

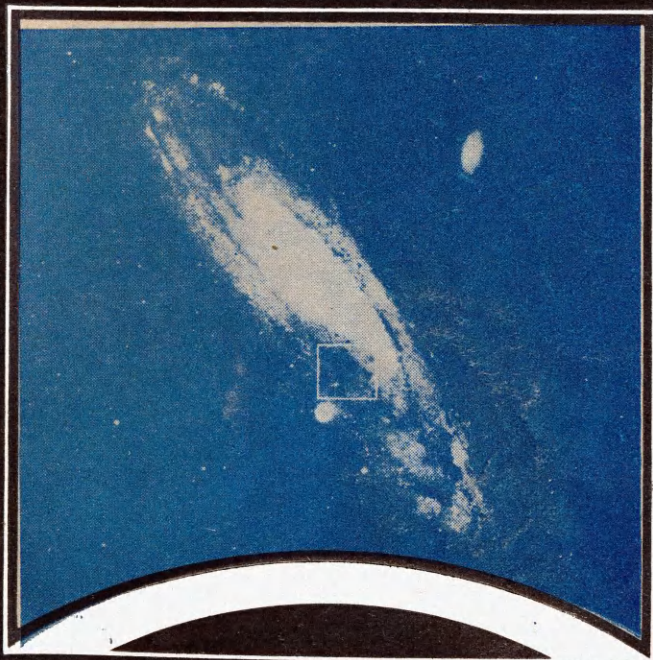
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983/5

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОФИЗИКИ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**

5/1983

Издается ежемесячно с 1971 г.

**СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ
АСТРОФИЗИКИ**

СБОРНИК СТАТЕЙ
(Перевод с английского)

СОДЕРЖАНИЕ

П. Ходж. Туманность Андромеды	8
У. Льюин. Источники небесных рентгеновских вспышек	21
Р. Уильямс. Оболочки Новых	46

С 56 **Современные проблемы астрофизики. Сб. статей/**
Пер. с англ. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. —
(Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонав-
тика, астрономия»; № 5).

11 к.

Сборник открывает статья о Туманности Андромеды, ближайшей к нам спиральной галактике, которая по форме напоминает нашу Галактику. Поскольку ученые не могут обозреть Галактику «со стороны», то многие представления о ее строении и составляющих получены как раз при изучении Туманности Андромеды. В сборник также включены статьи об удивительных двойных системах, порождающих такие явления, как обнаруженные недавно вспышки рентгеновского излучения и известные давно, но лишь недавно понятые вспышки Новых.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся астрономией.

1705040000

ББК 22.63
524

ТУМАННОСТЬ АНДРОМЕДЫ¹

Шел 1611 год. По всем городам Европы караульные вели ночной дозор. Для защиты пламени свечей от ветра и дождей использовались фонари с окнами из тонкого рогового покрытия. И когда баварский астроном С. Мариус направил свой телескоп на туманное световое пятнышко в созвездии Андромеды, он нашел, что оно похоже на «свечу, увиденную ночью через роговое покрытие».

Такое сравнение дает наглядное представление о том, как выглядит объект, ныне называемый Туманностью Андромеды, в небольшой телескоп, но даже не дает повода заподозрить, какое место занимает Туманность Андромеды в истории астрономии. С помощью крупных современных телескопов можно увидеть, что Туманность Андромеды представляет собой гигантскую спиральную галактику². По форме она, как полагают, похожа на нашу Галактику, [очерченную на небе] Млечным Путем. Но в отличие от Галактики Туманность Андромеды, по-видимому, вдвое больше и в столько же раз больше содержит звезд.

Находясь от Солнечной системы на расстоянии около 2 000 000 св. лет, она является ближайшей к нам спиральной галактикой и, кроме того, единственной достаточно близкой для детального обозрения гигантской спиральной галактикой. Даже наша собственная Галактика менее доступна для всеобщего обозрения, так как исследованию ее структуры с Земли мешают облака межзвездной пыли. Поэтому именно Туманность

¹ Paul W. Hodge. The Andromeda Galaxy. Copyright © 1981 by Scientific American, inc.

² На первой странице обложки приведена фотография Туманности Андромеды, полученная на обсерватории Маунт-Паломар с помощью 122-сантиметровой камеры Шмидта. Галактика простирается на небе с северо-востока на юго-запад, причем ближе к Земле расположен ее северный край. Справа от центрального утолщения (балджа) видна темная полоса пылевой материи, светлое пятно под балджем — это галактика-спутник М 32. Еще одна галактика-спутник, NGC 205, находится вверху справа от балджа, две другие галактики-спутника — за пределами снимка. Туманность Андромеды занимает на небе область угловым размером 3°, т. е. в 6 раз большую, чем Луна. Светлым квадратом обозначена область, приведенная на стр. 18.

Андромеды стала виновницей ломки наших представлений в таких вопросах, как эволюция звезд, вращение галактик и масштабы расстояний во Вселенной.

В настоящее время ведутся исследования ее радио- и рентгеновских источников. И с вводом в строй новых телескопов (как на Земле, так и на земной орбите) Туманность Андромеды будет основным объектом исследований этими мощными новыми средствами.

Определение расстояния. Первые научные в современном понимании исследования Туманности Андромеды начались почти 100 лет назад, когда с появлением фотографии впервые представилась возможность регистрировать свет, слишком слабый для человеческого глаза, и тем самым проникнуть дальше в глубь Вселенной. С помощью полуметрового телескопа И. Робертс получил первые фотографии Туманности Андромеды, выявившие ее спиральную структуру. Фотоизображения, кроме того, навели на мысль о присутствии слабых звезд во внешних частях этой спирали, однако в то время природа данного объекта оставалась неясной. Туманность Андромеды принимали за облако межзвездного газа, которое могло бы в конце концов сконденсироваться, образовав звезду с планетной системой. Туманность, как казалось, была самой крупной и самой яркой, а следовательно, вероятно, и ближайшей к нам из нескольких сотен других газовых туманностей. Поэтому предполагали, что она находится относительно близко от Солнечной системы.

Мысль о том, что звездные системы могут располагаться за пределами Млечного Пути, вскоре пришла ряду исследователей, среди которых был и Э. Хаббл из Маунт-Вилсоновской обсерватории. В 1925 г. Э. Хаббл показал, что небольшая, ничем не примечательная туманность NGC 6822 на самом деле является далекой звездной системой³. Между тем его внимание привлекла и гигантская спираль в созвездии Андромеды. Именно ей он посвятил основное содержание своей фундаментальной работы «Спиральная туманность как звездная система», опубликованной в 1929 г. На photographиях этого объекта, полученных Э. Хабблом, виден огромный бесформенный балдж (центральное утолщение), окру-

³ Еще раньше, в 1920 г., шведскому астроному К. Лундмарку удалось сделать то же самое относительно туманности NGC 598.—
Сост.

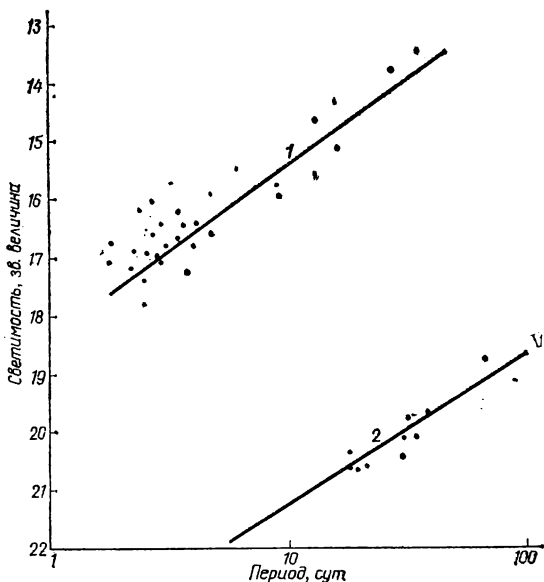


Иллюстрация расчета расстояния до Туманности Андромеды по цефеидам: 1 — зависимость яркости от периода для цефеид в Большом Магеллановом Облаке; 2 — та же зависимость для цефеид в Туманности Андромеды. Очевидно, что графики этих зависимостей аналогичны, но цефеиды в Туманности Андромеды кажутся слабее из-за большей удаленности. Разница на 6 звездных величин соответствует 100-кратному увеличению яркости, или 10-кратному увеличению расстояния

женный сильно закрученными спиральными рукавами, состоящими из пылевых облаков, звездных скоплений и тысяч световых точек, каждая из которых является звездой.

Доказательство Э. Хаббла о значительном расстоянии до Туманности Андромеды опирается на обнаружение им 40 пульсирующих звезд в этой галактике. Исследование последовательных фотографий галактики показало, что некоторые звезды там периодически увеличивают и уменьшают свой блеск. Хаббл распознал среди них цефеиды, которые были уже обнаружены в нашей Галактике. Х. Шепли ранее показал, что цефеиды могут служить в качестве астрономических индикаторов расстояний: истинная светимость цефеид пропорцио-

нальна периоду изменения их блеска, а их видимую яркость, естественно, можно непосредственно измерить. Отношение величины светимости к яркости пропорционально квадрату расстояния до звезды. Используя введенную Х. Шепли калибровку отношения периода к истинной светимости, Э. Хаббл пришел к выводу, что спиральная галактика в созвездии Андромеды должна находиться на расстоянии почти 1 000 000 св. лет от Земли, т. е. далеко за пределами нашей Галактики. Последующие исследования показали, что Туманность Андромеды на самом деле находится на расстоянии, более чем в 2 раза превышающем значение, полученное Э. Хабблом. Но об этом будет рассказано чуть позже.

Сравнивая ряд сделанных последовательно друг за другом фотографий, Э. Хаббл, кроме того, обнаружил 63 звезды, которые вспыхивали и затем медленно тускнели. Это были так называемые Новые. В настоящее время считается, что такие вспышки излучения возникают, когда газ, вытекающий из звезды-гиганта, падает на поверхность горячей и плотной звезды-компаньона [в двойной системе] и взрывается там в результате кратковременного эпизодического процесса термоядерного синтеза. Фактически поверхность звезды-компаньона в это время представляет собой водородную бомбу⁴. Изучение Новых в нашей Галактике показало, что в максимуме блеска эти объекты почти сравнимы с ярчайшими звездами. Э. Хаббл обнаружил, что в Туманности Андромеды Новые довольно тусклы, но тем не менее сравнимы в максимуме блеска с ярчайшими звездами этой галактики. Это послужило еще одним доказательством огромного расстояния до Туманности Андромеды.

В 1885 г. вблизи центра Туманности Андромеды был зарегистрирован еще один объект, отождествлявшийся с Новой. В максимуме блеска он имел чрезвычайно высокую яркость. Его можно было наблюдать невооруженным глазом. В происходивших позже дискуссиях этот объект, названный S Андромеды, приводился в качестве довода в пользу нахождения Туманности Андромеды внутри нашей Галактики. И в качестве аргумента отмечалось, что если было бы иначе, то S Андромеды имела бы слишком большую яркость для обычной Новой. Проведенное Э. Хабблом исследование большого числа Но-

⁴ См. последнюю статью этого сборника. — *Сост.*

вых в Туманности Андромеды убедило его в том, что S Андромеды принадлежит к необычному типу звездных взрывов, о которых тогда только-только узнали. Сейчас этот феномен называют Сверхновой. В отличие от Новых его связывают со взрывом звезды, приводящим к полному ее разрушению.

До сих пор S Андромеды является единственной Сверхновой, обнаруженной в Туманности Андромеды. Статистические оценки, полученные для других галактик, говорят о том, что было бы неудивительным, если бы в любой из следующих дней в Туманности Андромеды вспыхнет еще одна Сверхновая.

Открытия Бааде. Следующий не менее важный вклад в исследования Туманности Андромеды был сделан В. Бааде, который систематически изучал эту галактику с помощью 2,5-метрового телескопа Маунт-Вилсоновской обсерватории. Его исследования привели к двум открытиям, коренным образом изменившим наши представления о звездах и масштабах расстояний во Вселенной.

Первое открытие им было сделано в 1944 г. В то время В. Бааде, будучи германским подданным, не мог участвовать в американских военных работах. В результате он стал практически единственным ученым, работавшим на 2,5-метровом телескопе, что позволило ему тратить сколько угодно времени на экспериментирование с новыми фотоэмульсиями и разными оптическими цветными фильмами. Во время войны в находящемся неподалеку Лос-Анджелесе иногда в целях обороны осуществлялось затемнение города. В эти моменты ночное небо было необычайно темным, и В. Бааде мог постепенно переходить к фотографированию все более слабых объектов Туманности Андромеды.

В. Бааде хотел понять, почему на фотографиях спиральные рукава Туманности Андромеды хорошо разрешались на звезды, тогда как яркая аморфная центральная область была не разрешима даже на лучших фотопластинках Э. Хаббла. Несомненно, свет из центральной области галактики излучают миллионы звезд. Почему же ни одна из них не видна? К этой загадке прибавлялось и то, что четыре небольших, отчасти близких галактик-спутника Туманности Андромеды (две из них были к ней поближе, а две подальше) также не разрешались на звезды.

В конце концов В. Бааде использовал удачную комбинацию условий: чувствительные к красному свету фотоэмульсии, красный фильтр, идеальные атмосферные условия, затемненный Лос-Анджелес и чрезвычайно длительное время экспозиции. На полученных фотографиях не только разрешились звезды в центральном балдже Туманности Андромеды и в четырех галактиках-спутниках, но они также позволили В. Бааде различить два типа звездного населения. Появившиеся на фотопластинках прежде неуловимые звезды оказались красными гигантами — крупными, но тем не менее слишком слабыми, чтобы их можно было бы разрешать с помощью ранее использовавшихся фотоэмульсий. Они принадлежали к классу звезд, названному В. Бааде населением типа II. Эти звезды того же типа, как утверждал В. Бааде, что и образующие в нашей Галактике шаровые скопления.

По численности звезды населения типа II преобладают в центре Туманности Андромеды и в шаровых скоплениях этой галактики, разбросанных выше и ниже плоскости галактического диска в пределах некоторого сферического объема. По массе (но не по светимости) звезды этого населения, вероятно, наиболее распространены в Туманности Андромеды. Последующие работы В. Бааде, его учеников и сотрудников показали, что возраст звезд населения типа II приблизительно равен 12 млрд. лет, т. е. они практически являются ровесниками Метагалактики⁵. К населению типа I, напротив, относятся яркие голубые звезды, которые образуют спиральные рукава Туманности Андромеды. Считается, что эти звезды молоды. Население типа I включает в себя также газ и пыль, обычно окружающие яркие голубые звезды⁶.

Второе важное открытие В. Бааде также тесно связано с Туманностью Андромеды. Шаровые скопления нашей Галактики содержат несколько цефеид, которые

⁵ По оценкам ученых, именно примерно столько времени прошло после начала космологического расширения. Поскольку все галактики, как считают, образовались несколько позже этого момента, то продолжительность расширения можно условно приравнять возрасту Метагалактики. — *Сост.*

⁶ Независимо от В. Бааде советский астроном Б. В. Кукаркин, изучая переменные звезды в Галактике, также пришел к выводу о наличии нескольких типов звездного населения (подсистем) галактик. — *Сост.*

Х. Шепли использовал для калибровки отношения их периода к светимости. Однако В. Бааде заметил, что в шаровых скоплениях Галактики самые яркие красные гиганты имеют почти такую же яркость, что и цефеиды с периодами 30—40 сут. В Туманности же Андромеды самые яркие красные гиганты оказались слабее не входящих в шаровые скопления цефеид с такими же периодами.

О решении этой проблемы В. Бааде сообщил в 1952 г. в Риме на очередном съезде Международного астрономического союза, доказав, что цефеиды в шаровых скоплениях Галактики представляют собой особый тип звезд, обнаруживаемых только в соседстве со звездами населения типа II. Они отличаются от цефеид, имеющих в спиральных рукавах Туманности Андромеды и нашей Галактики. Цефеиды в шаровых скоплениях имеют примерно в 4 раза меньшую светимость, чем цефеиды в спиральных рукавах с таким же периодом изменения блеска. Поскольку яркость цефеид пропорциональна квадрату их расстояний, то оказалось, что изученные Э. Хабблом цефеиды в Туманности Андромеды находятся на расстоянии, в 2 раза превышающем вычисленное им значение. Определение расстояний до всех остальных галактик проводилось Э. Хабблом исходя из оценки расстояния до Туманности Андромеды, и поэтому второе открытие В. Бааде также привело к увеличению в 2 раза размеров Метагалактики [т. е. той области Вселенной, которая доступна наблюдениям. — *Сост.*].

Образование звезд. Интерес В. Бааде к звездным населением обратил его внимание на то, что газ и пыль в Туманности Андромеды, по-видимому, связаны почти исключительно со звездами населения типа I. Такая связь косвенно доказывала, что местонахождением газа и пыли как бы отмечены области, где образуются новые звезды. Иначе говоря, яркие голубые звезды населения типа I являются молодыми, так как звезда с такой светимостью не может в течение длительного времени поддерживать свойственное ей столь высокое выделение энергии. Поэтому газ и пыль, как очевидно, служат сырьем, из которого образуются звезды. Частицы пыли в этом случае могли бы быть местом аккреции газа.

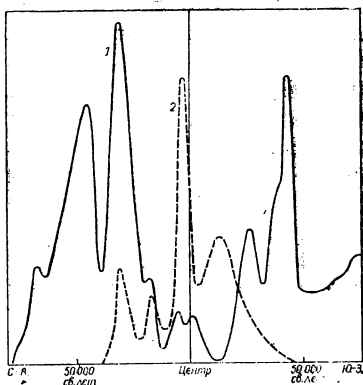
Для того чтобы выяснить, как образуются звезды и

как области звездообразования располагаются в спиральной галактике, В. Бааде изучил распределение горячих газовых облаков. Такие облака излучают благодаря находящимся в них ярким молодым звездам, но облака сначала поглощают излучение звезд, а затем переизлучают его только на определенных длинах волн, соответствующих энергиям возбуждения электронного уровня в атомах газа. Используя при фотографировании фильтры, пропускающие только свет на этих длинах волн, В. Бааде смог прокартографировать положение 688 горячих газовых облаков в Туманности Андромеды. Он обнаружил, что эти облака концентрируются к спиральным рукавам. Они наиболее заметны во внутренних областях рукавов, примерно на расстоянии 30 000—40 000 св. лет от центра галактики. Именно здесь находится наибольшее число ярких голубых звезд и, следовательно, именно здесь в настоящее время образуются новые звезды в галактике.

С развитием радиоастрономии появилось новое средство для изучения процесса звездообразования. Наиболее важным достижением в этой области стало открытие радиоизлучения нейтрального (т. е. неионизованного) водородного газа на длине волны 21 см. Каждый квант этого излучения возникает, когда ориентация углового момента электрона в атоме водорода изменяется относительно ориентации этого момента у протона. Но при этом еще и необходимо, чтобы атом находился в своем наименьшем энергетическом состоянии и, следовательно, излучающие таким образом атомы водорода не могли часто сталкиваться друг с другом. (Столкновения переводят атомы водорода в более высокое энергетическое состояние.) Следовательно, астрономические источники излучения на длине волны 21 см представляют собой холодные разреженные облака газа [где столкновения весьма редки].

Решающий момент в изучении нейтрального водорода наступил, когда в 1966 г. М. Робертс с помощью 92-метрового радиотелескопа в Грин-Бенк получил данные, позволившие составить с высоким разрешением карту распределения излучения на длине волны 21 см в Туманности Андромеды. Вместо дископодобной конфигурации, которая совпадала бы с галактическим распределением звезд, М. Робертс получил распределение нейтрального водорода, напоминающее гигантский пончик

с отверстием посередине и максимальной плотностью газа на расстоянии порядка 40 000 св. лет от центра галактики. Иначе говоря, на том же расстоянии, которое соответствует как самым ярким частям спиральных рукавов, так и максимальной концентрации горячих газовых облаков, согласно карте, составленной В. Бааде. На этом расстоянии распределения горячего и холодного водородного газа совпадают друг с другом.



Распределение вещества вдоль главной оси Туманности Андромеды: 1 — газ из нейтрального водорода; 2 — пылевые облака

За пределами самой толстой части «пончика» оба распределения отличаются друг от друга. Горячие газовые облака отсутствуют уже на расстоянии примерно 50 000 св. лет, а холодный газ из нейтрального водорода можно обнаружить и на вдвое большем расстоянии. Сейчас стало известно, что такой характер распределения газа является общим для гигантских спиральных галактик и, как надо понимать, обусловлен комплексом взаимосвязанных причин. Во внутренних районах такой галактики преобладают звезды населения типа II. Образование этих звезд давно завершилось, и здесь осталось лишь небольшое количество газа. В промежуточных районах галактики еще много газа, и приходящие сюда ударные волны плотности, очевидно, инициируют конденсацию новых звезд из газа. Во внешних районах галактики такие ударные волны слабы или вовсе отсутствуют, и поэтому для образования новых звезд плотность там оказывается слишком низкой⁷.

В последние годы мы еще больше узнали о распределении нейтрального водородного газа благодаря соз-

⁷ Здесь фактически рассмотрена структура галактического диска. Но не следует забывать, что у спиральных галактик существует еще и так называемое сферическое гало, звезды которого относятся к звездному населению типа II. — *Сост.*

данию радиоинтерферометров, в которых радиосигнал принимается несколькими параболическими антеннами, что позволило получать разрешение, такое же, как у радиотелескопа, размером с расстояние между радиантеннами в радиоинтерферометре. Среди первых исследований с помощью нового поколения радиоинструментов была и работа Д. Эмерсона и его сотрудников, которые, используя полумильный радиотелескоп в Кембридже, получили, что отверстие в «пончике» из нейтрального водорода в Туманности Андромеды простирается на расстояние порядка 12 000 св. лет от центра галактики. Начиная с этого расстояния, распределения водорода и пыли, видимо, соответствуют друг другу.

В то же время эти радиоастрономы обнаружили водородный газ на расстоянии примерно 105 000 св. лет от центра Туманности Андромеды в юго-западном направлении вдоль главной оси галактики (на небесной сфере галактика простирается с северо-востока на юго-запад). Отсюда следовало, что галактика занимает гораздо больший объем пространства, чем это следовало из фотографий, сделанных с помощью оптических телескопов.

Новые данные о распределении водорода. Более подробное исследование нейтрального водорода в Туманности Андромеды провел недавно Э. Байайа с помощью радиотелескопа апертурного синтеза в Вестерборке (Нидерланды). Хотя еще не все результаты опубликованы, Э. Байайа сообщил об обнаружении им связи между распределениями водорода и пыли, проявляемой в оптическом диапазоне, в северо-восточном направлении вдоль главной оси галактики, но только для этой половины галактики. В другом направлении от галактического центра распределение как газа, так и пыли практически не определено.

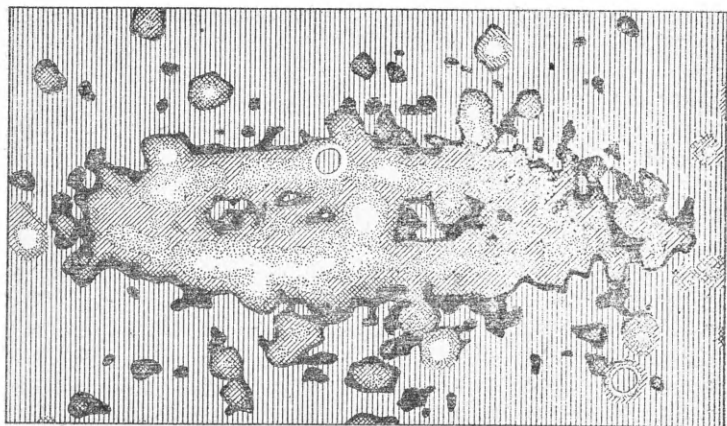
Э. Байайа, кроме того, исследовал движение нейтрального водородного газа и обнаружил, что тот движется не по строго круговым орбитам. Простейшая гипотеза о движении спиральной галактики гласит, что ее составляющие вращаются вокруг массивного галактического центра. В частности, считали⁸, что звезды насе-

⁸ По современным представлениям, в галактическом диске содержится лишь ничтожная часть спиральных галактик, тогда как большая часть массы находится в гало и короне (более подробное об этом можно узнать из статьи Б. Бока, помещенной в предшлюдином сборнике «Современные проблемы астрофизики»). — *Сост.*

ления типа II образовались еще до того, как большая часть галактики сконденсировалась в дископодобную конфигурацию. Орбиты этих звезд являются строгими эллипсами. В противоположность этому молодые звезды, а также газ и пыль в диске с населением типа I, как считают, движутся почти по круговым орбитам, подобно тому как планеты вращаются вокруг Солнца.

Новые данные с очевидностью указывают на то, что это не всегда соответствует действительности. Из трех выявленных рукавов из нейтрального водорода в северо-восточной половине Туманности Андромеды некоторые части самого внутреннего рукава опускаются по направлению к центру галактики со скоростью не менее 100 км/с. Это движение накладывается на вращательное движение вокруг центра. Причина этого пока остается загадкой. Связано ли некруговое движение со сложной динамикой деформации галактического диска? Вызвано ли оно воздействием галактик-спутников или же это следствие какого-то взрывного процесса, разрушившего частично эту часть галактики в прошлом? Ответы на эти вопросы, вероятно, удастся получить с помощью более подробных радиоинтерферометрических исследований, которые сейчас проводятся.

В то время как с помощью радиотелескопа в Вестер-



Распределение радиоизлучения Туманности Андромеды на длине волны 11 см согласно измерениям с помощью 100-метрового радиотелескопа. Более светлые области соответствуют более интенсивному излучению (фон неба указан вертикальной штриховкой)

борке была получена карта распределения радиоизлучения нейтрального водорода на длине волны 21 см, использование 100-метровой чаши радиотелескопа близ Бонна (ФРГ) позволило Э. Беркхюзен и ее коллегам составить карту распределения радиоизлучения на длине волны 11 см и выяснить природу источников такого излучения. Ранее Г. Пули из Кембриджа показал, что большая часть радиоизлучения Туманности Андромеды на длине волны 11 см приходит из центра галактики, а также от областей спиральных рукавов, имеющих повышенную яркость в оптическом диапазоне.

П. ван дер Круит, а также Е. Терзиан и Б. Балик со своими сотрудниками подтвердили вывод Г. Пули о распределении непрерывного радиоизлучения, исследуя его на других длинах волн. Они также показали, что относительное значение интенсивности радиоизлучения на используемых длинах волн указывает на нетепловой характер значительной части этого излучения. Источник теплового излучения, скажем, облако горячего газа, испускает радиосум, спектр которого имеет характерные подъем и спад в зависимости от температуры и размера облака. Зарегистрированные Е. Терзианом, Б. Баликом и их сотрудниками значения интенсивности не соответствуют такой форме спектра. В противоположность этому значительная часть излучения должна генерироваться каким-то нетепловым механизмом.

Им может быть, например, синхротронное излучение, испускаемое электронами, движущимися с околосветовой скоростью в магнитном поле. Синхротронный механизм дает излучение практически одинаковой интенсивности в широком интервале электромагнитного спектра — от рентгеновского до длинноволнового радиодиапазона. Оно возникает в областях, где произошло выделение огромного количества энергии, как, например, вблизи взрывов Сверхновых и так называемых сколлапсировавших массивных объектов (нейтронных звезд, черных дыр), которые, как полагают, остаются после таких взрывов.

Радиокарты, полученные Э. Беркхюзен, показывают, что тепловое излучение Туманности Андромеды приходит главным образом из окрестностей «пончика» из нейтрального водорода (примерно на расстоянии 30 000 св. лет от центра галактики). Следовательно, он, по-видимому, испускается находящимися в этой области мно-

гочисленными облаками горячего газа. Нетепловое излучение Туманности Андромеды исходит из более обширной области. Его распределение обладает острым максимумом в центре галактики и более или менее однородно на протяжении от 40 000 до 50 000 св. лет от центра галактики. Газовые остатки взрывов Сверхновых в нашей Галактике (В. Рубин, С. Кумаром и К. Фордом пока обнаружено 7 таких остатков Сверхновых в Туманности Андромеды) обладают подобным же распределением. Таким образом, нетепловое излучение Туманности Андромеды можно в значительной его части объяснить суммарным фоном от остатков Сверхновых, в том числе, может быть, включая S Андромеды.

Другие объекты. Существует один тип ярких газовых облаков, напоминающий кольцо сигаретного дыма и представляющий собой, как полагают, сброшенную внешнюю атмосферу старой или полностью выгоревшей звездой. Такое кольцо называют планетарной туманностью, поскольку оно хотя и туманно, но из-за своего компактного и дископодобного изображения похоже на планету [типа Сатурна]. В то время как В. Бааде удалось обнаружить всего 4—5 таких объектов в Туманности Андромеды, только за последние несколько лет их зарегистрировано там великое множество. Х. Форд и Дж. Якоби применили новую технику фильтрации и усиления изображений, чтобы обнаружить объекты, слишком слабые для фотографических возможностей В. Бааде. Используя 3-метровый телескоп Ликской обсерватории, они выявили в Туманности Андромеды 315 планетарных туманностей. Всего же, по их подсчетам, в этой галактике содержится около 10 000 таких объектов. В балдже, в центре галактики, по-видимому, умирает 5 звезд за столетие. За прошедшие несколько миллиардов лет накопившийся таким образом газ должен образовать там дископодобную конфигурацию, вращающуюся около балджа. И действительно, такой газовый диск, имеющий массу, близкую к предсказываемому значению, был обнаружен радиоастрономами.

Подобное же применение современных электронно-оптических усилителей и специальных фильтров привело и к некоторым достижениям в изучении горячих газовых облаков в Туманности Андромеды. Недавно был завершен их обзор группой французских ученых во

главе с Ж. Курте с помощью 2-метрового телескопа обсерватории в Верхнем Провансе, по результатам значительно превзошедший работу В. Бааде 50-х годов. Измеренные скорости облаков вместе с известными скоростями движения нейтрального водородного газа в настоящее время дают ясную картину вращения галактики.

Помимо этого, поскольку скорость объекта, движущегося по орбите, зависит от массы вещества, заключенного в пределах орбиты, и от массы соседних объектов, движущихся по этой же орбите, то из распределения скоростей движения объектов в Туманности Андромеды можно получить и распределение массы в этой галактике. По последним оценкам, полная ее масса составляет 200—400 млрд. масс Солнца, т. е. в 2 раза превышает массу нашей Галактики⁹. Но даже в этом случае орбитальная скорость водородного газа во внешних областях Туманности Андромеды приводит к предположению, что у галактики имеется очень массивное гало из невидимого вещества¹⁰.

В качестве одного из способов проверки такой оценки массы для Туманности Андромеды было бы измерение гравитационного взаимодействия галактической массы с какими-нибудь объектами, которые желательно находились бы на достаточном удалении от центра галактики. Используя в качестве таких объектов шаровые скопления звезд населения типа II, Ф. Хартвик, С. ван ден Берг и У. Саргент недавно провели совместное исследование шаровых скоплений на фотопластинках, полученных с помощью нового 4-метрового телескопа обсерватории Китт-Пик. Они составили каталог 355 возможных шаровых скоплений, удвоив, таким образом, количество известных к тому времени скоплений такого типа, обнаруженных там еще Э. Хабблом. 355 шаровых скоплений — это почти в 3 раза больше количества таких скоплений, обнаруженных в нашей Галактике. Само по себе обилие шаровых скоплений говорит в пользу большей массы Туманности Андромеды.

⁹ Здесь имеется в виду масса, заключенная в галактическом диске обеих галактик. Эта составляющая часть галактики, собственно, и видна в оптическом диапазоне. — *Сост.*

¹⁰ Помимо гало, как уже отмечалось, у галактик, вероятно, существуют и еще более массивные короны (см. сноску 8 на стр. 11). — *Сост.*

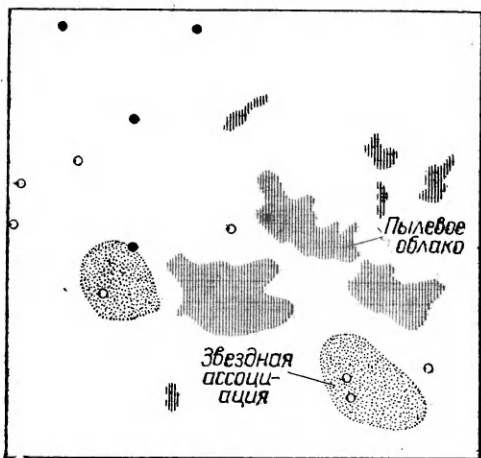
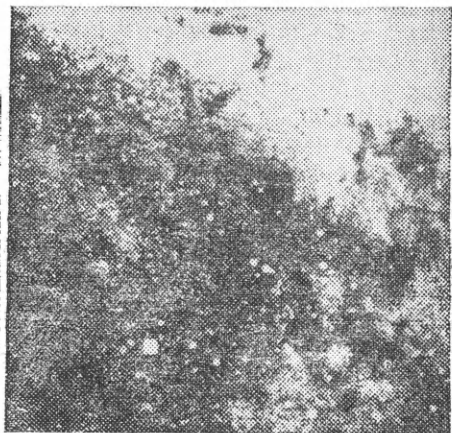
Однако поскольку еще не определены орбиты этих скоплений, то, следовательно, и вопрос о полной массе галактики остается открытым.

Из исследования спектров и цветов более ярких шаровых скоплений, проведенного С. ван ден Бергом, вытекает, что эволюция Туманности Андромеды на ранних этапах, должно быть, сильно отличалась от эволюции Галактики. В нашей Галактике шаровые скопления во внешних областях очень бедны тяжелыми элементами. Солнце содержит их в гораздо большем количестве. Эта разница в химических составах обычно объясняется проявлением некоторой общей закономерности. Старые звезды населения типа II практически полностью состоят из водорода и гелия — элементов, образовавшихся в основном на ранних этапах расширения Метагалактики, тогда как в более молодом диске из звезд населения типа I содержатся газовые «обломки» множества погасших звезд, в недрах которых в результате термоядерного синтеза образовались тяжелые элементы.

Но вызывает удивление, что спектры шаровых скоплений в Туманности Андромеды обнаруживают самое разнообразное содержание тяжелых элементов, причем вообще не существует никакой связи между содержанием тяжелых элементов в шаровом скоплении и его положением в галактике.

Строение спиральной структуры. В Туманности Андромеды были обнаружены скопления и другого типа, так называемые рассеянные скопления звезд. Они моложе шаровых и размещаются в плоскости галактики вместе с другими звездами населения типа I. За исключением двух таких скоплений, Э. Хаббл посчитал, что они отсутствуют в Туманности Андромеды. Однако в 1980 г. я воспользовался широким полем изображений, получаемым с помощью нового 4-метрового телескопа обсерватории Китт-Пик, для обзорных наблюдений этой галактики и обнаружил там 403 рассеянных скопления.

Большая их часть имеет размеры всего лишь около 60 св. лет. Тем не менее именно они позволили проследить недавнюю историю звездообразования в Туманности Андромеды. Отправной точкой рассуждений стала вероятность того, что все звезды в рассеянном скоплении образуются одновременно. С другой стороны, содержание звезд различного спектрального класса в скоплении за некоторый период времени изменяется.



На фотографии показан участок Туманности Андромеды, отмеченный светлым квадратом на передней странице обложки. Рядом схематично показана та же область с указанием конкретных объектов (черными кружками указаны шаровые скопления, светлыми — рассеянные скопления), в том числе ряд пылевых облаков и звездных ассоциаций

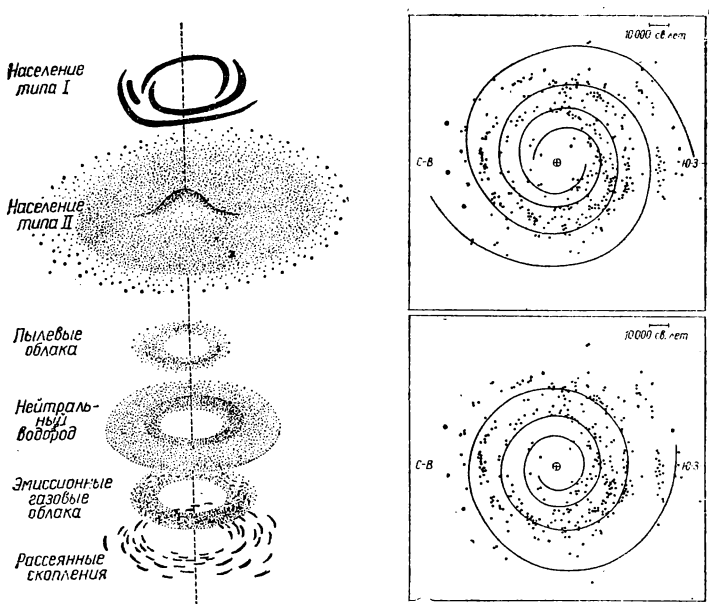
Таким образом, из статистических данных о звездах разного класса в скоплении можно определить его возраст. Используя этот способ, я показал, что скорость звездообразования изменялась со временем вдоль ра-

диуса Туманности Андромеды. Недавно она была необычно высокой на расстоянии порядка 30 000 св. лет от центра галактики, где сконцентрированы нейтральный водород и яркие звезды.

В настоящее время рассеянные скопления обратили на себя внимание при выявлении строения спиральной структуры Туманности Андромеды. Первую попытку выяснить это строение предпринял Х. Арп, который в своих исследованиях в обсерватории Маунт-Паломар основывался на распределении газовых облаков в этой галактике. Х. Арп получил, что спиральная структура с двумя рукавами, закручивающимися в направлении вращения галактики, достаточно хорошо соответствует распределению наблюдательных данных. Некоторое же имеющееся несоответствие может вызываться, как он считает, гравитационным воздействием на галактический диск со стороны массы М 32 — одной из четырех галактик-спутников Туманности Андромеды.

Недавно проведенный Дж. Бердом анализ с помощью ЭВМ, по-видимому, подтверждает этот вывод и объясняет, к тому же, наблюдаемое некруговое движение нейтрального водородного газа в галактике. С другой стороны, А. Калнайс, анализируя распределение облаков водородного газа, заключил, что галактика имеет только один спиральный рукав, закручивающийся в спираль в противоположном направлении, чем в двухрукавной схеме, предложенной Х. Арпом. Иначе говоря, рукав является ведущим, и его свободный конец указывает направление вращения Туманности Андромеды.

Во всей Метагалактике мы еще не наблюдали подобных примеров спиральных галактик с одним ведущим рукавом. Однако А. Калнайс отмечает, что такой характер спиральной структуры, возможно, определяется воздействием М 32. Если период вращения Туманности Андромеды кратен периоду вращения М 32 вокруг этой галактики, то гравитационное резонансное взаимодействие между двумя галактиками могло привести к появлению одного ведущего рукава. Недавно группа французских, швейцарских и греческих астрономов изучила собранные в большом количестве данные о положении объектов населения типа I в Туманности Андромеды и попыталась выявить ее спиральную структуру. Они также пришли к выводу, что данные больше всего согласуются со спиралью с одним ведущим рукавом.



Распределение астрофизических объектов в Туманности Андромеды (вертикальная пунктирная линия соответствует центру галактики). Показано, что распределение звезд населения типа II, указанное в виде сегментов (интерпретация автором), не дает четкой спиральной структуры

Схема двухрукавной и однорукавной спиральной структуры Туманности Андромеды

Дискуссия по этому вопросу еще не завершена. Распределение газовых облаков, по-видимому, весьма хорошо соответствует схеме с одним рукавом. Однако оказалось, что распределение рассеянных скоплений согласуется только со схемой с двумя рукавами, где спиральная структура деформирована под действием гравитационных сил. Помимо этого, спиральной модели не вполне соответствует распределение пылевых облаков. Эти расхождения наблюдений с теорией указывают на несовершенство большинства моделей спиральной структуры Туманности Андромеды и вообще на несовершенство наших представлений о спиральной структуре галактик.

Туманность Андромеды продолжает оставаться объектом как наблюдений, ставших возможными при ис-

пользовании нового инструментального оснащения, так и при поисках там новых типов объектов. В настоящее время для Туманности Андромеды построены карты распределения газа из окиси углерода, которые, как оказалось, соответствуют картам распределения нейтрального водородного газа. Кроме того, орбитальная рентгеновская обсерватория им. А. Эйнштейна зарегистрировала в Туманности Андромеды 69 рентгеновских источников. Предполагают, что некоторые из них являются шаровыми скоплениями, другие — объектами населения типа I, а третьи — остатками взрывов Сверхновых. Может быть, скоро будет определена конкретная природа высокоэнергетических процессов, генерирующих это излучение. Туманность Андромеды снабдила астрономов огромным количеством информации и вне всякого сомнения даст ее еще гораздо больше.

У. Льюин

ИСТОЧНИКИ НЕБЕСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК¹

Значительная часть представлений астрономов о Вселенной основывается на исключительной регулярности небесных явлений. С хорошо известными, обладающими точностью часов движениями Солнца, Луны и планет могут сравниться события совсем другого масштаба: вращение двойных звездных систем и пульсирующее радиоизлучение, зарегистрированное от вращающихся нейтронных звезд. В последние десятилетия, однако, обнаружен ряд небесных явлений, которые носят явно непериодический характер. Это вообще говорит о более бурном и менее упорядоченном мире небесных явлений, чем это предполагали астрономы всего лишь одно поколение назад.

В 1975 и 1976 гг. важный класс непериодических явлений привлек внимание астрономов. Были замечены кратковременные вспышки рентгеновского излучения, источники которых находились вблизи центра нашей Галактики и в шаровых звездных скоплениях. Эти вспышки не представляют собой обособленные, единичные события, но и не укладываются в определенную схему, а

¹ Walter H. G. Lewin. The Sources of Celestial X-Ray Bursts. Copyright © 1981 by Scientific American, inc.

нерегулярно повторяются через характерное время от нескольких часов до нескольких суток. Они, видимо, сигнализируют о каких-то взрывных процессах и заключают в себе огромное количество энергии, приходящееся на рентгеновский диапазон спектра. Типичная вспышка достигает максимума своей интенсивности за несколько секунд или еще быстрее, а затем в течение около 1 мин источник угасает до своего стационарного, довспышечного уровня рентгеновского излучения. За столь короткий промежуток времени испускается в рентгеновском диапазоне энергии около 10^{29} эрг, что равно энергии, излучаемой Солнцем во всех диапазонах длин волн примерно за две недели.

Источники рентгеновских вспышек привлекали к себе внимание еще до открытия этих вспышек. На небе в рентгеновских лучах, которое стало доступно наблюдениям лишь с помощью ракет, высотных баллонов и спутников, прорывающихся через непрозрачную для рентгеновских лучей атмосферу Земли, эти источники являются одними из самых ярких в нашей Галактике. В видимом диапазоне длин волн они излучают примерно в 100 раз больше энергии, чем Солнце, что, правда, не делает их особо выдающимися объектами на небе. Но в рентгеновском диапазоне электромагнитного спектра они выделяют непрерывный поток энергии, в миллиард раз более мощный, чем излучаемый Солнцем в этом же диапазоне. Рентгеновские вспышки еще добавляют энергии в этот непрерывный поток.

Таким образом, еще до обнаружения рентгеновских вспышек астрономы были весьма озадачены. Что за объекты способны испускать столь интенсивный и непрерывный поток рентгеновского излучения? Каков механизм генерации этого излучения?

К началу 70-х годов некоторые астрономы посчитали, что они нашли ответы на эти вопросы. Хотя предложенное ими объяснение оказалось в принципе верным, только недавно удалось понять, как его можно приспособить к совершенно различным типам объектов. Ими утверждалось, что рентгеновской «звездой» вполне может стать сверхплотный, гравитационно сжатый объект типа нейтронной звезды или, может быть в некоторых случаях, черная дыра. Нейтронные звезды — это такие, в которых уже исчерпалось ядерное горючее, и в результате

уже недостаточно генерируемого в их недрах теплового излучения, чтобы его давлением уравновесить силу гравитационного притяжения. Звезда сжимается под действием собственной тяжести до тех пор, пока протоны и электроны в составляющих ее атомах не соединятся друг с другом, образуя плотно упакованную массу из нейтронов. Последние могут приостановить дальнейшее гравитационное сжатие звезды, если ее масса не превышает трех масс Солнца. Предполагают, что более массивные звезды продолжают катастрофически сжиматься, в результате образуется черная дыра — область пространства, куда «проваливается» звезда. У черной дыры имеется «горизонт событий» (это, собственно, не физическая поверхность, а математически определяемая граница), где скорость, необходимая веществу для преодоления воздействия черной дыры, равняется скорости света.

Нейтронная звезда или черная дыра могут быть ответственными за генерацию мощного потока рентгеновского излучения вследствие чрезвычайно сильного гравитационного поля звезды, претерпевшей сжатие. Нейтронная звезда, скажем, с массой, примерно равной солнечной, имеет радиус всего лишь около 10 км (радиус Солнца приблизительно составляет 700 000 км). Вблизи поверхности такой нейтронной звезды сила тяжести примерно в 100 миллиардов раз больше, чем на поверхности Земли. При наличии какого-либо внешнего источника вещества, которое может быть захвачено гравитационным полем нейтронной звезды, это вещество будет стремительно падать в направлении звезды. Оно будет ускоряться до огромных скоростей и тем самым нагреется до высоких температур (10—100 млн. К). В результате вещество должно испускать характерное тепловое излучение, приходящееся при таких температурах в основном на рентгеновский диапазон электромагнитного спектра.

Что же представляет собой внешний источник падающего вещества на звезду?

Подходящим кандидатом здесь является гравитационно связанная с нейтронной звездой или черной дырой соседняя звезда во вращающейся двойной системе. В таком компаньоне-звезде могло бы продолжаться ядерное горение, как это происходит сейчас в недрах Солн-

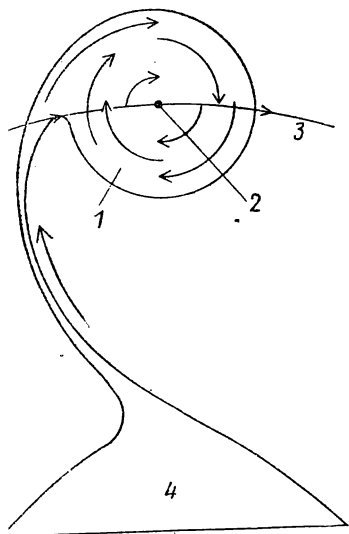


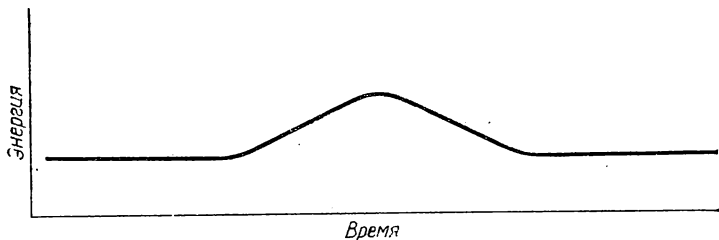
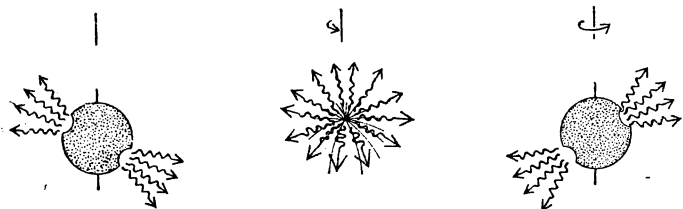
Схема перетекания вещества с компаньона-звезды на нейтронную звезду: 1 — аккреционный диск; 2 — нейтронная звезда; 3 — орбита нейтронной звезды; 4 — компаньон-звезда

ровали Р. Джиакони, Э. Шрейер, Х. Танэнбаум и их коллеги из Американской научно-технической корпорации при описании двух сильных источников рентгеновского излучения. Используя данные, полученные с помощью рентгеновского спутника «Ухуру», ученые выявили источники, интенсивность которых обладала сильной периодичностью кратковременных и продолжительных вариаций. Кратковременные вариации, или пульсации, с периодом несколько секунд объясняются тем, что во вращающейся нейтронной звезде с сильным магнитным полем ось вращения не совпадает с осью магнитного диполя. Падая в сильном дипольном магнитном поле, вещество [состоящее из заряженных частиц] будет аккрецироваться только вблизи магнитных полюсов звезды, образуя там два горячих пятна на поверхности, вращающихся вместе с звездой. Вращающиеся горячие пятна порождают рентгеновское излучение, которое выглядит пульсирующим для земного наблюдателя.

Поскольку черные дыры не могут иметь ни физиче-

ца. Если бы компаньон располагался достаточно близко от объекта, претерпевшего гравитационное сжатие, вещество (в основном водород) могло бы от первого перетекать на второе. Поскольку оба компонента быстро вращаются в системе около друг друга, то во многих случаях перетекающее вещество должно образовывать вращающийся аккреционный диск, откуда по спиралям падает на поверхность гравитационно сжатой звезды.

В 1971 г. возможности модели такой двойной системы с нейтронной звездой в качестве компактного источника рентгеновского излучения убедительно продемонстри-



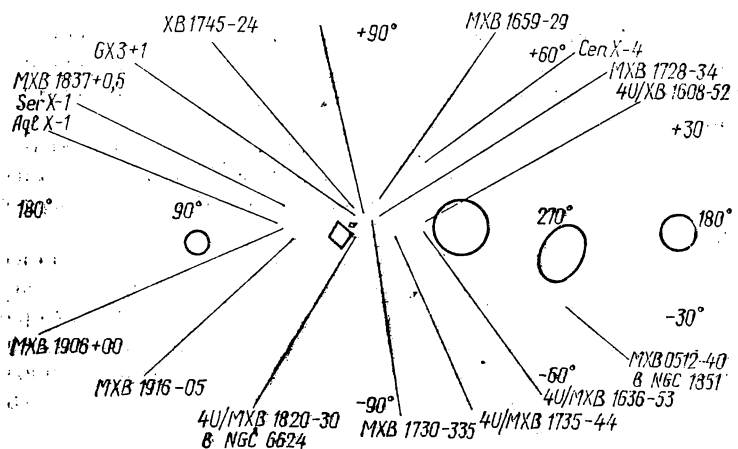
Схема, показывающая, как увеличивается рентгеновское излучение от нейтронной звезды в зависимости от ориентации ее горячих пятен к наблюдателю при вращении звезды

ской поверхности, ни сильного магнитного поля, их следует исключить из рассмотрения в качестве возможных источников пульсирующего рентгеновского излучения. Наблюдаемые продолжительные вариации рентгеновского излучения с периодом в несколько суток вызываются периодическим затмением нейтронной звезды значительно более крупным компаньоном-звездой.

После этого важного открытия некоторые астрономы предположили, что большинство сильных рентгеновских источников в нашей Галактике должны оказаться такими же двойными звездными системами. Чтобы проверить эту гипотезу, были изучены многие сильные рентгеновские источники с целью выявить у них пульсации и затмения рентгеновского излучения. К 1975 г. было открыто еще несколько рентгеновских двойных систем, но не столь много, как ожидалось. Кроме того, поиски также обнаружили большое число рентгеновских источников, которые не имели никаких признаков наличия звезды-компаньона и в которых отсутствовали рентгеновские пульсации. Если рассуждать логически, то не-

удача с обнаружением затмений и пульсаций еще не говорит о том, что данный рентгеновский источник не входит в состав двойной системы или что он не является нейтронной звездой: отсутствие доказательств не служит доказательством их отсутствия. В то же время уже с самого начала стали подозревать, что подобные рентгеновские источники образуют собой особый класс объектов, отличающихся от тех, для которых легко устанавливается принадлежность к двойной системе.

В большинстве явных двойных систем звезда-компаньон [рентгеновского источника] достаточно яркая и имеет массу в 10—20 раз больше массы Солнца. Такие системы должны быть сравнительно молодыми, поскольку звезды, имеющие массу в 20 раз больше солнечной, сжигают все свое ядерное горючее в течение нескольких миллионов лет. Отнесем молодые рентгеновские источники в таких системах к классу I. Большая часть рентгеновских источников, в которых отсутствуют пульсации и затмения рентгеновского излучения, обнаружены в основном районе галактического центра и в шаровых скоплениях. Звезды шаровых скоплений, как это известно из совокупности независимых данных, являются одними из самых старых в Галактике. Следовательно, та-



Положение 31 источника рентгеновских вспышек согласно данным, полученным на 1 декабря 1980 г. Кружками и ромбиками указаны области обнаружения вспышки. Концентрация вблизи центра Галактики, и в шаровых скоплениях, позволяет отнести эти источники к классу II

кое распределение этих рентгеновских источников в Галактике означает, что многие из них имеют возраст 10 млрд. лет [примерный возраст Галактики — Прим. сост.]. Отнесем эти источники к классу II.

К 1976 г. было установлено несколько критериев, классифицирующих рентгеновские источники как принадлежащих классу II: они не отождествляются с яркими оптическими объектами, источникам не свойственны ни пульсации, ни затмения рентгеновского излучения, и их часто обнаруживают в районах, связываемых с местоположением старых звезд. Но если объекты и можно было проклассифицировать, астрономы не понимали, к какому типу звездных систем они принадлежат. Действительная природа источников класса II в течение ряда лет оставалась загадочной.

Эта загадочность продлила жизнь нескольким альтернативным гипотезам о природе рентгеновских источников данного класса. Могут ли некоторые из них являться одиночными черными дырами или одиночными нейтронными звездами, не проявляющими пульсаций излучения? Очевидно, что одиночный объект не может чем-то затмеваться и обладать яркой звездой-компаньоном. Черная дыра вообще не может пульсировать, пульсации не ожидаются и от нейтронной звезды со слабым магнитным полем или когда ось магнитного диполя совпадает с осью вращения звезды. Может, этим и объясняется отсутствие затмений и пульсаций в излучении источников класса II?

Что же можно сказать об источнике вещества, которое должно падать (аккрецировать) на поверхность одиночного объекта для возбуждения рентгеновского излучения?

Для объяснения наблюдаемой светимости рентгеновского излучения скорость аккреции должна быть около 10^{17} г/с. (При такой скорости потребовалось бы примерно 2000 лет, чтобы накопиться массе, сравнимой с массой Земли.) Черная дыра или нейтронная звезда, имеющая массу, примерно равную солнечной, должна быть окутана достаточно большим и плотным облаком газа, чтобы поддерживалась подобная скорость аккреции. Но столь крупным и плотным газовым облакам не удалось бы остаться незамеченными. Поэтому одиночные нейтронные звезды и черные дыры с массой около Солнца можно было исключить из дальнейшего рассмотрения.

Отсутствие каких-либо данных об обнаружении таких облаков аккрецирующего газа, может быть, объясняется низкой плотностью этого газа, окружающего гораздо более массивный объект. В 1975 г. именно это предположили Дж. Бакалл и Дж. Острайкер, а также совершенно независимо от них Дж. Силк и Дж. Аронз, допустив, что источниками класса II могут быть черные дыры массой более чем 100 солнечных, захватывающие вещество из окружающего облака низкой плотности.

Несколько позже в том же году были обнаружены вспышки рентгеновского излучения. С помощью астрономического нидерландского спутника «АНС» Дж. Гриндлей и Дж. Хейс зарегистрировали две вспышки, испущенные объектом в шаровом скоплении NGC 6624. Вспышки были также выявлены Р. Беллианом, Дж. Коннером и Д. Эвансом на основании данных независимых наблюдений с помощью спутников «Вела».

После сделанного открытия мои коллеги по Массачусетскому технологическому институту и я обнаружили еще 5 вспышечных источников рентгеновского излучения менее чем за два месяца наблюдений при помощи спутника «САС-3». До конца 1976 г. обнаружилось еще 10 вспышечных источников различными группами ученых с помощью спутников «ОСО-8», «САС-3», серии «Вела» и «Ухуру». Вспышки испускали источники класса II, хотя и не все источники этого типа давали вспышки.

Несмотря на наше первоначальное замешательство с объяснением этого удивительного феномена непериодического характера, некоторые из нас пришли к выводу, что в этих вспышках находится ключ к пониманию природы всей совокупности рентгеновских источников класса II. На первых порах посчитали, что вспышки, может, свидетельствуют в пользу гипотезы массивных черных дыр. Дж. Гриндлей и Г. Гурски аргументировали это тем, что характер профиля вспышки (т. е. изменения сигнала со временем) вызван рассеиванием первичного всплеска рентгеновского излучения в горячей газе. Как они полагали, температура газа должна была бы быть порядка 1 млрд. К, в связи с чем они подчеркивали, что газ при столь высокой температуре не подвержен действию гравитационного поля, создаваемого объектом массой меньше нескольких масс Солнца. Следовательно,

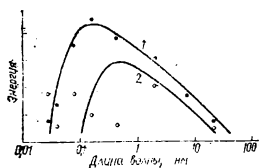
предположили ученые, вспышки возникают вблизи массивной черной дыры. Никакого механизма для источника первичного всплеска при этом не предполагалось, но аккреция вещества из окружающего облака на черную дыру, вероятно, представила бы такой механизм. Несмотря на привлекательность этой гипотезы, она оказалась неверной.

Кажущаяся справедливость модели массивной одиночной черной дыры опровергалась при более тщательном изучении профилей вспышек. Моделью предсказывался гораздо больший «горизонт событий» черной дыры, чем размеры источника, получаемые из профилей вспышек.

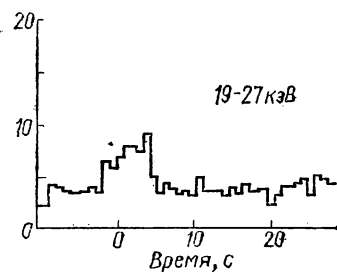
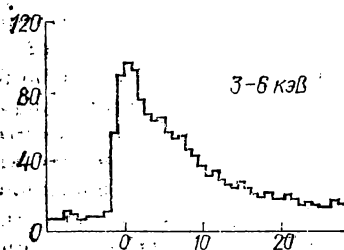
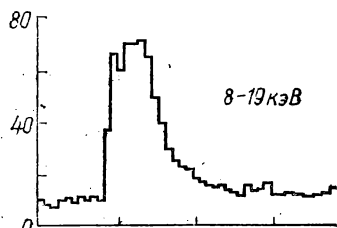
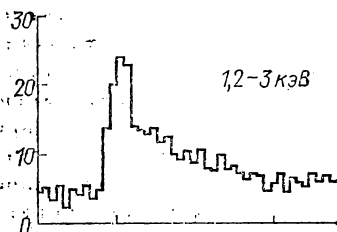
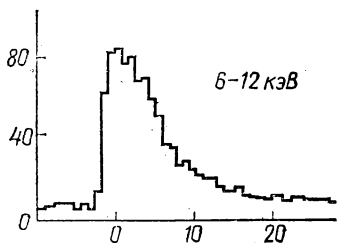
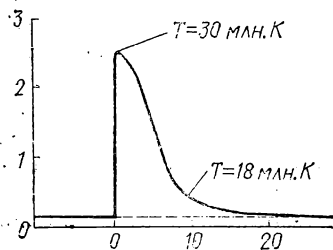
Размер излучающей области можно получить из рентгеновского спектра, наблюдаемого во время вспышки. Изменения в рентгеновских спектрах, характерные для различных интервалов энергий, указывают на охлаждение источника. При максимуме вспышки испускается рентгеновское излучение с энергиями 1—20 кэВ. Позднее, когда объект охладится, рентгеновское излучение высоких энергий уже не столь эффективно, и рентгеновский спектр вспышки охватывает интервал энергий примерно 1—7 кэВ. Таким образом, рентгеновское излучение от вспышек, имеющее низкую энергию, затухает медленнее, чем излучение с более высокой энергией.

При анализе этих рентгеновских спектров от вспышек Дж. Суанк и его сотрудники заметили, что рентгеновский спектр одной особенно продолжительной вспышки похож на спектр излучения охлаждающегося черного тела. Абсолютное черное тело (которое не следует путать с черной дырой) поглощает все падающее на него излучение, а спектр излучения черного тела зависит только от температуры тела. Следовательно, температура черного тела может быть вычислена из наблюдаемого спектра.

Полная светимость излучающего черного тела пропорциональна площади его поверхности и четвертой степени его температуры. Светимость же [излучения далекого черного тела] можно оценить по потоку энергии, получаемому на Земле; если известно расстояние до тела и если допустимо предположить, что оно равномерно излучает во всех направлениях. Следовательно, площадь поверхности такого астрономического объекта можно



Спектры чернотельного излучения с температурами 30 млн. К (1) и 10 млн. К (2). Распределение белых кружочков не имеет характера чернотельного излучения



Сравнение теоретического профиля вспышки рентгеновского излучения с наблюдаемыми профилями (на различных энергиях) вспышки от источника МХВ 1728—34

определить из его спектра и расстояния. Когда Дж. Суанк и его сотрудники смогли показать, что спектр излучения наблюдавшегося ими источника рентгеновской вспышки является чернотельным, они смогли рассчитать площадь поверхности (и, конечно, радиус) источника.

Большинство источников рентгеновских вспышек располагаются близ центра галактики, который, как известно, находится на расстоянии 30 000 св. лет от Солнечной системы. Это дало право Дж. Суанку предположить, что такое же расстояние имеет и наблюдавшийся источник вспышки. Температура в области вспышки в течение первых 60 с поднималась примерно до 26 млн. К, а затем упала до 15 млн. К спустя около 100 с. На основании этих данных Дж. Суанк со своими коллегами получил, что радиус источника приблизительно равнялся 100 км в первые 15 с вспышки, а в последующем он более или менее оставался постоянным — 15 км.

По примеру Дж. Суанка я со своими аспирантами Дж. Доти и Дж. Хоффманом рассчитали значения радиуса для двух других рентгеновских звезд, испускающих вспышки. Мы нашли, что радиусы обоих объектов равны около 10 км в течение всего периода охлаждения [тела после вспышки]. Нам не удалось получить радиусы рентгеновских звезд при нарастании вспышки (когда температура поднималась), так как в течение этого времени спектры излучения не были чернотельными. Год спустя Ж. ван Парадис показал, что небольшое значение радиуса, около 10 км, свойственно всем источникам вспышек.

Такие малые размеры дали первое убедительное свидетельство в пользу того, что объект, вспыхивающий в рентгеновском диапазоне, является нейтронной звездой. Если бы источником вспышек была бы черная дыра массой 100 солнечных, мы вправе были бы ожидать, что получим радиусы более 300 км — таков теоретически предсказываемый радиус горизонта событий в случае столь массивной черной дыры. Таким образом, результаты расчетов, по-видимому, исключают модель одиночной массивной черной дыры, поглощающей вещество из окружающего облака. Массивная черная дыра, вероятно, является единственным одиночным объектом, способным захватывать разреженное вещество из окружающего газового облака с требуемой скоростью аккреции.

Следовательно, оценки радиуса также впервые наглядно указали на то, что источником вещества для возникновения рентгеновских вспышек служит гравитационно связанная [с источником] звезда-компаньон в двойной системе. Хотя логически и верным было бы предположить, что источниками рентгеновских вспышек являются небольшие черные дыры (массой в несколько солнечных) в двойных системах, однако наши представления о рентгеновских источниках класса I делают такое предположение маловероятным. Источники класса I уже отождествлены как нейтронные звезды в двойных системах, и поэтому нет необходимости предполагать, что источниками вспышек служат другие объекты.

Если источники вспышек относятся к классу II, тогда и большинство рентгеновских источников класса II, вероятно, являются нейтронными звездами в двойных системах. Но если они входят в двойные системы, то как можно объяснить отсутствие затмений излучения, невидимость звезд-компаньонов, а также отсутствие доплеровских смещений спектральных линий и других наблюдательных данных, которые обычно необходимы для того, чтобы установить существование двойной звездной системы?

В 1977 г. Э. ван ден Хьювел допустил, что масса звезды-компаньона в рентгеновских источниках класса II может равняться примерно одной солнечной. Это означает, что звезды-компаньоны в двойных системах с источником класса II гораздо менее массивны, чем звезды-компаньоны в системах с источником класса I. Впоследствии П. Джосс и С. Рапппорт предположили, что масса необнаруживаемых звезд-компаньонов может быть и меньше 0,5 солнечной. Такая маломассивная звезда не обладает достаточной яркостью, чтобы без затруднений обнаружиться на расстояниях, оцениваемых для источников класса II (порядка 30 000 св. лет). На этом расстоянии Солнце выглядело бы как слабая звездочка 20-й звездной величины, а поглощение света межзвездной пылью сделало бы его еще более тусклым. Его можно было бы обнаружить лишь с помощью самых крупных оптических телескопов.

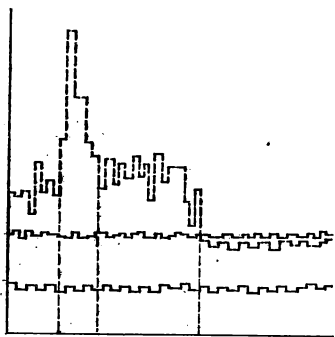
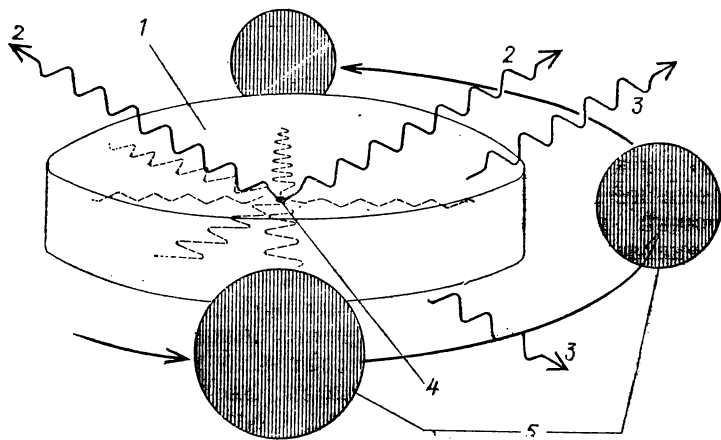
Хотя звезда-компаньон малой массы зачастую может быть слишком слабой для обнаружения, двойная природа источников класса II все же была бы выявлена,

если рентгеновский источник периодически затмевался бы звездой-компаньоном. Но для наблюдения затмений излучения с Земли двойная система должна быть сориентирована так, чтобы звезда-компаньон периодически блокировала рентгеновские лучи, испускаемые источником. Вероятность этого зависит от размеров звезды-компаньона и от расстояния между ним и рентгеновским источником. Эти две величины можно определить из известных характеристик для звезд системы. Для обычной звезды, в которой еще осуществляется ядерное горение, размер определенным образом зависит от массы. Расстояние же между компонентами двойной системы должно быть достаточно большим, чтобы вещество маломассивной звезды-компаньона падало на объект, излучающий рентгеновские лучи со скоростью аккреции [оцениваемой из наблюдений].

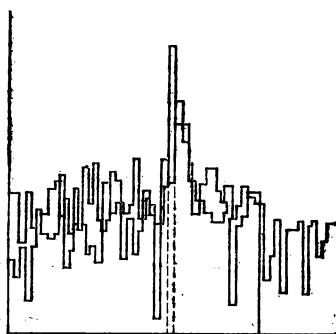
Чтобы более четко представить ограничения, накладываемые на размеры орбит двойной системы, вообразим для начала, что маломассивная звезда, где еще происходит ядерное горение, находится на таком большом расстоянии от нейтронной звезды, которое исключает перенос массы от звезды к звезде, и, следовательно, рентгеновское излучение. Если обычная звезда, т. е. в которой еще происходит ядерное горение, движется более близко от нейтронной звезды, гравитационное поле последней сильнее притягивает вещество обычной звезды, и та начинает вздуваться в направлении нейтронной звезды. На некотором расстоянии, которое определяется массами обеих звезд, вещество обычной звезды, находящееся на поверхности, ближайшей к нейтронной звезде, притягивается к нейтронной звезде сильнее, чем к самой собственной. В результате вещество начинает перетекать с поверхности обычной звезды на нейтронную звезду. Это расстояние и используется в качестве приближенного значения [радиуса орбиты] при вычислении вероятности рентгеновских затмений.

Плоскость орбиты двойной системы может образовывать любой угол с лучом зрения земного наблюдателя. Для вычисления вероятности затмения рентгеновского источника в такой произвольно ориентированной системе следует принять какие-либо значения для масс обеих звезд. Оказалось, что при массе порядка одной солнечной для нейтронной звезды и примерно 0,1 солнечной для обычной звезды вероятность наблюдения с

Земли затмения рентгеновского источника в таких системах равняется около 0,2. Для более массивных звезд-компаньонов вероятность еще больше. Поскольку есть все основания считать, что масса ряда звезд-компаньонов больше 0,1 массы Солнца, можно ожидать рентгеновских затмений по крайней мере от 20% источников



Время → а)



Вверху показана возможная ориентация наблюдателя относительно аккреционного диска: 1 — аккреционный диск; 2 — рентгеновские лучи; 3 — видимый свет от аккреционного диска; 4 — источник рентгеновского излучения (нейтронная звезда); 5 — звезда-компаньон. Внизу даны профили рентгеновского сигнала от источника: а — когда наблюдатель находится в «тени» аккреционного диска, б — вне ее

класса II. Однако для всех 20 тщательно изученных источников класса II затмений вообще не наблюдалось.

Каким же образом следует объяснить этот изъян в наблюдениях?

В первую очередь тем, что аккреционные диски двойных систем с рентгеновскими источниками как класса I, так и класса II непрозрачны для рентгеновского излучения. М. Милгром указал на то, что невозможность наблюдать затмения рентгеновского излучения характерна для двойных систем с маломассивными звездами-компаньонами независимо от ориентации системы к наблюдателю. Затмения не могут наблюдаться, если звезда-компаньон слишком мала, чтобы выходить из «рентгеновской тени» от аккреционного диска (см. рис. на стр. 34). Если бы такая система ориентирована в пространстве так, что наблюдатель на Земле мог бы видеть рентгеновские лучи, выходящие из нейтронной звезды, то другая звезда не может в этом случае попасть между Землей и нейтронной звездой и не вызывает никаких затмений рентгеновского источника. С другой стороны, если система была бы ориентирована более или менее в одной плоскости с Землей, так что звезда-компаньон способна в действительности проходить между Землей и нейтронной звездой, то рентгеновские затмения все равно не могут наблюдаться, поскольку вообще не наблюдается рентгеновское излучение. В этом случае Земля тоже находилась бы в тени аккреционного диска, поглощающего рентгеновские лучи. При любых геометрических схемах наблюдение затмений рентгеновского источника невозможно.

Энергия рентгеновского излучения, поглощаемая аккреционным диском, вновь испускается на других длинах волн, в том числе и в видимом диапазоне спектра. Видимый почти «с ребра» аккреционный диск мог бы наблюдаться как слабый звездоподобный объект, но при этом не регистрировалось бы никакого рентгеновского излучения, и в этом случае мы никогда бы не узнали о принадлежности системы к рентгеновским источникам. При наблюдениях уже под небольшим углом к плоскости орбиты системы можно было бы увидеть и аккреционный диск и нейтронную звезду. Причем аккреционный диск обнаруживался бы в видимом диапазоне, а нейтронная звезда — в рентгеновском.

Видимый свет от аккреционного диска мог бы указать на геометрию системы. Если бы внезапно увеличилось бы рентгеновское излучение от такой системы, аккреционный диск «откликнулся» бы (может, через несколько секунд) стремительным увеличением излучения в видимом диапазоне. При этом имелось бы кратковременное запаздывание, поскольку кратчайшее расстояние от Земли до нейтронной звезды, испускающей рентгеновское излучение, меньше суммарной длины двух других сторон треугольника «Земля — аккреционный диск — нейтронная звезда». Запаздывающий оптический сигнал, кроме того, был бы размазан по времени, поскольку различные части диска обуславливали бы различную степень задержки. Из величины запаздывания и степени размытия оптического сигнала можно было бы получить информацию о размерах и форме аккреционного диска.

Наблюдались ли когда-нибудь такие внезапные увеличения потока рентгеновского излучения? Конечно, да, ведь эти возрастания рентгеновского излучения и есть вспышки источников типа II.

Летом 1977 г. Дж. Хоффман и я организовали первые координированные глобальные поиски вспышек на небе. Наша цель заключалась в том, чтобы одновременно наблюдать вспышки (в радио-, инфракрасном и оптическом диапазонах) с помощью инструментов, установленных как на Земле, так и на борту рентгеновской автоматической обсерватории. Наблюдения в рентгеновском диапазоне осуществлялись нашей группой из Массачусетского технологического института (МИТ) с помощью спутника «САС-3».

Проводить такие наблюдения нелегко. Они требуют использования крупных оптических телескопов в период «темного неба» (вблизи времени новолуния), поскольку аккреционные диски обладают весьма слабым свечением. Кроме того, источники вспыхивают нерегулярно, а иногда они вообще не вспыхивают в течение нескольких суток. Нелегко убедить астронома тратить ценное рабочее время крупного телескопа, ночь за ночью наблюдая звезду, которая так и не вспыхивает.

При нашей первой попытке в течение 35 сут наблюдалось 120 рентгеновских вспышек от 10 источников. Ни одна из них так и не была зарегистрирована какой-либо обсерваторией на Земле. На следующий год была

улучшена чувствительность оптических наблюдений, и 2 июня 1978 г. впервые была одновременно зарегистрирована вспышка в рентгеновском и оптическом диапазонах. Источник вспышки получил обозначение МХВ 1735—44 (буквенная аббревиатура английского «Рентгеновская вспышка МИТ»). Он отождествился со слабым оптическим объектом, выявленным в 1977 г. Дж. Макклинтоком и имеющим заурядную звездную величину 17,5. При максимуме оптической вспышки, который отставал по времени от максимума рентгеновской вспышки на несколько секунд, наблюдаемый оптический поток примерно в 2 раза превышал значение, характерное для объекта до и после вспышки.

Затем были зарегистрированы еще два рентгеновских источника, вспышки которых, как показали наблюдения, имеют оптические аналоги. Х. Педерсен особое внимание уделил наблюдению одного из этих источников, и летом 1979 г. его старания были вознаграждены. Он зарегистрировал 15 оптических вспышек от источника МХВ 1636—53, и 5 из них были одновременно зарегистрированы с помощью японского рентгеновского спутника «Хакутё» группой ученых во главе с М. Одой. (Когда наблюдались 10 остальных оптических вспышек, аппаратура «Хакутё» либо не была направлена на МХВ 1636—53, либо не могла передать данные на Землю.) Во время вспышки интенсивность видимого света от МХВ 1636—53 за несколько секунд возрастала втрое, а сам сигнал запаздывал примерно на 3,2 с по сравнению с рентгеновским сигналом. На основании этих данных можно было оценить радиус аккреционного диска, он оказался в интервале от 500 тыс. км до 1 млн. км.

Я уже подчеркивал роль рентгеновских вспышек в развитии наших представлений о природе рентгеновских источников класса II: их принадлежность двойной системе и наличие аккреционного диска вокруг нейтронной звезды. Однако следует признать, что данные наблюдений лишь косвенно поддерживают гипотезу двойной звезды. Характер спектра вспышки исключает все другие разумные гипотезы об источнике аккрецирующего вещества, который питает непрерывное рентгеновское излучение. Но нет ли более непосредственных данных о том, что рентгеновские источники класса II являются двойными системами?

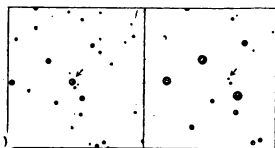
В отсутствие затмений рентгеновского источника, вероятно, наиболее непосредственным доказательством для двойной системы, которое астрономы еще могут надеяться получить, было бы наблюдение оптического излучения от маломассивной звезды-компаньона. Свет от ярких массивных звезд-компаньонов в системах с источником класса I можно зарегистрировать без особого труда. Однако весьма трудно выявить излучение от маломассивных звезд-компаньонов, так как свет от аккреционного диска обычно гораздо интенсивнее испускаемого самой звездой. Но если нельзя каким-либо путем «выключить» свет аккреционного диска (чтобы он не перекрывал свет звезды); нельзя и обнаружить маломассивную звезду-компаньон.

В принципе, если диск не очень яркий, можно отделить свет звезды от света, испускаемого аккреционным диском. В оптическом спектре звезды, в которой происходит ядерное горение, присутствует много линий поглощения, поскольку звездная атмосфера поглощает свет от звезды на определенных длинах волн. Поглощение проявляется в виде темных линий в спектре излучения звезды. Оптический спектр горячего аккреционного диска имеет совершенно другой вид: в нем присутствуют линии излучения, а не поглощения. И линии поглощения, и линии излучения образуются в результате переходов между энергетическими уровнями возбуждения атома.

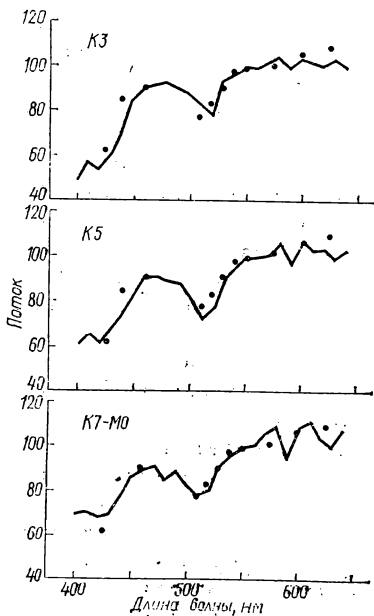
Существует несколько источников класса II, в которых свет, испускаемый аккреционным диском, временами «выключается». Они называются временными рентгеновскими источниками, или рентгеновскими Новыми, и могут внезапно объявляться на небе в качестве мощных рентгеновских источников. Однако их невозможно спутать со вспышками, так как они остаются мощными рентгеновскими источниками в течение нескольких недель, а то и месяцев, прежде чем потухнет их рентгеновское излучение. Относительно внезапное рентгеновское излучение служит сигналом для астрономов обратить внимание на временный источник. Поскольку повышение яркости рентгеновского излучения сопровождается повышением яркости ранее незаметного слабого оптического объекта, астрономам предоставляется возможность отождествить рентгеновский источник. Повышение яркости в оптическом диапазоне, вероятно, явля-

ется результатом нагрева аккреционного диска рентгеновскими лучами. В то время как рентгеновское излучение постепенно затухает, диск охлаждается и его свет ослабляется настолько, что свет от звезды-компаньона может стать преобладающим. Когда в оптическом спектре появляются темные линии поглощения, астрономы с полным основанием могут считать, что наблюдается компаньон [рентгеновского источника].

По такому сценарию были проведены наблюдения вспышки рентгеновской Новой в мае 1979 г. от рентгеновского источника Центавр X-4. Рентгеновская Новая была зарегистрирована с помощью английского спутника «Ариэль-5» Л. Калузенски и С. Холтом. Они смогли определить положение источника с точностью до нескольких угловых градусов. Вскоре специалисты по оптической астрономии обнаружили, что ничем не примечательная звезда в этой небольшой части неба внезапно существенно увеличилась



Два негативных изображения участка неба с источником Центавр X-4 (указан стрелками). Слева — фотография в синих лучах, полученная с помощью телескопа Шмидта Маунт-Паломар, когда источник был в невозмущенном состоянии. Справа — фотография, полученная с помощью 4-метрового телескопа Межамериканской обсерватории



Спектры оптического излучения от звезды компаньона рентгеновского источника Центавр X-4. В углу справа вверху каждого графика указан спектральный класс звезды, для которого характерны данный вид спектра

свой блеск, причем в ее спектре преобладали линии излучения. В течение порядка 5 недель, пока рентгеновское излучение постепенно ослабевало, звезда стала примерно в 100 раз слабее и возвратилась к своему до-вспышечному уровню по звездной величине. И тогда в ее оптическом спектре появились линии поглощения, характерные для звезды массой 0,7 солнечной, что сильно подтверждало модель маломассивной двойной системы.

Осталось теперь ответить еще на один важный вопрос, касающийся рентгеновских вспышек. Какова природа самих вспышек?

Весной 1976 г. итальянские ученые Л. Марасчи и А. Кавальери предположили, что рентгеновские вспышки вызываются неуправляемыми реакциями термоядерного синтеза на поверхности нейтронной звезды. Идею о том, что вспышки являются результатом гигантского термоядерного взрыва, независимо выдвинули также С. Уусли и Р. Таам, а также К. Хансен и Х. Ван Хорн. В 1978 г. П. Джосс опубликовал первые подробные расчеты по термоядерному взрыву на поверхности нейтронной звезды и убедительно показал, что такая модель, по всей вероятности, соответствует действительности.

Принцип действия этой модели весьма прост. Водородный газ падает на поверхность нейтронной звезды, приводя к непрерывному излучению рентгеновских лучей, обусловленному высвобождением гравитационной потенциальной энергии падающего вещества. Водород скапливается на поверхности и непрерывно превращается там в гелий в результате термоядерного синтеза. Образованный таким образом слой гелия находится под слоем водорода [продолжающего поступать на нейтронную звезду]. После того как там соберется масса примерно 10^{21} г, температура и плотность гелиевого слоя могут принять критические значения и гелий сможет синтезироваться в углерод в ходе термоядерного взрыва. Именно этот взрыв и создает вспышку рентгеновского излучения. Интервалы между вспышками зависят от скорости потока массы на нейтронную звезду и от температуры звездных недр. Для обычной скорости аккреции, порядка 10^{17} г/с, интервал между вспышками равен примерно 3 ч.

Модель такого термоядерного взрыва в ее современном варианте позволяет успешно объяснить многие на-

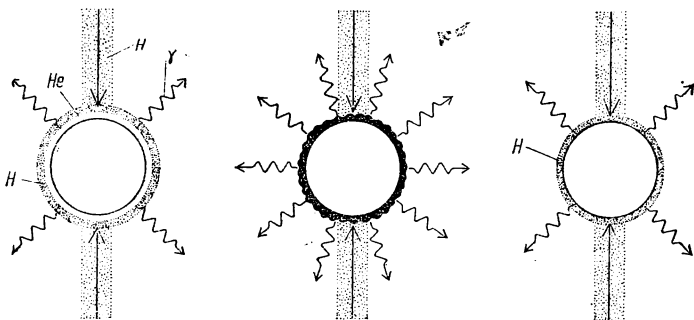
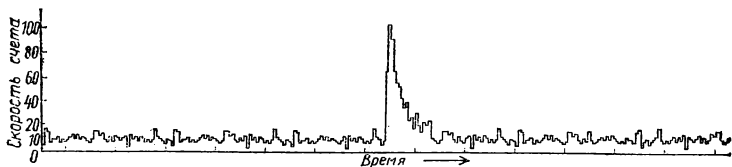


Схема возникновения вспышки рентгеновского излучения в результате термоядерного взрыва на поверхности нейтронной звезды. Вертикально к ней указан аккреционный диск, из которого поступает на звезду водород

блюдательные данные о вспышках, хотя, безусловно, не все из них. Эта модель также исключает черные дыры как источники вспышек, поскольку те не имеют поверхности, на которой падающее вещество могло бы скопиться и взорваться. Модель объясняет быстрое возрастание потока рентгеновского излучения в ходе вспышки, интервалы между вспышками, наблюдаемую температуру порядка 30 млн. К при максимуме вспышки и последующее охлаждение объекта радиусом около 10 км.

Модель также в большинстве случаев (но не во всех) согласуется с наблюдаемым отношением величины ядерной энергии, высвобождаемой при вспышках, к величине гравитационной энергии, выделяемой при аккреции вещества. Протон, т. е. ядро водорода, падающий на нейтронную звезду массой порядка одной солнечной, приобретает кинетическую энергию около 100 МэВ, которая выделяется в виде излучения в рентгеновском диапазоне. При синтезе же углерода из гелия высвобождается энергия порядка 1 МэВ на один нуклон. Следовательно, получается, что энергия, выделяемая при вспышках, должна приблизительно (при усреднении по времени) составлять 0,01 энергии, излучаемой

непрерывным потоком в рентгеновском диапазоне. Наблюдаемое отношение величин этих энергий в течение времени высокой вспышечной активности часто и равняется 0,01.

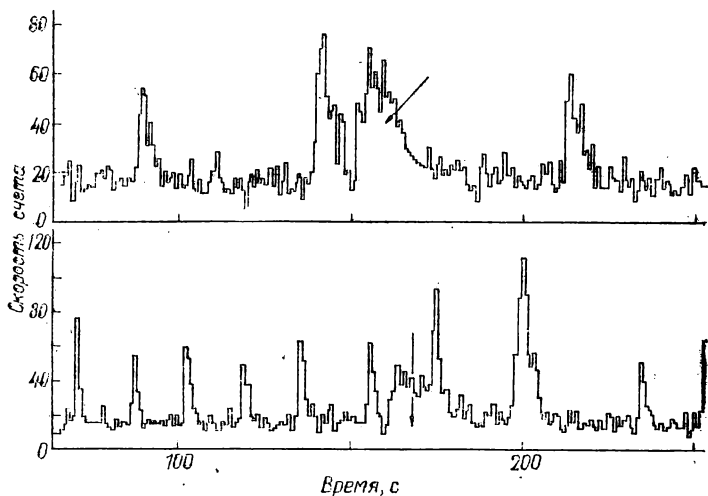
Модель термоядерного взрыва подтверждает высказывавшиеся ранее доводы в пользу того, что рентгеновские источники класса II являются нейтронными звездами. Следовательно, очевидным становится и то, что источники как класса I, так и класса II находятся в двойных системах, один из компонентов которых есть нейтронная звезда. Но почему тогда столь значительна разница между двумя классами источников? Почему, например, в источниках класса II наблюдаются только вспышки и не наблюдаются пульсации рентгеновского излучения? И наоборот, почему источники класса I только пульсируют, но не вспыхивают?

Коренным различием источников класса I и II является масса звезды-компаньона. Массивная звезда в объекте с источником класса I должна быть относительно молодой, и поэтому нейтронная звезда в системе, по-видимому, также должна быть молодой. Разумно предположить, что молодая нейтронная звезда обычно имеет сильное магнитное поле. Объект с источником класса II, как правило, образуется гораздо более старыми звездами, и магнитное поле более старой нейтронной звезды либо уже достаточно ослабло, либо ось магнитного диполя стала совпадать с осью вращения. Поскольку считается, что сильное магнитное поле представляет механизм, ответственный за концентрацию падающего вещества во вращающемся на поверхности горячее пятно, пульсации возможны только для молодых нейтронных звезд (в источниках класса I) и невозможны в старых нейтронных звездах (в источниках класса II). Сильное магнитное поле молодой нейтронной звезды (в источнике класса I) и концентрация вещества на магнитных полюсах также приводят к тому, что ядерное горение осуществляется там постоянно, а не в виде вспышек. Вот, вероятно, почему вспышки наблюдаются только от источников класса II, а не от источников класса I.

Модель термоядерного взрыва для рентгеновских вспышек больше не вызывает серьезных сомнений у большинства астрономов. Однако на ранней стадии ее разработки мои сотрудники и я обнаружили уникальный

источник рентгеновских вспышек, свойства которого поставили под сомнение эту модель, прежде чем она смогла стать единственно верной. Новый источник, МХВ 1730—335, испускал чередующиеся друг за другом вспышки с частотой несколько тысяч в сутки. Отдельные вспышки могли в 1000 раз отличаться друг от друга своей энергией, что выделяло их среди вспышек других источников, которые различаются своей энергией не более чем в 10 раз. Я помню свой энтузиазм по поводу модели термоядерного взрыва в феврале 1976 г., когда мне ее впервые объяснила Л. Марасчи. Однако спустя месяц, когда обнаружился быстрый «барстер»² МХВ 1730—335, я свой энтузиазм утратил. Повторяющиеся вспышки, которые воспринимались, подобно пулеметным выстрелам, не могли быть результатом термоядерных взрывов.

Хотя поначалу быстрый «барстер», как казалось, подрывал теорию, через 1,5 года он стал краеугольным камнем в наших представлениях о рентгеновских вспышках. В конце 1977 г. Дж. Хэффман, Г. Маршалл (один



Профили вспышек быстрого «барстера» (стрелками указаны «особые» вспышки)

² Слово «барстер» в переводе с английского означает «объект, испускающий вспышки». Это название стало общепринятым для источников вспышек рентгеновского излучения. — *Сост.*

из моих аспирантов) и я обнаружили «особый» тип вспышек от быстрого «барстера». Они совершенно отличались от «быстрых» вспышек, но выглядели похожими на вспышки других рентгеновских источников. «Особые» вспышки испускались каждые 3—4 ч, их длительность и мощность были почти одинаковыми в ходе наших наблюдений, а интенсивность рентгеновского излучения спадала быстрее при высоких энергиях, чем при низких.

Теперь, когда от быстрого «барстера» наблюдалось два типа вспышек, идея термоядерного взрыва вновь обретала силу. Она натолкнула на мысль, что «особые» вспышки вызывались термоядерными взрывами, а «быстрые» вспышки — неустойчивостями в аккреционном потоке газа.

Такая неустойчивость подозревалась еще во время обнаружения быстрого «барстера». По какой-нибудь причине (может, вследствие структуры окружающего магнитного поля) вещество падает на быстрый «барстер» в виде отдельных «капель», а не непрерывным потоком. Иначе говоря, вещество, которое непрерывно скапливается над поверхностью звезды, внезапно находит путь к звезде в некоторой критической точке; количество же вещества, содержащегося в каждой такой «капле», определяется интервалом времени, необходи-

мым для достижения им другой критической точки. Капающий водопроводный кран действует подобным образом. Система такого типа называется релаксационным генератором.

Для проверки нашей гипотезы мы измерили энергию, высвобождаемую при «быстрых» вспышках, и сравнили ее с энергией, выделяемой при «особых» вспышках. Если бы «особые» вспышки вызывались термоядерными взры-

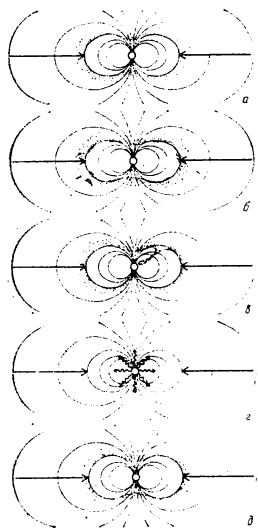


Схема капельной модели возникновения вспышек: *а* — начальная стадия аккреции; *б* — возникновение неустойчивости; *в* — проникновение вещества через критическую точку к поверхности звезды; *г* — термоядерный взрыв; *д* — новая стадия аккреции

вами, а «быстрые» — «капельным» механизмом (а не обычной непрерывной аккрецией), то измеренное нами отношение энергий составило бы примерно 0,01. Полученное нами отношение равнялось около 0,0085, что превосходно подтверждало модель.

Таким образом, оказалось, что «особые» вспышки особенны только для быстрого «барстера». Но они были обычными рентгеновскими вспышками, испускаемыми и всеми другими рентгеновскими источниками вспышек. Это открытие, сделанное в конце 1977 г., стало поворотным пунктом в наших представлениях о рентгеновских вспышках. Даже до того, как П. Джосс опубликовал свои расчеты, оно выдвинуло модель термоядерного взрыва на ведущие позиции.

Хотя большая часть загадки источников рентгеновских вспышек разрешилась, остался еще ряд вопросов. Какова, например, природа аккреционной неустойчивости, приводящей к необычному характеру вспышек быстрого «барстера»? Почему такой характер не свойствен излучению других рентгеновских источников? Почему быстрый «барстер» периодически перестает вспыхивать, а затем вновь становится активным через примерный период 0,5 года? Как образованы двойные системы с источником класса II? Дж. Кларк объясняет происхождение таких систем, выявленных в шаровых скоплениях, результатом близкого сближения нейтронной звезды со звездой, в которой еще осуществляется ядерное горение. Однако многие источники класса II не находятся в шаровых скоплениях. Как же тогда образовались эти двойные системы?

Несмотря на оставшиеся вопросы, мы значительно продвинулись в наших представлениях о рентгеновских источниках класса II. Всего лишь 6 лет назад эти источники были полностью загадочными, и нам были неизвестны рентгеновские вспышки. Теперь мы ясно представляем, каковы источники этих вспышек и как эти вспышки возникают. Вспышки сами, в свою очередь, дают новый и мощный инструмент для изучения свойств нейтронных звезд, их аккреционных дисков и маломассивных двойных систем, в которых они часто обнаруживаются.

Существует опасение, что работы в этом новом направлении астрономических исследований приостановят-

ся в 80-е годы. В настоящее время только японский рентгеновский спутник «Хакутё» может проводить наблюдения рентгеновских вспышек координированно с наземными наблюдениями. Но этот спутник, вероятно, сможет работать лишь еще несколько лет. Ожидается, правда, что западноевропейская организация космических исследований ЕСА запустит в 1983 г. спутник с рентгеновской аппаратурой «Экзосат». Возможно, и в США все же одобряют разработанный проект спутника «ХТЕ» с рентгеновской аппаратурой, идеально подходящей для исследований большого числа сильно переменных явлений. (20 февраля 1983 г. В Японии запущен рентгеновский ИСЗ «АСТРО-Би». — *Сост.*)

Р. Уильямс

ОБОЛОЧКИ НОВЫХ¹

Большинство звезд расходуют свои запасы ядерного горючего с удивительно постоянной скоростью — в течение нескольких сот миллионов или миллиардов лет. Однако примерно раз в 10 лет одна из звезд в нашем районе Галактики внезапно в 10^5 — 10^6 раз увеличивает свой блеск и в течение непродолжительного времени соперничает с ярчайшими звездами на небе — она становится Новой. Самая последняя яркая Новая появилась в конце лета 1975 г. в созвездии Лебедя².

Полное количество Новых в нашей Галактике, кото-

¹ Robert E. Williams. The Shells of Novas. Copyright © 1981 by Scientific American, inc.

² На последней странице под номером 3 представлена фотография Новой Геркулеса, когда ее блеск достиг звездной величины +1,4. До вспышки яркость ее соответствовала 14-й звездной величине, т. е. звезда увеличила свой блеск в 100 000 раз. Под номером 4 помещен снимок Новой Орла 1918, самой яркой из наблюдавшихся Новых за последние 100 лет. В максимуме блеска она достигла звездной величины —1,1 и в течение нескольких суток стала второй по яркости звездой на небе. За время вспышки блеск звезды увеличился на 12 звездных величин, т. е. в 60 000 раз. Под номером 5 дан снимок Новой Лебедя 1975, полученный 31 августа 1975 г., когда она достигла максимальной звездной величины +1,8. До вспышки звезда была столь слабой, что не обнаруживалась на фотографиях. Поскольку в этом случае ее блеск до вспышки должен быть не ниже 20-й звездной величины, то она обладает рекордным среди известных Новых увеличением яркости во время вспышки: ее блеск должен был увеличиться по крайней мере в 19 000 000 раз!

рая насчитывает более 100 миллиардов звезд в пределах галактического диска диаметром 80 000 св. лет, установить сложно из-за наличия межзвездной пыли. Если бы пыль отсутствовала, то самые яркие из Новых теоретически еще могли бы быть доступными для наблюдений невооруженным глазом, находясь на расстоянии 25 000 св. лет. Однако в области Галактики, сильно экранированной пылью, типичная Новая может вспыхнуть всего на расстоянии 1000 св. лет от нас и оказаться при этом незамеченной. Лучшая оценка о количестве Новых в Галактике получена при изучении их вспышек в ближайших спиральных галактиках. Эти обзоры показали также, что можно различать два качественно различных типа звездных вспышек — Новые и Сверхновые. В обычной галактике каждый год вспыхивает около 25 Новых, но лишь примерно 2—3 Сверхновые — в столетие. Ни одной Сверхновой в нашей Галактике не наблюдалось с 1604 г. Сверхновые в десятки тысяч раз ярче и во столько же раз больше выделяют энергии, чем Новые.

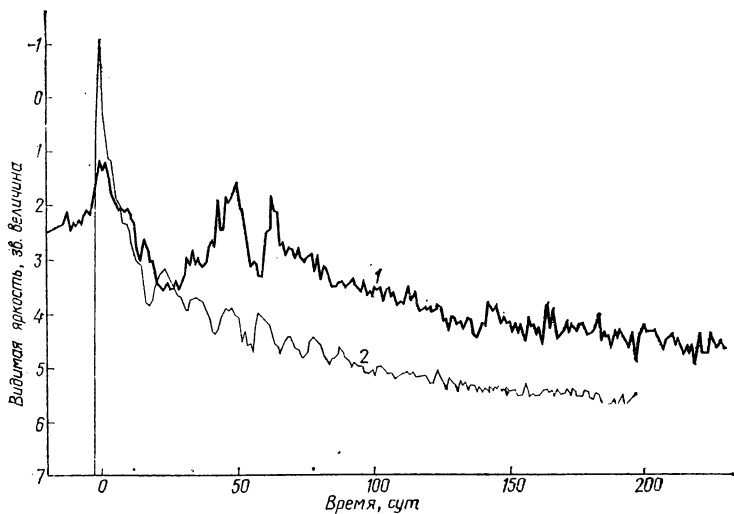
Оба этих феномена совершенно отличаются друг от друга и ничем не связаны между собой. Сверхновые — это краткая конечная стадия эволюции массивной звезды. При достаточно высоких температурах и давлениях в центре звезды ядра тяжелых элементов претерпевают цикл реакций, в результате которых из звезды удаляется энергия. Это приводит к быстрому сжатию звездного вещества, сменяющемуся затем взрывным обратным процессом выбрасывания вещества в окружающее пространство. В итоге звезда разрушается, за исключением очень плотного ее ядра, которое после всего этого остается в виде нейтронной звезды. Новые, в свою очередь, не относятся к какой-либо стадии эволюции обычных звезд. Они представляют собой эпизодический случай термоядерного процесса, протекающего (вероятно, периодически) на поверхности белого карлика, входящего в очень тесно связанную гравитационно систему с гораздо более крупной расширяющейся холодной звездой.

Несмотря на эти основные отличия Новые и Сверхновые имеют и общее свойство — обе выбрасывают газовую оболочку в окружающее пространство. Остатки взрывов Сверхновых в виде волокнистых туманностей могут существовать в течение столетий. Крабовидная туманность в созвездии Тельца является остатком Сверх-

новой, которая вспыхнула в 1054 г. Оболочки, сбрасываемые Новыми, меньше в размерах и массе, чем остатки Сверхновых, и обычно наблюдаются только у более близких к нам и более ярких Новых. Недавние спектроскопические исследования оболочек Новых предоставили возможность определить типы термоядерных реакций, лежащих в основе взрывного процесса высвобождения энергии в Новой. Эти работы показали, что оболочки Новых богаче тяжелыми элементами (например, углеродом, азотом и кислородом), чем обычные звезды.

Время, требующееся для достижения максимума блеска, может у Новых сильно различаться — от двух суток до нескольких месяцев. График изменения визуальной яркости Новой от времени называется кривой блеска Новой. По своим кривым блеска Новые различаются на два основных класса — быстрых и медленных. Быстрые Новые обычно увеличивают блеск более чем в 100 000 раз за время всего нескольких суток. Меньше недели максимум их блеска сохраняется, а затем постоянно снижается. Первоначально снижение блеска быстрой Новой идет довольно быстро, уменьшаясь на одну звездную величину (в 2,512 раз) каждые двое суток. Медленные Новые достигают своего максимума блеска более постепенно и неустойчиво, чем быстрые, а снижение их блеска гораздо медленнее. Кроме того, увеличение их яркости происходит на меньшую величину. Однако полная энергия, высвобождаемая во время вспышки Новой, примерно одинакова для обоих этих классов. Во всяком случае Новые, как смогли определить, в конечном счете возвращаются к той же самой величине блеска, которой они обладали до вспышки.

Вначале Новые называют по созвездию, в котором они наблюдались, вместе с годом, когда произошла вспышка. Таким образом, Новая в созвездии Лебедя, которая в течение нескольких ночей 1975 г. была такой же яркой, как и ближайшая к ней звезда первой звездной величины Денеб, была названа Новой Лебедя 1975. Позже Новой дается официальное наименование, состоящее из названия соответствующего созвездия с приставленными спереди несколькими буквами или буквы V (от английского variable, что в переводе означает «переменная») и цифрами, обозначающими порядок обнаружения переменных звезд в этом скоплении. Отсюда Новая



Кривые блеска различных Новых: 1 — медленная Новая Живописца 1925; 2 — быстрая Новая Орла 1918

Лебедя 1975 теперь официально называется V 1500 Лебедя, а другая хорошо известная яркая Новая Геркулеса 1934 обозначена как DQ Геркулеса.

Наши современные представления о Новых основываются на сделанном в 1954 г. М. Уокером открытии того, что DQ Геркулеса является затменной переменной звездой, или двойной системой звезд. М. Уокер исследовал интенсивность светового излучения DQ Геркулеса с целью определить природу мерцания, свойственного многим старым Новым, когда обнаружил, что блеск звезды значительно уменьшился в течение почти 1 ч, а затем вернулся к первоначальному значению. Дальнейшие наблюдения установили, что подобный характер переменности повторяется каждые 4 ч 39 мин; несомненно, звезда затмевалась невидимым компаньоном, обращающимся по орбите вокруг звезды. Обнаружение того, что DQ Геркулеса на самом деле является двойной звездной системой, имеющей самый короткий период обращения из всех известных в то время, позволило установить некоторые фундаментальные свойства двух звезд, входящих в систему.

Один из известных законов Кеплера, который можно вывести из ньютоновых законов движения и тяготения,

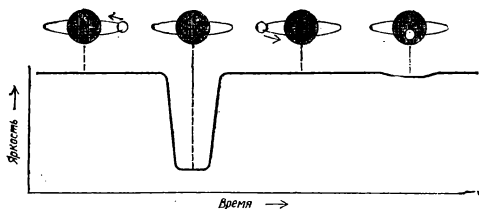


Схема затмения излучения звезды компаньоном-звездой в двойной звездной системе

утверждает, что расстояние между любыми двумя гравитационно связанными объектами, обращающимися по орбитам друг около друга, можно вычислить из их масс и орбитального периода. Массы большинства звезд заключены в довольно узком интервале — примерно от 0,1 до 10 масс Солнца, так что расстояние между двумя телами в системе DQ Геркулеса можно оценить довольно точно, даже не зная конкретных масс двух звезд. Из очень короткого орбитального периода системы с очевидностью вытекает, что две звезды должны находиться очень близко друг к другу, разделяясь расстоянием, немного большим диаметра типичной звезды.

Этот результат произвел впечатление на астрономов. Является ли простым совпадением то, что Новая 1934 г. входит в состав очень тесной двойной системы? Или же вспышка как-нибудь связана с тем, что две звезды находятся в пространстве в непосредственной близости друг с другом?

Были предприняты попытки обнаружить возможные звездные компаньоны и у других известных Новых. Поскольку все известные нам Новые далеки от нас настолько, что ни одна двойная звездная система на таком удалении не может непосредственно быть разрешена на отдельные звезды, то воспользовались косвенными методами. Существование двойных систем можно выяснить двумя путями: при наличии затмений одной звезды другой, как в случае DQ Геркулеса, или при доплеровском смещении спектральных линий звезды, вызываемом ее движением около компаньона в системе.

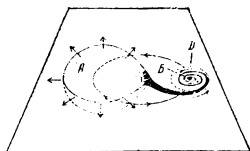
Р. Крафт изучил 10 старых Новых и нашел, что 7 из них явно показывают на присутствие еще необнаруженного компаньона-звезды. В большинстве случаев, когда смог быть определен орбитальный период двойной си-

стемы, он оказывался менее суток. Наблюдения Р. Крафта не выявили бы двойную систему, если плоскость ее орбиты была бы почти перпендикулярна лучу зрения наблюдателя, и поэтому весьма логично предположить, что все старые Новые, рассмотренные Р. Крафтом, входят в состав двойных систем, а расстояния, на которые разделены две звезды в системе, в общем, сравнимы с диаметром обычных звезд. Во всяком случае полученные результаты дали сильный довод в пользу того, что феномен Новой непосредственно связан с существованием очень тесных двойных звездных систем.

В случае обнаружения затменной системы при изучении старых Новых можно получить дополнительную информацию о природе входящих в них звезд. Если периодические доплеровские смещения спектральных линий позволяют оценить орбитальные скорости звезд, то можно рассчитать и их размеры, определяя продолжительность затмений. Кроме того, можно установить относительные светимости двух звезд, если сравнить светимость системы при затмении звезды компаньоном со светимостью в отсутствие затмения. Этот метод анализа систем старых Новых привел к еще одному интересному и неожиданному результату: одна из звезд в двойной системе с Новой, как правило, имеет довольно большую температуру и малые размеры. Действительно, компаньоны, имеющие меньшие размеры в такой системе, меньше любой обычной звезды. Они могут быть только очень плотными белыми карликами, т. е. звездами массой в $\frac{2}{3}$ массы Солнца и размером примерно с Землю.

Белый карлик — это звезда, находящаяся на самом конце своего эволюционного пути. В принципе все имеющееся у нее ядерное горючее из водорода и гелия уже превратилось в углерод и кислород в результате термоядерного синтеза, и она больше не может производить энергии. В отсутствие энергетического источника, который предотвращает взаимное гравитационное притяжение всех ее составляющих атомов, белый карлик сжимается до чрезвычайно плотной, компактной конфигурации, в которой вещество больше уже не может сжиматься. Очень плотное вещество в такой звезде, находящееся с большой вероятностью в твердом состоянии, а не в виде обычного газа, имеет свойства так называемого вырожденного газа. Несжимаемость вырожденного газа пре-

Схема перетекания вещества в двойной системе: А — звезда-компаньон; В — белый карлик; Д — аккреционный диск



пятствует дальнейшему сжатию звезды³, что, собственно, и приводит к концу ее эволюции. Обычно белый карлик медленно остывает в течение нескольких миллиардов лет и в конце концов пропадает на темном фоне.

Открытие того, что большинство Новых, видимо, являются членами двойных систем, в которых один из компонентов есть белый карлик, привело к возможному объяснению вспышек Новых. Основываясь на идеи Э. Шацмана и Л. Местеля, Р. Крафт предположил, что вспышки Новых вызываются переносом вещества от обычной звезды в двойной системе к вырожденному компаньону — белому карлику. Из-за своей высокой плотности белый карлик имеет очень сильное гравитационное поле, и газ, падающий (аккрецирующий) на его поверхность, ускоряется до очень высоких скоростей. Поэтому столкновение вещества с поверхностью белого карлика нагревает ее до чрезвычайно высоких температур. В конечном счете температура становится столь высокой, что на поверхности карлика начинаются термоядерные реакции, приводящие к бурному высвобождению энергии.

Это интенсивное взрывоподобное высвобождение энергии является следствием того, что термоядерные реакции на поверхности белого карлика протекают в вырожденном газе. В обычном газе такого происходить не может, поскольку газ с увеличением температуры будет расширяться. А при расширении газа его температура падает, и вместе с температурой падает интенсивность термоядерных реакций, которая зависит от температуры. Благодаря этому эффекту все обычные звезды излучают энергию на устойчивом уровне в течение нескольких миллиардов лет.

Вырожденное же вещество вследствие своей несжи-

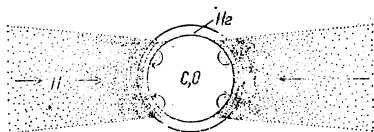
³ Дальнейшему сжатию препятствует давление вырожденного газа, имеющее квантово-механическую природу. С этого момента ее состояние не зависит от температуры, в результате чего звезда и не расширяется при ее увеличении. — *Сост.*

маемости не расширяется при нагреве. Поэтому при протекании термоядерных реакций температура вещества постоянно увеличивается, и в результате термоядерные реакции происходят с еще большей интенсивностью. От этого газ нагревается еще больше, процесс становится неуправляемым, что приводит к неустойчивому (или неустойчивому) росту количества термоядерных реакций. Быстро увеличивается выделение энергии, достигая в апогее огромной величины при термоядерном взрыве.

Перенос газа от обычной звезды на соседний с ней выродившийся компактный компаньон свойствен не только Новым. Подобный процесс действует и в рентгеновских звездах — двойных системах, в которых, как полагают, компактным объектом является не белый карлик, а нейтронная звезда (или черная дыра). Вещество в нейтронной звезде еще больше уплотнено (а в черной дыре и до бесконечности «уплотнено»), чем вещество в белом карлике. В результате газ, движущийся по спиралям в аккреционном диске к компактному объекту, ускоряется до чрезвычайно высокой скорости. Из-за повышенной кинетической энергии, приобретаемой газом, испускаемое излучение приходится в основном на рентгеновский, а не на оптический диапазон.

За последнее десятилетие большинство теоретических работ, посвященных Новым, касались проверки предположения о том, что вспышка Новой связана с термоядерным взрывом на поверхности белого карлика в тесной двойной системе. [В США] наибольший вклад в этом направлении внесли С. Старфилд, Дж. Трурэн и У. Спарк. [В частности], результаты их подробных расчетов, касающихся феномена Новой; в общем, согласуются с рядом основных данных о вспышках Новых. На основании работ этих и других ученых можно представить себе следующую картину.

Аккреция газа на белый карлик представляет собой непрерывный процесс вследствие стационарного расширения внешних слоев звезды-компаньона по мере того, как она в ходе своей эволюции становится красным гигантом. Газ, образующий дискообразную конфигурацию в плоскости орбит звезд, в значительной степени состоит из водорода. Когда частицы газа, двигаясь по спирали, падают с высокой скоростью на поверхность белого карлика, они смешиваются там с веществом внешних слоев карлика, которое большей частью состоит из гелия, мо-



Схематический разрез аккреционного диска, где указано движение водородного газа (H) к гелиевой поверхностной оболочке (He) белого карлика, недра которого обогащены углеродом (C) и кислородом (O)

жет быть, с примесью углерода и кислорода, образовавшихся в недрах белого карлика.

Обычно белые карлики испытывают недостаток в водороде, поскольку тот уже превратился в более тяжелые элементы (гелий, углерод и кислород) в результате термоядерных реакций, осуществ-

лявшихся ранее в ходе звездной эволюции. Скапливание свежего запаса водорода на поверхности карлика имеет важное значение, так как водород благодаря несложному строению ядер (состоящих из одного протона) представляет собой химический элемент, весьма легко вступающий в ядерные реакции с выделением энергии. Именно добавление поступающих ядер водорода к ядрам более тяжелых элементов, уже присутствующих в белом карлике, позволяет начаться новому циклу термоядерных реакций. Для инициирования реакций термоядерного синтеза требуется температура около 20 млн. К. При такой температуре отдельные ядра приобретают достаточно высокие скорости, чтобы преодолеть электростатическое отталкивание, оказываемое им положительными зарядами ядер, давая возможность сталкиваться, синтезироваться и выделять энергию.

Необходимая температура достигается в результате падения газа, движущегося по спиральям с высокой скоростью, на поверхность белого карлика. Время, требующееся, чтобы температура повысилась до уровня, достаточного для начала термоядерного синтеза, зависит от нескольких факторов (в том числе и от скорости, с которой расширяющийся компаньон-звезда питает газом аккреционный диск), но обычно оно порядка нескольких десятков тысяч лет.

В реакции синтеза протон захватывается ядрами более тяжелых элементов. Ядра, образующиеся в результате синтеза, тут же начинают распадаться со скоростью, зависящей от характерных для них периодов полураспада. В тех реакциях, которые, как полагают, происходят на поверхности белых карликов, процесс распада обыч-

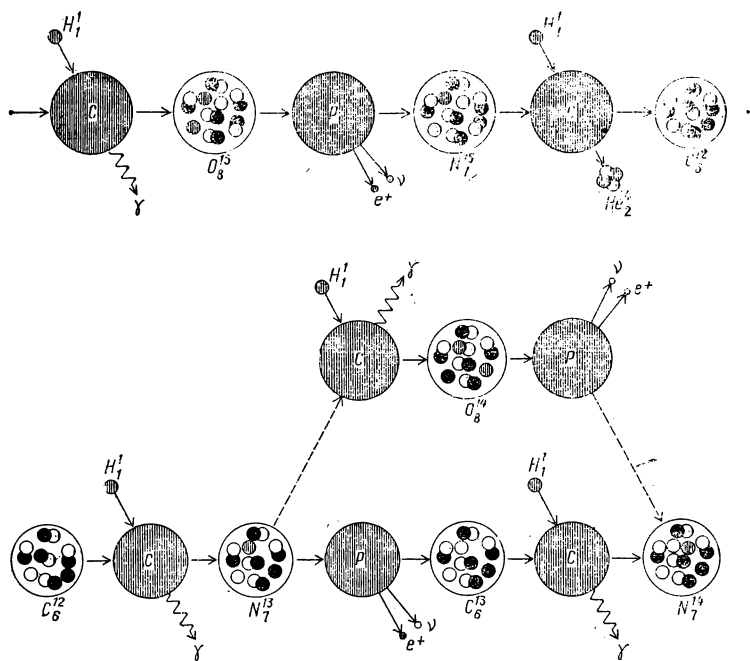


Схема углеродно-азотного цикла термоядерных реакций: *C* — синтез; *P* — распад

но связан с испусканием положительно заряженного электрона (позитрона) и нейтрино. Последовательность реакций подобна той, в ходе которой водород превращается в гелий в недрах обычных звезд, если они более массивны, чем Солнце. Эта последовательность столкновений ядер, которая вызывает полное превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия, затрагивает в качестве катализирующих ядра углерода, азота и кислорода, и поэтому называется углеродно-азотным циклом.

Расчеты, выполненные С. Старфилдом, Дж. Трурэнном и У. Спарксом, показали, что термоядерные реакции углеродно-азотного цикла на поверхности белого карлика начинаются тогда, когда со временем там выпадет достаточное количество водорода. Расчеты также говорят о том, что данное условие, надо предполагать, свойственно тесным двойным системам, причем начавшиеся в вырожденном поверхностном веществе термоядерные реакции приводят к взрывному процессу. Не-

которые параметры этих теоретических моделей хорошо согласуются с наблюдаемыми свойствами Новых, такими, как форма кривых блеска и значение полной выделяемой энергии. Расчеты также указывают, что одним из наиболее важных параметров, обуславливающих характеристики вспышки Новой, является относительное содержание (по сравнению с содержанием водорода) углерода, азота и кислорода. Вырожденное вещество, обогащенное тяжелыми элементами, выделяет энергию гораздо быстрее и в большем количестве, чем вещество со значительно меньшим содержанием этих элементов. Фактически модели предполагают, что одним из основных различий между быстрыми и медленными Новыми является химический состав вещества на поверхности белого карлика.

Согласно теории, если суммарное содержание углерода, азота и кислорода примерно в 100 раз больше, чем в обычных звездах типа Солнца, т. е. равно 1% (относительно содержания водорода), то термоядерные реакции в вырожденном газе протекают настолько стремительно, что температура поверхности быстро достигает 100 млн. К, и в течение нескольких минут происходит взрывоподобное выделение энергии. Вспышка излучения и корпускулярного потока частиц охватывает всю поверхность белого карлика. За несколько часов значительная часть внешнего его слоя, подвергавшегося аккреции, выбрасывается в окружающее пространство, и звезда быстро увеличивается в блеске, почти так же, как это происходит с быстрой Новой. И наоборот, данная модель предсказывает, что, если вырожденные поверхностные слои белого карлика содержат углерода, азота и кислорода не больше, чем обычные звезды, неуправляемый термоядерный процесс охватывает больший период времени. Это и есть случай вспышки медленной Новой.

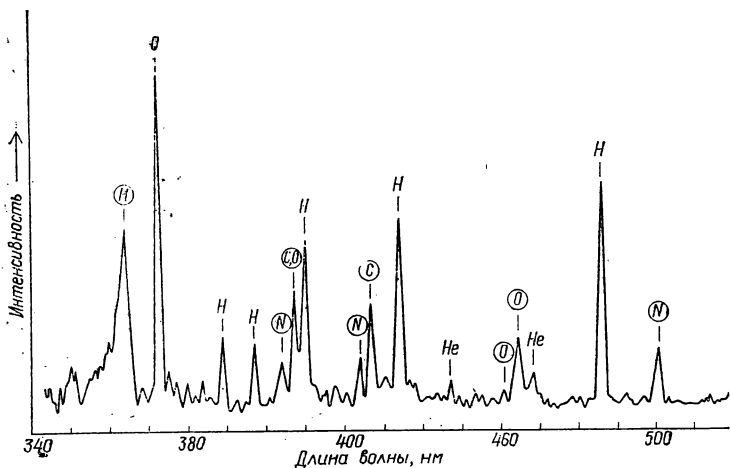
То, что, согласно теории, разница в химическом составе может в значительной степени обуславливать наличие различных классов вспышки Новой, дает удобный случай проверить справедливость теоретических моделей и предсказываемой ими основной схемы вспышки Новой. Может быть, чтобы самым непосредственным образом установить состав газа на поверхности белого карлика, достаточно изучить газовые оболочки, которые сбрасываются при вспышках Новых. После того как они

выбрасываются в пространство, на них уже не сказывается активность двойной системы с Новой. Следовательно, оболочки должны характеризоваться условиями, которые привели к их образованию.

Спектры Новых во время вспышки всегда указывают на то, что вещество было выброшено с большой скоростью из системы с Новой. Сброшенные оболочки состоят из значительной части вещества, которое перетекало на белый карлик (оно составляет около 0,01% его массы) от его большего компаньона. Вещество, «сдуваемое» в окружающее пространство со скоростью около 1000 км/с, образует расширяющуюся оболочку около двойной системы. Такие оболочки сравнительно быстро распадаются (диссипируют) при своем расширении, полностью исчезая из поля зрения еще до того, как стать вполне большими, чтобы их можно было бы наблюдать. Однако оболочки, сброшенные некоторыми из более близких к нам Новых, были все же обнаружены.

Мои коллеги и я осуществили на Стюардской обсерватории Аризонского университета программу поиска и изучения оболочек старых Новых. Согласно теоретической модели, у быстрых Новых они должны быть обогащены углеродом, азотом и кислородом в отличие от оболочек вокруг медленных Новых. Состав оболочки и действующие там физические условия можно определить, исследуя их спектры. В спектре такого разреженного газа, как в оболочке Новой, имеются яркие линии, называемые эмиссионными. В зависимости от состава, плотности и температуры газа он излучает только на вполне определенных длинах волн. Поэтому измерив относительную интенсивность эмиссионных линий на различных длинах волн, можно получить конкретную информацию о содержании химических элементов и температуре оболочки.

Первой оболочкой, которую мы проанализировали спектрально, было симметричное образование около DQ Геркулеса — медленной Новой, вспыхнувшей в 1934 г. Обнаружилось, что этот спектр, полученный с помощью 2,3-метрового телескопа Стюардской обсерватории, совершенно отличается от спектров всех других известных газовых туманностей. Спектры эмиссионных газовых облаков, таких, как Большая туманность в созвездии Ориона, совершенно схожи друг с другом. Туман-



Спектр оболочки DQ Геркулеса, полученный с помощью 2,3-метрового телескопа Стюардской обсерватории. В кружочках указаны линии элементов, не наблюдаемых в газовых туманностях

ности высвечивают энергию, которую они получают от находящихся рядом горячих звезд. Излучение горячих звезд в основном приходится на ультрафиолетовый диапазон спектра, и когда оно с высокой энергией распространяется вокруг звезды, то ионизует газ, т. е. «сдирает» электроны у его атомов. При этом газ нагревается примерно до температуры 10 000 К, а столкновения между ионами и свободными электронами приводят к излучению энергии в эмиссионных линиях, характерных для спектра туманностей [поэтому их и называют эмиссионными].

Спектр оболочки DQ Геркулеса совершенно отличается от этого спектра: большинства его самых сильных линий нет в спектрах эмиссионных туманностей. Загадка происхождения их излучения в оболочке Новой разрешилась, лишь когда было выяснено, что одна из этих спектральных линий, излучаемая водородом, соответствует значительно более холодному газу, чем находящийся в эмиссионных туманностях. Температура газа в оболочке Новой должна быть около 500 К. Это объяснило, почему многие из спектральных линий, свойственных эмиссионным туманностям, в свою очередь, не обнаруживаются в спектре оболочки. После того как эмиссионные линии оболочки Новой были, наконец, отожде-

ствлены, оказалось, что они соответствуют излучению ионов водорода, гелия, углерода, азота и кислорода. Это вновь привело к недоумению, ведь для ионизации атомов требуется высокая энергия, а она обычно ассоциируется с высокой температурой.

Парадоксальную ионизацию холодного газа можно объяснить, если оболочка Новой уже не находится в состоянии термодинамического равновесия [для которого характерна температура 10 000 К], но еще сохраняет следы вспышки Новой. Наблюдения Новых вблизи момента их вспышки указывают на то, что сбрасываемая ими оболочка является в сильной степени ионизованной и горячей (с температурами больше 15 000 К). Со временем поверхность белого карлика остывает настолько, что больше не испускает интенсивного ультрафиолетового излучения, первоначально нагревающего и ионизирующего оболочку. Иногда расширяющаяся оболочка черпает энергию и из других источников. Если ее расширение затрагивает область с относительно плотным межзвездным газом, то ее столкновение с ним может происходить с выделением высокой энергии. Таким столкновением можно хорошо объяснить необычный вид оболочки GK Персея — одной из ярчайших Новых, вспыхнувшей в 1901 г. и оставившей после себя самую большую и самую горячую оболочку из известных. Между тем оболочка DQ Геркулеса 1934 расширялась, как очевидно, без взаимодействия с межзвездным газом: она находится вне пределов плоскости Галактики, где располагается большая часть межзвездного газа⁴. Свободно расширяясь без какого-либо добавочного источника энергии, оболочка DQ Геркулеса, должно быть, уже постепенно охладилась. Электроны, которые в свое время были оторваны от атомов, теперь вновь захватываются обратно ионами. Однако время, необходимое для того, чтобы все электроны захватились обратно атомами, существенно превышает время, требующееся для полного падения температуры газа. В результате и получается, что оболочка сейчас уже остыла до температуры гораздо ниже первоначального значения, но большинство

⁴ На последней странице обложки под номером 1 представлен снимок оболочки Новой GK Персея. Новая быстро достигла максимума своего блеска, некоторое время соперничая с Проционом — восьмой по яркости звездой на небе. Под номером 2 дана фотография (полученная в лучах линии водорода) оболочки Новой Геркулеса 1934.

электронов еще не захвачены обратно атомами. В этом и состоит кажущийся парадокс холодного газа с сильной степенью ионизации.

Когда нами был завершен анализ спектра оболочки Новой Геркулеса (1934 г.), мы нашли, что суммарное содержание в ней углерода, азота и кислорода в 100 раз выше, чем в обычных звездах. Согласно теоретическим моделям такое содержание как раз и ожидалось бы в случае быстрой Новой. Однако DQ Геркулеса является медленной Новой, и, следовательно, результаты спектрального анализа находятся в явном противоречии с этими моделями.

Требовалось обобщить результаты, касающиеся одного единственного объекта, с новыми данными об оболочках других Новых, и с этой целью мы с Дж. Галлэджером сейчас исследуем другие бывшие Новые, оставшиеся после вспышки, возможно, протяженные и расширяющиеся оболочки. Пока завершена работа по еще двум объектам — оболочкам, окружающим медленные Новые RR Живописца (вспыхнула в 1925 г.) и Т Возничего (вспыхнула в 1891 г.). Их спектры показывают, что оболочка RR Живописца значительно обогащена гелием и азотом, а оболочка Т Возничего — гелием, азотом и кислородом. Г. Ферлэнд и Г. Шилдс провели аналогичные исследования быстрой Новой V 1500 Лебедя, вспыхнувшей в 1975 г., и показали, что ее оболочка, которая еще слишком слаба, чтобы ее можно было бы выявить на фотографии, значительно обогащена многими химическими элементами (в том числе углеродом, азотом и кислородом) по сравнению с составом обычных звезд.

Ряд других оболочек Новых (в частности, наблюдаемых в Южном полушарии) также доступен для спектрального анализа, и сейчас их химический состав анализируется. Согласно полученным пока результатам (см. таблицу) большинство оболочек Новых (быстрых и медленных) обогащены различными химическими элементами. Источник такого обогащения неизвестен, но вполне возможно, что им являются недра белого карлика, в которых, как мы знаем, много углерода и кислорода.

Наличие высокого содержания некоторых тяжелых элементов в оболочках быстрых Новых совсем не удивительно. Однако обнаружение того, что оболочки и медленных Новых DQ Геркулеса, RR Живописца и Т Воз-

Характеристики наблюдавшихся оболочек Новых *

Новая (в скобках указан год вспышки)	Максимум блеска, зв. вел.ч.	Класс	Угловые размеры оболочки, угл. с	Температура оболочки, К	Обогащенность химическими элементами
T Возничего (1891)	+4,2	медл.	20	< 3000	He, N, O
GK Персея (1901)	+0,2	быстр.	75	>25 000	N
V476 Лебеда (1920)	+2,0	»	10		
RR Живописца (1925)	+1,2	медл.	25	15 000	He, N, Ne (?)
DQ Геркулеса (1934)	+1,4	»	20	500	C, N, O
CP Кормы (1942)	+0,2	быстр.	15	< 1000	N
V533 Геркулеса (1963)	+3,0	»	5		
T Компыса (1890, 1902, 1920, 1944, 1966)	+6,6	медл.	10	~10 000	Обогащения нет

* За исключением повторной Новой T Компыса, Новые, видимо, образуют оболочки с одной общей особенностью: все они обогащены одним или более химическими элементами по сравнению с составом обычных звезд. Фотография оболочки повторной Новой T Компыса помещена на последней странице обложки под номером 6. Эта Новая, начиная с 1890 г., претерпела пять вспышек. Во время вспышки этот тип Новых увеличивает свой блеск всего лишь в 1000 раз. Только после того как Г. Бутчер, Д. Коприва и я обнаружили в 1978 г. около нес оболочки, стало ясно, что и у этих Новых также остаются достаточно протяженные оболочки.

ничего обогащены этими элементами, находится в противоречии с теоретическими расчетами. Чтобы согласовать наблюдаемое обогащение оболочек медленных Новых тяжелыми элементами с предсказаниями модели вспышки Новой в результате неуправляемого углеродно-азотного цикла, некоторые теоретики предположили, что термоядерный взрыв на белых карликах может и не всегда затрагивать реакции этого цикла.

Такое обогащение вполне объяснимо, если вспышки Новых вызываются термоядерными реакциями, в ходе которых углерод, азот, кислород и другие элементы синтезируются непосредственно из водорода и гелия (в углеродно-азотном цикле они должны присутствовать до начала реакций). Существуют, например, термоядерные реакции, в которых из трех ядер гелия (альфа-частиц) образуется углерод-12 с последующим синтезом других тяжелых элементов при захвате ими протонов. Этот процесс «трех альфа» известен как важный источник энергии в звездах красных гигантов. Вероятно, на вырожденной поверхности белых карликов имеется достаточно гелия, чтобы там эти реакции протекали, и таким образом, вероятно, что вспышки некоторых Новых могут вызываться реакциями процесса «трех альфа», а не углеродно-азотного цикла, исходными элементами которого является водород без гелия.

Еще одно свидетельство того, что подобный синтез с участием гелия происходит во время вспышек некоторых Новых, может быть, дает сравнение содержания гелия в аккреционном диске до вспышки и в оболочке, оставшейся после вспышки. Недавние исследования оболочек старых Новых показали, что гелия в них меньше количества, которое обычно должно быть свойственно газу, аккрецирующемуся на белый карлик. Разумно было бы объяснить такое уменьшение содержания гелия тем, что реакции «трех альфа», протекающие в ходе вспышки Новой, превращают гелий в углерод и другие элементы.

Несмотря на неопределенности в некоторых деталях, в настоящее время общепринято, что взрывы Новых, вероятно, вызываются термоядерными реакциями на поверхности белых карликов в тесных двойных системах. Этот процесс осуществляется благодаря перетеканию вещества от расширяющегося звездного компаньона на

белый карлик. Падающее вещество ударяется о поверхность вырожденного белого карлика с такой высокой скоростью, что нагревает ее до температуры 20 млн. К, достаточной для начала неуправляемого цикла термоядерных реакций. Теоретические модели вспышки Новых, в основе которых лежат реакции углеродно-азотного цикла, успешно объясняют большинство наблюдаемых характеристик Новых. Однако недавние данные о химическом составе оболочек старых Новых требуют пересмотреть некоторые из прежних представлений о природе вспышек. И дальнейшее изучение оболочек старых Новых необходимо не только потому, что при этом должна неизбежно появиться дополнительная информация о Новых, но и поскольку астрономы, изучая оболочки Новых, обнаружили необычное их обогащение элементами, совершенно несвойственное всем остальным известным до сих пор объектам Галактики.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОФИЗИКИ

Сборник статей (Перевод с английского)

Составитель — **Чаругин В. М.**

Переводчик — **Гузенкова Н. Д.**

Главный отраслевой редактор **Л. А. Ерлыкин**

Редактор **Е. Ю. Ермаков**

Мл. редактор **Г. И. Валюженич**

Обложка художника **Л. П. Ромасенко**

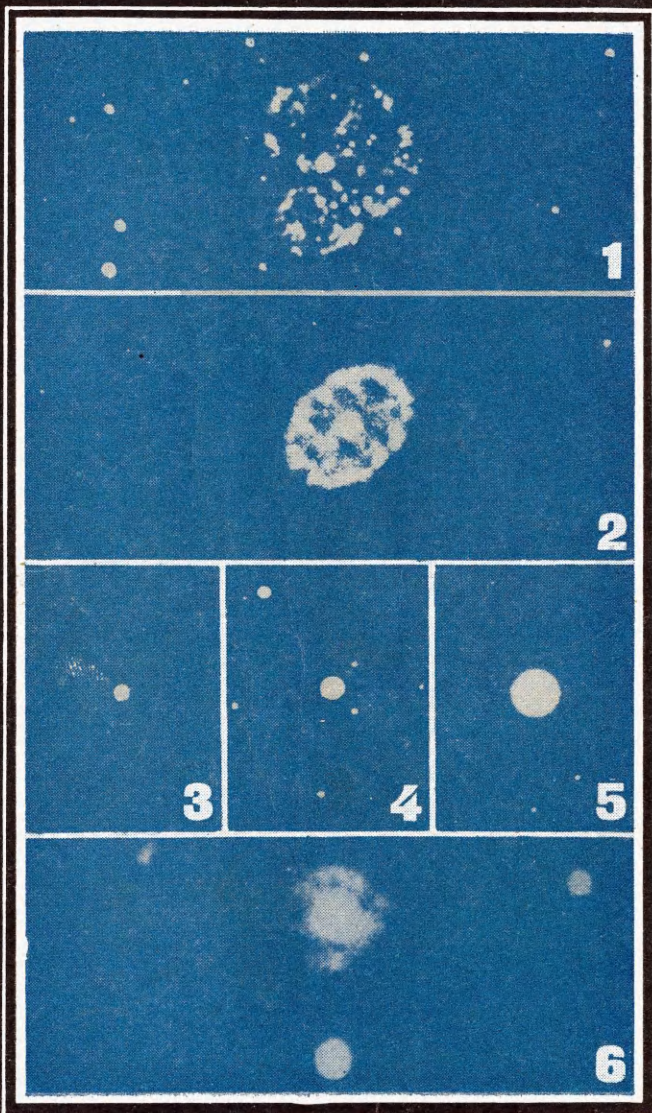
Худож. редактор **М. А. Гусева**

Техн. редактор **Н. В. Лбова**

Корректор **В. В. Каночкина**

ИБ № 5428

Сдано в набор 28.02.83. Подписано к печати 30.03.83. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 23. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,45. Тираж 28 170 экз. Заказ 400. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834205.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**