в конце концов порождающее поле останавливает коллапс. Вместо того чтобы подойти к сингулярности пространства-времени, тело совершает колебания между состояниями высокой и низкой плотности.

Максимальная достижимая плотность составляет 10^{30} г/см³. Тело, в тысячу раз меньшее булавочной головки, весит при этой плотности что-нибудь около 10^{18} тонн! Столь грандиозные плотности до сих пор никогда не рассматривались. Даже ядерная физика не может подсказать нам, что произойдет с веществом, приведенным в такое состояние.

Отсюда возникает много интересных вопросов для физики высоких энергий и астрономии. Не указывают ли наблюдаемые изменения блеска сверхзвезд на наличие колебательных состояний? Если это так, то нельзя ли эти данные интерпретировать как свидетельства в пользу существования порождающего поля?

Очень многие астрономы думают, что после обнаружения расширения Вселенной Хабблом открытие массивных сверхзвезд следует считать одним из наиболее важных событий в истории астрономии. Если иметь в виду все следствия, которые вытекают из этого открытия для астрономии и общей теории относительности, то может оказаться, что это действительно так.

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции	5
<i>Дж. Гринстейн. Сверхзвезды</i>	9
<i>Х. Чу. Гравитационный коллапс</i>	37
<i>Дж. Нарликар. Гравитационный коллапс</i>	68

Сверхзвезды

Редактор В. БАССОЛО

Художник В. Кайдан

Художественный редактор Н. Фильчагина. Технический редактор В. Сизова

Корректор В. Дюжева

Сдано в производство 5/III 1965 г. Подписано к печати 7/VIII 1965 г.
Бумага 84×108¹/₃₂ — 1,31 бум. л., 4,31 печ. л. Уч.-изд. л. 3,90. Изд. № 27/3227
Цена 27 коп. Зак. 266.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР». Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома Государственного
комитета Совета Министров СССР по печати. Ярославль, ул. Свободы, 97

