1964 г. Июль Т. LXXXIII, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.84

СВЕРХЗВЕЗДЫ *)

Дж. Гринстейн

В начале 1963 г. астрономы обнаружили, что пять небесных объектов, которые до этого времени считались слабыми и несколько необычными звездами нашей Галактики, на самом деле являются, быть может, самыми странными и загадочными объектами, когда-либо наблюдавшимися в телескоп. Отнюдь не слабые звезды, а чрезвычайно мощные источники радиошумов — вот чем оказались эти объекты. Согласно последним 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 биллионами звезд **). То, что эти объекты кажутся неяркими звездами, объясняется их значительным удалением от нас. Один из двух объектов, о которых идет речь, по своему удалению от нас занимает второе место среди всех наиболее удаленных небесных тел. Что касается остальных трех, то расстояния до них еще не определены, но они могут оказаться еще бо́льшими. 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 наверное меньше, чем галактики. Их диаметры оцениваются, во всяком случае, не более чем одна пятая и, быть может, около одной сотой диаметра типичной галактики.

Драматическое выявление этих необыкновенных объектов стало возможным в результате плодотворного сотрудничества между радиоастрономами и астрономами, использующими обычную оптическую технику. В свое время точные положения пяти радиоисточников, которые тогда же были отождествлены как объекты звездного типа, были определены на фотографиях, выполненных на обсерваториях Маунт-Вилсон и Паломарской. Сначала эти объекты были приняты за звезды, первые звезды — если исключить Солнце, — мощность радиовыхода которых достаточна для того, чтобы на Земле можно было обнаружить их радиоизлучение. Дальнейшее

*) Jesse L. Greenstein, Quasi-Stellar Radio Sources, Scientific American 209 (6), 54 (1963). В русском переводе точное название статьи «Квазизвездные радиоисточники» заменено на «Сверхзвезды». Этот термин у нас в настоящее время уже принят. Соответственно этому всюду в статье «квазизвездный радиоисточник» переводится как «сверхзвезда». В оригинале — резюме: «Эти источники не принадлежат ни к звездам, ни к галактикам, однако они могут оказаться самыми яркими объектами во вселенной и вместе с тем самыми удаленными. Лишь в последнее время, когда удалось расшифровать их загадочные спектры, эти источники перестали принимать за близкие звезды». Перевод В. А. Угарова. Дополнение составлено Л. М. Озерным.

**) 1 биллион = 1 миллиард = 10^9.

изучение этих объектов показало, однако, что они вовсе не являются отдельными звездами, а оказываются объектами неизвестной до сих пор природы (рис. 1). Чтобы подчеркнуть их небольшие размеры, не подобрав для них лучшего названия, их стали называть квазизвездными радиоисточниками. Вероятно, они получат другое название, когда будет выяснена их подлинная природа, но в этой статье нам ничего не остается как придерживаться именно этой терминологии *).

Пять известных в настоящее время квазизвездных источников следующие: 3C 48, 3C 147, 3C 196, 3C 273 и 3C 286. Первые два значка «3C» —

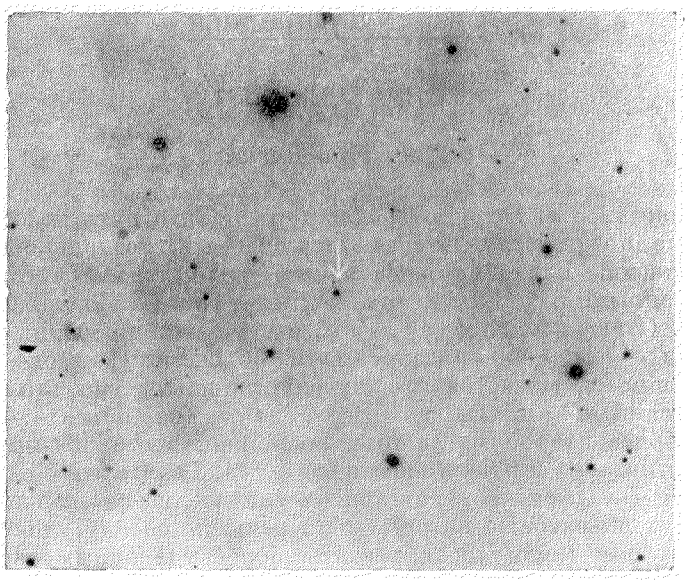

Рис. 1. Сверхзвезда 3C 48 —второй из известных источников по своему удалению от нас — видна в центре фотографии (указана стрелкой), полученной с помощью 200-дюймового Паломарского телескопа.

Чтобы отчетливее воспроизвести подробности, публикуется негатив фотографии. До того, как этот источник был отождествлен как сверхзвезда, он рассматривался как обычная звезда 16-й величины. Сейчас о нем говорят как о сверхзвезде, потому что он почти наверняка обычной звездой быть не может. С другой стороны, если бы его размеры совпадали с размерами типичной галактики, получаемое на пластине изображение было бы диффузным (см. рис. 2).

это начальные символы слов «Третий Кембриджский» сокращенного названия «Третьего Кембриджского каталога радиоисточников», составленного в Кембриджском университете группой под руководством Мартина Райла.

Почти два десятилетия основной заботой радиоастрономов было составление каталогов и определение точного положения радиоисточников; радиоастрономы надеялись на то, что в конечном счете радиоисточники будут отождествлены с объектами, обнаруживаемыми на фотоснимках, сделанных с помощью больших телескопов. 3C-каталог содержит положения нескольких сотен наиболее ярких радиоисточников. Некоторые из них группируются вблизи плоскости Млечного Пути и отождествлены

*) Как уже было указано, в русском переводе «квазизвездный радиоисточник» заменен на «сверхзвезду», однако замечание автора вполне может относиться и к последнему названию. (*Прим. перев.*)

с газовыми туманностями. Энергия их радиоизлучения черпается от теплового движения частиц, возбужденных до очень высокой энергии. Небольшое число источников обладает значительным угловым диаметром и считается остатками сверхновых звезд. Энергия их радиоизлучения в основном не является тепловой и, как полагают, генерируется электронами больших скоростей, захваченных магнитными полями. Радиоизлучение,

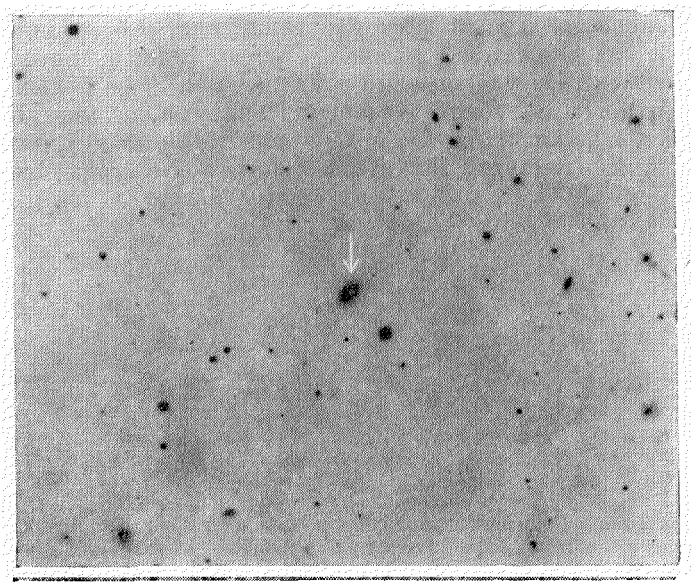

Рис. 2. Типичная радиогалактика М 23-112 (указана стрелкой).

По видимой яркости она почти не отличается от 3С 48. М 23-112 находится на расстоянии 0,8 биллиона световых лет, тогда как удаление 3С 48 равно четырем биллионам. На этой пластинке (также полученной на Паломарской обсерватории) она выглядит ярче, чем 3С 48 (на этом негативном отпечатке темнее), потому что экспозиция этой пластинки в три раза больше, чем пластинки рис. 1, а при съемке использовалась контрастная пластинка. В точности та же процедура, примененная к 3С 48, не позволила обнаружить никаких намеков на галактическую структуру.

создаваемое такими электронами, принято называть синхротронным излучением.

На более высоких галактических широтах, т. е. по мере удаления от плоскости Млечного Пути, большинство 3С-источников представляют собой удаленные галактики (рис. 2). Около пятидесяти из них отождествлены сейчас с объектами, наблюдаемыми в оптические телескопы. Видимая часть типичных радиогалактик, несомненно, представляет собой грандиозное скопление звезд, составляющее по диаметру десятки и тысячи световых лет. Радиоизлучение зачастую наблюдается в двух значительно более протяженных невидимых областях, расположенных по обе стороны от видимой галактики. Угловой диаметр каждой из таких областей заключен в пределах от одной до пяти угловых минут, т. е. примерно в десять раз превышает диаметр самой галактики. В небольшом числе случаев область радиоизлучения попадает в район оптической галактики, причем по своим размерам она оказывается меньше, чем галактика.

Галактики, отождествленные как сильные радиоисточники, часто обнаруживают некоторые удивительные свойства. Некоторые из этих источников выглядят, как две или даже больше деформированные галактики, находящиеся в непосредственном соприкосновении. В других случаях

наблюдается аномальное распределение свечения вдоль поверхности галактики. По своей форме большинство радиогалактик представляют собой эллипсоиды или сферы; в них совсем нет газа или если есть, то очень мало; звезды с высокой светимостью обнаруживаются в них совсем редко. Но при всем этом сами по себе они очень ярки. Радиоисточниками оказались также несколько необычных спиральных галактик с большим содержанием газа.

Но из какого бы газа ни состояла галактика, в большинстве радиогалактик этот газ окажется в высшей степени ионизованным; это означает, что у атомов газа удален один электрон или даже больше. Это ясно видно из спектрограмм, обнаруживающих сильные, резкие линии испускания элементов, ионизационные потенциалы которых доходят до 100 *эв*. Обычные эллипсоидальные галактики дают в спектрах лишь слабые

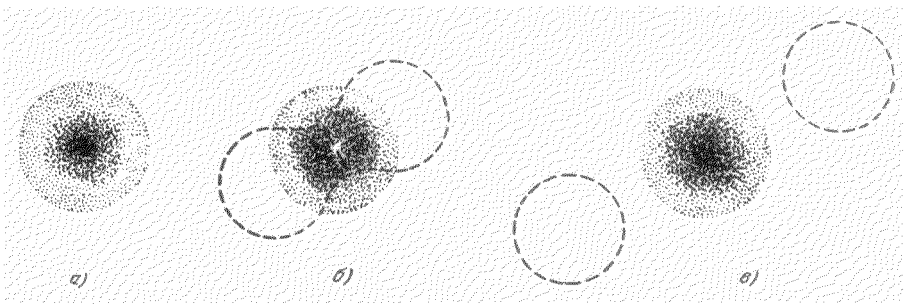

Рис. 3. Рождение радиогалактики может начинаться с гигантского взрыва, высвобождающего энергию, эквивалентную энергии, выделяемой при слиянии водорода, обладающего массой от 10 миллионов до биллиона солнечных масс.

До взрыва галактика может иметь типичную эллиптическую или сфероидальную форму (*а*). Взрыв (указан стрелками) образует источник радиошума в области, напоминающей по своей форме гантель (обведена пунктиром) (*б*). Радиоисточник, приведенный в движение взрывом, часто распадается на две области, которые могут отойти на сотни тысяч световых лет от оптической галактики (*в*) (два пунктирных круга).

линии испускания 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 энергетические возмущения.

В некоторых случаях общее количество энергии, испускаемое в виде радиоизлучения яркими радиогалактиками, равно или даже превышает общее количество световой энергии, излучаемой звездами, входящими в галактику. Эта энергия радиоизлучения, как сейчас думают, возникает главным образом 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; их точка зрения является сейчас общепринятой.

Однако механизм, передающий электронам высокую энергию и создающий магнитные поля, совсем неясен. Обычно предполагают, что и те и другие образуются в результате гигантских 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 невидимых областях, откуда и наблюдаются радиошумы. Если допустить, что эти области удаляются от галактики примерно со скоростью света, можно приближенно подсчитать, когда такой начальный взрыв произошел.

Наиболее интенсивные радиоисточники излучают в пределах радиодиапазона с мощностью около 10^{45} *эрг/сек* и неизвестное количество инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений. Если допустить, что действие источника продолжается в течение миллиона лет (минимальное значение, определяемое по его расстоянию от своей галактики), энергия взрыва превышает 10^{58} *эрг*. Поскольку процесс, превращающий энергию частиц и магнитного поля в излучение, не может быть очень эффективным, полная энергия, первоначально содержащаяся в частицах и поле, должна составлять от 10^{60} до 10^{61} *эрг*. Для сравнения укажем, что ядерная энергия, которая возникает при полном преобразовании водорода, имеющего массу Солнца, в гелий, равна всего 10^{52} *эрг*. Это означает, что движущая сила первоначального взрыва, необходимого для образования сильной радиогалактики, равна по крайней мере полной мощности ядерной энергии 10^8 или 10^9 (100 миллионов или биллион) солнц.

Вопрос, который сильно озадачивает теоретиков, состоит в следующем: как 10^8 или 10^9 солнечных масс водорода можно заставить детонировать в одном взрыве? В условиях обычных термоядерных процессов на Солнце выделение 10^{52} *эрг* энергии потребовало бы 10 биллионов лет. Однако еще более загадочным является то, что последовательность событий, приводящих к возникновению радиоизлучения, кажется противоречащей второму началу термодинамики, согласно которому энергия в замкнутой системе может переходить только от высшей формы к низшей. В радиогалактиках происходит, на первый взгляд, совсем обратное. Ядерная энергия первоначального взрыва (если это действительно ядерный взрыв) вызывает появление быстро движущихся частиц и гамма-лучей, причем и те и другие обладают энергией в несколько миллионов электрон-вольт. Соударения и взаимодействие с окружающим веществом должны были бы очень быстро приводить к тому, что энергия частиц и гамма-лучей быстро деградировала бы в тепловую энергию. Вместо этого в результате действия какого-то таинственного механизма она появляется в форме высокоорганизованной энергии, а именно в виде электронов с энергией около 100 биллионов *эв* и крупномасштабных магнитных полей. Здесь можно сказать лишь то, что в природе, по-видимому, имеется подходящий механизм преобразования энергии.

Главным препятствием к отождествлению радиоисточников с видимыми объектами является то, что радиотелескопам присуща низкая разрешающая способность; поэтому с их помощью довольно трудно установить точное местоположение. Двухсотфутовая параболическая антенна, применяемая без дополнительных приспособлений, не может определить положение радиоисточника с большей точностью, чем несколько угловых минут. Но в области с таким диаметром на астрономической фотографии расположены десятки различных объектов.

Чтобы увеличить разрешающую способность радиотелескопов, радиоастрономы могут применять антенны, состоящие из нескольких элементов, например из двух параболических тарелочек, отстоящих друг от друга на расстоянии в несколько тысяч футов. Волны, идущие от радиоисточника, достигают двух тарелочек, слегка различаясь по фазе, и поэтому создают интерференционные полосы, по которым размеры и положение источника можно рассчитать значительно точнее, чем при наличии одной тарелочки.

Используя такую технику, называемую радиоинтерферометрией, наблюдатели Манчестерского университета и Калифорнийского технологического института провели подробнейшее изучение структуры

наиболее сильных радиоисточников. В Манчестерскую группу входили А. Аллен, Б. Андерсон, Р. Конвей, Г. Палмер, Ю. Реддиш и Б. Робсон; в группу Калифорнийского института — Пер Мелтби, Томас Меттьюс и Аллен Моффет. Манчестерская группа зарегистрировала изучение около двухсот радиоисточников на длинах волн, превышающих один метр. Применив интерферометр с простыми передвижными элементами, удаленными друг от друга на расстояние до 61 000 длин волн (т. е. примерно 75 миль), им удалось добиться предельного разрешения

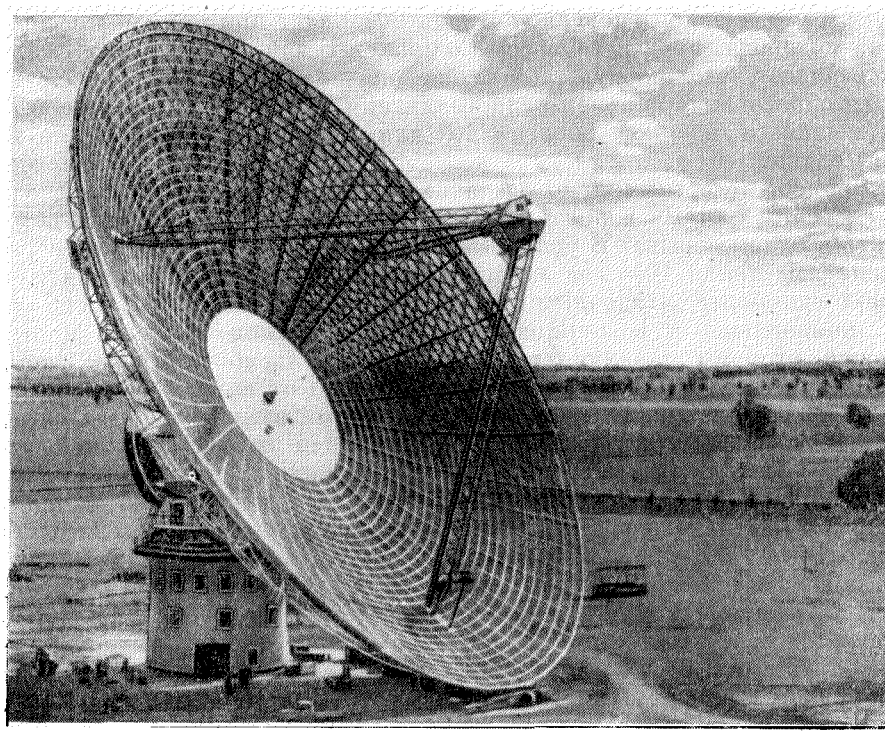

Рис. 4. На Австралийском радиотелескопе около Сиднея было произведено точное определение положения сверхзвезды 3С 273.

Тарелка радиотелескопа имеет диаметр 210 футов (66 *м*). Радиотелескоп вошел в строй в 1962 г.

около одной угловой секунды. Среди исследованных двухсот источников, как это выяснилось теперь, четыре относятся к сверхзвездам. Два из них состоят из маленькой яркой сердцевины, по своим размерам находящейся на пределе разрешения, окруженной слабым гало, по-видимому, имеющим в диаметре около 20 угловых секунд. Два других источника представляют собой яркие точки, имеющие угловой диаметр менее одной секунды. Один из них — радиообъект 3С 48, сверхзвезда, весьма интенсивно изучаемая в настоящее время.

Другим источником, также весьма энергично исследуемым в настоящее время, является сверхзвезда 3С 273; ее точное положение было определено в начале 1963 г. австралийскими наблюдателями К. Азардом, М. Макки и А. Шимминсом. Австралийцы пользовались великолепным 210-футовым параболическим радиотелескопом, расположенным вблизи Сиднея (рис. 4). Им удалось воспользоваться тем, что в природе существует большой естественный диск, при своем движении проходящий

через значительную часть неба и закрывающий некоторые радиоисточники. Этот естественный диск — речь идет о Луне — большинство оптических астрономов склонно считать помехой; однако для радиоастрономов он открывает возможность с большой точностью определять положение радиоисточников, а также разрешать мельчайшие детали их строения.

Диск луны можно рассматривать как эквивалент острого конца клина, образующего простые дифракционные полоски в те моменты, когда светящийся объект исчезает за краем диска или появляется из-за него (рис. 5). Более того, поскольку положение Луны в любой момент времени известно с высокой степенью точности, можно точно указать

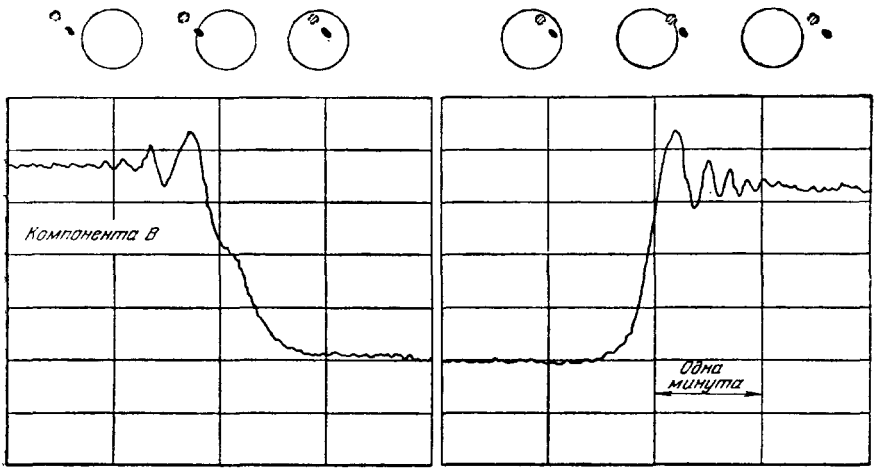

Рис. 5. Покрытие радиоисточника Луной позволяет с высокой точностью определить его положение и структуру.

На кривой видно, как радиосигнал от двухкомпонентной сверхзвезды 3С 273 был прерван Луной 5 августа 1962 г.; запись принадлежит австралийским наблюдателям, работавшим с 210-футовым радиотелескопом в Парк, близ Сиднея. Ступенька на спадающей части кривой (слева) указывает момент, когда компонента *В* начинает исчезать из поля зрения. Расположение обеих компонент относительно Луны таково, что вновь они появляются одновременно.

моменты затемнения и появления источников. Австралийские наблюдатели исследовали несколько из 3С-источников, о которых известно, что они обладают малым угловым диаметром; им удалось подтвердить, что источники действительно имеют малые размеры, а также уточнить их положения. Среди этих источников был один из пяти небольших объектов, известный теперь как сверхзвезда 3С 273.

Располагая точными данными о положении радиоисточников, Томас Меттьюс (радиообсерватория Калифорнийского технологического института) и Аллан Сэндейдж (обсерватории Маунт-Вилсон и Паломарская) пересмотрели астрономические фотографии, пытаясь обнаружить объекты, которые могли бы совпадать с небольшими радиоисточниками. Но ни с одним из них не совпала какая-либо необычная галактика. Меттьюс и Сэндейдж смогли, однако, найти изображения звезд внутри 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 положений 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 верят в то, что большинство радиоисточников являются слишком удаленными и слишком слабыми, чтобы

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

И все же я, как и многие другие наблюдатели, почувствовал, 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 тщательное исследование вопроса сделало такое предположение маловероятным. На том расстоянии, на котором находится от нас ближайшая звезда, радиоизлучение Солнца, например, уменьшается в 10^{11} раз; это обстоятельство сразу ставит звезду значительно ниже порога чувствительности современных радиотелескопов. Правда, известны сообщения о том, что были детектированы радиосигналы от некоторых близлежащих «вспыхивающих звезд» во время вспышки, но эти данные все еще не очень надежны.

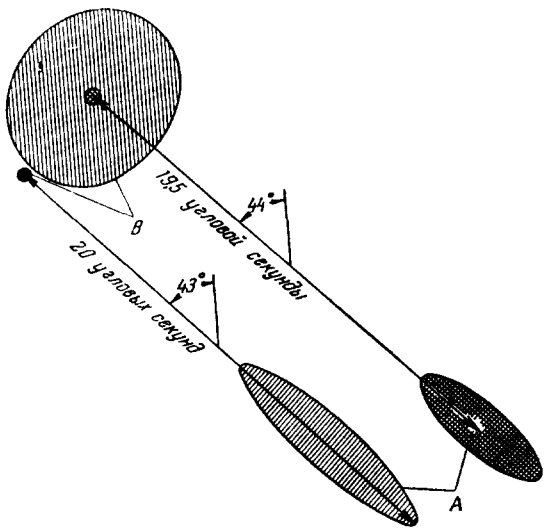

Рис. 6. Структура 3С 273, определенная Маартеном Шмидтом по паломарским фотографиям (слева), очень близка к тому, что получено с помощью лунного покрытия радиосигнала этого источника (справа).

Две картины приведены на рисунке рядом, хотя фактически они перекрываются. К компоненте *A* относится 90% радиоэнергии, излучаемой этой сверхзвездой. В видимом излучении компонента *B* значительно ярче, так что компонента *A* почти невидима.

Во всяком случае Сэндейдж сделал новую серию фотографий с помощью 200-дюймового телескопа и обнаружил слабые следы в том самом месте, где находятся две сверхзвезды и где раньше ничего не обнаруживали. На одной пластинке удалось заметить слабые красноватые волокна туманности, размером около 12 угловых секунд; эти следы окружали изображение звезды, совпадающей с 3С 48. На другой фотопластинке можно было уловить еще более слабую туманность, примыкающую к объекту, который, возможно, отождествляется с 3С 196.

Точное положение и характерная структура 3С 273 дали возможность Маартену Шмидту (Маунт-Вилсон и Паломар) произвести блестящее отождествление радиоисточника. Австралийские радионаблюдения, произведенные с помощью Луны, обнаружили, что 3С 273 состоит из двух небольших компонент, обозначаемых *A* и *B*, центры которых отстоят друг от друга на расстоянии 19,5 угловой секунды (рис. 6). Компонента *B* слегка эллипсоидальной формы и значительно слабее компоненты *A*, которая имеет ярко выраженную эллипсоидальную форму *). Шмидт получил фотографии, показывающие, что слабый выброс туманности перекрывается с радиоположением, установленным для компоненты *A*. В том месте, где расположена компонента *B*, фотография Шмидта обнаружила некоторый след, который можно приписать звезде 13-й величины. Нет никаких сомнений в отождествлении двух компонент, потому

*) Новые радионаблюдения с помощью лунных покрытий приведены в статьях [8].

что в этой части пластинки нет никаких других объектов, которые представляли бы интерес с этой точки зрения.

Мы должны считать, что 3С 48 и 3С 273 остаются сейчас наиболее уверенно отождествленными и наиболее подробно изученными из всех пяти известных сверхзвезд. В оптической астрономии непосредственная фотография объекта является лишь прелюдией к тщательному изучению его спектра; спектр объекта — это тот ключ, с помощью которого мы получаем доступ к данным о температуре, составе объекта и расстоянию до него. Первые спектры 3С 48, снятые с малой дисперсией, были получены Сэндейджем более чем четыре года тому назад. На пластинке было обнаружено несколько диффузных линий испускания, наложенных на непрерывный спектр. Однако положение этих линий, как это казалось, не совпадало ни с одной твердо установленной линией атомных спектров.

Чтобы разобраться в этой загадочной истории, были сняты спектры с высокой дисперсией (это означает, что спектральные линии оказываются на большем удалении друг от друга); впервые это сделал Гвидо Мюнх (Маунт-Вилсон и Паломар), а позже я. Объект настолько слаб, что требуется семичасовая выдержка для спектрографа с фокусным отношением $f/1$ *). 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 фактически определяет существующий предел для спектроскопии удаленных или очень слабых объектов (этот предел может быть, в конце концов, превзойден созданием обсерваторий за пределами земной атмосферы).

Тщательными измерениями семи фотонегативов, полученных различными наблюдателями, мне удалось установить положение шести линий, которые, по-видимому, действительно принадлежат 3С 48. Эти линии располагались между длинами волн 3500 Å на ультрафиолетовом краю спектра и 6000 Å на красном. Они не попадали ни в одну простую серию и совсем не соответствовали линиям, наблюдаемым в других звездах или сверхновых; они не совпадали также с яркими линиями туманностей.

Спектроскописты всегда ясно сознавали, что их атлас спектральных линий отнюдь не полный и что всегда возможно 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 совсем не просто. Такие линии возникают в атомах при редких переходах, которые осуществляются лишь тогда, когда атомы образуют газ малой плотности. К счастью, длины волн запрещенных линий можно предсказать теоретически, и их атлас для типичных элементов также достаточно полон.

Попытка отождествления линий излучения 3С 48 заставила меня перебрать литературу по спектроскопии; в конце концов я пришел к убеждению, что эти линии могут испускаться сильно возбужденными ионами и скорее всего атомами гелия, утерявшими один электрон, и атомами кислорода, потерявшими пять электронов. Действительно, одна из этих линий совпала с линией, обнаруженной впервые в Британском экспериментальном термоядерном центре, и это еще больше укрепило мои убеждения. Линии, которые еще не отождествлены, рассуждал я, могут принадлежать еще неизвестному спектру такого, например, иона, как сильно возбужденный неон.

Таинственность всей этой истории лишь увеличилась, когда Шмидт успешно зафиксировал несколько слабых линий излучения от весьма

*) Спектрограф со светосилой камеры 1 : 1.

слабых источников 3С 147, 3С 196 и 3С 286. Он обнаружил, что ни одна из этих линий не совпадает с какой-либо линией в 3С 48. Из всех возможных интерпретаций смогла выжить лишь одна, утверждающая, что все эти объекты — звезды необыкновенного состава и к тому же все разные. Мне думалось, что 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 «скользким».

Именно такой запутанной и оставалась ситуация более чем два года, пока Шмидт не приступил к изучению спектра 3С 273. На этот раз природа оказалась любезнее. Четыре из шести линий испускания 3С 273 составляли простую гармоническую последовательность, причем расстояние между линиями и их интенсивность уменьшались в направлении к ультрафиолету. Эти линии с несомненностью принадлежали к серии того типа, который можно ожидать от водорода или другого атома, у которого удалены все электроны, кроме одного. Однако какого же все-таки атома и к какой именно серии?

Почти сразу же Шмидт установил, что наблюдаемые длины волн не могут принадлежать излучению ни одного из атомов. Но если принять, что излучаемые атомом спектральные линии смещены к красному концу на шестнадцать процентов, четыре из наблюдаемых линий совпадают с линиями излучения водорода. Одна из остающихся линий легко отождествлялась, далее, с запрещенной линией дважды ионизованного кислорода (т. е. атома кислорода, лишенного двух электронов), смещенной на ту же величину. Последняя линия приходилась на длину волны 3239 Å вблизи ультрафиолетового края спектра. До того, как она была смещена к красному краю, она имела длину волны 2800 Å в ультрафиолетовой части спектра, который обычно ненаблюдаем. Мы вспомнили, что две линии ионизованного магния расположены вплотную к 2800 Å и что эти линии были сильнейшими линиями испускания, обнаруженными в спектре солнечного излучения, полученного за пределами земной атмосферы на ракете. Позже с помощью фотоэлектрического сканирующего спектрографа Беверли Оук обнаружил, что первая линия серии водорода, H_α, которая имеет длину волны «покоя» 6563 Å, сместилась к 7590 Å в инфракрасную область. Важнейшее открытие Шмидта оказалось ключом, разрешающим загадку.

Незамедлительно я пересмотрел свои спектры 3С 48, чтобы выяснить, не откроет ли фактор красного смещения возможность интерпретации наблюдаемых линий (рис. 7). Самой сильной линией в моем спектре 3С 48 была линия около 3832 Å. Если бы эта линия оказалась линией 2800 Å, смещенной более чем на 1000 Å, то это означало бы красное смещение на 37%. Допустив то же самое смещение по всему спектру, Мэттьюс и я смогли отождествить пять других линий, но забавным образом ни одна из них не совпала с линиями водорода. Они оказались запрещенными линиями однократно ионизованного кислорода и линиями двукратно и четырехкратно ионизованного неона (рис. 8). Если линии водорода и имеются, то они слишком широки и слишком мало контрастны, чтобы выделяться на общем фоне.

Для образования четырехкратно ионизованного атома гелия необходима энергия 100 *эв*, что указывает на то, что газовые облака в 3С 48 горячее и обладают меньшей плотностью, чем газовые облака 3С 273. Кроме того, Оук выяснил, что сплошной фон у этих двух объектов различный; это указывает на различие в происхождении фона двух объектов.

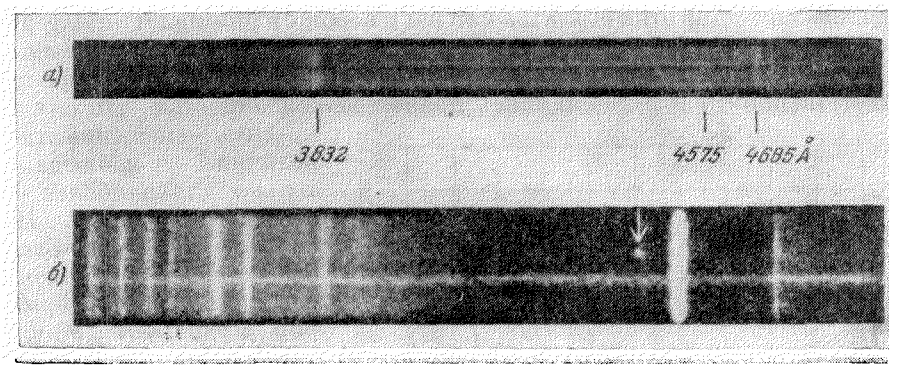

Рис. 7.

а) Спектрограмма 3С48, полученная автором, обнаруживает три слабые линии излучения: 3832, 4575 и 4685 Å. Приведенная фотография фактически состоит из двух спектрограмм, приложенных друг к другу, для того чтобы слабые линии стали заметнее. Но даже при этом три отмеченные линии почти подавлены сплошным излучением объекта. Видно также некоторое число наиболее ярких линий свечения ночного неба, обусловленных свечением воздуха в верхней части атмосферы. Тщательное изучение как этой, так и других спектрограмм позволило обнаружить еще три очень слабые линии излучения: 4066,5098 и 5289 Å. Эти шесть линий излучения были отождествлены при предположении, что длина их волны в покоящемся источнике испытывает красное смещение на 37% (см. рис. 8).

б) Спектрограмма 3С295, наиболее удаленного из всех наблюдаемых объектов, обнаруживает единственную и очень слабую линию излучения (стрелка) около 5450 Å. Полагают, что она возникла в результате красного смещения, равного 46%, двух тесно примыкающих друг к другу линий излучения кислорода, которые в нормальных условиях находятся около 3727 Å. На этой спектрограмме свечение воздуха вызывает появление множества ярких вертикальных линий; самая яркая из них — зеленая линия свечения ночного неба (яркая горизонтальная линия, возможно, создается звездой). Если бы линия излучения 3С295 совпала с любой из ярких линий свечения ночного неба, нам никогда бы не удалось ее наблюдать. Поскольку наблюдается одна-единственная линия излучения, ее отождествление с кислородной линией 3727 Å — в лучшем случае правдоподобная догадка.

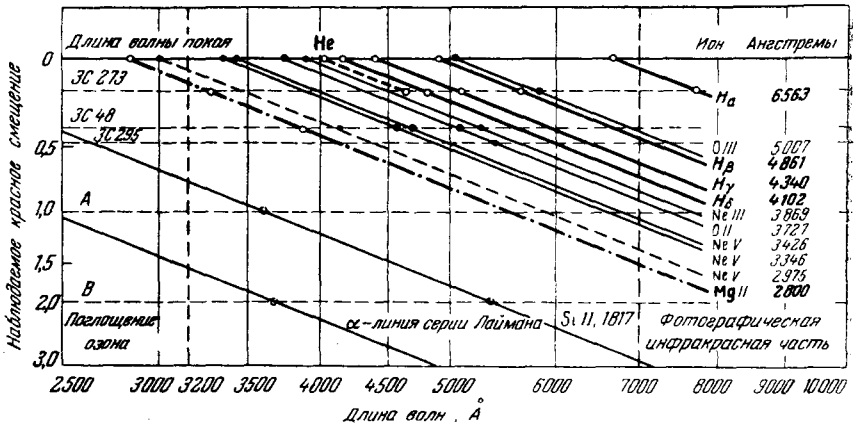

Рис. 8. Красное смещение показано для спектральных линий, наблюдаемых от двух сверхзвезд 3С 273 и 3С 48 и наиболее удаленной галактики 3С295.

Верхняя горизонтальная линия показывает длины волн покоя «разрешенных» линий водорода и ионизованного магния (светлые кружки). Черные точки — это «запрещенные» линии ионизованного неона (Ne) и кислорода (O). Римские цифры указывают состояние ионизации элемента, цифра — на единицу больше числа электронов, удаленных из иона. Наклонные линии 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 наблюдавшимся. Спектры, обладающие такими красными смещениями, могли бы содержать линии однократно ионизованного кремния (SiII), который имеет излучение с длиной волны покоя 1817 Å в ультрафиолете. Спектр, имеющий красное смещение, равное двум, мог бы включать в себя α-линию лаймановской серии водорода, нормально расположенную в далеком ультрафиолете около 1216 Å.

Одинаков ли состав этих объектов или нет и вообще напоминает ли материал этих объектов обычный звездный материал — ничего этого мы пока не знаем.

Значительные красные смещения 3С 273 и 3С 48, составляющие соответственно 16 и 37%, явились полной неожиданностью. До сих пор красные смещения такой величины наблюдались только для наиболее удаленных галактик. Наибольшее известное красное смещение было измерено в Паломарской обсерватории Рудольфом Минковским для слабой галактики 3С 295. Обнаруженная впервые как радиоисточник, галактика 3С 295 имеет красное смещение 46%. Уже из самой первой работы Эдвина Хэббла (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.

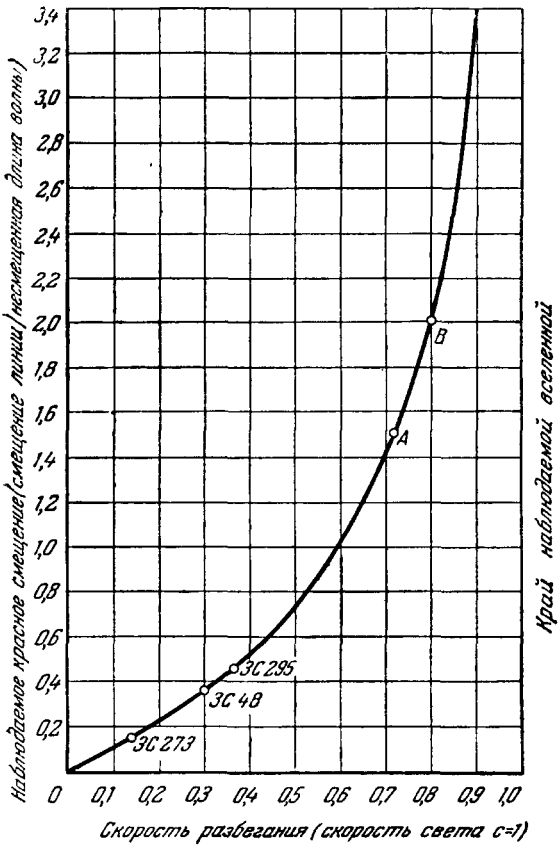

Рис. 9. Красное смещение далеких галактик интерпретируется как следствие разбегания галактик.

Кривая на графике показывает, как связано наблюдаемое красное смещение со скоростью разбегания, которая ни в каком случае не может достичь скорости света. Радиогалактика 3С 295 удалена от нас на расстояние около пяти биллионов световых лет и является самым удаленным из всех наблюдаемых объектов. Сверхзвезда 3С 48 занимает по своему удалению второе место; 3С 273, также сверхзвезда, примерно вдвое ближе, чем 3С 48. Точка *A* 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 *B* на графике показывает место, где α-линия серии Лаймана водорода 1216 А смещается в видимую часть спектра вблизи ультрафиолета с $\lambda = 3647$ Å.

Красное смещение галактик было связано со скоростью их разбегания и со шкалой расстояний. Когда красное смещение мало, его значение в процентах, грубо говоря, равно скорости разбегания, выраженной в долях скорости света. Но эта связь заведомо не линейная, потому что никогда не может быть достигнута скорость разбегания, равная скорости света, независимо от того, насколько велико красное смещение. Соответствующая зависимость приведена на рис. 9. Из графика видно, что красному смещению в 46% соответствует скорость разбегания, составляющая около 36% от скорости света. Красным смещениям в 16 и 37% для 3С 273 и 3С 48 соответственно сопоставляются скорости разбегания в 15 и 30%. На принятой в настоящее время шкале галактических расстояний красное смещение в 46% для 3С 295 соответствует расстоянию около пяти биллионов световых лет. Аналогичные расстояния для 3С 273 и 3С 48 составляют два и четыре биллиона световых лет.

Но, может быть, самым удивительным у сверхзвезд 3С 273 и 3С 48 является то, что они вовсе не выглядят как удаленные объекты. Обычная яркая галактика на расстоянии в четыре биллиона световых лет имеет видимую величину от 20-й до 22-й, и ее можно наблюдать только с помощью самых больших телескопов. Видимая величина 3С 48 равна 16^m, а 3С 273 равна 13^m. Звезда 13-й величины может наблюдаться в любой мало-мальски приличный самодельный телескоп. К тому же обычная галактика, достаточно близкая к нам, чтобы иметь 16-ю величину, не говоря уже о 13-й, всегда легко разрешается как сложная звездная система (см. рис. 2). Остается загадкой, как 3С 273 и 3С 48 могут находиться на таком удалении и казаться столь яркими. С другой стороны, если не считать их столь удаленными объектами, а принимать их за обычные звезды 16-й и 13-й величины — в этом случае они оказываются в пределах нашей Галактики, — как можно объяснить столь большую величину их красного смещения?

Но красные смещения могут появиться не только за счет «космологического» расширения вселенной. Согласно теории относительности фотоны, проходя через гравитационное поле, совершают работу. Затраченная работа проявляется как уменьшение частоты или как смещение длин волн в красную сторону — красное смещение. Можно было бы поэтому допустить, что красное смещение в 37% для 3С 48 может возникнуть, если источник чрезвычайно плотный или чрезвычайно массивный. Например, ультраплотная звезда с массой, равной массе Солнца, и радиусом, меньшим 10 *км*, обнаружила бы такое же красное смещение, как и звезда солнечного радиуса с массой, равной 200 000 масс Солнца.

Самыми плотными объектами, известными в настоящее время, являются белые карлики, масса которых хотя 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. Допустимо, что в некоторых экстраординарных и преходящих условиях, о которых сейчас трудно сказать что-либо определенное, сердцевина массивной звезды может быть смята до значительно более высоких плотностей, чем это наблюдается у белых карликов. Если внешняя оболочка такой звезды может затем испариться, то останется масса, равная по величине солнечной, с плотностью, превышающей в 10^7—10^{13} раз плотность белого карлика. При таких плотностях нейтроны и гипероны (частицы тяжелее, чем нейтроны) представляют собой устойчивую форму вещества.

Однако имеются очень веские доводы не считать сверхзвезды нейтронными или гиперонными звездами. 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 притяжения и это изменение вызовет значительное уширение линий испускания; приведенная ширина оболочки соответствует фактически наблюдаемой ширине линий. Кроме того, в самой оболочке плотность не может превышать некоторую, довольно небольшую величину; в противном случае исчезли бы запрещенные линии излучения. Общее количество энергии, излучаемое такой небольшой оболочкой малой плотности, с астрономической точки зрения пренебрежимо мало. Фактически линии испускания нейтронных звезд вообще нельзя было бы заметить, если бы эти звезды были существенно удалены от солнечной системы.

Серьезные затруднения возникают также при рассмотрении альтернативной возможности, 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 большей, чем сто солнечных масс, будет неустойчивой и, следовательно, не может конденсироваться из межзвездного газа. Однако в самое последнее время Фрэд Хойл (Кембриджский университет) и Уильям Фаулер (Калифорнийский технологический институт) рассмотрели условия, существующие в аномальных объектах, обладающих массой от миллиона до биллиона солнечных масс.

Оставив в стороне вопрос о том, каким образом можно сформировать столь большие массы, и благополучно миновав ряд нестабильных конфигураций масс в пределах от сотни до миллиона солнечных масс, они надеялись сначала, что в очень массивных звездах может появиться тенденция к временной стабилизации. Последующее теоретическое исследование вопроса, проведенное Хойлем, Фаулером и их сотрудниками в Калифорнийском технологическом институте, по-видимому, указало на то, что объекты с очень большой массой подвержены гравитационному коллапсу, причем настолько быстрому, что устойчивые конфигурации могут вообще не существовать. Гравитационное красное смещение в таких массивных объектах, возможно, удерживает 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 сердцевина 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. Супервзрывы, постулированные Хойлем и Фаулером, могут вызвать такие физические процессы, которые обеспечивают образование — хотя и альтернативными путями — как протяженных интенсивных радиогалактик, так и сверхзвезд.

Но если сверхзвезды — и не сверхплотные, и не сверхмассивные звезды, то что же они все-таки такое? Допустим, что их большое красное смещение является следствием высокой скорости разбегания и что они, следовательно, являются объектами, удаленными от нас на биллионы световых лет. Если исходить из этого допущения, легко подсчитать по величине изображения на фотографических пластинках, что звездные компоненты 3C 48 и 3C 273 имеют максимальные размеры соответственно порядка 16 000 и 3000 световых лет. Выброс 3C 273 и слабые волокна около 3C 48 имеют поперечные размеры около 299 000 световых лет. Выброс и волокна действительно имеют галактические масштабы; звездная компонента 3C48 самое большее занимает треть размера типичной галактики, а звездная часть 3C 273 меньше одной десятой галактического размера.

Очень мало сомнений в том, что их мощный радиовыход обязан синхротронному излучению. Однако их световой выход создает беспрецедентную трудность. Наличие резких линий излучения заставляет нас думать, что мы наблюдаем вовсе не галактический ансамбль звезд, кото-

рый обнаруживал бы лишь небольшое число линий эмиссии или вовсе бы их не обнаруживал, а имеет дело с массивным газовым облаком, нагретым до температуры свыше 10 000° К. Именно такие температуры наблюдаются в ярких газовых туманностях внутри нашей собственной Галактики.

Но еще более любопытно то, что Сэндейдж и Меттьюс с помощью фотоэлектрических наблюдений обнаружили, что свет, исходящий от 3С 48, изменяет на 30% свою яркость в течение года. Старые фотографии обсерватории Гарвардского колледжа, пересмотренные Доррит Хоффлейт и Гарланом Смитом (Иельский университет), позволили установить аналогичные длиннопериодные вариации как у 3С 48, так и у 3С 273 *); не исключено, что некоторые вспышки факельного типа имеют место в пределах месяца.

Такие вариации было бы нетрудно объяснить, если бы 3С 48 и 3С 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 с одной стороны объекта на другую. Другими словами, представляется невозможным объяснить регулярную вариацию яркости без наличия импульсного передающего сигнала; но такой сигнал не может передаваться со скоростью, большей скорости света. Предположение о том, что вариации яркости могут возникать из-за случайных флуктуаций яркости небольших отдельных компонент, было всесторонне рассмотрено Шмидтом и признано непригодным. Если бы существовало более нескольких сотен хаотично пульсирующих компонент, их индивидуальные флуктуации усреднялись бы и никогда не могли бы вызвать значительное увеличение яркости всей сверхзвезды. Однако если флуктуирующих компонент около сотни-двух, каждая из них должна была бы иметь от одной десятой до одной пятой яркости нормальной галактики. Если бы такие экстраординарные объекты существовали, то они ставили бы перед нами значительно больше теоретических проблем, чем снимали.

Возвращаясь к радиоизлучению 3С 48 и 3С 273, мы обнаруживаем некоторые добавочные загадки сверх тех, которые связаны со всеми сильными радиоисточниками. Сделав определенные предположения, в частности считая, что объекты имеют размеры около верхнего возможного предела, можно установить, что полная энергия, заключенная в магнитном поле сверхзвезд, может иметь значение между 10^{56} и 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 так как совершенно ясно, что вовсе не вся магнитная энергия может быть превращена в излучение, верхний предел времени жизни уменьшается до пределов 10^3—10^7 лет. С точки зрения временнóго масштаба вселенной — тринадцати биллионов лет — сверхзвезды имеют весьма быстротечное существование. 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 изло-

*) Колебания блеска объекта 3С 273 были одновременно обнаружены А. С. Шаровым и Ю. Н. Ефремовым [6] на пластинках Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга.

жить предварительные соображения. Согласно нашему анализу диаметр 3С 48 может заключаться в пределах от одного года до шести тысяч световых лет, а его полная масса — в пределах от 10^4 до 10^8 солнечных масс. Аналогичный анализ для объекта 3С 273 дает размеры от шести до шести тысяч световых лет, а массу 10^6—10^{10} солнечных. У меня создалось такое впечатление, что объект 3С 48 больше, старше и менее ярок, чем 3С 273, так что для 3С 48 лучше использовать верхние значения радиуса и массы. Спектр 3С 48 напоминает спектр планетарной туманности вблизи очень горячей звезды, тогда как спектр 3С 273 представляется более аномальным. Однако в обоих случаях можно думать, что линии испускания возникают в необъятных 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; распространенность элементов представляется нормальной, за исключением явной недостаточности водорода в 3С 48.

В качестве конкретной модели (которая заведомо не объясняет вариаций блеска) можно представить себе сверхзвезду как возбужденное газовое облако диаметром в 600 световых лет, с массой, равной 10^9 солнечных масс. В настоящее время кажется весьма вероятным, что источником энергии сверхзвезды могут считаться грандиозные взрывы, высвобождающие либо ядерную, либо гравитационную энергию. Совершенно неясно, 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 10^{58}—10^{59} *эрг*, что лишь немногим больше современной энергии разлета. Если взрыв носил ядерный характер, то он потребовал бы водорода в количестве 10^7—10^8 солнечных масс. Джеффри Бэрбидж (Калифорнийский университет) высказал предположение, что быстрое выделение столь грандиозных количеств энергии может возникнуть за счет цепной реакции взрывов сверхновых звезд, расположенных в густо населенных областях галактики. Альтернативная возможность указана Хойлем и Фаулером: требуемое количество энергии может возникнуть при гравитационном коллапсе отдельной звезды с массой, равной 10^8 солнечных масс. Наличие выброса у 3С 273 говорит за то, что характерной особенностью взрыва был выброс небольшого количества вещества со скоростью, близкой к скорости света, тогда как значительно бóльшая доля вещества (образующая центральную компоненту) двигалась со скоростью, составлявшей всего лишь около трети скорости света. В частности, для 3С 273 наиболее быстро движущаяся компонента — выброс — испускает в десять раз больше радиоизлучения, чем центральная компонента.

Нет никаких прямых данных, опровергающих или подтверждающих гипотезу Бэрбиджа о многократных взрывах сверхновых звезд. Подобная цепная реакция взрывов сверхновых могла бы быть возможной в сверхплотной сердцевине гигантской эллиптической галактики, у которой расстояния между соседними звездами составляют всего лишь несколько световых месяцев. Если сердцевина галактики содержит звездное население возраста, достигающего критической эволюционной стадии, взрыв одной из звезд может инициировать взрыв и остальных. Однако у известных объектов фактическая населенность и полная масса центральных областей, по-видимому, недостаточны, чтобы благоприятствовать гипотезе Бэрбиджа.

Гипотеза Хойла — Фаулера является еще в меньшей степени оправданной, потому что никому 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 Галактика спиральная, богатая содержанием газа. У эллиптической галактики масса межзвездного газа очень редко превышает 10^8 масс солнца. В быстро вращающихся спиральных системах газ обладает настолько значительным моментом импульса, что трудно представить, как газ с массой в 10^8 солнечных масс может собраться в единый объект. Фактически стационарные условия, необходимые для того, чтобы такая большая масса газа могла собраться воедино, едва ли могут быть обеспечены в пределах любой галактики.

Одним из мест, где могут собраться большие массы газа, является межгалактическое пространство. Плотность газа 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 импульса в больших 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 другим кругом данных. Сверхзвезды, с одной стороны, 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.

В любом случае мы столкнулись с самой загадочной группой астрономических объектов. Скрываются ли за их блестящим, но эфемерным существованием какие-либо новые, неизвестные нам фундаментальные процессы или, быть может, наша фантазия еще слишком узка для их понимания — на эти вопросы может ответить лишь будущее.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. B. Oke, Nature **197**, No. 4872, 1040 (1963).
2. C. Hazard, M. B. Mackey and A. J. Shimmings, Nature **197**, No. 4872, 1037 (1963).
3. Jesse L. Greenstein, Nature **197**, No. 4872, 1041 (1963).
4. M. Schmidt, Nature **197**, No. 4872, 1040 (1963).

К СТАТЬЕ ДЖ. ГРИНСТЕЙНА «СВЕРХЗВЕЗДЫ»

Хотя со времени публикации первых сведений о квазизвездных радиоисточниках прошло немногим более года, появилось большое число новых наблюдений и попыток их теоретического истолкования. Поэтому уже сейчас представляется целесообразным кратко систематизировать выполненные работы.

К настоящему времени прямыми радиоастрономическими методами окончательно подтверждена внегалактическая локализация 3C 273, типичного квазизвездного радиоисточника [1], и, следовательно, правильность интерпретации красного смещения как допплер-эффекта. Объем сведений об этих уникальных объектах быстро расширяется. И. С. Шкловский [2] из анализа спектров 3C 286 и 3C 196 оценил красное смещение $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ соответственно в 0,848 и $\geqslant$1,25. Меттьюс и Сэндейдж [3] приводят много фактических данных о 3C 48, 3C 286 и 3C 196. Список квазизвездных радиоисточников пополнился еще тремя [4]: 3C 9, 3C 216 и 3C 245, отождествленными благодаря необычному ультрафиолетовому избытку, найденному и у других «сверхзвезд»[3].

Совокупность наблюдений, в том числе обсуждаемых и Гринстейном, показывает, что типичными свойствами квазизвездных радиоисточников являются следующие:

1) радиоизлучение из области с аномально малыми (доли угловой секунды) размерами;

2) малые размеры оптического объекта по сравнению с размерами радиоисточника; огромная яркость в оптическом диапазоне;

3) колебания светового потока.

Последнее свойство является настолько фундаментальным, что, видимо, должно получить непринужденное объяснение уже в рамках понимания самой природы этих объектов. Фотоэлектрические наблюдения Сэндейджа [5] показали, что оптический поток от 3C 48 изменился за 600 дней на 40% синфазно в трех длинах волн (вероятная ошибка измерений в 20 раз меньше наблюдавшихся колебаний). Блеск 3C 273 продолжал уменьшаться (см. [6,7]); за 10 месяцев он снизился на 20%. Сэндейдж утверждает также, что разница $0^m,24$ в блеске 3C 196 между 16 мая и 12 декабря 1963 г. существенно больше вероятной ошибки.

Важная роль в понимании физических условий в квазизвездных радиоисточниках принадлежит анализу спектральных данных. Спектрофотометрия оптического источника 3C 273-B, недавно проведенная Э. А. Дибаем и В. И. Проником [10], показала, что интенсивность непрерывного спектра $I_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, где $\alpha \simeq 0{,}2 \div 0{,}3$ и отличается знаком от предварительной величины, которую получил Беверли Оук. Непрерывный спектр, согласно [10], является магнитотормозным, а не тепловым, иначе отсутствие заметного бальмеровского скачка требовало бы слишком высокой электронной температуры, противоречащей наблюдаемым интенсивностям запрещенных линий. Поэтому представление о тепловой и, конкретно, рекомбинационной природе оптического спектра 3C 273-B, развиваемое в [11] Хойлем и Фаулером, является необоснованным. С другой стороны, магнитотормозной механизм оптического спектра квазизвездного радиоисточника должен привести, согласно В. Л. Гинзбургу, Л. М. Озерному и С. И. Сыроватскому[12], к новому эффекту. Именно, оптические электроны при столкновении с тепловыми фотонами, плотность которых у поверхности источника чрезвычайно велика, создают мощный комптоновский поток γ-лучей, вполне измеримый у Земли. Проведение соответствующих измерений откроет новый канал информации от этих объектов.

	n_e, *см*$^{-3}$	r, *см*	$M_{\text{газ}}/M_\odot$
3C 48	$<10^5$	$>10^{20}$	$>5\cdot10^6$
3C 273	$\sim 10^7$	$\gtrsim 4\cdot10^{18}$	$2\cdot10^5$

Структура контуров спектральных линий 3C 273 свидетельствует о сильной неоднородности распределения газа в атмосфере источника [10]. На основе анализа всех имеющихся (пока еще довольно скудных) спектральных данных И. С. Шкловский [9] оценил параметры газовых атмосфер 3C 48 и 3C 273 (см. таблицу) среднюю концентрацию n_e, эффективный размер r и массу $M_{\text{газ}}$ ионизованного газа. К аналогичным оценкам пришли Гринстейн и Шмидт [9a]. Модель атмосферы [9], не противоречащая наблюдаемым вариациям светового потока, имеет строение типа оболочки (возможно, нестационарной), размер которой для 3C 273-B порядка $4\cdot10^{18}$ *см*, а толщина 10^{17} *см*. Количество нейтрального газа в этой модели остается пока неопределенным.

Большой световой поток от квазизвездных радиоисточников играет, видимо, и динамическую роль. Предполагая, что притяжение плазмы к центральному ядру уравновешено лучистым давлением, Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков [12a] оценили массу оптического источника 3C 273 в $10^8\ M_\odot$. Заметим, что если этот механизм лучистого равновесия оболочек универсален для квазизвездных радиоисточников, имеет место следующее соотношение между массой M и светимостью L источника: $M = 2{,}5\cdot10^{-5}\,L$ (в солнечных единицах); для обычных звезд, где определяющим является градиент материального давления, $M \propto L^{1/3}$. Было бы важно найти соотношение масса — светимость для сверхзвезд независимым путем.

Накопление новых данных о квазизвездных радиоисточниках, уточнение, а иногда и опровержение некоторых наблюдений происходит столь бурно, что попытки теоретической интерпретации непрерывно сменяют друг друга, порою не успев еще выйти из печати.

Понимание природы этих объектов упирается прежде всего в отыскание источников энергии колоссальной мощности, которая непосредственно проявляется в мощнейшем оптическом радиоизлучении. Высказанные к настоящему времени гипотезы можно разделить с точки зрения природы используемой энергетики на два направления.

I. Ядерная энергетика

Бэрбидж [13], развивая представления И. С. Шкловского о решающей роли сверхновых в образовании радиогалактик [14], постулировал возможность взрыва ядра галактики, представляющего собой компактное скопление старых звезд, где взрыв одной сверхновой I типа мог бы, согласно [13], инициировать другие. Близкая идея была высказана Камероном [15], предложившим вместо индуцированного взрыва коллективное образование большого количества массивных звезд с одинаковым временем эволюции,

по истечении которого эти звезды за короткий промежуток времени должны были взорваться как сверхновые II типа. В деталях подобный механизм обсуждается Колгейтом и Камероном [16]. Однако астрофизические данные свидетельствуют, что возраст квазизвездных радиоисточников является, по-видимому, слишком малым, чтобы они могли иметь значительное число сверхновых, требуемое ядерной энергетикой.

II. Гравитационная энергетика

Максимально возможный выход ядерной энергии, отвечающий превращению водорода в железо, составляет $8\cdot10^{-3}Mc^2$, тогда как выделение гравитационной энергии лимитировано лишь величиной Mc^2. Кроме того, ускорение космических лучей эффективнее в сжимающейся среде, между тем как ядерный взрыв неизбежно приводит к расширению. Поэтому в 1960 г. В. Л. Гинзбург [17] предложил связывать явления мощных радиогалактик с процессом гравитационного сжатия, которое из-за неустойчивости сопровождается появлением неоднородностей и быстрых движений в газе при бурном звездообразовании в нем.

В последнее время для объяснения природы квазизвездных радиоисточников к идее гравитационного сжатия, конечной фазой которого при сферически-симметричной картине сжатия является неудержимый коллапс [18], вновь привлекли внимание Хойл, Фаулер и Бэрбидж [20]. Первоначально Хойл и Фаулер [19] постулировали возможность образования и равновесного существования в течение длительного времени сверхмассивных звезд, о чем выше упоминал Гринстейн, а затем в поисках источника энергии перешли к рассмотрению коллапса. Основная проблема состоит в процессе выхода огромной потенциальной энергии. Мишель [21] предложил взрывной разлет оболочки за счет ослабления поля тяготения центральной части «сверхзвезды», вызванного излучением нейтрино. Однако оценка Я. Б. Зельдовича [22] показала, что гравитационное самозамыкание звезды в ходе сферически-симметричного коллапса приводит к невозможности потери значительной части массы. Каждый элемент коллапсирующей звезды падает под гравитационную сферу (сферу с радиусом $R_g=3\cdot10^5M/M_\odot$ *см*) при плотности лишь немногим превышающей начальную [23], и нейтринная светимость при этом является еще крайне низкой. Точный расчет нейтринных потерь в ходе коллапса дан Я. Б. Зельдовичем и М. А. Подурцом [24].

Для внешнего наблюдателя свечение звезды экспоненциально затухает с характерным временем $\sim R_g/c=10^{-5}\,M/M_\odot$ *сек*; точная асимптотика приводится М. А. Подурцом [25].

Таким образом, из-за перехода преобладающей части энергии коллапса в кинетическую энергию радиального движения, сферически симметричный коллапс не может служить сколько-нибудь длительным источником энергии.

Я. Б. Зельдович [26] предложил связывать выделение гравитационной энергии с несимметричным падением внешних масс в сильном поле тяготения коллапсирующей звезды. Источником излучения являются столкновения (на расстояниях порядка R_g) падающих сгустков плазмы. Этот механизм в принципе содержит и возможность колебаний светового потока [12а]. При нестационарной аккреции вещества, схлопывающегося на тыльной стороне звезды, может также иметь место, согласно [26], кумулятивный выброс части вещества с энергией, составляющей заметную долю mc^2. И. С. Шкловский и Н. С. Кардашев [27] привлекли внимание к важности учета излучения гравитационных волн в ходе несимметричного сжатия. Из рассмотрения траекторий частиц в шварцшильдовском поле тяготения Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков [28] оценили, что в результате гравитационного излучения система из двух взаимодействующих масс теряет не более нескольких процентов собственной энергии.

Важнейшая роль в эффективном механизме переработки гравитационной энергии может принадлежать магнитному полю. В. Л. Гинзбург [29] показал, что при выполнении условия вмороженности первоначально слабое дипольное поле звезды в процессе ее коллапса усиливается на много порядков. Тем самым, согласно [29], в принципе существует возможность, что «сверхзвезды» представляют собой радиационные пояса вокруг коллапсирующих магнитных протозвезд большой массы. Рассмотрение поля на релятивистской фазе коллапса, проведенное В. Л. Гинзбургом и Л. М. Озерным [30], показало, что дипольное магнитное поле сжимающейся в вакууме звезды асимптотически прижимается к ней, тангенциально «обволакивая» поверхность звезды, и убывает до нуля в любой точке вне ее. Однако с учетом атмосферы звезды и при нарушении условия вмороженности часть магнитных силовых линий могла бы замкнуться вовне в токонесущую оболочку вокруг звезды. При некоторых условиях коллапс магнитной звезды может сопровождаться излучением магнитогидродинамических волн [30] и электромагнитным излучением [31], являющимися механизмами трансформации гравитационной энергии.

Реалистическая постановка задачи о коллапсе должна учитывать отклонение от строгой симметрии, обязанное различным факторам. К примеру, учет вращения

сжимающейся массы приводит, как показали И. Д. Новиков и Л. М. Озерной [32], к резкому уменьшению возможного числа сколлапсировавших звезд в Галактике. К тому же сферически-симметричный коллапс неустойчив: произвольно малые начальные возмущения плотности в ходе сжатия нарастают [33]. Чандрасекар [34] отметил, что благодаря близости $\gamma = c_p/c_v$ к 4/3 в модели сверхзвезды Хойла и Фаулера [19] динамическая неустойчивость сверхзвезды развивается в ходе коллапса задолго до достижения гравитационной сферы. Простой расчет показывает, однако, что для заметного роста указанных возмущений начальное возмущение плотности $\delta\varrho_0/\varrho_0$ должно превосходить $\sim(\gamma - 4/3)^{1/4}$. При потере сверхзвездой устойчивости из равновесного состояния последняя величина близка к единице; реальные же начальные возмущения трудно ожидать столь большими. Так или иначе рассмотрение условий на начальных стадиях сжатия приобретает важное самостоятельное значение [30]. Фрагментация, предшествующая самозамыканию массивного и достаточно плотного объекта, могла бы служить продолжительное время источником энергии [11,35].

Последняя точка зрения, подробно рассмотренная Филдом [36], привлекательна именно тем, что связывает образование квазизвездных радиоисточников с естественными процессами эволюции большого газового облака, сжатие которого приостанавливается звездообразованием. Схема такой эволюции в самых общих чертах построена (см. [37], стр. 451 и далее, а также цитированную там литературу). Однако конкретный вариант [36] требует привлечения слишком больших масс (10^{11} $M_\odot$, т. е. порядка масс гигантских спиралей) и, объясняя вспышками сверхновых короткопериодические изменения потока, не позволяет понять причин длиннопериодических колебаний.

В некоторых работах делаются попытки найти объяснения природы квазизвездных радиоисточников в выходе за рамки существующих физических теорий. Хойл, Фаулер и Бэрбидж [20] предполагают, что коллапс может происходить до некоторых минимальных размеров $R_{\min} < R_g$, $\rho \sim 10^{30}$ *г/см*^{3}, после чего сменяется расширением: подобные осцилляции сопровождаются выходом наружу значительных количеств энергии. Остановка и обращение коллапса достигаются введением в уравнения общей теории относительности дополнительного «*C*-поля», обладающего весьма странными свойствами [38].

Возможность устранения бесконечной плотности на финальной стадии сжатия за счет нарушения в ходе сильного сжатия микроскопической причинности была продемонстрирована Д. А. Киржницем и В. Л. Поляченко [39]. Поскольку, однако, для внешнего наблюдателя рост плотности коллапсирующего тела ($M \gtrsim M_\odot$) асимптотически останавливается на величине $\simeq 2\cdot 10^{16}(M_\odot/M)^2$ *г/см*^{3}, сравнительно скромной уже для $M > 30\,M_\odot$, подобная возможность могла бы представить интерес лишь с точки зрения наблюдателя в системе, сопутствующей падающему веществу (в частности, наблюдателя во фридмановском мире на стадии его сжатия).

Чтобы избежать радикальных трудностей с уносом энергии коллапса из-за самозамыкания в «гравитационную могилу», И. Д. Новиков [40] предложил объяснить природу квазизвездных радиоисточников «антиколлапсом» — расширением участков фридмановского мира, до этого пребывавших в латентном состоянии. Причина задержки взрыва, неопределенность длительности этой задержки и ряд астрофизических вопросов пока не сняты этой гипотезой. Нужно заметить вместе с тем, что В. А. Амбарцумян [41] уже в течение многих лет высказывает мнение о происхождении звезд и звездных систем в явлениях типа «антиколлапса» — путем выбросов вещества, сохраняющегося до момента взрыва в некотором дозвездном состоянии.

В настоящее время еще нет явного прогресса в понимании природы квазизвездных радиоисточников; эта проблема теснейшим образом переплетается с нерешенной проблемой эволюции радиогалактик. Тем не менее есть все основания считать, что бурное развитие радиоастрономии уже в ближайшее время прольет свет на оба эти феномена природы.

Л. М. Озерной

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. J. Robinson, K. J. van Damme, J. A. Koehler, Nature **199**, No. 4897, 990 (1963).
2. И. С. Шкловский, Астрон. циркуляр № 250 (1 июня 1963); № 256 (3 сент. 1963).
3. T. A. Matthews, A. R. Sandage, Ap. J. **138**, 30 (1963).
4. M. Ryle, A. Sandage, Ap. J. **139**, 419 (1964).
5. A. Sandage, Ap. J **139**, 416 (1964).
6. А. С. Шаров, Ю. Н. Ефремов, Астрон. ж. **40**, 950 (1963).
7. Sky and Teleskope **27**, 80 (1964).

8. J. A. Bailey, N. J. B. A. Branson, B. Elsmore, P. A. G. Scheuer, Nature **201**, No. 4921, 755 (1964); R. G. Conway, C. G. T. Haslam, P. P. Kronberg, C. H. Slater, Nature **201**, No. 4921, 756 (1964).
9. И. С. Шкловский, Астрон. ж. **41**, 176 (1964); Вестн. АН СССР, № 2, 22 (1964); Астрон. ж. **41** (1964).
9a. J. L. Greenstein, M. Schmidt, The Quasi-stellar Radio Sources 3C 48 and 3C 273, Preprint (1964).
10. Э. А. Дибай, В. И. Проник, Астрон. циркуляр № 282 (1964); № 286 (1964).
11. F. Hoyle, W. Fowler, Report on the Properties Massive Objects, Preprint (1964).
12. В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, С. И. Сыроватский, Астрон. циркуляр № 267 (30 октября 1963 г.); ДАН СССР **154** (3), 557 (1964).
12a. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, ДАН СССР **157** (1964).
13. G. R. Burbidge, Nature **190**, No. 4781, 1053 (1961).
14. И. С. Шкловский, Астрон. ж. **37**, 945 (1960).
15. A. G. W. Cameron, Nature **194**, No. 4832, 963 (1962).
16. S. A. Colgate, A. G. W. Cameron, Nature **200**, No. 4909, 870 (1963).
17. В. Л. Гинзбург, Астрон. ж. **38**, 380 (1961).
18. J. R. Oppenheimer, H. Snyder, Phys. Rev. **56**, 455 (1939).
19. F. Hoyle, W. Fowler, Mon. Notices **125**, 169 (1963); Nature **197**, No. 4867, 533 (1963).
20. F. Hoyle, W. A. Fowler, G. R. and E. M. Burbidge, On Relativistic Astrophysics, Preprint (1963).
21. F. C. Michel, Collapse of Massive Stars, Preprint Cal. Inst. of Technology, Pasadena (1963).
22. Я. Б. Зельдович, Астрон. циркуляр № 250 (1 июля 1963 г.).
23. М. А. Подурец, ДАН СССР **154** (2), 300 (1964).
24. Я. Б. Зельдович, М. А. Подурец, ДАН СССР **156** (1), 57 (1964).
25. М. А. Подурец, Астрон. ж. **41** (1964).
26. Я. Б. Зельдович, ДАН СССР **155** (1), 67 (1964).
27. И. С. Шкловский, Н. С. Кардашев, ДАН **155** (5), 1039 (1964).
28. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, ДАН **155** (5), 1033 (1964).
29. В. Л. Гинзбург, ДАН **156** (1), 43 (1964).
30. В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, О гравитационном коллапсе магнитной звезды. Препринт физического ин-та АН СССР им. П. Н. Лебедева, А-30, 1964; ЖЭТФ **47**, (1964).
31. И. Д. Новиков, Астрон. циркуляр № 290 (1964).
32. И. Д. Новиков, Л. М. Озерной, О количестве сколлапсировавших звезд в Галактике, Препринт Физического ин-та АН СССР им. П. Н. Лебедева, А-17, 1964 г.; Nature (1964).
33. Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников, УФН, **80**, 391 (1963).
34. S. Chandrasekhar, Phys. Rev. Letts. **12**, 114 (1964).
35. L. Woltjer, Nature **201**, No. 4921, 803 (1964).
36. G. B. Field, Quasi-stellar Radio Sources as Spherical Galaxies in the Process of Formation, Preprint (1964).
37. С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер, Межзвезная среда, М., Физматгиз, 1963.
38. F. Hoyle, J. V. Narlikar, Proc. Roy. Soc. **273**, No. 1352, 1 (1963).
39. Д. А. Киржниц, В. Л. Поляченко, ЖЭТФ **46**, 755 (1964).
40. И. Д. Новиков, Астрон. ж. **41** (1964).
41. В. А. Амбарцумян, Отчет XI Сольвейской конференции (Брюссель, 1958 г.); Изв. АН Арм. ССР, сер. физ.-мат. наук **11** (5), 9 (1958).