

# НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Ю. П. Псковский

Издание второе  
переработанное и дополненное  
Москва 1985

Книга Ю.П. Псковского рассказывает об объектах, изучение которых занимает в астрофизике исключительное место. С новыми и сверхновыми звездами связано большинство удивительных открытий: радиоизлучающие газовые оболочки и плерионы, пульсары, рентгеновские источники - явления, за которыми скрыты экзотические объекты Вселенной (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры).

Книга написана на основе спецкурса, читавшегося автором в ГАИШ МГУ.

---

## Оглавление

- [Введение](#)
- [Глава I. Астрономы исследуют звезды](#)
- [Глава II. Будни вселенной](#)
- [Глава III. Обыкновенные новые звезды](#)
- [Глава IV. Спектральные летописи новых звезд](#)
- [Глава V. Особые разновидности новых звезд](#)
- [Глава VI. Что скрывается за вспышками новых звезд?](#)
- [Глава VII. Сверхновые в далеких галактиках](#)
- [Глава VIII. Спектры сверхновых во время их вспышек](#)
- [Глава IX. Вспышки сверхновых в нашей Галактике](#)
- [Глава X. Реликты оболочек сверхновых](#)
- [Глава XI. Пульсары - еще один вид реликтов сверхновых](#)
- [Глава XII. Несколько трудных вопросов](#)
- [Заключение](#)
- [Литература](#)

## ВВЕДЕНИЕ

С незапамятных времен человек изучает небесные светила и свойства безграничного пространства, окружающего нашу планету. От невооруженного глаза - к телескопу, от [оптических телескопов](#) - к [радиотелескопам](#), от них - к ракетной технике - так возрастал арсенал средств исследования внешнего мира, который древние греки называли космосом, а мы теперь называем Вселенной. Чем совершеннее эти средства, тем больше раздвигалась область Вселенной, доступная исследованиям, и тем более сложным и многообразным по формам, явлениям и свойствам оказывался реальный мир.

По кругу исследуемых объектов астрономия может быть подразделена на три больших раздела: астрономия Солнечной системы, звездная астрономия и внегалактическая астрономия. В таком же порядке шел и исторический процесс развития этой науки. Сейчас активно развивается каждый из указанных разделов. Например, астрономия Солнечной системы вступила в период ракетных исследований и освоения планет и межпланетного пространства человеком. Звездная астрономия из раздела, занимавшегося главным образом звездной статистикой и классификацией физических свойств звезд, быстро превращается в дисциплину,

изучающую физическую структуру звезд и туманностей и всей нашей звездной системы (Галактики), а также их эволюцию. Особенно бурное развитие происходит во внегалактической астрономии, проблемы которой тесно связаны с современной физикой: теорией относительности, ядерной физикой и радиофизикой.

Не только звезды, Солнце и планеты привлекали издавна взоры людей к небу. В еще большей степени их поражали грандиозные небесные явления, внезапно происходившие на их глазах. Чаще всего это было появление ярких, иногда видимых даже днем светил. События такого характера часто отмечались в летописях, хрониках, жизнеописаниях выдающихся деятелей древности, а еще ранее - в древнейших памятниках человеческой культуры: в резьбе на кости и наскальных рисунках.

Сейчас мы знаем, что такими яркими феноменами были небесные явления, совершенно несравнимые по своим масштабам. Не шутка ли природы, что такие явления, как затмения Солнца Луною, падения крупных метеоритов, визиты к Солнцу комет, являющихся в сущности, даже в сравнении с любой планетой или спутником, телами ничтожной массы, - эти события производили на людей более сильное впечатление, чем крупнейшие катастрофы звездного мира - вспышки звезд, называемые новыми звездами?

Только в современную эпоху, в наши дни, астрономам становится ясным, что представляют собой новые звезды и самые яркие, самые мощные вспышки, за которыми утвердилось наименование сверхновых звезд.

Новые и сверхновые звезды занимают особое место в звездном мире. Чтобы понять их роль и действительные события, протекающие в них, нам нужно познакомиться с широким кругом астрономических проблем. Мы совершим путешествие в Галактику - этот остров звездного мира, где расположена и наша Солнечная система, выйдем за его пределы, к другим галактикам, где тоже обнаружены новые и сверхновые звезды. Мы увидим, что изучение этих удивительных объектов находится на оживленном перекрестке астрофизики, через который пролегают пути к пониманию происхождения и развития звезд, газовых туманностей, галактик, [космических лучей](#) и т. п. Мы совершим путешествие также и в прошлое, к древним рукописям, в которых иногда обнаруживаются интересные сведения о вспышках звезд, сохранившие ценность и для современной науки. Но прежде мы ознакомимся с основными астрономическими инструментами, способами наблюдения и анализа их результатов. Кое с чем - немедленно, с остальными - по пути.

## **Глава I. АСТРОНОМЫ ИССЛЕДУЮТ ЗВЕЗДЫ**

### **Звезды, изменяющие блеск**

Как сообщает древнеримский историк Плиний Старший, около 134 г. до н.э. в созвездии Скорпиона наблюдалась вспышка новой звезды. Заинтересовавшись этим, крупнейший астроном древнего мира Гиппарх решил переписать все звезды, чтобы можно было обнаружить появление новых звезд в будущем.

Знаменитый звездный каталог Гиппарха насчитывал около 500 звезд. В нем не только было описано положение звезд в созвездиях, но и указывалось, какая из них и насколько ярче или слабее соседних. Для этой цели Гиппарх распределил звезды на шесть классов по их блеску. Самые яркие получили наименование звезд 1-й величины, а самые слабые видимые глазом - 6-й. Звезды 2-й величины выглядели слабее звезд 1-й величины на столько же, на сколько звезды 2-й величины выглядели ярче звезд 3-й величины и т. д.

Впоследствии, уже в XIX в., выяснилось, что такое подразделение звезд по величинам отражает логарифмический характер восприятия силы света человеческим глазом: если блеск звезд ослабевает в геометрической прогрессии, то глаз это ощущает как ослабление светового воздействия в арифметической прогрессии, т. е. как убывание блеска на постоянную величину.

Поскольку звезды 6-й величины на пять величин слабее по блеску звезд 1-й величины, причем количество света, приходящее от них, различается в сто раз, то из этих установленных наблюдениями фактов можно вычислить, что знаменатель геометрической прогрессии, на котором Гиппарх интуитивно основал систему звездных величин, равнялся 2.512. Иными словами, мы получаем изменение на одну величину при уменьшении блеска в 2.512 раза.

Итак, блеск в звездных величинах - это выражение в логарифмической шкале меры световой энергии звезды, принимаемой глазом в единицу времени, а математически - это величина, пропорциональная логарифму освещенности.

Пусть освещенность, создаваемая первой звездой, будет  $E_1$ , а второй -  $E_2$ . Тогда разность их блеска в звездных величинах будет выражаться так называемой формулой Погсона:  $m_1 - m_2 = -2.5 \lg E_1/E_2$ , где  $m_1$  - звездная величина первой, а  $m_2$  - второй звезды.

Это простое соотношение между звездными величинами и освещенностями составляет основу звездной фотометрии, т.е. методов точного измерения блеска звезд. Теперь астрономы умеют измерять блеск звезд очень точно, и звездная величина записывается с одним или двумя знаками после запятой и отмечается значком  $m$ .

В 1610 г. Галилей впервые направил на небо телескоп. С этого момента началась триумфальная эпоха телескопической астрономии. В телескопы астрономы увидели бесчисленные множества звезд, бывших ранее неизвестными из-за слабого блеска. Выяснилась природа [Млечного Пути](#). Эта светящаяся полоса, как бы поясом охватывающая небо, оказалась состоящей из слабых звезд. Дальнейшее изучение Млечного Пути показало, что наше Солнце и все видимые простым глазом звезды тоже принадлежат этому большому облаку звезд, называемому теперь [Галактикой](#) (от греческого галактос - млечный).

Около столетия назад начали применять фотографирование небесных светил. Телескоп стал служить гигантским фотоаппаратом. Оказалось, что фотографирование сочетает ценнейшие качества, какими не обладают даже многие новейшие средства наблюдений. Оно позволяет быстро, документально точно и подробно зарегистрировать явление и окружающие его детали. Другие новые средства наблюдений: спектроскопия, фотоэлектроника, телевизионная и радиоастрономическая техника - наиболее успешно применяются совместно с фотографией. С появлением фотографии определение блеска звезд стало проводиться фотографическим способом. Однако следует отметить, что наш глаз, фотопластинки и фотоэлементы по-разному чувствительны к синим, желтым и другим лучам. Глаз, например, лучше воспринимает желтые, а фотопластинка - синие, а у фотоэлементов чувствительность к цвету излучения зависит от химического состава вещества фотоэлемента.

В результате получается, что звезды голубоватого цвета на снимках выходят более яркими по блеску, чем они оценены с помощью глаза. Чтобы учесть это различие, фотографирование звезд проводят на изопанхроматических пластинках со специальными желтыми светофильтрами, позволяющими имитировать "визуальное" цветовосприятие, характерное для глаза. Блеск большинства светил сейчас измерен в синих лучах в так называемых фотографических звездных величинах в отличие от оценок в желтых лучах (визуальные

звездные величины). Разность фотографической и визуальной звездных величин светила называется его показателем цвета. Для голубоватых звезд он отрицателен, для белых близок к нулю, т. е, блеск таких звезд в тех и других лучах одинаков. Для желтых и красных звезд показатель цвета положителен.

Нам теперь следует оговорить, что вспышки новых звезд наблюдались и до Гиппарха. Древнейшие из дошедших до нас сведений о них относятся, по-видимому, к четвертому тысячелетию до нашей эры. В древние времена внимание к необычным небесным явлениям было не случайным. Тогда существовало убеждение, что небесные явления - это знаки, предсказывающие важные события в жизни государств и людей. Наблюдение за небом носило характер важного государственного мероприятия. Заметки древних астрономов, бывших поневоле и астрологами, служат источником информации о небесных явлениях, происходивших много веков назад.

В эпоху телескопической астрономии были обнаружены разнообразные по свойствам звезды, изменяющие блеск. Они получили название переменных. Новые звезды также являются одним из классов переменных звезд. Важнейшей характеристикой любой переменной звезды является так называемая кривая блеска, т. е. график изменения ее блеска со временем. Переменные звезды по характеру причин изменности блеска подразделяются на две группы: на физические переменные и затменные переменные. У первых изменение блеска вызвано внутренними физическими причинами, вторые же являются разновидностью так называемых двойных звезд.

Физические переменные по характеру подразделяются на три группы: пульсирующие, эруптивные и взрывные. Пульсирующие звезды периодически изменяют блеск, что отражает колебания размеров их газовых шаров. Наиболее важный класс пульсирующих звезд - цефеиды, пульсация которых отличается строгой периодичностью. Наблюдениями обнаружено, что чем длиннее период изменения блеска цефеиды, тем больше мощность ее излучения. Поэтому по видимому блеску и длине периода пульсации цефеиды можно определять расстояние до нее.

К эруптивным переменным относятся звезды, прожившие малую долю своей жизни, с нерегулярными во времени и по величине изменениями блеска вследствие происходящих в них взрывных процессов умеренной силы (эрупций).

Наконец, взрывные переменные, которым посвящена эта книга, это звезды "на склоне лет", в которых происходят внезапные освобождения большого количества энергии в механической и тепловой формах (взрывы), что на некоторое время во много раз увеличивает их блеск. В порядке убывания мощности вспышки различают: сверхновые, новые, карликовые новые или переменные типа U Близнецов и новоподобные переменные. Вспышки звезд трех последних классов носят циклический характер, т. е. могут повторяться через некоторые промежутки времени.

Остановимся теперь на двойных звездах. По способу выявления их двойственности они подразделяются на визуально-двойные, спектрально-двойные и затменные переменные. И

спутник, и главная звезда в визуально-двойной системе видны в телескоп. Наблюдения за ними в течение многих лет позволяют рассчитать орбиту движения спутника около главной звезды, а по орбите определить массы обеих звезд. Это единственный прямой путь определения масс звезд в астрономии. Масса же звезды, как мы увидим, самая важная характеристика, предопределяющая все существование звезды.

Спектрально-двойные звезды образуются такими близкими парами, что присутствие двух звезд можно обнаружить только с помощью спектральных приборов. Мы встретимся с ними в главе IV, посвященной объяснению явления новых звезд.

Особую роль в современной астрономии играют так называемые тесные двойные системы, поскольку одна из звезд такой пары может перетянуть к себе значительную часть массы другой звезды. Такой "звездный каннибализм" имеет далеко идущие последствия, связанные с судьбами этих звезд, рентгеновских источников и, возможно, некоторых типов сверхновых звезд.

Наконец, затменные переменные звезды. Это - двойные звезды, которые при своем обращении по орбитам поочередно заслоняют друг друга для наблюдателя на Земле, вследствие чего мы видим систематические колебания блеска, а также часто и спектрально-двойную переменность.

## **Спектральный анализ**

С конца прошлого века важным средством исследования небесных светил стал спектральный анализ. С его помощью получены сведения о природе светил, их движении, развитии и химическом составе.

Спектральный анализ основан на свойстве света разлагаться на составляющие его цветовые лучи, т. е. в спектр. По зрительному ощущению мы различаем в спектре семь основных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, но в действительности наблюдается переход от одного цвета к другому через промежуточные оттенки. Почему цвета в спектре располагаются в строго определенном порядке, установлено исследованием природы света. Было выяснено, что свет представляет собой распространяющуюся в пространстве смесь электромагнитных колебаний, каждое из которых имеет свой период и соответствующую ему длину волны. Длины волн в спектре принято измерять в специальных единицах - ангстремах ( $\text{\AA}$ ), составляющих одну стомиллионную часть сантиметра. В видимом спектре длины волн уменьшаются от красных (около 7000  $\text{\AA}$ ) до фиолетовых (около 4000  $\text{\AA}$ ). Длины волн остальных цветов заключены между ними. К видимым лучам примыкают невидимые: короче 4000 - ультрафиолетовые и длиннее 7000 - инфракрасные (рис. 1).

**Рис. 1.** Шкала электромагнитных волн и "окна прозрачности" земной атмосферы.

Разлагают свет в спектр спектральные приборы, важнейшая деталь которых-стеклянная призма или дифракционная решетка. Свет в призме преломляется, причем лучи с большей длиной волн отклоняются от первоначального направления меньше, чем лучи с короткой длиной волны. Разделившиеся лучи попадают в зрительную трубу или фотокамеру.

Спектральные исследования небесных тел основаны на законах излучения. При разогревании тел повышается их температура. У твердых тел она представляет собой меру колебательной энергии их атомов, а у жидких и газообразных - меру кинетической энергии свободных атомов и молекул. У нагретых твердых и жидких тел излучение имеет плавный, непрерывный по длинам волн спектр. Яркость того или иного участка спектра характеризует количество излучаемой телом энергии на этой длине волны. Например, у тел, нагретых до 4000 К, наиболее ярким будет красный участок спектра, а по мере дальнейшего повышения температуры ярче его становятся последовательно другие участки спектра. У тел, нагретых выше 7000 К, излучение всего ярче в ультрафиолетовых лучах. Глаз не различает эти лучи, зато их чувствуют фотоэлементы и фотоэмульсии. Например, обычные фотопластинки воспринимают излучения с длинами волн от 2000 . Но имеются специальные сорта фотопластинок и так называемые фотоспротивления, которые воспринимают инфракрасные излучения, а еще более длинноволновые излучения измеряются термоэлементами и радиоприемными аппаратами.

Сплошные спектры излучают только твердые и жидкие нагретые тела. У газообразных тел спектры совсем иного характера. Дело в том, что нагретый газ излучает свет в узких участках спектра, имеющих вид ярких линий, называемых спектральными. Это очень важное свойство спектров газов, позволившее разносторонне исследовать газообразные небесные тела - звезды, туманности и атмосферы планет.

Почему газы излучают спектральные линии, объяснила квантовая теория излучения. Атомы поглощают и отдают (излучают) энергию строго определенными порциями (квантами). Чем больше порция, тем в более возбужденном состоянии оказывается атом, поглотивший энергию. Напомним, что сам атом, как известно из физики, представляет собой систему, состоящую из ядра и облака электронов. Процесс поглощения порции энергии состоит в том, что ее получает один самый удаленный от ядра электрон. Чем больше квант энергии, тем независимее ведет себя этот электрон по отношению к атому. Тот и другой находятся, как говорят, в возбужденном состоянии. Если квант, захваченный электроном, достаточно велик, то электрон может совсем оторваться от атома: происходит ионизация. Атом, потеряв электрон, становится положительно заряженным ионом (один раз ионизованным), а электрон - свободным. В остальных случаях энергии кванта на ионизацию атома не хватает и через считанные доли секунды атом (его электрон) отдает порцию энергии в виде излучения. Энергия может отдаваться одной большой порцией или несколькими малыми, которым соответствуют определенные длины волн, т. е. спектральные линии. Эти линии мы и исследуем в спектрах газообразных тел.

Распределение энергии излучения по непрерывному спектру и его зависимость от температуры излучающего тела устанавливаются законом Планка. График выражаемой им зависимости для нескольких температур и график распределения энергии в спектре Солнца приведены рис. 2. С законом Планка тесно связан закон Стефана, определяющий соотношение между температурой

источника и полным количеством энергии, проходящим через квадратный сантиметр его излучающей поверхности (эта величина носит название полного потока излучения). Полный поток излучения согласно закону Стефана пропорционален четвертой степени температуры излучающего тела.

**Рис. 2.** Ход интенсивности планковского (теплового) излучения по спектру для четырех температур и для излучения по спектру Солнца. Стрелками обозначены максимумы интенсивности (по вертикали - относительная интенсивность).

Но действительные закономерности излучения небесных светил более сложны, чем закон Планка. Во внутренних слоях звезд этот закон соблюдается неуклонно, но излучение оттуда к нам прямо не приходит, а поглощается атомами наружных слоев звезды. Величина же этого поглощения в сильной степени зависит от химического состава и температуры излучающих слоев звезды. И хотя распределение по спектру выходящей из звезды энергии отличается от закона Планка, мы можем по нему найти значение полного потока излучения и с помощью закона Стефана вычислить соответствующую этому потоку температуру. Эта температура носит название эффективной температуры и характеризует нагрев излучающей звездной поверхности.

Еще один важный закон связывает излучение и поглощение света газами. Если газ поместить перед более горячим источником с непрерывным спектром излучения, то на фоне яркого сплошного спектра появятся темные спектральные линии поглощения нашего газа - те же самые, что ранее были видны в спектре газа как яркие спектральные линии (закон Кирхгофа). Поэтому обнаружение тех или иных линий поглощения в спектре звезды указывает на присутствие в ней химических элементов, которым они принадлежат. Правда, отсутствие спектральных линий того или иного элемента еще не означает, что его нет в звездной оболочке. Просто в звезде могут быть такие условия, что линии элемента весьма слабы и поэтому незаметны.

С помощью закона Кирхгофа астрономы анализируют строение звездных оболочек и их химический состав.

Интенсивность спектральных линий поглощения зависит не только от числа атомов данного элемента, но и от температуры и плотности слоев звездной атмосферы, где они образуются. По интенсивности линий можно установить поэтому температуру, плотность и другие характеристики звездных атмосфер.

Очень важную роль в спектральном анализе играет эффект Доплера. Он заключается в том, что если источник излучения движется к нам, то длины волн спектральных линий в его спектре уменьшаются, а если удаляется, то увеличиваются. Смещение спектральных линий, таким образом, характеризует скорость движения источника по направлению луча зрения. Эту скорость называют лучевой скоростью светила. Выраженная в километрах в секунду, она пропорциональна смещению длины волны наблюдаемой линии по сравнению с ее длиной волны в неподвижном источнике:

где  $c$  - скорость света.

Используя эффект Доплера, астрономы измерили тысячи лучевых скоростей звезд, газовых туманностей и их деталей, внегалактических объектов, выяснили закономерности движений звезд и вращения звездных систем, нашли массы звездных скоплений и галактик. Кроме того, исследование лучевых скоростей далеких галактик играет важную роль в изучении общих закономерностей Вселенной в целом.

По характеру спектров звезды делятся на спектральные классы (рис. 3), которые различаются между собой интенсивностями важнейших спектральных линий поглощения. Каждый класс подразделяется на десять подклассов, и все вместе они образуют сплошную последовательность от класса O5 до класса M9, вдоль которой вместе с изменением интенсивности линий изменяются также и эффективные температуры, цвет и ряд других физических характеристик звезд.

**Рис. 3.** Спектры звезд основных спектральных классов.

Отмечены характерные спектральные линии водорода ( $H\alpha$ ,  $H\beta$ ), не ионизованного и ионизованного кальция (CaI и CaII) и полосы окиси титана (TiO). Резкие линии CaII в спектре горячей звезды класса O6 имеют межзвездное происхождение и не относятся к атмосфере звезд.

Звезды классов O, B и A называют горячими, F и G-звездами класса Солнца, а K и M-холодными.

Линии многих ионизованных элементов в спектрах звезд оказываются чувствительными к степени разреженности звездных атмосфер, поэтому они интенсивнее в разреженных атмосферах звезд, являющихся по размерам сверхгигантами. На этом основано определение размеров и мощности излучения звезд по их спектрам.

В табл. 1 даны характеристики спектров звезд основных классов, знакомство с которыми мы продолжим далее.

**Таблица 1. Характеристики звезд главных спектральных классов**

Спектральный класс	Цвет звезды	Температура поверхности, К	Наиболее заметные детали в спектре звезды
O	Голубой	45000	Линии ионизованного гелия
B	Голубовато-белый	30000	Линии нейтрального гелия
A	Белый	11000	Линии водорода
F	Светло-желтый	7500	Линии водорода и ионизованного кальция
G	Желтый	6000	Те же
K	Оранжевый	5000	Линии ионизованного кальция
M	Красный	3600	Полосы окиси титана

## Расстояния до звезд

Находясь на Земле, астрономы могут измерять только видимый блеск звезд и угловые расстояния между ними. Чтобы установить линейные размеры, мощность излучения и размещение звезд в пространстве, нужно уметь находить расстояние до них. Однако в астрономии нет единого, как говорят, универсального способа определения расстояний. По мере перехода от близких светил к далеким один способ сменяется другим, так что для определения расстояния до очень далеких объектов приходится, в сущности, пройти ступеньки целой лестницы способов. Первая ступенька - определение среднего расстояния от Солнца до Земли (его называют еще астрономической единицей длины). До недавнего времени для вычисления этого расстояния требовалось измерить геодезическими средствами радиус Земли. Сейчас по радиолокационным измерениям расстояний до планет и по наблюдениям за движением межпланетных станций астрономическая единица определяется очень точно и найдена равной 149.6 млн. км.

Для определения расстояний до звезд в астрономии используется мера длины более крупная, чем астрономическая единица. Ее называют парсеком (пс), она содержит 206265 астрономических единиц или  $30.8 \cdot 10^{12}$  км (читается: 30.8 триллиона км). Тысяча парсеков составляет килопарсек (кпс), а миллион парсеков - мегапарсек (Мпс).

Расстояние до самой близкой от Солнца звезды - Проксимы (что в переводе с греческого означает "ближайшая") - в созвездии Центавра равно 1.32 пс, т. е. 40.7 триллиона км.

Часто используется и еще одна астрономическая мера расстояний - световой год, т. е. путь, который свет проходит за год. Он равен  $9.46 \cdot 10^{12}$  км, или 0.307 пс, другими словами, 1 пс равен 3.26 светового года.

Не будем здесь останавливаться на способах определения расстояний до ближайших звезд, подробно описанных в книгах по элементарной астрономии, и остановимся на способе, широко применяемом для оценок расстояний до далеких звезд. Это - метод сравнения видимого блеска и светимости звезд. Светимостью называется мощность всей излучаемой светилом энергии. Вычисление светимости в энергетических единицах-задача сложная и не всегда выполнимая. Но, к счастью, для сравнения светимостей достаточно знать блеск светил в видимых звездных величинах  $m$  и расстояние  $l$  до них, выраженное в парсеках. В этом случае мерой светимости будут служить так называемые абсолютные звездные величины.

Чтобы сравнить светимости звезд, их нужно условно отнести на одинаковое расстояние от наблюдателя. Это расстояние выбрано равным 10 пс. Освещенности, создаваемые одинаковыми источниками, согласно закону освещенностей, обратно пропорциональны квадратам расстояний до источников света. Следовательно, если звезда на расстоянии  $l$  от наблюдателя имеет блеск  $m$ , то на расстоянии в 10 пс она будет иметь блеск  $M$ , который соответствует изменению освещенности, создаваемой звездой, в  $(10/l)^2$  раз. Подставив теперь эти соотношения в формулу Погсона, получим такое выражение для  $M$ :

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Звездная величина  $M$ , которую имеет светило на расстоянии 10 пс от наблюдателя, и называется его абсолютной звездной величиной.

Из последней формулы можно найти и расстояние  $r$  в парсеках, если известны видимая  $m$  и абсолютная  $M$  звездные величины светила. Следует еще отметить, что видимые звездные величины удаленных объектов ослабляются не только вследствие закона падения освещенностей, но еще и из-за поглощения света пылинками, имеющимися в межзвездном пространстве. Поэтому видимая звездная величина светила должна быть предварительно исправлена, После исправления формула для определения расстояния будет такая:

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1.$$

Таким образом, чтобы найти расстояние до светила, нужно знать его абсолютную величину. Имеется несколько способов оценить ее. Мы уже упоминали, что период колебаний блеска переменных звезд - цефеид - тем длиннее, чем больше их абсолютные величины. Следовательно, сравнительно простым способом - по длительности периода колебаний блеска - мы можем узнать расстояние до цефеиды и до того скопления или звездной системы, где эта цефеида находится.

Если звезды, абсолютные величины которых известны, сопоставить с их спектральными классами, то обнаружится систематическое убывание абсолютных величин большинства звезд по мере перехода от горячих классов к холодным, т. е. от классов O и B к классам K и M (рис. 4). Это большинство, так называемые обыкновенные звезды-карлики, образует главную последовательность на этой диаграмме. Некоторая часть звезд классов F-M сохраняет почти одинаковые высокие абсолютные величины; это - последовательность звезд-гигантов. Самые мощные по светимости звезды, называемые сверхгигантами, встречаются чрезвычайно редко и имеют самые различные спектральные классы. Немного ниже главной последовательности располагаются на диаграмме звезды, называемые субкарликами, а еще ниже - звезды особой категории, называемые белыми карликами.

**Рис. 4.** Диаграмма спектр - светимость (Герцшпрунга - Рассела).

На нижней горизонтальной рамке отмечены спектральные классы и температуры звезд главной последовательности, на верхней рамке - то же для звезд гигантов. На левой вертикальной рамке отмечены абсолютные величины звезд, а на правой - светимости и массы звезд, выраженные в долях светимости и массы Солнца.

Графическая зависимость между абсолютными величинами и спектральными классами, изображенная на рис. 4, носит название диаграммы Герцшпрунга - Рассела по имени астрономов, получивших ее впервые в начале текущего века. По горизонтальной оси на ней откладываются спектральные классы (а иногда цвет или температура звезд), а по вертикальной - абсолютные величины звезд (или их светимости). Как мы увидим впоследствии, диаграмма Герцшпрунга - Рассела помогает разобраться в эволюции звезд. Кроме того, она широко применяется и для определения расстояний до звездных скоплений.

Хотя карликовые и гигантские звезды могут иметь один и тот же спектральный класс, второстепенные детали их спектров различны. Например, у карликов усилены линии водорода, тогда как у гигантов в спектрах интенсивными становятся линии ионизированных атомов. Благодаря этому по интенсивности линий оказалось возможным оценивать абсолютные величины звезд, принадлежащих одному и тому же спектральному классу. В этом и заключается спектральный способ определения абсолютных величин звезд и расстояний до них. Этим способом найдены расстояния до множества далеких от нас звезд.

## **Глава II. БУДНИ ВСЕЛЕННОЙ**

### **Наше Солнце**

После беглого знакомства с главными способами астрофизических исследований обратимся теперь к результатам изучения звезд и звездных систем. В этой главе нас будут интересовать главным образом спокойные стадии жизни объектов, обычные будничные биографии звезд и галактик. "Мятежными" звездами и бурными стадиями в их жизни займемся позже.

Первым светилом, о котором пойдет речь, будет, естественно, Солнце. Когда были измерены расстояния до звезд и для их исследования был применен спектральный анализ, то стало ясно, что звезды - гигантские горячие шары из газа, а наше Солнце - одна из многих звезд. Но Солнце - единственная звезда, у которой мы видим поверхность. Остальные звезды вследствие удаленности видны как точки, и только у ближайших из них специальными приборами можно измерить угловые размеры.

Излучающая поверхность Солнца, называемая фотосферой, - сравнительно небольшой по толщине слой газа, излучение из которого почти свободно выходит в космическое пространство. Фотосфера создает непрерывный спектр Солнца. Измерение энергии, излучаемой Солнцем в непрерывном спектре, показывает, что она соответствует температуре около 6000 К. Температура верхнего слоя фотосферы, который называется обращаемым слоем, на тысячу кельвинов ниже. В нем идут два процесса, создающие линии поглощения солнечного спектра. С одним мы знакомы - это поглощение более холодным газом в соответствии с законом Кирхгофа. Но основная доля интенсивности линий поглощения связана с процессом рассеяния квантов. В отличие от процесса поглощения атом в этом случае только переизлучает захваченный квант в каком-нибудь направлении. Таким образом, из-за рассеяния мы недополучим квант и видим ослабление спектра - линию поглощения.

Наблюдения солнечных затмений позволили обнаружить еще две внешние оболочки солнечной атмосферы, прозрачные для излучения фотосферы. Это - хромосфера, спектр которой состоит из ярких линий, и солнечная корона. Особенности этих оболочек Солнца являются высокая разреженность и высокие температуры, значительно превышающие температуру фотосферы: у хромосферы температура около 10000 К, а у короны она достигает до 2 млн. кельвинов. Сходную структуру внешних слоев имеют и другие звезды.

Солнце излучает огромную энергию. На квадратный сантиметр поверхности Земли, перпендикулярной к лучам Солнца, мы получаем (если не учитывать поглощение в атмосфере)

две калории в минуту. Полное излучение Солнца (его светимость) составляет  $3.8 \cdot 10^{33}$  эргов в секунду. Откуда же оно черпает такую энергию? Можно подсчитать, что энергии сжатия его газа под действием силы тяготения к центру хватило бы всего на 50 млн. лет. Это немного меньше длительности последней геологической эры (кайнозойской). Возраст же Земли составляет около 4.5 млрд. лет, а Солнца, как мы далее увидим, и того более. Следовательно, сжатие Солнца не может служить единственным и постоянным источником энергии.

Источник мощного излучения Солнца таится в структуре его внутренних слоев, которые недоступны прямым наблюдениям. Однако представления о них дают теоретические исследования. Газовый шар с массой Солнца находится под воздействием двух сил: силы тяготения к своему центру и силы газового давления, стремящейся расширить шар. Силы эти уравновешены. Давление внутри Солнца растет в глубину и в центре достигает до 200 млрд. ат при температуре около 13 млн. градусов и плотности около 100 г/см.

Высокая температура в центре Солнца создает благоприятные условия для протекания термоядерных реакций. Так называются реакции между ядрами атомов, при которых происходит слияние двух легких ядер и образование более тяжелого ядра атома другого химического элемента. При этом слиянии выделяется большое количество энергии. При температурах 10-14 млн. кельвинов может идти реакция слияния протонов, т. е. ядер водорода. Окончательным продуктом ее являются ядра атомов гелия.

В ходе последовательных превращений водорода сначала в тяжелый водород, а затем в гелий выделяется 200 млрд. калорий на каждый грамм водорода. Это в десять раз больше того, что выделяет один грамм урана-235 в известной реакции деления его атомных ядер. Другой важной особенностью термоядерных реакций этого типа является медленный характер некоторых из них, что обеспечивает спокойный равномерный темп выделения энергии в центре звезды. С ростом температуры увеличивается скорость термоядерных реакций и возможность образования более сложных ядер.

При термоядерных реакциях энергия выделяется главным образом в виде очень жесткого рентгеновского излучения и рождающихся в ходе реакций элементарных частиц, из которых важнейшими для нас являются нейтрино. Излучение поглощается недрами звезды, а вот нейтрино, свободно проходя через них, уносят с собой около 10% выделившейся энергии.

Однако попытки измерить количество нейтрино, излучаемых Солнцем, принесли неожиданности. Экспериментальным установкам (нейтринным телескопам) пока доступны только самые энергичные нейтрино. И даже, эти сильные нейтрино удавалось обнаружить не всегда. Возможно, температура в центре Солнца ниже 14 млн. кельвинов? Пока еще трудно установить причину экспериментальных неудач. Может быть, регистрируемые нейтрино составляют еще меньшую долю в общем числе нейтрино, излучаемых Солнцем, чем мы сейчас предполагаем, а может быть, наши представления о структуре центральной области Солнца упрощены.

Современное Солнце состоит на три четверти из водорода, остальное приходится главным образом на гелий. Известная часть гелия образовалась за время существования Солнца в ходе

термоядерной реакции. По количеству гелия можно оценить максимальный возраст Солнца. Расчеты дали около 5 млрд. лет. Пройдет еще не меньше времени, прежде чем Солнце исчерпает водородное горючее и перейдет на другой вид топлива - гелий.

Огромная энергия, вырабатываемая в недрах Солнца, должна равномерно выводиться наружу. Как это происходит? В центральных областях энергия находится в двух формах: в виде кинетической энергии движения частиц (тепловая форма) и в виде излучения (световая форма). Соответственно этому передача энергии в наружные слои возможна двумя путями: конвекцией и излучением. При конвекции нагретый газ расширяется, становится легче и всплывает в более высокие и менее плотные слои. При излучении же атом испускает квант (порцию энергии), который поглощается одним из встречных атомов и снова переизлучается в любом направлении. При большой плотности в центральных частях звезды таких поглощений и переизлучений происходит очень много, и квант, родившийся в центре звезды, долго странствует по ее недрам, распадается на кванты меньшей энергии, которые спустя примерно 60 млн. лет просачиваются, наконец, в фотосферу и уходят прочь.

В небольшом ядре радиусом около 35 тыс. км, находящемся в центре Солнца, господствует конвекция. Вне его энергия отводится уже излучением. По мере перехода к наружным слоям, где давление меньше, температура понижается и на глубине от 200000 до 300 км падает с миллиона до нескольких сотен тысяч кельвинов. В этой зоне, называемой зоной ионизации, происходит важный физический процесс: если в глубоких слоях Солнца атомы водорода ионизованы, то здесь они могут стать нейтральными, т. е. приобрести недостающий электрон. Атом водорода то ионизируется, поглощая кванты ультрафиолетового излучения, то становится нейтральным, отдавая энергию. В связи с этим уменьшается роль передачи энергии излучением и возрастает роль конвекции. Зону ионизации энергия проходит всего за 20 суток и вступает в следующую зону, где преобладают уже нейтральные атомы водорода. Ее верхняя граница и есть фотосфера Солнца. В этом слое толщиной около 300 км роль излучения в передаче энергии наружу снова становится главной. Большинство квантов, переизлучившись в фотосфере несколько раз, покидает Солнце. Образованный ими спектр Солнца мы и наблюдаем.

## **Физика звезд**

Кроме Солнца и сходных с ним звезд, существуют звезды более горячие и более холодные, принадлежащие, как и оно, к главной последовательности, а также [гиганты](#), [сверхгиганты](#) и [белые карлики](#). Их характеристики показаны на рис. 4. Изучение строения звезд и их изменений со временем (эволюции) показало, что есть две важнейшие характеристики звезды, которые определяют ее судьбу: возраст и срок жизни, температуру и размеры, светимость и даже поколение, к которому она принадлежит. Первая характеристика - масса звезды, от нее зависит большинство физических свойств звезды, другая - ее химический состав, т. е. процентное содержание водорода, гелия и более тяжелых элементов; оно указывает на возраст и поколение звезды и уточняет остальные свойства.

Пока удалось измерить массы только у тех двух сотен двойных звезд, у которых прослежены орбиты спутников относительно главной звезды и точно измерены длины больших полуосей этих орбит. Интересно, что по массам звезды различаются не так сильно, как по светимостям и радиусам. Наиболее массивные звезды главной последовательности лишь в 50-75 раз превосходят по массе Солнце, зато по светимости они больше его в десятки тысяч, а по радиусам - в сотни раз. Слабейшие карлики по светимости слабее Солнца в тысячи раз, по размерам - в сотни раз меньше Солнца, а по массам составляют всего десятую долю массы Солнца. И все таки 750-кратного различия звезд по массам оказывается достаточно, чтобы характеры и судьбы их были удивительно различны.

Уже в звездах главной последовательности различие в массах приводит к существенному различию в структуре звезд и их размерах. Решающее влияние массы связано с условиями механического и теплового равновесия звезды. Чем больше масса, тем большее газовое давление нужно в ее центральной области для уравнивания тяготения газовых масс к центру и тем выше там температура и больше вырабатывается термоядерной энергии за секунду. Но звезда находится еще и в тепловом равновесии: она должна отдавать во внешнее пространство столько энергии, сколько ее выработалось в центре за равное время. Это тепловое равновесие, как мы уже видели в случае Солнца, поддерживается комбинацией двух способов передачи энергии: излучением и конвекцией.

Чтобы поддерживалась постоянная энергетическая отдача или, другими словами, светимость, в звезде должны отрегулироваться размеры излучательной и конвекционной зон, должен установиться такой радиус, чтобы возникло и механическое, и тепловое равновесие. Если звезда излучает тепла больше, чем вырабатывает, ее радиус уменьшается, а это повышает давление в центре и увеличивает отдачу термоядерной энергии, пока она не устанавливается на уровне, обеспечивающем оба равновесия.

В случае самых массивных звезд классов О и В условия равновесия приводят даже к взаимной перестановке конвективной и излучательной зон: в центре образуется конвективная зона, окруженная протяженной излучательной, переходящей затем в фотосферу (поверхностная температура таких звезд высока, и зоны, где атомы водорода становятся нейтральными, у них нет).

Заметим, что из необходимости соблюдения в звезде как механического, так и теплового равновесия вытекает взаимосвязь масс и светимостей звезд главной последовательности: светимость пропорциональна массе звезды в третьей степени. Такая зависимость сначала была предсказана, а затем и обнаружена по измеренным массам и светимостям звезд.

Белыми карликами были названы звезды, у которых при массах, обычных для большинства звезд (т. е. звезд главной последовательности), радиусы чрезвычайно малы и поэтому чудовищно велики плотности звездного вещества. Вследствие этого расстояния между атомами газа белых карликов в несколько десятков раз меньше, чем в жидких или твердых веществах! Такой необычный газ называется вырожденным газом. Он обладает свойствами, отличающимися от свойств обычного газа. В частности, давление такого газа мало зависит от

температуры, но зато сильно зависит от плотности. Вследствие этого для белого карлика тепловое равновесие не играет такой важной роли, как в обычных звездах, но сохранение механического газового равновесия между силой тяготения и давлением имеет важное значение.

У белых карликов нет взаимосвязи между массой и светимостью, которая характерна для звезд главной последовательности, но зато есть соотношение между массой и радиусом: чем больше масса, тем меньше радиус белого карлика. Расчеты показывают, что для масс порядка  $1.4$  радиус белого карлика уменьшается до нуля. Следовательно, столь массивные белые карлики уже не могут существовать, так как давление вырожденного газа в них не в состоянии уравновесить тяготение массы звезды.

По внутреннему устройству белые карлики просты. У них большое ядро, из вырожденного газа с мало изменяющейся в глубину температурой. Это "изотермическое" ядро снаружи окружено тонким слоем обычного звездного газа. На границе этих двух зон могут быть условия для термоядерных реакций, если в карлике не выгорел весь водород, а температура для этих реакций достаточно высока. Но существуют белые карлики (например, звезда ван Маанена), у которых температура изотермического ядра ниже  $6$  млн. кельвинов и термоядерные реакции в них не идут. В этом случае белый карлик может долго светиться за счет охлаждения: запас тепловой энергии в нем еще огромен, обычный газовый слой плохо проводит тепло излучением, поэтому потери энергии на свечение сравнительно невелики.

А как устроены красные гиганты? Строение их весьма сложно. По современным представлениям в центре такой звезды находится массивное изотермическое ядро из вырожденного газа, т. е. по существу горячий белый карлик с температурой в несколько десятков миллионов кельвинов. Но в отличие от белого карлика изотермическое ядро гиганта окутано не тонким слоем обычного газа, а обширной разреженной газовой оболочкой. Она имеет несколько зон. Ядро и небольшая внутренняя зона, прилегающая к ядру, имеют температуру, достаточную для протекания в них не только реакций превращения водорода в гелий, но и других реакций ядерного горения вплоть до образования ядер атомов железа. Следующая зона излучательного переноса энергии снижает температуру слоев до  $1$  млн. кельвинов. За ее пределами располагается разреженная конвективная оболочка - "шуба" красного гиганта, на которую приходится около  $90\%$  радиуса звезды, и на ее поверхности температура снижается до нескольких тысяч кельвинов. Этой низкой температуре фотосферы гигант и обязан своим красным цветом.

## **Рождение и эволюция звезд**

О самой начальной стадии звезд мы знаем очень мало. Существуют лишь гипотезы, использующие комплекс сведений о звездах, межзвездной среде и законы физики. Самая разработанная и, по-видимому, близкая к истине - гипотеза образования звезд, из межзвездной среды.

Согласно этой гипотезе, самые старые звезды (звезды "первого поколения") - ровесники нашей Галактики - произошли из сгустков ее газового облака, состоявшего почти целиком из водорода и некоторой примеси гелия. Звезды же последующих поколений, более молодые, формировались из межзвездного газа и пыли, содержащих уже и другие элементы, родившиеся в ходе ядерных реакций и взрывов в звездах, и выброшенных ими в межзвездную среду. Очень вероятно, что и в настоящее время звезды продолжают возникать в холодных областях плотных межзвездных газовых облаков. Возможно, что некоторые- звезды рождаются в плотных сгустках газа и пыли, называемых глобулами, которые наблюдаются на фоне светлых газовых туманностей как круглые темные зерна. Размеры глобул составляют от 0.06 до 8 пс, а массы - от 0.002 до 13

Ранний период развития звезд в общих чертах сходен для всех звезд. Под действием тяготения к центру газового сгустка ("протозвезды") потенциальная энергия газовых частиц его внутренних слоев переходит в кинетическую, и протозвезда начинает светиться за счет энергии гравитационного сжатия. Естественно, что чем массивнее звезда, тем она быстрее сжимается под действием собственного тяготения. Длительность этой стадии выражается формулой

$$t_c = 50 / L \text{ млн. лет,}$$

где  $L$  - масса звезды и ее светимость и долях солнечной массы и светимости. Интересно, что у самых малых звезд с массами менее 0.3 длительность стадии сжатия превосходит возраст нашей Галактики, т. е. они еще не закончили своего сжатия, хотя и начали его в числе первых. Сжатие создает условия для возникновения в центральной части молодой звезды ядерных реакций. Выделяемая в результате "горения" водорода энергия повышает газовое давление в звезде, и сжатие останавливается. Таким образом, гравитационное сжатие, затопив термоядерную печь звезды, сменяется "ядерным веком" - реакциями горения водорода. Скорости течения ядерных реакций очень сильно зависят от температуры, поэтому в массивной звезде, поскольку в ней сжатие и температура в центре выше, водород горит быстрее. На диаграмме Герцшпрунга - Рассела это выражается тем, что звезды с различными массами в момент начала, в них термоядерных реакций имеют различные абсолютные величины и спектральные классы. Вместе все они образуют знакомую нам главную последовательность. Таким образом, стадия главной последовательности - это период жизни звезды за счет горения в ее недрах водородного горючего. "Водородный век" имеет в 200 раз большую длительность, чем стадия протозвезды.

В ходе переработки водорода в гелий в центре звезды накапливается ядро из гелия, а также некоторое количество азота с примесью углерода и кислорода. Зона ядерной реакции перемещается на периферию ядра. Чтобы температура в этой области была достаточна для поддержания реакции, на время снова подключаются силы гравитационного сжатия. Внутренние слои сжимаются, а наружная оболочка расширяется. Звезда превращается в красный гигант, совершая скачок с главной последовательности вверх - вправо.

Как только истощается водород на периферии звездного ядра, звезда снова начинает сжиматься, пока в ее центре не будет достигнута температура в сотни миллионов кельвинов. При такой температуре начинается реакция превращения гелия в углерод и изотопы кислорода, неона и магния. "Гелиевый век" звезды также сравнительно длителен, но примерно в десять раз короче основного, водородного.

Самые массивные звезды - сверхгиганты - имеют еще и последующие стадии: после израсходования гелия ядро звезды сжимается и повышает центральную температуру до миллиарда кельвинов. Тогда горючим для звезды становятся углерод и другие элементы, и в ходе реакций теперь начинают образовываться кремний, сера, аргон и кальций. И еще раз наступает момент, когда в звезде включается механизм сжатия: это когда сгорит углерод и нужно будет поднять температуру в центре звезды до трех миллиардов градусов. В этой стадии горят уже кремний и получившиеся вместе с ним элементы, а образуются элементы группы железа. На этом ядерная эволюция в звезде завершается: ядерные реакции образования более тяжелых, чем железо, элементов энергию уже не выделяют, а поглощают. Наступает финальная стадия звезды, когда сжатие может продолжаться неограниченно. О финальной стадии мы поговорим в конце книги. Длительность углеродной и других стадий коротка по сравнению с водородной и гелиевой. А у обычных звезд, не сверхгигантов, таких стадий даже не бывает, потому что не хватает энергии сжатия для столь высоких температур, какие нужны для "загорания" углерода и более тяжелых элементов.

Обратим внимание на решающую роль величины массы звезды в ее эволюции. Но масса звезды не сохраняется постоянной. Когда массивная звезда переживает "водородный век" и имеет высокую температуру, по силовым линиям с ее поверхности начинает дуть звездный ветер - это тепловая энергия внутренних слоев звезды превращается в механическую энергию корональной оболочки, непрерывно расширяя последнюю.

Во все стороны от звезды оттекает ионизованный газ. Раздутая звездным ветром газовая оболочка может принять гигантские размеры, и в этом случае мы видим "планетарную туманность" - газовый круг, в центре которого находится горячий объект - ядро туманности.

Как видим, массивная звезда таким путем может выбросить значительную часть своего вещества в окружающее пространство. И не всегда это происходит спокойно.

## **Наша Галактика**

Мы уже говорили, что наше Солнце входит в состав большого облака звезд - в Млечный Путь, или Галактику. Поскольку расстояния между соседними звездами, не считая двойных, огромны, в среднем около полутора парсеков, то мы, находясь внутри этой звездной системы, видим на небе невооруженным глазом несколько тысяч звезд, которые вследствие перспективы выглядят хаотически разбросанными по небу. Но более слабые и далекие звезды, доступные только телескопам, распределяются по небу не так беспорядочно: чем ближе участок неба к Млечному Пути, тем он богаче звездами. Млечный Путь как бы рассекает небо на две полусферы, и это сечение представляет собой (грубо приближенно) плоскость симметрии

нашей звездной системы (она называется галактической плоскостью), вблизи которой находится и наше Солнце.

Большинство звезд, входящих в Галактику (в том числе и двойные), являются ее самостоятельными членами, но некоторая часть образует коллективы от нескольких десятков до десятков тысяч членов. Эти звездные группы называются звездными скоплениями.

По внешнему виду наблюдаются две разновидности скоплений: рассеянные и шаровые. У рассеянных скоплений видимые очертания нечеткие, они выделяются на фоне остальных звезд Галактики сгущениями самых ярких звезд, а центральная зона между яркими звездами, заселенная карликами, не всегда заметна. У шаровых же скоплений совсем нет ярких горячих голубых звезд, и самые яркие в них красные гиганты. Звезды в шаровых скоплениях расположены густо, и число их возрастает к центру скопления. Разница между рассеянными и шаровыми звездными скоплениями заключается также и в их возрасте.

Теория звездной эволюции показывает, что рассеянные скопления намного моложе шаровых. Около тысячи известных теперь рассеянных скоплений видны на небе в Млечном Пути или вблизи него, а их пространственное размещение в теле Галактики - тонкий слой около галактической плоскости - очерчивает дискообразную форму нашей звездной системы. Шаровые же скопления - почти ровесники Галактики. Они видны на небе не только вблизи Млечного Пути, но и в далеких от него районах неба. Их найдено уже 130. Размещаются они в пространстве сферическим роем с повышением концентрации к центру роя, и сами образуют как бы шаровое скопление из скоплений.

Сферическая форма размещения шаровых скоплений - пространственное распределение их, как принято говорить у астрономов - это следы бывшей формы нашей Галактики.

Строение Галактики выяснилось не сразу. Когда в 1918 г. американский астроном Х. Шепли изучил, как расположены шаровые скопления, то обнаружилось, что центр симметрии их распределения в пространстве (т. е. центр масс, вокруг которого они располагаются) не совпадает с Солнцем, а находится от него на значительном расстоянии - в направлении созвездия Стрельца, где находится яркая часть Млечного Пути. Это было важное открытие. Раньше астрономы считали, что если Млечный Путь опоясывает наше небо сплошным поясом без разрывов, то Солнце находится близко к центру Галактики. В действительности же оно оказалось ближе к периферии нашей звездной системы.

По современным данным, расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 10 кпс, а наружный край ее находится от нас на расстоянии 13 кпс.

Далее обнаружилось, что звезды участвуют во вращении Галактики. Ось вращения звездной системы перпендикулярна к галактической плоскости и проходит через центр Галактики. С галактическим вращением связана и чечевицеобразная форма Галактики (рис. 5). Если предположить, что Солнце в своем движении вокруг центра Галактики описывает окружность, то ее длина будет около 63 кпс, а время полного оборота по галактической орбите - около 300 млн. лет. Чтобы представить себе такой отрезок времени, напомним, что триста миллионов лет

назад на Земле растительная и животная жизнь еще только выходила из океанских глубин на сушу (девонский период палеозойской эры)!

А вот каковы размеры Галактики: ее радиус - 23 кпс, толщина (если считать ее сплюснутой чечевицей) - 3 кпс, объем - около 6600 куб. кпс. Масса Галактики, вычисленная по закону вращения - около 300 млрд. .

Это, конечно, не значит, что в Галактике насчитывается 300 миллиардов звезд. Как известно, наиболее часто встречаются звезды со светимостью, в сто раз меньшей солнечной, и соответственно с массой, в десять раз меньшей, чем масса Солнца. Таким образом, число звезд в Галактике-около трех триллионов ( $3 \cdot 10^{12}$ ).

**Рис. 5.** Строение галактики.

I-гало, II-промежуточная сферическая подсистема, III-диск, IV-плоская старая подсистема, V-плоская молодая подсистема.

Вне звезд находится около 2% массы нашей звездной системы. Это межзвездный газ с незначительной примесью пыли. Основная масса газа холодная, и лишь небольшая его часть нагрета горячими звездами и светится в виде газовых туманностей. Свечение их сосредоточено, в основном, в линиях водорода. Линии второго распространенного элемента - гелия слабы, зато очень ярки некоторые линии других элементов. Дело в том, что высокая разреженность межзвездного газа создает условия для свечения в таких спектральных линиях, в которых в обычных плотных звездных атмосферах свечение подавлено или, как говорят, запрещено. Такие запрещенные линии обнаруживаются только в спектрах сильно разреженных газов - будь то лабораторный вакуум, солнечная корона, ионосфера Земли или газовая туманность. Сам межзвездный холодный газ почти прозрачен для видимого излучения звезд и его удается обнаружить благодаря тому, что в спектрах горячих звезд появляются "лишние" линии поглощения, свойственные не горячим газам звездных атмосфер, а более холодным газам межзвездной среды (см. подпись к рис. 3).

Детальное исследование межзвездного газа стало возможным благодаря открытию его радиоизлучения. Сильное радиоизлучение было обнаружено у горячих газовых туманностей. По характеру оно аналогично излучению Газа при температуре около 10 тыс. кельвинов, которую имеют эти туманности.

Холодный же межзвездный газ должен иметь слабое радиоизлучение, не превосходящее излучение тела, нагретого всего до 100 К.

Однако радиоизлучение межзвездной среды оказалось значительно более интенсивным. Оно создано космическими лучами в магнитном поле Галактики. Космические лучи - это электроны, протоны и другие элементарные частицы, мчащиеся со скоростями, близкими к скоростям света. Когда такой электрон попадает в магнитное поле, он начинает двигаться по спирали и расходовать свою энергию на излучение. Это излучение распространяется в узком пучке, ось которого касательна к траектории электрона. Такое явление и его свойства были изучены физиками в магнитном поле ускорителя элементарных частиц, называемого синхротроном. Поэтому и излучение, возникающее в подобных условиях, получило название

синхротронного. Его свойства отличаются от свойств теплового излучения, возникающего в телах вследствие их нагревания, поэтому синхротронное излучение называют разновидностью нетеплового излучения.

Важнейшим средством изучения межзвездной газовой среды служит сильное излучение межзвездного водорода в спектральной линии на волне 21 см, обнаруженное радиоастрономией. Изучение размещения водорода по интенсивности излучения и доплеровскому смещению этой спектральной линии позволило проследить ход спиральных рукавов Галактики на значительном протяжении, а по движению водорода изучить вращение нашей звездной системы, вокруг ее оси и узнать многое о центральном сгущении газа в Галактике.

О том, что в нашей Галактике имеются газовые спиральные рукава, подобные спиральным рукавам многих других звездных систем, астрономы догадывались, изучая размещение светлых газовых туманностей, окружающих горячие звезды. Но эти туманности легко обнаруживались только в близких окрестностях нашего Солнца - на расстояниях в 2 - 3 кпс. К тому же контуры спиральных рукавов замаскированы сильным межзвездным поглощением света в Млечном Пути, где они расположены. Радиоастрономические исследования спиральных рукавов нашей Галактики не встретили подобных затруднений.

Теперь известно, что спиральные рукава представляют собой распространяющиеся из центра Галактики волны уплотнения межзвездного газа. Звезды Галактики, принимая участие в ее осевом вращении, попадают в эти газовые уплотнения и несколько тормозятся в межзвездной среде, но со временем они покидают рукава, продолжая пути по своим галактическим орбитам, а волна уплотнения продолжает свое движение от центра к периферии.

Центральное сгущение звезд Галактики - ее ядро закрыто от нас густыми слоями межзвездной пыли, которая ослабляет его свет в 1500 и более раз. Поэтому обнаружить ядро и изучать его стало возможным лишь с помощью инфракрасной техники и радиоастрономии. Было найдено, что ядро Галактики служит сильным источником синхротронного радио излучения. Вокруг самой сердцевины ядра найдено удивительное по свойствам облако, которое вращается по необычному для газовых тел закону - так, как будто это не газовый сгусток, а твердый диск.

В 1943 г. В. Бааде, работавший в США, и Б.В. Кукаркин обнаружили, что звезды и газовые туманности Галактики по своим разнообразным свойствам подразделяются на несколько типов населения или на "подсистемы". При этом Бааде опирался на изучение звезд в туманности Андромеды, а Кукаркин, исследуя классы физических переменных звезд, подразделил их на плоскую, промежуточную и сферическую подсистемы.

Теперь принято считать, что население нашей Галактики образует пять подсистем. Эти подсистемы, или типы звездного населения, различаются между собой характером объектов, их размещением в Галактике, типичными скоростями движения, химическим составом и возрастом.

Именно возраст служит главным различием подсистем (табл. 2). Самая древняя подсистема "гало" или сферическая. Она образовалась еще тогда, когда газовое облако Галактики

распадалось на отдельные сгустки. Следующая подсистема промежуточная сферическая. Далее идет промежуточная подсистема, образуемая населением диска. Это самая массивная и многочисленная по звездам подсистема, обрисовывающая главное тело Галактики, ее "линзу". К ней относятся яркие красные гиганты, новые звезды, а главную ее массу составляют звезды, подобные нашему Солнцу. Наконец, есть две "плоские" подсистемы: старая или промежуточная плоская подсистема и молодая плоская подсистема. К последней относятся горячие звезды-сверхгиганты, долгопериодические цефеиды и звездные скопления, содержащие горячие звезды, пыль и межзвездный газ. Это молодое звездное население располагается точно в галактической плоскости и образует спиральные рукава.

**Таблица 2. Звездные подсистемы Галактики**

Звездная подсистема	Главное звездное население (наиболее заметные элементы подсистемы)	Толщина подсистемы, доли диаметра Галактики
Сферическая (гало)	Шаровые скопления, субкарлики, короткопериодические цефеиды, высокоскоростной газ	1 : 1
Промежуточная сферическая	Звезды-"бегуны", долгопериодические переменные	1 : 2
Промежуточная - диск	Звезды со слабыми линиями металлов, планетарные туманности, новые звезды, красные гиганты	1 : 5
Плоская старая	Звезды с сильными линиями металлов классов А-М	1 : 20
Плоская молодая	Сверхгиганты, горячие звезды классов О и В, звезды типа Т Тельца, газ и пыль	1 : 100

Звездная подсистема	Степень концентрации звезд к центру системы	Распределение населения в подсистеме	Процент гелия по массе	Возраст объектов подсистемы, млрд. лет	Масса подсистемы, млрд. масс Солнца
Сферическая (гало)	Сильная	Равномерное	0.3	14-12	100
Промежуточная сферическая	Сильная	Равномерное	1	12-7	170
Промежуточная - диск	Сильная	Равномерное	2	7-2	170
Плоская старая	Слабая	Клочковатое	3	1.5-0.1	20
Плоская молодая	Слабая	Клочковатая, спиральная структура	4	0.1	10

Как шла эволюция нашей Галактики, мы рассмотрим после того, как познакомимся с другими типами звездных систем.

## Другие галактики

За порогом Галактики начинается удивительный мир бесчисленного множества звездных систем, одной из которых - не самой маленькой, но и не самой большой - является и наша Галактика. С переходом к более слабым по видимой величине галактикам их число на небе быстро возрастает. Так, галактик ярче 12-й звездной величины известно около 250, галактик 15-й величины - уже около 50000, а число галактик, которые могут быть сфотографированы самыми крупными телескопами, составляет многие миллиарды.

Галактики раньше назывались также внегалактическими туманностями, потому что многие из них были обнаружены еще в прошлом веке, когда не было сильных телескопов, способных разложить их на звезды, и они по внешнему виду мало отличались от газовых туманностей. Их внесли в каталоги как однотипные объекты с настоящими газовыми туманностями и звездными скоплениями. Наиболее известны каталог более ста ярких туманностей, составленный Мессье, и "Новый каталог" Дрейера, насчитывающий вместе с дополнительными списками почти десять тысяч туманностей. Галактика в Андромеде, например, в этих каталогах имеет обозначения M31 и NGC 224.

При знакомстве со звездными системами бросается в глаза чрезвычайное разнообразие форм галактик. По наиболее характерным признакам их удается подразделить на несколько основных типов.

**Рис. 6.** Основные типы галактик.

1 - Sb, 2 - Sc, 3 - Im, 4 - E, 5 - S0, 6 - Sa

Около 25 % галактик имеют особенно простую - круглую или эллиптическую форму (рис. 6). Это эллиптические галактики, их символ - E. В зависимости от степени сжатия различают восемь подтипов эллиптических галактик - от сферических E0 до чечевицеобразных E7 (цифра указывает степень сжатия). Эти галактики наиболее просты по структуре звездному составу и характеру внутренних движений. Формы линий в спектрах эллиптических туманностей свидетельствуют о том, что звезды в них движутся в самых произвольных направлениях со скоростями порядка 200 км/с. Распределение звезд в них во всех направлениях от центра симметрии почти равновероятно; это и объясняет плавность изменения яркости и эллиптичность формы галактик. Горячих сверхгигантов в них нет, самые яркие звезды - красные гиганты, подобные встречающимся в шаровых скоплениях.

Самый распространенный тип галактик (50%) - уже знакомые нам по нашей звездной системе спиральные галактики (символ S). Примерно у половины их рукава начинаются сразу от ядра, а у остальных ядро пересекается газовой перемышкой, от концов которой и начинаются рукава. По относительным размерам ядра и диска обе разновидности подразделяются на подтипы a, b, c и d (размеры ядра убывают от a к d).

Наша Галактика скорее всего является спиральной типа Sb.

Примерно 20% галактик относится к типу S0 промежуточному между эллиптическими и спиральными, но все же более близкому к первым. В галактиках этого типа яркость от центра падает уже ступеньками.

Всего 5% галактик относится к неправильным (символ I). Это класс довольно разнородных объектов. Одни - неправильные галактики типа Магеллановых Облаков (их символ Im) - предельный случаи спиральных галактик, только без центрального сгущения. Другие имеют черты эллиптических (символ IO).

Специальным классом галактик являются так называемые взаимодействующие галактики со следами воздействия друг на друга, выражающимися в искажении формы, перемычках между галактиками и т. д.

Богатство форм звездных систем объясняется разнообразием условий, в каких они рождались. А возникновение галактик было, в конечном счете, некоторым этапом развития Вселенной. Расширение Вселенной, о котором будет сказано в следующем разделе, и выводы ядерной физики свидетельствуют о том, что эпохе галактик предшествовали более ранние стадии развития, когда все вещество Вселенной находилось в горячем состоянии, имело огромную плотность и было равномерно сосредоточено в небольшом пространстве.

По каким-то причинам этот сверхплотный объект взорвался и начался разлет вещества, расширение Вселенной. С этого момента и начинается отсчет ее возраста. Расширение сопровождалось понижением плотности вещества и температуры. В течение первой секунды расширения Вселенной температура снизилась с десяти триллионов до десяти миллиардов кельвинов. Первая секунда была целой эпохой существования Вселенной, в течение которой шли взаимодействия частиц и античастиц, рождавшихся и погибавших с образованием нейтрино и световых квантов.

Следующей была стосекундная эпоха ядерных реакций. В эту эпоху образовались ядра водорода (70% массы вещества Вселенной) и гелий (30%); их смесь представляла собой еще горячую плазму, которая стала медленно остывать.

Скоротечные эпохи развития Вселенной на этом закончились, новые эпохи стали длиться миллионы лет. За первый миллион лет температура вещества снизилась до 3500 К, образовались нейтральные атомы гелия и водорода. Это разреженное газовое облако распалось на отдельные облака различной массы. Одни из них имели центральные сгущения, вокруг которых вращался остальной газ. Из них и получились спиральные галактики. Другие не вращались и положили начало эллиптическим галактикам. Третьи вращались, но не имели значительного центрального сгущения. Так образовались неправильные галактики типа Im. Особенности других типов неправильных галактик возникли, по-видимому, в результате внутренних взрывов в них.

Первоначальные газовые облака, быстро охлаждаясь, в свою очередь также распадались на отдельные сгущения. Сгущения двигались с большой скоростью и в самых разных направлениях. Из этих сгущений образовались звезды первого поколения и шаровые звездные скопления. Следовательно, рой быстрых звезд и шаровых скоплений - это напоминание о первоначальной сферической форме нашей Галактики. После того как в галактиках образовались звезды, их дальнейшее развитие шло по-разному, в зависимости от массы (в

массивных галактиках эволюция идет быстрее) и от вращения галактик: системы с быстрым вращением развились в тип Sc, со средним - в Sb, а с медленным - в тип Sa.

Первое поколение звезд нашей Галактики имело разный по длительности век: звезды малой массы существуют и сейчас, а более массивные прожили свою жизнь быстро.

В отличие от звезд, сохраняющих почти неизменным характер своих движений с начала существования, межзвездный газ находится под сильным воздействием тяготения звездной системы и, участвуя в ее вращении, опускается к главной плоскости галактики и сжимается к ее центру. Это, согласно закону сохранения момента вращения, усиливает вращение плоской составляющей галактики. В местах, где плотность газа оказывается высока, он превращается в звезды следующего поколения. Полному превращению всего газа спиральных галактика звезды препятствуют их магнитные поля.

Образование молодых звезд идет также в ядре галактики: к ее центру опускается газ, потерявший момент вращения. Здесь рождаются звезды новых поколений подсистемы, которая составляет ядро галактики. Однако здесь нет условий для образования массивных звезд, так как газ образует небольшие плотные сгустки. В случаях же, когда газ сжимается в тело, масса которого равна тысячам солнечных масс, процесс завершается, по-видимому, катастрофой: вместо образования устойчивой звезды происходит сжатие, приводящее к созданию в центре высокой плотности и образованию радиоактивных изотопов со взрывным характером выделения энергии. Следует сильный взрыв, и сферическая волна газа устремляется во все стороны из галактического ядра. Некоторые ученые считают, что такой взрыв произошел около десяти миллионов лет назад в центре галактики M82, в результате чего она стала неправильной типа Ю.

В эллиптических галактиках путь эволюции проще. В них совсем не было систематического галактического вращения и заметного магнитного поля. Весь газ в этих системах превратился в звезды сферической подсистемы. Газ же, выбрасываемый звездами в ходе их эволюции, опускается к центру системы, где могут поэтому рождаться звезды новых поколений. Но в эллиптических галактиках чрезвычайно массивных звезд нет, поэтому общий процесс звездной эволюции идет намного медленнее, чем в спиральных. Конечно, и в эллиптических галактиках одновременно сосуществуют звезды различных поколений, но между ними нет такого резкого различия, в характере движения, химическом составе и массе, какое наблюдается в спиральных галактиках.

В неправильных галактиках типа Магеллановых Облаков процесс образования звезд тянулся очень долго и, по-видимому, еще не закончился.

Общей тенденцией эволюции галактик, таким образом, является продолжающийся процесс образования звезд новых поколений в центре и в спиральных рукавах. Но в ходе эволюции все большая часть газа консервируется в карликовых звездах и надолго исключается из общего кругооборота. Образование новых поколений идет поэтому все медленнее и в меньших масштабах. В этом заключается старение галактик.

## Мир галактик

Взглянем теперь на галактики с другой точки зрения. В современной астрономии не менее важным оказался вопрос о взаимных расположениях и движениях галактик, так как изучение его пролило свет на самые общие свойства и эволюцию Вселенной. Мы начнем знакомство с этим аспектом мира галактик с важной проблемы внегалактической астрономии - с определения расстояния до галактик.

Как мы уже знаем, благодаря тому, что в ближайших галактиках были найдены цефеиды, новые звезды и сверхгиганты, удалось установить расстояния до ближайших звездных систем. В 1912 г. американский астроном В. Слайфер обнаружил замечательное свойство туманностей, оказавшихся позже внегалактическими. В спектрах этих далеких галактик все спектральные линии оказались смещенными к красному концу по сравнению с такими же линиями в спектрах источников, неподвижных относительно наблюдателя. Отношение смещения линии к длине волны оказывается для всех линий в спектре данной галактики одинаковым и называется красным смещением. Аналогичное свойство, согласно принципу Доплера, имеют объекты, удаляющиеся вдоль луча зрения со скоростью  $v$ , где  $c$  - скорость света. В этом случае смещение линий соответствует лучевой скорости светила. Смещение линий в красную сторону спектра указывает, что галактики удаляются друг от друга. Но долгое время полагали, что явление красного смещения может иметь и другие причины.

В 1929 г. Э. Хаббл, сравнивая красные смещения и расстояния галактик, обнаружил, что красные смещения в среднем пропорциональны расстояниям:

Коэффициент пропорциональности  $H_0$  (называемый постоянной Хаббла) по многочисленным оценкам равен 55 км/с на Мпс. Закон Хаббла оказался прекрасным средством определения расстояний до тысяч галактик.

Когда нужно определить расстояние до галактики, красное смещение которой не измерено, прибегают к грубым способам оценки расстояния, например, по видимой и абсолютной звездным величинам галактик соответствующих типов, по угловым размерам галактик и крупнейшим газовым сгусткам в них. Для самых далеких галактик задача определения расстояния осложняется тем, что на ослабление блеска и угловые размеры начинает влиять еще и сам эффект красного смещения.

Каковы же размеры, массы и мощность излучения галактик? Зная расстояния до них, можно ответить и на эти вопросы. Проще других определяется мощность излучения (светимость), которую мы умеем выражать в абсолютных величинах. Размеры же и масса галактики возрастают по мере перехода от абсолютно слабых галактик к более ярким. Возрастают абсолютной величины на единицу соответствует увеличение диаметра галактики в полтора раза, а массы - в два раза (спиральных) и в три раза (эллиптических).

По абсолютным величинам галактики можно подразделить на классы светимости. Среди эллиптических галактик встречаются как сверхгигантские, так и карликовые. Среди

неправильных гигантских нет и т. д. Сведения о представителях галактик основных типов, их средних абсолютных величинах и массах даны в табл. 3.

**Таблица 3. Характеристики различных типов галактик**

Класс светимости	Светимость галактик		Масса,	Тип галактик
	абсолютные величины, $M$	эрг/с		
Яркие сверхгиганты	-24	$10^{45}$	$10^{13}$	E
Нормальные сверхгиганты	-22	$2 \cdot 10^{44}$	$10^{12}$	E, S
Яркие гиганты	-20	$3 \cdot 10^{43}$	$10^{11}$	E, S
Нормальные гиганты	-18	$5 \cdot 10^{42}$	$10^{10}$	E, S, I
Яркие карлики	-16	$8 \cdot 10^{41}$	$10^9$	E, S, I
Нормальные карлики	-14	$10^{41}$	$10^8$	E, S, I
Слабые карлики	-12	$2 \cdot 10^{40}$	$10^7$	E, I
Пигмеи	-8	$5 \cdot 10^{38}$	$10^6$	E, I

Зная расстояния до галактик и их положение на небе, можно установить их размещение в пространстве относительно нашей звездной системы. Оказалось, что галактики встречаются как одиночные, так и двойные, объединенные в группы, большие скопления и даже облака скоплений (в сверхскопления).

Средние расстояния между галактиками в группах и скоплениях - сотни килопарсеков, а между группами галактик, одиночками и т. д. - в среднем 1 - 2 Мпс. Скопления удалены друг от друга на десятки мегапарсеков.

Наша Галактика и туманность Андромеды входят в Местную группу галактик. Они являются главными объектами группы. Наша Галактика имеет в качестве спутников две крупные галактики: Большое и Малое Магеллановы Облака, у туманности Андромеды четыре больших эллиптических спутника. Кроме того, спутниками каждой из них являются несколько карликовых и слабых неправильных галактик. Полное число галактик, составляющих Местную группу, приближается к 40 за счет продолжающихся открытий слабых неправильных галактик в радиусе 1.5 Мпс вокруг Галактики.

Есть несколько групп галактик, ближайших к Местной группе. Это - группа Южного галактического полюса, группа Центавра-А, группы в Большой Медведице, Льве и Гончих Псах. В наших окрестностях сейчас найдено более 50 малых групп галактик.

Кроме небольших групп открыто много богатых скоплений с сотнями и тысячами галактик. Ближайшее такое скопление находится в созвездии Девы на расстоянии 20 Мпс. В его составе семь гигантских эллиптических галактик, в том числе радиогалактика Дева А, и девять гигантских спиральных. Треть галактик - скопления эллиптические и S0, остальные - спиральные. Размеры этого скопления 5.5 Мпс, но сейчас скопление в Деве считают лишь центральным сгущением сверхскопления, к которому принадлежат наша Местная группа и ее

соседи. Общее число галактик нашего сверхскопления около 10000, диаметр его около 50 Мпс. Найдено уже полсотни таких сверхскоплений.

У спиральных и неправильных галактик наблюдается радиоизлучение, аналогичное радиоизлучению нашей Галактики. У обычных эллиптических галактик радиоизлучение незначительно и обнаружено лишь недавно с большим трудом. Но среди сверхгигантских эллиптических галактик и реже среди спиральных встречается особый класс галактик сильным нетепловым радиоизлучением. К таким радиогалактикам относятся Центавр А, М 82, Печь А, Дева А, находящиеся в соседних группах и скоплениях галактик. Самая близкая к ним радиогалактика высокой мощности - Лебедь А - на фотографиях выглядит как пара слабых эллиптических галактик 16-й величины, зато ее радиоизлучение, например на волне 1 м, уже соответствует объекту 2-й звездной величины, если выражать радиоизлучение в этих единицах. Сейчас известны сотни источников радиоизлучения, оказавшиеся радиогалактиками.

В 1963 г. было обнаружено, что некоторые радиоисточники являются не обычными галактиками, а точечными звездообразными оптическими объектами - квазарами. Это, вероятно, особо компактные далекие галактики, отличающиеся от просто компактных галактик сильным радиоизлучением.

Вся совокупность галактик, квазаров и объектов межгалактической среды составляет так называемую Метагалактику. Красное смещение галактик отражает одно из важнейших свойств Метагалактики: ее расширение. Других объяснений этому явлению не найдено. Более того, обнаружено метагалактическое тепловое радиоизлучение - остаточное излучение того первоначального газового облака, из которого формировались галактики около 13 млрд. лет назад, когда они находились ближе друг к другу и представляли собой сгустки этого облака. А еще ранее вещество Метагалактики находилось, по-видимому, в сверхплотном состоянии; после взрыва этого вещества началось расширение и эволюция Метагалактики и ее членов.

Основная часть наблюдаемого вещества Метагалактики сейчас сосредоточена в звездах, только несколько процентов сохраняется в виде межзвездного газа и пыли, а также межгалактического газа. Некоторая часть вещества Метагалактики находится в форме излучения. В раннюю эпоху существования Метагалактики, когда она имела высокую температуру, световая форма вещества даже преобладала.

Так выглядит по современным взглядам Вселенная и так мы представляем ее историю и ее будущее развитие. Опираясь на эти сведения, мы можем теперь подробнее познакомиться с основным предметом нашей книги - с новыми и сверхновыми звездами.

### **Глава III. ОБЫКНОВЕННЫЕ НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ**

#### **Как открывают новые**

Мы уже знаем, что появление новой звезды не представляет собой рождения звезды в месте, где ее до сих пор не было. Когда в астрономическую обсерваторию приходит телеграмма об открытии новой, астрономы приступают к ее наблюдению: фотографируют ту часть неба, где

обнаружена вспышка, а также получают спектры новой звезды. Кроме того, астрономы просматривают многочисленные старые снимки этой области неба, чтобы узнать, какой величины была эта звезда до вспышки. И часто поиски оказываются удачными: на месте вспышки действительно ранее была видна слабая звездочка, не изменявшая сильно своего блеска. Особая же удача бывает, когда эту часть неба фотографировали накануне открытия новой. В этих случаях удастся обнаружить и оценить звездную величину новой в период подъема ее блеска. Казалось бы, скромный успех? Но астрономы, увы, пока еще не обнаружили признаки, по которым можно предвидеть, что звезда готовится к вспышке. Не удалось пока застать и самое начало вспышки.

Чаще всего новую звезду обнаруживают, когда она уже стала медленно гаснуть, и значительно реже - до того момента, как она достигла наибольшего блеска (максимума).

В отличие от других разновидностей взрывных звезд, с которыми мы будем знакомиться позже, типичные новые звезды - это такие, у которых наблюдалась единственная вспышка, причем блеск их быстро увеличивался на 5-19 звездных величин, т. е. в тысячи и даже миллионы раз, а затем новая начинала сравнительно медленно ослабевать и постепенно возвращаться к своему первоначальному слабому блеску.

Хотя вспышки новых звезд наблюдали еще тысячелетия назад, систематически обнаруживать их стали лишь в последнее столетие. С тех пор найдено около двухсот новых звезд. Теперь ежегодно их открывается до десятка. Но в нашем столетии среди них была всего одна, превосходившая в момент максимума блеска нулевую звездную величину.

Самая яркая новая в нашем веке вспыхивала в созвездии Орла в 1918 г. Ее поэтому называют Новая Орла 1918 г. Немного слабее ее были Новая Персея 1901 г. и Новая Кормы 1942 г.

Следует отметить, что примерно с 1604 г., когда была обнаружена очень яркая Новая Змееносца или Новая Кеплера, (в действительности оказавшаяся сверхновой звездой), астрономы вплоть до начала нашего века не открывали ярких новых звезд. Это объясняется, главным образом, неблагоприятными сезонными условиями. Разве не могло быть вспышек звезд в созвездиях, которые в это время года не видны, так как восходят и заходят днем? Например, созвездия, видимые низко над горизонтом в южной стороне неба зимой, нельзя видеть в течение летнего сезона и наоборот. Или, например, случится две недели непогоды в Европе, где в прошлом веке были сосредоточены почти все обсерватории, и новая звезда ослабевала так, что ее уже не найти простым глазом. Несомненно, что некоторые яркие вспышки новых теряются и в наше время.

### **Медленные и быстрые новые звезды**

Мы уже говорили, что важной характеристикой звезд, изменяющих блеск, являются их кривые блеска (рис. 7). У новых звезд кривые блеска делятся на два главных участка: участок подъема до максимума и участок падения блеска после максимума. Сравнение кривых блеска различных новых звезд показало, что подъем блеска в среднем всегда идет быстрее падения и,

чем быстрее подъем, тем больше и скорость последующего "погасания" звезды. Каждый участок кривой блеска новой звезды, кроме того, имеет свои особенности.

Кривая возрастания блеска обычно не совсем гладкая: примерно за две величины до максимума блеск новой несколько часов почти не меняется или возрастает медленнее. После этого звезда увеличивает блеск до максимального и вскоре начинает ослабевать. Вслед за первоначальным периодом ослабления блеска на 3-4 звездных величины новая звезда вступает в так называемый переходный период.

В это время новые звезды ведут себя по-разному. У одних убывание идет и далее плавно, у других носит колебательный характер, а у третьих - блеск резко падает на несколько звездных величин, но спустя некоторое время частично восстанавливается. С этого времени начинается период окончательного спада блеска до той звездной величины, которую новая звезда имела до вспышки.

**Рис. 7.** Схема кривой блеска новой звезды с указанием стадий, наблюдаемых в ее спектре.

а-состояние до вспышки, б-начальный подъем, в-предмаксимальная задержка, г-конечный подъем, д-первоначальный спад, е-переходный период, ж - конечный спад, з - состояние после вспышки. Показаны три типа поведения новой звезды во время переходного периода.

Новые звезды очень разнообразны не только по характеру изменения блеска, но и по скорости его изменения. Вот, например, кривая блеска очень быстрой Новой Персея 1901 г. (рис. 8, а). До вспышки эта звезда была, по-видимому, 13-й звездной величины. Открыта она была уже во время возрастания блеска как звездочка 11-й величины и за 27 часов увеличила блеск до 3-й величины. Затем, не сделав остановки, она несколько сбавила скорость нарастания блеска и еще спустя 38 часов достигла максимума блеска. Следовательно, на то, чтобы увеличить свой блеск, ей понадобилось всего трое суток. В максимуме она пробыла лишь несколько часов, и после быстрого (двухнедельного) первоначального ослабления блеск этой новой звезды стал колебаться и ослабление до минимума растянулось на 15 лет. Сейчас блеск ее колеблется между 12-й и 14-й звездными величинами.

**Рис. 8.** Кривые блеска быстрых (а) и медленных (б) новых звезд

Другой пример, на этот раз медленной новой, представляет также яркая Новая Геркулеса 1934 г. (рис. 8, б). Она была открыта как звезда 3-й величины за 9 суток до максимума блеска. Но несомненно, что до этого ее блеск возрастал быстро, так как за 30 суток до открытия на снимках она была еще, как и всегда, звездой 15-й величины. В максимуме блеска новая звезда оставалась двое суток.

Последовавшее затем ослабление блеска с самого начала носило колеблющийся, периодический характер: звезда то слабела на полторы величины, то вдруг увеличивала свой блеск почти до максимума - и так трижды. Наконец, на 110-е сутки после максимума ее блеск ослабел сразу на 7 звездных величин и звезда оставалась слабой 100 суток, после этого

изменение блеска продолжалось (как будто бы не было провала), звезда медленно ослабевает уже несколько десятилетий, приближаясь к 15-й величине.

**Таблица 4. Характер кривых блеска некоторых новых звезд**

Новая, год вспышки	Звездные величины, m		Характер кривой блеска		Продолжительность падения	
	в максимуме	в минимуме	первоначальный спад	переходный период	на 3 величины, сутки	до минимума, годы
Очень быстрые						
Орла 1918	-1	12	Гладкий	Колеблющийся	8	7
Орла 1936	5	18	Колеблющийся	Гладкий	16	-
Лебедя 1920	2	17	Гладкий	С минимумом	16	8
Близнецов 1903	5	16	Гладкий	С горбом	17	-
Ящерицы 1936	2	15	Гладкий	Гладкий	10	9
Персея 1901	0	13	Гладкий	Колеблющийся	13	15
Кормы 1942	0	17	Гладкий	Гладкий	7	-
Лебедя 1975	2	21	Гладкий	Гладкий	4	-
Быстрые						
Орла 1945	7	18	Гладкий	Колеблющийся	31	-
Близнецов 1912	3	15	Колеблющийся	Колеблющийся	37	-
Ящерицы 1910	5	15	Гладкий	Гладкий	37	-
Ящерицы 1950	5	16	Колеблющийся	Колеблющийся	29	4
Стрельца 1898	5	16	Гладкий	С минимумом	20	9
Щита 1949	7	17	Колеблющийся	Гладкий	40	-
Медленные						
Возничего 1891	4	16	Колеблющийся	С минимумом	80	15
Лебедя 1948	8	18	Колеблющийся	Колеблющийся	160	-
Геркулеса 1934	1	15	Колеблющийся	С минимумом	100	20

1934

Змееносца 1848	4	13	Колеблющийся	Гладкий	145	30
-------------------	---	----	--------------	---------	-----	----

Живописца 1925	1	12	Колеблющийся	С минимумом	150	25
-------------------	---	----	--------------	-------------	-----	----

Очень медленные

Змеи 1909	9	17	Колеблющийся	-		19
-----------	---	----	--------------	---	--	----

Живописца 1925	1	12	Колеблющийся	-		15
-------------------	---	----	--------------	---	--	----

Живописца 1925	1	12	Колеблющийся	-		17
-------------------	---	----	--------------	---	--	----

Поистине, сколько новых звезд, столько и различных кривых блеска, но, как мы сейчас увидим, новые звезды можно подразделить на несколько классов по скорости и характеру изменения их блеска. В табл. 4 приводится описание нескольких типичных кривых блеска новых. Как видно из нее, по длительности падения блеска после максимума на три звездных величины их можно подразделить на четыре класса: очень быстрые (падение менее чем за полмесяца), быстрые (от половины месяца до двух), медленные (более двух месяцев) и очень медленные (десятилетия).

Здесь следует сказать подробнее об очень медленных новых звездах. До обнаружения в 1909 г. Новой Змеи, относящейся к этому классу, на ее месте не наблюдалось звезды ярче 15-й величины. В течение пятнадцати лет - до 1923 г. - она колебалась между 10-й и 11-й величинами, а затем стала постепенно слабеть. За следующие пятнадцать лет ее блеск понизился на три величины. Есть и еще более удивительные очень медленные новые.

Большое разнообразие в скорости развития процессов в новых звездах, несомненно, связано с различиями в мощности взрывов. Чтобы оценить мощность и энергию, выделяемую ими при вспышках, нужно уметь определять расстояния до них и их абсолютные величины.

### Способы определения расстояний и абсолютных величин новых

Мы уже знаем, как находят расстояния до звезд. Но в случае новых звезд обычные способы использовать удается редко. Например, спектральные методы определения абсолютных величин здесь непригодны, так как спектры новых звезд, как мы увидим далее, необычны.

Пришлось изыскивать другие способы. Самый надежный из них основан на том, что при вспышке новой звезды образуется расширяющаяся оболочка, которую можно наблюдать сначала спектрально, а затем и на снимках.

Возьмем для примера одну из наблюдавшихся в нашем веке вспышек - вспышку Новой Персея 1901 г. Изучение ее спектра в эпоху максимального блеска показало, что вокруг звезды образовалась оболочка, расширяющаяся со скоростью около 1200 км/с. Скорость расширения оболочки найдена на основе принципа Доплера по смещению линий поглощения в спектре новой звезды. Через несколько лет после вспышки на photographиях вокруг звезды была

обнаружена слабая туманность, радиус которой систематически увеличивался примерно на 0.54 угловой секунды. Это была сама расширяющаяся оболочка (рис. 9). Если учесть, что в году около 31.6 млн. секунд, то по скорости расширения, найденной ранее по спектру оболочки, мы можем подсчитать годовое увеличение оболочки в километрах или в астрономических единицах:  $1200 \times 31.6 \text{ млн.} = 37.9 \text{ млрд. км} = 254 \text{ а.е.}$  Вспомним теперь, что парсеком мы называем расстояние, с которого астрономическая единица видна под углом в 1 секунду. Следовательно, расстояние до Новой Персея будет в соответствующее число раз больше, т.е. равно 470 пс.

**Рис. 9.** Фотография Новой Персея 1901 г. и ее оболочки, полученная на 5-метровом телескопе через 60 лет после вспышки.

В редких случаях удается спустя полгода после вспышки обнаружить быстро расширяющееся кольцо - это новая звезда временно освещает случайно оказавшуюся рядом с ней пылевую туманность. Мы наблюдаем таким образом распространение световой волны в пылевой туманности или, другими словами, световое эхо вспышки. И в этом случае тоже можно рассчитать расстояние до новой звездой методом, аналогичным применяемому к расширяющейся оболочке новой звезды.

Пока расширяющиеся оболочки наблюдали в пятнадцати, а световое эхо - в четырех случаях. Расстояния до остальных новых, у которых известны видимые величины в максимуме блеска, находят по известной уже нам формуле, связывающей расстояние и видимую и абсолютную величину светила. Изучение абсолютных величин новых звезд в максимуме блеска имеет поэтому особое значение.

Сначала удалось разными способами установить средние абсолютные величины новых в максимуме блеска. Для этой цели использовались и абсолютные величины отдельных новых звезд, найденные по хорошо известным расстояниям до них, и статистические методы. Последние основаны на том, что расстояние входит во многие формулы, описывающие средние движения и положения звезд в Галактике. Вычислять расстояния до отдельных звезд с помощью таких формул, верных лишь для групп одинаковых по свойствам звезд, трудно, но зато средние расстояния эти формулы дают неплохие. После изучения абсолютных величин новых звезд туманности Андромеды этим методам теперь оставлена роль ориентировочных (контрольных) оценок.

Как видно из табл. 5, где приведены абсолютные величины 8 новых звезд, расстояния до которых удалось найти по расширяющимся оболочкам, их абсолютные величины в максимуме колеблются от -9.6 до -6.5. Следовательно, если мы используем среднюю абсолютную величину (она равна -8.1), то получим грубые оценки расстояний, иногда завышенные или заниженные более чем в два раза.

К счастью, американский исследователь Д. Мак-Лофлин еще в 1945 г. по этим нескольким новым обнаружил, что абсолютные величины быстрых новых обычно больше, чем медленных. Таким образом, по скорости ослабления блеска мы можем найти абсолютную величину новой в

максимуме и вычислить ее расстояние точнее, чем просто по средней абсолютной величине. Но пока эта закономерность была основана на нескольких оценках, преимущества ее использования были невелики. Она скорее была угадана, чем установлена. Лишь десятилетие спустя аккуратное исследование блеска новых звезд в туманности Андромеды подтвердило и уточнило найденную Мак-Лоплином закономерность.

**Таблица 5. Абсолютные величины новых звезд в максимуме блеска**

Новая, год вспышки	Скорость расширения		Расстояние, пс	Видимая величина, <i>m</i>		Абсолютная величина в максимуме, <i>M</i>
	угловые секунды за год	км/с		в максимуме	в минимуме	
Орла 1918	0.956	1600	350	-1	12	-9
Персея 1901	0.540	1200	470	0	13	-9
Кормы 1942	0.210	700	700	0	17	-9
Живописца 1925	0.180	300	350	1	12	-7
Геркулеса 1934	0.270	350	270	1	15	-6
Лебеда 1975	0.250	1600	1350	2	21	-10
Лебеда 1920	0.093	740	1680	2	17	-10
Ящерицы 1936	0.250	2300	1940	2	15	-9
Возничего 1891	0.117	1760	830	4	16	-6

Перепад между блеском в максимуме и в минимуме называется амплитудой колебания блеска новой. Как мы уже знаем, эта амплитуда составляет от 5 до 19 звездных величин. У быстрых новых амплитуды обычно оказываются больше, чем у медленных. Таким образом, основные различия между новыми звездами заключены в мощности вспышек - в их максимальных светимостях и скоростях возгорания и ослабления. А абсолютные величины новых звезд в минимуме блеска (т. е. стадии, в которой новая пребывает основное время жизни) сходны: от 3<sup>m</sup> до 5<sup>m</sup> за редкими исключениями.

Итак, в стадии минимального блеска новые звезды оказываются объектами малой светимости, подобно нашему Солнцу. Однако, как мы узнаем, познакомившись с физической природой новых звезд, они существенно отличаются от нашего светила во многих отношениях.

### Новые в туманности Андромеды

Еще в 1929 г. Хаббл нашел в близкой к нам спиральной системе - в туманности Андромеды - несколько десятков новых звезд. С тех пор исследователи часто находят новые в этой галактике. Сейчас их число приближается к двумстам. Особенно ценным было исследование американского астронома Х. Арпа. Он изучил множество фотографий этой туманности, полученных в 1953-1955 гг. в течение 290 ясных ночей, и нашел 30 новых звезд, блеск которых аккуратно измерил.

Звезды в туманности Андромеды практически все находятся на одинаковом расстоянии от нас, теперь хорошо установленном и равном 690 кпс. Поэтому для вспыхивающих в ней новых звезд абсолютные величины в максимумах блеска находятся без особых трудностей, если только вспышка не произошла в области с большим поглощением света.

Одинаковы ли свойства этих новых звезд и новых нашей Галактики? Этот вопрос исследован, и найдено, что физически они одинаковы. Следовательно, закономерность между абсолютной величиной в максимуме и скоростью падения блеска новой может служить для определения расстояний до новых звезд в нашей Галактике.

Но не только этому помогло исследование новых звезд в соседней с ними галактике. Наблюдения за появлением новых в туманности Андромеды велись регулярно на протяжении нескольких лет, что позволило оценить, сколько в среднем новых вспыхивает в этой галактике за год. Получились оценки 26-31 в год (последняя оценка принадлежит советскому астроному А. С. Шарову). В нашей Галактике среднее число вспышек новых в год оценить трудно, так как из-за сильного поглощения света в Млечном Пути мы хорошо видим вспышки только ближайших к нам новых и не замечаем более далекие, а те новые, которые вспыхивают вблизи ядра Галактики и за ним, вообще не могут быть обнаружены.

Приходится делать подсчеты в небольшой области Галактики - в радиусе 2 кпс вокруг Солнца и затем увеличивать оценку в 80-100 раз. Исследователи получают оценки, превышающие частоту вспышек новых в туманности Андромеды. Так, А. С. Шаров получил 260 новых в год в нашей Галактике. Почти десятикратное расхождение с туманностью Андромеды требует дальнейшего исследования этого вопроса.

Для всех когда-либо обнаруженных новых в туманности Андромеды сохранились сведения о месте их вспышек, и по ним нужно судить о размещении новых звезд в этой галактике.

Много вспышек отмечалось в области центра системы и меньше на периферии. Это указывает на то, что новые звезды не являются объектами плоской подсистемы, а относятся к промежуточной или сферической. К какой же из них? В этом помогает разобраться то, что главная плоскость туманности Андромеды видна под большим наклоном к лучу зрения. В таком случае плоская подсистема (спиральные рукава) и промежуточная подсистема вследствие перспективы выглядят сжатыми эллипсами, тогда как сферическая подсистема (шаровые скопления, окружающие туманность) таких перспективных искажений почти не терпит. Новые звезды показывают перспективно сжатое распределение и выявляют себя как промежуточное население звездной системы.

Эти выводы подтверждают и исследования размещения новых в нашей Галактике. По новым, находящимся сравнительно близко к нашему Солнцу, к сожалению, нельзя составить полное представление о их распределении в Галактике, как это удается для туманности Андромеды, наблюдаемой извне. Но и по обнаруженным в нашей Галактике новым видны их большая концентрация к центральной области Галактики и умеренная концентрация к главной плоскости Галактики. Эта умеренная концентрация характерна для объектов промежуточной

подсистемы. По средней высоте новых звезд над галактической плоскостью их относят к населению диска Галактики

## **Глава IV. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЛЕТОПИСИ НОВЫХ ЗВЕЗД**

### **Три оптически важных слоя в оболочке новой звезды**

Мы уже знаем, что спектральный анализ дает богатые сведения о физических условиях в оболочках звезд. Особенно плодотворно изучение спектров новых звезд. Каждая деталь их несет кроме обычных сведений еще и дополнительную информацию о событиях, происходящих в слоях, где эта спектральная деталь образуется. А весь спектр в целом дает для каждого момента многопанорамную картину явления, важнейшие детали которой астрофизики теперь умеют понимать.

В серии спектров новой звезды, сфотографированных на последовательных стадиях изменения ее блеска, перед исследователем, как в настоящем кинофильме, проходит развитие явления новой звезды от образования плотной расширяющейся оболочки после вспышки и до превращения ее в разреженную газовую туманность. Изучение спектров новых звезд дает также сведения о размерах и плотности оболочек на разных стадиях, их массах, тепловых режимах и химическом составе.

Важной особенностью спектров новых звезд является смещение в фиолетовую сторону линий поглощения. Согласно принципу Доплера, это означает, что газ, в котором они образуются, т. е. обращенная к нам часть оболочки, движется в нашу сторону. Следовательно, в целом газовая оболочка новой звезды расширяется. Как мы уже говорили, спустя некоторое время после вспышки новой это подтверждается прямыми наблюдениями расширяющейся туманности вокруг угасающей новой звезды.

Как и в обычных звездах, оболочка новой имеет фотосферу, непрозрачную для оптического излучения, которая создает непрерывный спектр оболочки, и обращающий слой, непрозрачный для излучения фотосферы только в спектральных линиях газов, образующих оболочку. Но кроме линий поглощения в спектре новой звезды вскоре после максимума блеска становятся заметны и яркие линии излучения. Такие линии обычно оттеняются с фиолетовой стороны темной линией поглощения, присутствовавшей в спектре новой еще до появления яркой линии. И та и другая линии образуются атомами одного и того же химического элемента, но яркие линии возникают в так называемой протяженной оболочке - разреженном и прозрачном для выходящего из фотосферы излучения слое. Этот слой называется протяженным потому, что его толщина может превосходить радиус фотосферы новой звезды.

Итак, в спектре новой звезды на некоторых стадиях мы встречаемся со спектральными деталями трех сортов, которым соответствуют разные части оболочки (рис. 10): фотосфера, обращающий слой и разреженная протяженная оболочка.

Следует заметить, что в отличие от линий поглощения яркие линии, соседствующие с ними, не смещены в фиолетовую сторону спектра. Это объясняется тем, что протяженная оболочка, в которой возникают яркие линии, прозрачна. Ее полусфера, обращенная к нам, создает

фиолетовую сторону яркой линии, а обратная полусфера - красную сторону. С фиолетовой стороны яркая линия резко переходит в узкую линию поглощения.

При расширении звезды протяженная оболочка становится все больше и больше, тогда как фотосфера и обращаящий слой, связанные с непрозрачными плотными областями оболочки, не увеличиваются после достижения звездой максимума блеска. Поэтому после максимума блеска линии излучения в спектре новой звезды продолжают усиливаться, а с линиями поглощения происходят необычные превращения: они распадаются на отдельные компоненты, в разной степени смещенные в фиолетовую часть спектра. В ходе расширения оболочки звезды наименее смещенные компоненты этих линий, возникшие в свое время первыми, первыми и исчезают, а самые смещенные временно усиливаются.

В самых разреженных частях оболочки новой звезды образуются особые яркие линии. В этих частях практически нет поглощения, и поэтому они не имеют темных компонент с фиолетовой стороны. Это появляются запрещенные линии, о которых мы уже упоминали в главе II. Они излучаются газами только в условиях крайне низкой плотности под воздействием горячего ультрафиолетового излучения новой.

**Рис. 10.** Образование линий излучения и поглощения в спектре новой звезды.

Вверху - новая звезда с расширяющейся главной оболочкой, внизу - вид спектральной линии на фотографии спектра новой звезды и схема изменения величины почернения спектральной линии. Части оболочки образуют разные участки линии, они обозначены на схемах одними и теми же буквами. Важную роль в этом разъединении играет то, что оболочка очень протяженна и имеет значительную скорость расширения (ее направление и величина схематически отмечены стрелками), а проекции ее на луч зрения (т. е. лучевые скорости участков оболочки, отмеченные пересеченными стрелками) изменяются в зависимости от положения участка относительно наблюдателя. Сама новая звезда образует непрерывный спектр (Н). Она просвечивает через полупрозрачную часть оболочки (А), которая образует линию поглощения в непрерывном спектре. Области протяженной оболочки Б, В и Г образуют крылья и вершину линии излучения.

Первыми в спектрах новых звезд появляются запрещенные линии нейтрального кислорода, хорошо теперь известные геофизикам по исследованиям ночного свечения земной атмосферы и называемые авроральными. Несколько позже появляются запрещенные линии дважды ионизованного кислорода, которые типичны для спектров горячих газовых туманностей и носят в астрономии название небулярных (от латинского "небула"- "туманность"). В спектрах некоторых новых звезд встречаются также запрещенные линии высокоионизованных атомов, характерные для спектра солнечной короны ("корональные").

Раньше, когда о способности известных газов излучать особые запрещенные линии в условиях низкой плотности не знали, линии в спектрах газовых туманностей, не отождествлявшиеся с линиями спектров обычных газов, наблюдаемых в лабораторных условиях, называли линиями "небулия", а аналогичные линии в спектре солнечной короны - линиями "корония". Развитие спектральных исследований позволило разгадать природу линий небулия и корония. Как мы теперь знаем, их излучают газы в необычных условиях.

Теперь мы получили представление о сложности спектров новых. Несмотря на значительный успех теории новых звезд, пока изучены и объяснены лишь главные черты этого явления. Но достигнутые успехи свидетельствуют, что астрономы идут по верному пути.

### **Основные стадии изменения спектра новой звезды**

Познакомимся теперь с последовательностью изменений вида спектров новой звезды и соответствующей ей последовательностью изменений блеска. Разобраться в них удалось еще до объяснения - процессов, стоящих за этими изменениями.

Если не считать особых спектров до вспышки и после ее окончания, то новая звезда имеет пять основных спектральных стадий. Вот их названия: предмаксимальный спектр, "главный спектр", диффузно-искровой спектр, орионов спектр, небулярный спектр. Каждая из спектральных стадий начинается еще до завершения развития предшествующих и сначала существует одновременно с ней.

На рис. 7 была изображена схема кривой блеска новой звезды с указанием основных стадий развития спектра и блеска. Мы видели, что каждой спектральной стадии соответствует свой участок кривой блеска. Схема помогает понять очередность смен спектральных стадий. Достаточно сказать, что специалисты по виду спектра могут разобраться в характере кривой блеска новой звезды и установить, когда она имела максимум, если его не удалось наблюдать из-за позднего открытия звезды.

Проследим теперь основные черты каждой из спектральных стадий.

Предмаксимальный спектр, снятый за 1-2 суток до максимума, похож на спектры сверхгигантов классов А - F. Он сохраняется и в первые дни после максимума. Затем сходство спектров новых звезд с обычными звездными спектрами прекращается.

Сразу же после максимума блеска спектр новой резко преобразуется. Рядом с линиями поглощения исчезающего предмаксимального спектра с фиолетовой стороны появляются темные "дублиеры", а с красной стороны - яркие линии излучения. Это возник "главный спектр". Среди ярких линий сильнейшие - линии водорода и некоторых металлов, а позже, в ходе развития спектра, появляются также запрещенные линии ряда элементов.

Появление запрещенных линий в спектре происходит очень эффектно. Например, авроральные линии нейтрального кислорода появляются вскоре после максимума блеска и сначала равномерно усиливаются, но потом вдруг ярко вспыхивают. В действительности же в этот момент звезда вступила в стадию быстрого падения блеска, что спектрально соответствует ослаблению ее непрерывного спектра, и на фоне его быстрого ослабления усиление запрещенных линий выглядит "вспышкой".

"Главный спектр" пребывает в непрерывном изменении: одни линии исчезают, другие появляются, некоторые линии поглощения перед исчезновением раздваиваются и т. д. Общая тенденция заключается в том, что усиливаются линии, характерные для горячей газовой оболочки, становящейся все более разреженной. Постепенно линии поглощения "главного спектра" слабеют и эта стадия заканчивается. Яркие же линии некоторых атомов еще продолжают свое существование и после окончания стадии.

Но еще до значительного ослабления "главного спектра" появляется третья система линий поглощения, смещенная в фиолетовую сторону больше, чем система линий "главного спектра". Новые линии отличаются большой шириной, размытостью (диффузностью) и по составу напоминают спектр мощной электрической искры. За эти особенности астрономы дали ей название диффузно-искрового спектра.

Четвертая система линий поглощения - орионов спектр - появляется в момент полного развития диффузно-искрового спектра. В орионовом спектре преобладают линии, характерные - для звезд спектрального класса В, которых много в созвездии Ориона. Отсюда и родилось в свое время название звезд этого спектрального класса - орионовы звезды, давшее затем название и стадии спектра новой звезды.

В орионовом спектре новой звезды самыми заметными яркими деталями являются широкие линии дважды ионизованного азота.

Пятая стадия спектра новой звезды - небулярная. Она начинается рано, с появлением первых запрещенных линий, и достигает полного развития, когда исчезают последние линии поглощения. К этому времени спектр новой очень похож на спектры горячих газовых туманностей и состоит из ярких линий водорода, гелия и ряда запрещенных линий.

Когда туманность вокруг звезды рассеется, спектр новой оказывается близким к спектру звезды класса О. Интересно, что когда чисто случайно перед самой вспышкой был получен спектр Новой Орла 1918 г., он оказался похожим на спектр этой новой, зарегистрированный через несколько лет после вспышки. Важные сведения о спектрах новых звезд в период между вспышками дали исследования тех новых, которые повторяют свои вспышки. О них мы будем говорить позже.

### **Спектр информирует о температуре новой звезды**

Разнообразие спектральных стадий и сложность некоторых из них потребовали глубоких исследований. В первую очередь были установлены физические условия, существующие в новой звезде, т. е. ее температура и плотность ее оболочки.

Точной характеристикой была бы эффективная температура новой звезды, вычисляемая по полному излучению, но у горячих звезд подавляющая часть световой энергии, согласно закону излучения, выделяется в ультрафиолетовой части спектра, недоступной до последнего времени прямым измерениям. Лишь спектрографы, устанавливаемые на ракетах и искусственных спутниках, дали такую возможность для самых ярких звезд и для вспышек новых.

Но уже давно были найдены обходные пути определения температур оболочек новых звезд. Один из них, предложенный голландским астрофизиком Г. Занстрой в 1930 г., основан на свойствах самого распространенного в газовых туманностях и в новых звездах элемента - водорода. Спектр водорода состоит из нескольких серий линий; каждая из серий сгущается в фиолетовую сторону и переходит в непрерывный спектр. Напомним, что, чем больше порция энергии, полученная атомом водорода, тем в более коротковолновой области спектра расположена линия, где он излучит эту порцию; если же атом ионизируется, то мы видим его

последующее излучение в непрерывном спектре за пределом серии. В далекой ультрафиолетовой области спектра расположена серия Лаймана со своим непрерывным спектром, в оптической области - серия Бальмера и ее непрерывный спектр, а остальные спектральные серии водорода располагаются в инфракрасной области.

Свечение в линиях водорода и других элементов в спектрах газовых туманностей происходит вследствие того, что атомы в них поглощают мощное ультрафиолетовое излучение горячей звезды в области непрерывного спектра серии Лаймана, а потом эта энергия излучается уже более мелкими порциями в бальмеровской и других сериях спектра. Занстра показал, что из каждого кванта непрерывного спектра серии Лаймана газовая туманность образует только один квант в бальмеровском участке спектра. Поэтому, измерив силу линий излучения водорода и его непрерывного спектра в оптически наблюдаемой области спектра, можно вычислить и величину энергии в ненаблюдаемом непосредственно ультрафиолетовом участке спектра, а по ней найти соответствующую температуру центральной звезды.

Другие способы отыскания температуры центральных звезд в газовых туманностях и новых звездах были предложены в 1932 г. советским астрофизиком В.А. Амбарцумяном. Так, сопоставляя интенсивность излучения в линиях водорода и ионизованного гелия, расположенных рядом в спектре, можно найти наивысшую оценку температуры звезды, а по сравнению энергий, излучаемых в запрещенных линиях дважды ионизованного кислорода, - наинизшую оценку. Этот способ основан на знании причин свечения запрещенных линий.

Источник энергии свечения запрещенных линий в конечном счете тот же самый, что и для разрешенных линий, - сильное ультрафиолетовое излучение звезды. Оно ионизует атомы водорода. При ионизации части энергии ультрафиолетового кванта расходуется на освобождение электрона и возвращается в виде свечения линий водорода. А остальная часть ее уносится электроном. Чем выше температура звезды, тем больше кинетическая энергия этих свободных электронов. Когда атом ионизованного кислорода сталкивается в оболочке новой звезды со свободным электроном, последний передает ему часть своей кинетической энергии, которой оказывается достаточно для свечения этого атома в запрещенной линии. Конечно, если бы газовая среда была плотнее, атом кислорода не успел бы излучить эту энергию в запрещенной линии, так как еще раньше столкнулся бы с другим: электроном и передал ему энергию. Но в разреженной среде столкновения редки и все обходится без приключений: свечение в запрещенной линии появляется.

Отношение энергий запрещенных линий дважды ионизованного кислорода и водорода характеризует определенным образом отношение энергий в ультрафиолетовом участке спектра звезды, находящемся за пределом серии Лаймана. По этому отношению можно, следовательно, тоже рассчитать температуру. Поскольку причина свечения кислорода в запрещенных линиях, как мы только что видели, - кинетическая энергия электронов, то температуру, вычисленную таким путем, называют "электронной" или "кинетической" температурой туманности или оболочки новой звезды.

**Таблица 6. Температуры оболочки Новой Ящерицы 1936 г., найденные различными способами в период вспышки звезды**

Время в сутках считаемое от максимума	Звездная величина новой, $m$	Температура, К				Спектральные стадии, присутствующие в спектре новой
		цветовая	ионизационная		электронная	
			по водороду	по дважды ионизированному азоту		
0	2	10250	-	-	-	Предмаксимальная
2	3	7800	-	-	-	Предмаксимальная и главная
5	4	10500	-	-	-	Главная, диффузно-искровая, орионова
13	5	12500	32500	63000	-	То же
26	6	14000	32500	66000	9200	Главная, небулярная
39	6,5	-	34000	67500	9200	Небулярная
46	7	34000	33500	71000	9200	Небулярная
66	8	14300	39500	75000	9200	Небулярная

В табл. 6 приведены температуры новой звезды, полученные разными способами для важнейших спектральных стадий. Они значительно различаются при измерениях разными способами. Такое в астрофизике случается довольно часто. Это не обязательно связано с приближенностью измерений или несовершенством методов, а может указывать на сложность, неоднородность условий в звезде. Именно так обстоит дело с новыми звездами.

### Скорости расширения, размеры и плотности оболочек

Смещение линий поглощения в спектрах новых звезд свидетельствует о расширении их оболочек. Измерение смещения линий в спектрах показывает, что скорость расширения слоев, создающих эти линии поглощения, не остается постоянной, а различна для разных спектральных систем и даже возрастает иногда в течение стадии.

В табл. 7 показаны скорости расширения медленных и быстрых новых звезд на разных спектральных стадиях. Прежде всего обнаруживается, что у очень стройной новой скорости расширения велики, а у медленной - значительно меньше. Это, между прочим, дает ключ к объяснению существования быстрых и медленных новых. Звезда с быстро расширяющейся оболочкой быстро взлетает к максимуму блеска, а затем быстро падает до минимума, форсированно пробегая все спектральные стадии.

**Таблица 7. Скорости расширения оболочки новых звезд, выброшенных на разных стадиях, км/с**

Новая, год	Характер	Предмаксимальный	"Главный	Диффузно-	Орионов	Небулярный
------------	----------	------------------	----------	-----------	---------	------------

вспышки	изменения блеска	спектр	спектр"	искровой спектр	спектр	спектр
Орла 1918	Очень быстрый	1300	1600	2200	3000	Линий поглощения для измерений скоростей не имеется
Лебеда 1920	Очень быстрый	520	740	1400	2500	То же
Ящерицы 1936	Очень быстрый	1100	2300	2000	3300	То же
Персея 1901	Очень быстрый	700	1200	3500	3650	То же
Близнецов 1912	Быстрый	400	850	1500	1600	То же
Ящерицы 1950	Быстрый	-	900	1500	2500	То же
Живописца 1925	Медленный	100	300	700	1300	То же
Геркулеса 1934	Медленный	175	350	500	800	То же

В эпоху максимума блеска - в предмаксимальном и главном спектре - скорости расширения сравнительно умеренны, но, когда появляются линии поздних спектральных стадий, они указывают на значительно более высокие скорости. Естественное объяснение этого явления, как мы увидим, заключается в том, что диффузно-искровой и орионов спектры образуются веществом, выброшенным из звезды уже после главной вспышки.

Основная, главная оболочка, которую впоследствии удастся видеть на фотографиях - это та, что создает "главный спектр". По скорости главной оболочки мы можем, следовательно, рассчитать радиус оболочки для каждого момента явления новой звезды. Для сравнения с размерами обычных звезд радиусы оболочек удобно выражать в радиусах Солнца (700000 км). Эти данные содержатся в табл. 8.

**Таблица 8. Радиусы оболочки и фотосферы Новой Ящерицы 1950 г. (в радиусах Солнца)**

Стадия	Сутки после максимума	Абсолютная величина, <i>M</i>	Радиус фотосферы	Внешний радиус оболочки
Максимум	0	-7.5	150	150
"Главный спектр"	6	-6.5	90	816
Орионов спектр, минимум	29	-4.4	5.5	3372
Орионов спектр, максимум	31	-5.0	9.6	3705

Переходный спектр, минимум	53	-3.6	2.9	6149
Переходный спектр, максимум	60	-5.0	9.8	6816
Начало небулярной стадии	112	-2.9	1.7	12593

В этой же таблице приведены радиусы фотосфер новой звезды, т. е. радиусы внутренней области оболочки новой звезды, которая непрозрачна для излучения изнутри. Радиус фотосферы  $R$  зависит от ее температуры и абсолютной величины звезды:

$$\lg R = 5900/T - 0.2M - 0.02$$

В случае новых звезд расчеты показывают огромные изменения радиуса фотосферы. Разность же радиуса оболочки и радиуса фотосферы дает представление о гигантской толщине обращаемого слоя, где образуются линии оболочки новой.

Важной физической характеристикой оболочки новой звезды является ее плотность. Способы определения плотности довольно разнообразны. Впервые ее удалось оценить в 1933 г. советским астрофизикам В.А. Амбарцумяну и Н.А. Козыреву. Они рассчитали плотность в фотосфере новой в момент максимума блеска, пользуясь температурой и размерами оболочки звезды, а также данными об интенсивностях некоторых ярких линий спектра новой в небулярной стадии.

Чаще всего теперь определяют плотность оболочки новой по интенсивности линий водорода. Разработанные для этого способы дают количество свободных электронов в кубическом сантиметре оболочки (так называемую электронную концентрацию). Поскольку оболочки новых звезд почти целиком состоят из ионизованного водорода, то свободные электроны в них появляются главным образом за счет ионизации водорода. Следовательно, электронная концентрация характеризует количество ионов водорода или практически в нашем случае - полное число атомов водорода в кубическом сантиметре. Если умножить его на массу протона ( $1.66 \cdot 10^{-24}$  г), то мы найдем плотность вещества оболочки в слое, где возникает линия излучения водорода.

Наблюдения показали, что по мере расширения оболочки ее плотность убывает, несмотря на то, что в оболочку продолжает непрерывно поступать вещество из звезды. Зная скорость расширения оболочки и изменение ее плотности с глубиной, можно вычислить массу оболочки новой, звезды на разных ее стадиях.

Советский астрофизик И. М. Копылов подсчитал массы (оболочек десяти новых звезд в небулярных стадиях. Они получились небольшими: от 0.00002 до 0.001 масс Солнца. Это указывает на то, что при вспышке от звезды отделяется небольшая масса газа, а сама звезда сохраняется в целостности. Поэтому после вспышки она возвращается к своей нормальной звездной величине.

Что касается масс самих новых звезд, то их удается оценить в редких случаях, и мы будем говорить об этом позже, обычные новые оказались карликами с массами от одной солнечной до нескольких десятых солнечной.

Ознакомление с явлениями вспышки новой звезды и ее физическими характеристиками подводит нас к пониманию, что собой представляет эта вспышка и чем является сама новая звезда. Но прежде чем разобраться в этом, мы должны познакомиться с другими взрывными звездами, изучение которых оказалось очень полезным для объяснения явления новых звезд.

## Глава V. ОСОБЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ НОВЫХ ЗВЕЗД

### Повторные новые - обычные новые или особый класс?

Мы познакомились с явлениями, протекающими при вспышке обычной новой звезды. Однако встречаются разновидности новых, вспышки которых отличаются теми или иными особенностями от стандартных. Поэтому наряду с обычными новыми звездами отдельно рассматриваются их разновидности: повторные новые, звезды типа U Близнецов и новоподобные звезды

Ближе всего к обычным новым звездам так называемые повторные новые. Как говорит само название, их главное отличие от обычных новых заключается в том, что их вспышки повторяются через определенное время. Впервые это было обнаружено в 1902 г., когда вспыхнула Новая Компаса, имевшая уже до этого вспышку в 1890 г. Явление повторной вспышки новой звезды, естественно, показалось нехарактерным для обычных новых, и эту звезду перевели в класс новоподобных, куда, как в мусорную корзину, до сих пор отправляют различного рода уникальные случаи вспышек. Но вскоре были открыты еще несколько повторных новых, а Новая Компаса к настоящему времени повторила вспышки еще три раза.

Сейчас известно восемь повторных новых. Они перечислены в табл. 9, где приведены также годы их вспышек, длительности циклов между вспышками и разности звездных величин в максимуме и минимуме (амплитуды) блеска. Тут же приведены три обычные новые, у которых также подозревается цикличность вспышек. Но все ли повторные новые выявлены среди двухсот наблюдавшихся к настоящему времени новых звезд? Конечно, нет.

Дело в том, что, пока новая не повторит вспышки, она ничем не отличается от остальных новых, имевших единственную вспышку; среди повторных новых есть и быстрые и медленные: абсолютные величины повторных новых такие же, как у обычных новых. Правда, по амплитудам блеска, спектральным деталям и другим особенностям повторные новые сходны между собой больше, чем с новыми, не имевшими повторных вспышек. Так, почти все повторные имеют амплитуды колебания блеска, меньшие, чем новые, не повторявшие вспышек. Но все же этого недостаточно, чтобы считать повторные каким-то особым классом новых звезд.

**Таблица 9. Повторные новые звезды**

Новая	Годы вспышек	Звездная величина	Амплитуда, <i>m</i>	Средний цикл, годы
-------	--------------	-------------------	------------------------	-----------------------

		В максимуме	В минимуме		
Северной короны	1866, 1946	2.4	11.4	9.0	80
Змееносца	1898, 1933, 1958, 1967	5.3	12.3	7.0	30
Компаса	1890, 1902, 1920, 1944, 1967	7.0	14.5	7.5	19
Стрелы	1913, 1946, 1978	7.0	15.5	8.5	33
Стрельца	1901, 1919, 1973	7.2	14.4	7.2	18
Водолея	1907, 1962	8.0	16.6	8.6	55
Скорпиона	1863, 1906, 1936, 1979	8.8	19.3	10.5	39
Единорога	1917, 1975	11.3	20	8.7	58
Орла	125, 1918	-1	12	13	1793
Персея	839, 1901	0	13	13	1062
Скорпиона	393, 1600	0	?	?	1207

В 1934 г. советские астрономы П.П. Паренаго и Б.В. Кукаркин сравнили амплитуды и циклы повторных новых звезд и переменных типа U Близнецов (иногда называемых еще карликовыми новыми). И оказалось, что чем больше амплитуда, тем больше и цикл между вспышками. Другими словами, стала вырисовываться взаимосвязь: у переменных типа U Близнецов амплитуды небольшие и короткие промежутки между вспышками, а у повторных новых и то и другое больше, следовательно, если обычные новые звезды имеют еще большие амплитуды блеска, то они должны повторять свои вспышки только через более длительные промежутки времени.

Паренаго и Кукаркин обратили внимание на Новую Северной Короны 1866 г., у которой амплитуда блеска была где-то между большими амплитудами обычных новых и небольшими амплитудами повторных. Если обнаружившаяся взаимосвязь между амплитудами и циклами существует в действительности, то эта новая звезда по их расчетам должна была повторить вспышку между 1926 и 1966 гг.

И вот 8 апреля 1946 г. любитель астрономии, путевой обходчик А.С. Каменчук, хорошо знавший звездное небо, обнаружил в созвездии Северной Короны "лишнюю" звезду 2-й величины (такую величину в этом небольшом созвездии имела лишь самая яркая звезда - Гемма). Это была повторная вспышка Новой 1866 г. Астрономы профессионалы заметили эту звезду лишь 9 апреля, когда она уже стала убывать в блеске.

Предсказание вспышки Новой в Северной Короне сильно укрепило гипотезу Паренаго и Кукаркина о повторности вспышек обычных новых. По пока это единственная повторная новая с длинным циклом. Астрономы ждут повторных вспышек других новых звезд, наблюдавшихся

в XVII-XIX вв. Так, по предположениям советского астронома П.Г. Куликовского, в ближайшие десятилетия возможно повторение вспышки Новой Ориона 1667 г.

Решающим подтверждением гипотезы были бы обнаружение повторности вспышек обычных новых звезд с большими амплитудами. Но интервал между их вспышками составляет тысячи лет, и ожидание их повторения выглядит безнадежным.

К счастью, еще в 1954 г. советский астроном И.М. Копылов заметил, что закономерности для повторных новых и карликовых новых следует рассматривать отдельно, так как эти классы взрывных звезд существенно различаются между собой по многим признакам, начиная с абсолютных величин. Теперь это нашло подтверждение в исследовании московских астрономов Ю.Н. Ефремова и П.Н. Холопова. Причем длительность цикла обычных новых значительно уменьшается.

Однако имеется еще одна возможность подтвердить или отвергнуть повторность обычных новых звезд. Дело в том, что в древних китайских, японских и европейских хрониках имеются записи о появлении комет, вспышках ярких звезд и других небесных явлениях. Ахиллесовой пятой этих старинных записей является грубость указаний положения на небе, нечеткость характеристики явления. Сейчас собраны данные о более чем 200 вспышках новых и сверхновых звезд, замеченных в древности, и среди них, несомненно, встречаются и ярчайшие повторные новые. Одни из них еще повторят вспышки в будущем, а иные повторили их у нас на глазах, только прежние их вспышки были забыты.

В древности замечались, конечно, только самые яркие вспышки - не слабее 3-й звездной величины, поэтому мы можем проверить гипотезу повторности обычных новых по самым ярким вспышкам, например, по Новой Орла 1918 г., Новой Персея 1901 г. и Новой Кормы 1942 г. Все они были быстрыми новыми и в максимуме превосходили 1-ю звездную величину. Следовательно, простым глазом они могли быть видны не более месяца, а бросались в глаза от силы дней десять. Если же в этот период была пасмурная погода, яркую вспышку могли и не заметить.

Тем не менее в районе вспышки Новой Орла 1918 г. европейские наблюдатели видели вспышки около 125 г. и в 1612 г., но ряд соображений говорит, что в 1612 г. наблюдалась другая новая звезда. Интервал между вспышкой в 125 г. и вспышкой 1918 г. составляет 1793 года. Вполне возможно, что одна или даже две вспышки в этом интервале были наблюдателями пропущены. На месте Новой Персея 1901 г. была замечена вспышка в 839 г., цикл между вспышками этой звезды 1062 года. Что касается вспышек на месте Новой Кормы 1942 г., то они не были замечены вследствие, очевидно, двух обстоятельств: Корма - южное созвездие, наблюдаемое короткое время весной, а, судя по большой амплитуде вспышек, цикл между ними должен насчитывать несколько тысячелетий.

**Рис. 11.** Зависимость "амплитуда - цикл" для повторных новых.

На рис. 11 мы видим зависимость "амплитуда - цикл" повторных новых, как она выглядит в настоящее время. Можно считать, что мы имеем новые подтверждения повторности обычных

новых. Но все ли новые с малыми амплитудами повторяют вспышки? Оказывается, есть Новая Циркуля 1906 г., амплитуда которой всего 4.7 звездной величины, а повторных вспышек у нее не наблюдается. Предполагают, что в действительности эта новая в минимуме блеска значительно слабее, а свет ее сливается с сиянием яркой соседней звезды, не имеющей к ней никакого отношения. Но пока это утверждение не проверено наблюдениями.

Повторные новые оказались удобными для изучения спектральных свойств новых звезд между вспышками. В целом спектры обычных и повторных новых в минимуме оказались одинаковыми, В период вспышки новые с малыми амплитудами блеска, т. е. повторные, имеют некоторые отличия в спектрах от обычных новых: более слабый непрерывный спектр, корональные линии и т.д. Это говорит о большей разреженности и меньшей массе оболочек, выбрасываемых при вспышке, что вполне соответствует небольшой амплитуде вспышки такой новой звезды.

В последние годы исследования повторных новых получили еще одно направление. В августе 1975 г. английский спутник, оснащенный рентгеновскими телескопами, обнаружил в созвездии Единорога слабое рентгеновское излучение, интенсивность которого стремительно возрастала, и через пять суток опередила самый яркий из известных до сих пор рентгеновских источников в Скорпионе. Достигнув на десятый день максимума, источник стал слабеть и через 8 месяцев исчез. Естественно возник вопрос, что находится на месте, где произошла рентгеновская вспышка. Была найдена звезда, имевшая в августе 1975 г. 11-ю звездную величину и непрерывный спектр без линий. А на старых снимках она получалась всего 20-й величины. Кроме того, в 1917 г. она уже имела вспышку блеска, следовательно, это оказалась повторная новая звезда. И все же особая. Когда начались исследования неба рентгеновскими телескопами, было уже несколько вспышек повторных новых звезд, но они не сопровождалась сильными всплесками рентгеновского излучения. Явление Новой Единорога пока уникально.

## **Взрывные звезды типа U Близнецов**

В 1855 г. английский искатель астероидов Дж. Хинд обнаружил в созвездии Близнецов быстро разгоревшуюся звезду. 15 декабря она была 9-й величины, через три недели ослабела до 12-й и впоследствии вернулась к 14-й величине. А приблизительно через сто суток ее вспышка повторилась. К настоящему времени у этой звезды наблюдалось уже несколько сотен вспышек. Интервалы между вспышками не имеют строго постоянной длительности, так же как неодинакова и яркость самих вспышек. Таким образом, по характеру кривой блеска переменная несколько напоминала новую звезду, но многими чертами от нее отличалась.

**Рис. 12.** Кривые блеска U Близнецов (а) и Z Жирафа (б).

Сейчас известно более ста пятидесяти переменных типа U Близнецов, как назвали их по первой открытой Хиндом звезде. Все они характеризуются циклическим (т. е. нестрого периодическим) повторением вспышек. Кроме того, есть немногочисленная разновидность переменных этого типа, у которых ослабление блеска идет медленно, иногда оно

задерживается, не снижаясь до старого минимума, и звезда переживает до следующей вспышки (рис. 12).

Для малых амплитуд блеска (в две звездные величины) циклы составляют несколько суток, а для амплитуды в пять-шесть величин - сотни суток. Эта взаимосвязь амплитуд и циклов открыта П.П. Паренаго и Б.В. Кукаркиным.

Абсолютные величины переменных типа U Близнецов в минимуме блеска получаются от 10 до 7.5.

Исследование характера движения переменных типа U Близнецов и их размещения в Галактике привело к выводу, что они, как и новые звезды, не населяют спиральные рукава, а принадлежат к населению галактического диска.

Таким образом, по ряду признаков переменные типа U Близнецов обнаруживают сходство с новыми звездами, но тем не менее являются самостоятельным классом взрывных звезд. Согласно работам советского астрофизика В.Г. Горбачко иногда употребляемое теперь образное, выражение "карликовые новые", в сущности, неправильно, так как причины увеличения блеска у этих двух классов звезд, судя по спектрам, разные.

В эпоху между вспышками спектр U Близнецов непрерывный, имеет яркие линии излучения водорода и гелия. Цветовая температура непрерывного спектра около 5500 К, что соответствует карлику немного холоднее Солнца (G5). Как недавно выяснилось, в эпоху максимума блеска спектр этой переменной повышает интенсивность, а яркие линии слабеют. При вспышке U Близнецов в отличие от обычных новых, по-видимому, не происходит отделения или расширения оболочки, а повышается по каким-то причинам ее температура до 15000К, что и ведет к возрастанию блеска.

### **Несколько типов новоподобных звезд**

Кроме звезд типа U Близнецов обнаружен ряд звезд, сходных с новыми по тем или иным признакам, но не являющихся типичными новыми. Их обычно называют новоподобными. Каждый представитель класса новоподобных исключительно своеобразен, и они образуют пестрый список объектов.

Наиболее четко среди новоподобных звезд выделяются переменные типа Z Андромеды, или симбиотические звезды. Их известно около двух десятков.

Переменные этого типа по временам скачками изменяют блеск на несколько величин, но амплитуды их значительно меньше, чем у новых (не более 5<sup>m</sup>). Зато изменения в спектрах сходны с изменениями в спектрах новых.

Между вспышками в спектре Z Андромеды присутствуют линии, аналогичные линиям спектров, новых звезд и горячих газовых туманностей. Во время вспышки звезда выбрасывает газовую оболочку, расширяющуюся со скоростью около 100 км/с. В это время в спектре сильны яркие полосы окиси титана. Колебания блеска и спектра этой новоподобной звезды напоминают колебания новой в переходной стадии.

**Рис. 13.** Модель симбиотической звезды: холодный красный гигант и горячая звезда с яркими линиями излучения в спектре окружены протяженными разреженными оболочками и обе погружены в общую туманность. Каждая из оболочек и туманность обнаруживают свое присутствие спектральными линиями излучения.

1 - горячая звезда, 2 - красный гигант, 3 - оболочка, излучающая линии H и He, 4 - разреженная оболочка, излучающая запрещенные линии ионизированного железа, 5 - оболочка, излучающая разрешенные и запрещенные линии ионизированного железа, 6 - протяженная туманность с запрещенными линиями ионизированного кислорода и неона.

В спектре звезд типа Z Андромеды обнаруживается удивительное сочетание особенностей горячей и холодной звезд. По непрерывному спектру цветовые температуры получаются всего 5000 К в минимуме и 10000 К в максимуме вспышки, а яркие линии спектра указывают на температуру в десятки тысяч кельвинов. В спектрах некоторых из этих переменных обнаружено периодическое изменение смещения линий.

Это указывает на то, что звезда является двойной. Как правило, главная звезда в такой системе - горячая класса O, а спутник - разреженный холодный гигант класса K или M. Обе звезды погружены в общую газовую туманность. Вспыхивает главная горячая звезда. Она поддерживает высокую температуру оболочки с линиями излучения. Зато красный гигант дает больше холодного излучения в непрерывном спектре переменной (рис. 13).

Такое сочетание туманности с тесной двойной системой, состоящей из контрастных по свойствам звезд, дало право называть переменные такого типа симбиотическими. Среди симбиотических звезд встречаются и такие, у которых не наблюдается колебаний блеска или периодического смещения линий в спектре. Тем не менее сложные комбинированные спектры оказываются достаточными для отнесения объектов к этому замечательному типу звезд.

Кроме симбиотических существует еще одна группа звезд, которая сходна с новыми особенностями своего спектра. Это звезды типа Р Лебеда.

Сама Р Лебеда появилась как звезда 3-й величины в 1600 г. и сохраняла свой блеск неизменным два года, а затем ослабела до 6-й величины. В 1655 г. ее вспышка повторилась снова. С 1715 г. ее блеск колеблется около 5-й величины.

Спектр Р Лебеда, - сверхгиганта класса В - очень своеобразен. Он характеризуется присутствием ярких линий водорода и гелия, окаймленных с фиолетовой стороны темными линиями поглощения. Эти особенности спектра Р Лебеда напоминают спектр новой вскоре после максимума блеска. Создается впечатление, что звезда как бы застыла в максимальной стадии новой. Этой удивительной переменной присвоили титул "перманентной новой". По смещению линий в спектре Р Лебеда установлено, что она непрерывно выбрасывает газ со скоростью до 300 км/с. Р Лебеда имела вспышки и в прошлом, но не была обычной новой. Советский астроном Б.А. Воронцов-Вельяминов считает, что новоподобные типа Р Лебеда - это массивные горячие сверхгиганты, у которых иногда на наших глазах образуется протяженная расширяющаяся атмосфера, где сложились условия для образования ярких линий.

К типу Р Лебеда относят звезды, сходные с нею по спектру, хотя у многих из них увеличение блеска не наблюдалось. Все они - горячие сверхгиганты, самые яркие звезды в галактиках. Например, в Большом Магеллановом Облаке ярчайшей звездой является звезда такого типа, называемая переменной S Золотой Рыбы. Ее абсолютная величина около -10! И еще одна черта объединяет эти переменные звезды с новыми: как правило, они также оказываются двойными.

## **Глава VI. ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА ВСПЫШКАМИ НОВЫХ ЗВЕЗД?**

### **Новые звезды - двойные**

К середине нашего столетия объяснение явления вспышки новой звезды свечением ее расширяющейся оболочки было уже бесспорным. Астрономов все более интересовали внутренние причины вспышек новых и в связи с этим их свойства в спокойной стадии после вспышки. Казалось, что наблюдения поведения спектральных линий бывших новых звезд и их блеска не могут принести ничего неожиданного, а важнейшие результаты следует ожидать от теории внутреннего строения звезд. И все же главная сенсация, приблизившая нас к пониманию природы новых звезд и приоткрывшая завесу тайны их вспышек, связана именно с наблюдениями блеска и спектров и объяснением их в первую очередь не физическими, а механическими причинами.

Речь идет об открытии двойственности многих новых звезд и других взрывных переменных.

В 1954 г. американский астроном М. Уокер обнаружил, что Новая Геркулеса 1934 г. является затменно-двойной системой с очень коротким периодом в 4 часа 39 минут. Напомним, что система из двух звезд выглядит для наблюдателя на Земле как затменная звезда, если луч зрения лежит в плоскости орбиты этой системы. Тогда звезды этой системы поочередно заслоняют друг друга. В результате мы видим систематические колебания блеска звезды и периодическое изменение доплеровского смещения спектральных линий, отражающее орбитальные движения звезд двойной системы.

Изучение двойной системы Новой Геркулеса показало, что кроме обычных она имеет еще небольшие хаотические колебания блеска, а на орбитальное движение в системе указывали только линии водорода и гелия в фиолетовой части спектра. У линий же водорода в красной части спектра не отмечалось периодического доплеровского смещения; они очевидно, принадлежат туманности, обволакивающей двойную звезду. К тому же не было найдено никаких следов спектра другой звезды.

Такая странная ситуация сильно напоминала случай симбиотической звезды. Система, по видимому, состоит из горячей звезды, сходной по характеристикам с белым карликом, и из темного спутника, который регулярно затмевает главную звезду. Горячая звезда, как полагают, окружена кольцом горячего газа, движущегося вместе с ней по орбите вокруг общего центра тяжести двойной системы (рис. 14). Именно этот газ и показывает орбитальное движение в спектре системы.

**Рис. 14.** Модель двойной системы Новой Стрелы 1913 г.

Крестом отмечен центр масс системы, "Груша" (1) - разреженный красный гигант-спутник, а черный кружок (2) - горячая звезда со свойствами белого карлика, являющаяся главным компонентом системы. Стрелки показывают вытекание газа из спутника и образование кольца вокруг горячей звезды. У новой Геркулеса 1943 г. спутник является карликом и в спектре не проявляется.

Так раскрылась структура одной из новых звезд. Но все ли новые устроены по такому образцу и являются двойными системами? Этим вопросом занялись американские астрономы Р. Крафт и Дж. Мамфорд и польские астрономы В. Кжеминьский и Б. Пачиньский. Спектроскопическим исследованиям были подвергнуты несколько новых звезд, а также переменных типа U Близнецов и некоторые новоподобные.

Крафт обратил внимание на то, что даже если все новые являются двойными с тесно расположенными друг к другу звездами, то лишь некоторые из них будут для нас затменными. Нужно искать не колебания блеска, а в первую очередь периодические изменения лучевых скоростей в спектрах, вызванные их орбитальными движениями. И все же у части бывших новых звезд может и не быть следов орбитального движения в спектрах - в том случае, если луч зрения наблюдателя проходит близко к направлению оси орбитального движения системы. У большинства исследованных новых звезд и им подобных объектов действительно были обнаружены периодические изменения лучевых скоростей с периодом от нескольких часов до нескольких месяцев. Были и ожидаемые исключения. Отсюда последовал важный вывод: новые звезды и сходные с ними объекты являются, как правило, двойными системами. Осторожность такой формулировки объясняется тем, что мы пока не видели спутников и главных звезд в этих системах отдельно, а заключение о двойственности вывели из поведения спектральных линий. Кроме того, имеются случаи, когда спектральные исследования не отмечают признаков двойственности звезд; в этом случае можно думать, что орбиты их компонент случайно лежат в плоскости, перпендикулярной лучу зрения наблюдателя.

Оказалось, что все новые звезды (в том числе и повторные), у которых обнаружены следы орбитального движения, состоят из компактной главной звезды - горячего белого карлика - и холодного разреженного спутника спектральных классов К или М. Последний светит очень слабо и проявляет себя в спектре заметными линиями. Этим случай новых звезд отличается от симбиотических (новоподобных) звезд.

Горячая звезда в системе новой звезды окружена газовым диском. Как он возник? Дело заключается в свойствах тесных двойных систем. У любой двойной системы, будь она звезда со спутником или Земля и Луна, на оси, проходящей через центры главного тела и спутника, имеется точка, где уравниваются силы притяжения обоих тел. Эта точка представляет собой как бы брешь, через которую холодный спутник систематически теряет вещество, перетекающее в газовое кольцо вокруг горячей звезды. Под действием тяготения этой звезды газ по спиральной траектории приближается со все возрастающей скоростью к поверхности белого карлика. Перетекание идет непрерывно, и образуется сплошной диск газа.

Как только определились контуры явления, происходящего в тесных двойных системах, стало ясно, что эта взаимодействующая комбинация красный гигант - белый карлик и диск не

случайна, а имеет прямое отношение к самому явлению вспышки. Собственно новой оказался горячий белый карлик, окруженный водородным диском, образовавшимся из вещества, перетекшего с холодного спутника.

После того как была обнаружена двойственность новых, следы двойственности были найдены и у некоторых новоподобных звезд, не имевших явных вспышек, не говоря уже о симбиотических, двойственность которых была известна издавна.

Довольно любопытным оказался факт обнаружения двойственности ряда переменных типа U Близнецов. Они во многом похожи на двойные звезды, вспыхивавшие как новые, но имеют и заметные отличия. Исследуя переменные этого типа, удается выяснить, что, возможно, происходит в двойной системе во время вспышки. Польский астроном В. Кжеминьский по анализу кривых блеска обнаружил, что в случае переменных типа U Близнецов вспыхивает не горячая звезда, как это полагают в случае новых звезд, а более холодная звезда двойной системы. По расчетам Кжеминьского во время вспышки эта звезда на 40% увеличивает свои размеры и одновременно разогревается с 5000 К до 15000 К. В таком случае новые и близкие к ним новоподобные звезды должны принципиально отличаться от взрывных переменных типа U Близнецов. Но есть уже и другая точка зрения. Уокер и итальянский астроном Г. Чинкарини обнаружили в 1968 г. по спектральным наблюдениям одной из переменных типа U Близнецов, что вспышка связана с оболочкой или кольцом вокруг главной звезды. Поэтому польский астроном Ю. Смак в 1971 г. предложил новую схему вспышки переменных U Близнецов, согласно которой за вспышку ответственно горячее пятно в кольце, окружающем главную звезду. В этом случае принципиальной разницы между переменными этого типа и новыми уже нет.

### **Как выглядит процесс развития вспышки новой**

То, что при вспышке новой звезды произошел сильный взрыв и вокруг нее образовалась расширяющаяся оболочка, является, в сущности, наблюдательным фактом. Но почему, как и где произошел в новой звезде взрыв - это вопросы сложные и разобраться в них мы сможем, если составим отчетливое представление о том, как развивается вспышка новой звезды согласно наблюдаемым изменениям блеска и спектра.

Вследствие взрыва в звезде выделяется много энергии, которая расходуется на нагревание окружающей массы газа. Поэтому по законам газового состояния резко возрастает давление газа, нарушается равновесие между наружными слоями звезды и слоем, где произошел взрыв. Наружная оболочка звезды начинает расширяться. При этом резко возрастает излучающая поверхность звезды, вследствие чего увеличивается ее световая отдача, т. е. светимость. Это мы наблюдаем как повышение блеска звезды.

По мере расширения наружных слоев их плотность быстро убывает, поэтому радиус фотосферы или зоны, непрозрачной для непрерывного излучения звезды, растет значительно медленнее, чем радиус расширяющейся оболочки. Наступает момент, когда радиус фотосферы достигает максимальной величины, а затем начинает отступать в глубь оболочки. Поскольку

при этом площадь излучающей поверхности быстро сокращается, блеск звезды, достигнув максимума, начинает падать.

Следует напомнить, что при возрастании радиуса фотосферы ее температура систематически убывает, так как фотосфера - это близкие к наружным более холодные слои оболочки.

Но характер изменения блеска в гораздо большей степени зависит от изменения размеров поверхности излучающей оболочки, чем от изменения температуры.

Если процесс вспышки новой звезды ограничивался бы этой элементарной картиной, блеск ее после максимума падал бы очень быстро. Однако спектральные исследования и кривая блеска новой указывают на более сложный характер явлений, протекающих в оболочке уже после достижения звездой максимального блеска.

По мере расширения оболочки новой звезды ее плотность уменьшается, линии поглощения становятся слабее и исчезают: сначала самые слабые, а после всех - самые заметные. Наступает небулярная стадия. Но это происходит не сразу после достижения максимума блеска. Вскоре после максимума блеска в спектре новой появляются кроме линий поглощения главного спектра, принадлежащих главной оболочке звезды, еще линии поглощения диффузно-искрового, а впоследствии и орионова спектра. Линии диффузно-искрового спектра сильнее смещены в фиолетовую область, что свидетельствует о том, что слои вещества, образующего эти линии, удаляются от звезды со скоростью в 1.5-2.5 раза большей, чем скорость главной расширяющейся оболочки новой звезды. Скорость расширения вещества, образующего орионов спектр, бывает еще более высокой.

Спектральные линии диффузно-искрового и орионова спектров свидетельствуют о том, что в новой звезде и после достижения ею максимума блеска продолжается истечение вещества в расширяющуюся оболочку. Причина этого явления пока не установлена, но к началу небулярного периода масса выброшенной оболочки оказывается уже примерно в два раза больше, чем она была до появления диффузно-искрового спектра. Предполагают, что вещество, пополняющее оболочку после максимума блеска, разгоняется до более высоких скоростей энергией ионов и горячего ультрафиолетового излучения новой звезды. Такую гипотезу предложил советский астрофизик Э.Р. Мустель.

Газ пополняет оболочку отдельными сгустками разной скорости, плотности и температуры. Поэтому диффузно-искровой и орионов спектры новых звезд довольно разнообразны и переменчивы. Имея повышенную по сравнению с главной оболочкой скорость, они в конце концов догоняют главную оболочку, и в момент, когда это должно произойти, в спектре новой звезды действительно исчезают линии диффузно-искрового спектра.

В тех случаях, когда истечение вещества из недр новой продолжается до самой небулярной стадии, оно может идти плавно или, наоборот, неравномерно. В соответствии с этим кривая блеска в переходной стадии имеет различный вид. При спокойном истечении у кривой блеска плавный вид, а при неравномерном и кривая блеска, и интенсивности спектра и его ярких линий - все меняется скачкообразно. Если же истечение газа вообще прекращается, то

происходит резкое падение блеска. Затем в небулярной стадии блеск снова восстанавливается на уровне, который на 6-7 звездных величин ниже максимума.

Таким образом, колебания блеска интенсивностей спектра и линий, а также их смещение, появление и исчезновение получают естественное объяснение. Но существуют еще не решенные важные вопросы. Например, до сих пор не решен окончательно вопрос, когда происходит отделение главной оболочки, от звезды. Часть астрономов считает, что это происходит сразу после взрыва и задолго до максимума. По мнению же Э.Р. Мустеля, вплоть до максимума происходит "раздувание" фотосферы новой звезды, а в момент максимума оболочка наконец, отрывается.

И та и другая гипотезы объясняют все перипетии развития оболочки новой звезды и переход оболочки в газовую туманность. Одна гипотеза легче объясняет одни стадии, другая - иные. Однако для того чтобы раздувшаяся звезда стала сжиматься, она должна либо иметь огромную массу (в несколько сотен масс Солнца), либо сильные магнитные поля.

**Рис. 15.** Строение главной оболочки, выброшенной Новой Орла 1918 г., по Э.Р. Мустелю.

С другой стороны, специальные исследования снимков расширяющихся оболочек ярких новых звезд позволили Э.Р. Мустелю и А.А. Боярчуку выявить, что оболочка у Новой Персея 1901 г. имеет сравнительно правильную круглую форму (см. рис. 9), а у Новой Орла 1918 г. и Новой Геркулеса 1934 г. обнаружилось своего рода симметричные по отношению к некоторой оси сгустки. Оболочки имеют полярные сгустки и экваториальные кольца (рис. 15). По мнению авторов работы, такое явление может объясняться существованием магнитного поля новой, звезды, имеющего осевой (дипольный) характер подобно магнитному полю земного шара в направлении магнитной оси поле должно тормозить ионизованный газ в меньшей степени, чем в экваториальном направлении, поэтому расширяющаяся оболочка новой звезды приобретает вытянутую вдоль магнитной оси форму. Возможно также, что существует какая-то взаимосвязь между периодом обращения тесной пары в новой звезде и напряженностью ее магнитного поля. Так, период обращения у Новой Персея примерно в 10 раз больше, чем у двух упомянутых выше новых, и воздействие магнитного поля на расширяющуюся оболочку в этом случае проявляется довольно равномерно во всех направлениях.

Обнаружение следов магнитного поля в новых звездах и установление факта постоянного пополнения оболочки новой звезды после ее выброса уменьшили бы различие между упоминавшимися выше гипотезами.

### **Полная энергия вспышки новой звезды**

Чтобы приблизиться к раскрытию тайны взрывов в звездах, нужно оценить выделяющуюся при этом энергию. Совершенно очевидно, что если энергия взрыва составляет ничтожную долю запаса, заключенного в звезде, то взрыв не ведет к серьезной перестройке недр звезды, какая происходит, например, при переходе звезды на новый вид ядерного горючего. Кроме того, значение выделяемой при взрыве энергии подскажет, что может служить ее источником и где искать причину взрыва.

Но как установить значение энергии взрыва? Очевидно, по ее расходу на физические и механические процессы, протекающие во время вспышки. Воспользовавшись одним бухгалтерским термином "расход", мы тут же прибегнем к другому - "баланс", так как наша задача подвести энергетический баланс вспышки новой звезды. Каковы же основные статьи расхода звезды на устройство вынужденного фейерверка?

Как мы уже знаем, высокая температура в месте взрыва создает высокое давление, которое отрывает от звезды слой, лежащий над местом взрыва. Таким образом, часть энергии при взрыве расходуется в тепловой форме, а часть превращается в механическую энергию и используется на отрыв оболочки от звезды, на расширение газа в этой оболочке, а также на расширение самой оболочки. В условиях расширяющейся оболочки тепловая энергия взрыва вместе с энергией, поступающей из обнажившихся недр звезды, идет на излучение.

Преодоление тяготения звезды требует значительной энергии. Это, собственно, энергия, необходимая газовой частице или телу (например ракете) для достижения второй космической скорости. Оторвавшись от звезды, газ движется со скоростью около 1000 км/с. Энергия этого движения - хорошо известная в механике кинетическая, энергия - пропорциональна квадрату скорости расширения оболочки. По мере расширения оболочки увеличивается излучающая поверхность звезды и соответственно растет световая отдача или светимость.

Чтобы подсчитать полный расход энергии, излучаемой за время вспышки, нужно сложить ее ежесуточные расходы, пользуясь, сведениями об изменении блеска, температуры и размеров новой звезды. Расчеты показывают, что потеря новой звездой энергии на излучение оказывается почти такой же, как и расход энергии на отрыв и расширение оболочки.

В зависимости от светимости при вспышке (т. е. от абсолютной величины звезды в максимуме блеска) расходы энергии на расширение, отрыв и излучение новой колеблются в десятки раз. Средняя полная энергия вспышки составляет  $10^{47}$  эрг, т. е. столько, сколько энергии излучает наше Солнце за миллион лет. Но самое существенное различие в расчете энергетического баланса новой зависит от того, когда отрывается оболочка: при взрыве или после раздувания звезды до максимума. В последнем случае расходы в 200 раз ниже, но как говорилось при разборе этих гипотез, у новой звезды тогда должны быть либо огромная масса, либо сильное магнитное поле. Во избежание этих трудностей предпочитают гипотезу раннего отрыва, ведущую к упомянутому равенству между механической и излучательной долями энергии взрыва.

Но все ли главные расходы мы учли? Не расходуется ли часть энергии новой звезды на образование космических лучей? Астрофизика установила взаимосвязь между рождением космических лучей и синхротронным радиоизлучением. Если в новой звезде рождаются космические лучи (не только протоны и другие ядра, но и электроны), они должны в свою очередь создавать в ее газовой оболочке сильное синхротронное радиоизлучение. Но у новых звезд ни во время вспышки, ни в небулярной стадии, особенно благоприятной для этого вида радиоизлучения, не найдено его следов. Только в последние годы с помощью гигантских

радиотелескопов удалось обнаружить небольшое тепловое радиоизлучение некоторых новых во время их вспышек.

Зато исследования инфракрасных спектров новых звезд принесли сюрпризы. Если Новая Змеи 1970 г. после достижения максимума начала систематически ослабевать в видимых лучах, то на волнах 1-10 мкм она более 3.5 месяцев оставалась постоянной по блеску. Ее блеск в инфракрасной области достигал в этот период 4-й звездной величины, и она была самой яркой инфракрасной звездой на небе. И это происходило в то время, как визуальный блеск звезды уменьшился на четыре звездные величины после максимума. Предполагают, что высокую инфракрасную светимость новой звезды создает облако пылинок, сформировавшееся через несколько суток после начала вспышки. Температуру пылинок облака оценивают в 900К, диаметр облака около 6.5 млрд. км, масса его - одна миллионная массы Солнца, или около 1% массы оболочки, выбрасываемой новой звездой. Инфракрасный феномен был обнаружен также у повторной Новой Змееносца, имевшей последнюю вспышку за три года до проведенных наблюдений, но у повторной Новой Северной Короны повышенной инфракрасной светимости не нашли, потому что прошло уже 39 лет со времени последней вспышки этой звезды.

За время между вспышками новая звезда излучает примерно столько же энергии, сколько высвобождает при вспышке. Следовательно, не становясь на грань энергетического банкротства, она может позволять себе повторять такие фейерверки через определенное время. Ранее мы видели, что и выбрасываемая при взрыве масса газа несущественна для ее дальнейшей судьбы.

Переходят ли одни объекты в другие или просто сосуществуют в сходных по условиям состояниях, это решат исследования роли двойственности взрывных звезд в их эволюции.

В этом отношении показательна гипотеза американца Р. Крафта и аргентинца Х. Сахаде о том, что звезды типа U Близнецов есть этап в ходе эволюции затменных переменных систем, имеющих периоды менее суток (так называемых систем типа W Большой Медведицы). Действительно, тесные двойные с периодами менее суток сходны со звездами типа U Близнецов по размещению в Галактике и по характеру движения в ней. А по светимости, массам и периодам обращения первые несколько больше вторых. В процессе эволюции звезды типа W Большой Медведицы должны терять половину, своей массы. Одна из звезд двойной системы должна стать красным гигантом, который заполняет своей атмосферой пространство вплоть до точек равновесия. Через эти точки уходит часть его газа, т. е. теряется масса звезды. Ход эволюции тесной двойной системы с этого момента изменяется: она быстро теряет в массе и превращается в переменную типа U Близнецов. Как мы увидим далее, что-то в таком же роде происходит, по-видимому, и у новых звезд.

### **Что известно о причинах взрывов в новых звездах?**

Естественно, что причины вспышек новых звезд стало возможным установить лишь после того, как выяснилось, что они являются тесными двоичными системами, главным членом которых является белый карлик, окруженный газовым диском. Как мы уже знаем, собственный водород

белого карлика давно выгорел в предшествующих стадиях эволюции этой звезды и наружные слои его содержат ядра гелия, углерода, азота и кислорода наряду со свободными электронами, обладающими свойствами вырожденного газа. На поверхность белого карлика непрерывно поступает "свежий" водород, попадающий из оболочки холодного спутника в газовый диск вокруг белого карлика, в котором ядра водорода разгоняются по спиральной траектории до скоростей в тысячи километров в секунду. С такой скоростью струя водорода ударяет по наружному слою белого карлика, перемешивается с ним и создает новый слой термоядерного горючего.

Разогнавшиеся в поле тяготения белого карлика протоны легко преодолевают отталкивание ядерных сил и, начиная с температур выше 20 млн. кельвинов, сливаются с ядрами указанных выше элементов. Начинают идти термоядерные реакции, при которых дополнительно выделяется энергия. И если бы вещество белого карлика было обыкновенным газом, то эта энергия, согласно газовым законам, повышала бы температуру газа и в итоге шла бы на его расширение, как это наблюдается в нормальных звездах. Но вырожденный электронный газ в белом карлике не расширяется при повышении температуры. Выделяемая при реакциях энергия целиком уходит только на возрастание температуры. А чем выше она, тем сильнее идут термоядерные реакции, высвобождающие все большую энергию. И вот наступает момент, когда температура достигает 100 млн. кельвинов, и выделение энергии на несколько минут приобретает мгновенный, взрывной характер. Карлик сбрасывает загоревшуюся оболочку, что мы и наблюдаем как вспышку новой звезды. Температура его поверхности становится ниже 20 млн. кельвинов, термоядерные реакции прекращаются, начинается новый цикл. За время около суток восстанавливается питание белого карлика водородом, перетекающим от холодного спутника, и через тысячи лет, а у повторных новых - всего через десятки лет - его поверхность настолько обогатится водородом и поднимет температуру, что снова начнутся термоядерные процессы.

Таким образом, белый карлик устраивает фейерверки за счет приобретенной им от спутника газовой массы, незначительно расходуя свое вещество. Вспышки новой звезды могут повторяться много раз, пока не иссякнет резервуар водорода - оболочка холодного гиганта.

Вот так уже около двадцати лет назад представлял причину вспышек новых звезд Р. Крафт. Кстати, воспользовавшись результатами его исследований тесной двойной системы Новой Геркулеса 1934 г., мы можем рассчитать зависимость между величиной амплитуды вспышки и длительностью цикла. Из наблюдений за Новой Геркулеса установлено, что весь газ диска успевает обновиться в течение одних суток, т. е. транспортировка газа требует такого времени. Масса газа, выброшенного при вспышке Новой Геркулеса, в 2-3 миллиона раз превышает массу газового диска, следовательно, для накопления избыточной массы, которую белый карлик потом выбросит, необходимо около двух миллионов дней или пять-шесть тысяч лет. Амплитуда Новой Геркулеса 13-14 звездных величин, и, согласно рис. 11, длительность цикла должна составить тоже пять или шесть тысяч лет.

Однако гипотеза о термоядерном взрыве на поверхности белого карлика станет надежной теорией только после всесторонней количественной проверки. В последнем десятилетии американские астрофизики С. Старфилд, Дж. Труран и У. Спаркс сделали количественные расчеты вспышек новых звезд, основанные на описанной выше идее. Опираясь на данные наблюдений тесных двойных систем некоторых новых звезд, они нашли скорость питания белого карлика водородом, подобно тому, как это сделал Крафт для новой Геркулеса. К тому же теперь лучше установлены скорости термоядерных реакций углеродно-азотно-кислородного цикла. Поэтому стало возможным рассчитать кривые блеска новых звезд в зависимости от процентного содержания водорода, гелия и легких элементов, т. е. углерода, азота, кислорода. В обычных звездных слоях на 10000 ядер водорода приходится около 850 ядер гелия, 3, 1 и 7 ядер соответственно углерода, азота и кислорода. В случае быстрых новых звезд расчеты соответствуют наблюдаемым кривым блеска, если, в поверхностных слоях белых карликов содержится в сто раз больше этих элементов, т. е. на 10000 ядер водорода должно быть до 300, 100 и 700 ядер углерода, азота и кислорода соответственно, а также повышенное количество гелия, как основного элемента, из которого состоит белый карлик. В случае медленных новых звезд расчеты предсказывали небольшой избыток этих легких элементов.

Но предсказание оказалось возможным легко проверить. Ведь такое относительное содержание элементов должно наблюдаться в спектрах оболочек, выброшенных новыми звездами! К настоящему времени с этой целью проведен тщательный анализ спектров десятка новых звезд во время вспышек. В СССР это сделали А.А. Мустель и Л.И. Антипова, а также А.А. Боярчук, в США - Р. Уильяме и другие. Ожидаемый почти стократный избыток элементов подтвердился. Но он оказался столь же большим и у медленных новых звезд. По-видимому, расчеты Старфилда и других требуют уточнения. Действительно, нельзя забывать, что при температурах в 100 млн. кельвинов ядерным горючим становится еще и главный элемент белого карлика, гелий, три ядра которого сливаются в ядре углерода, выделяя энергию. Учет этой реакции может несколько, изменить расчеты.

## **Глава VII. СВЕРХНОВЫЕ В ДАЛЕКИХ ГАЛАКТИКАХ**

### **Самые яркие вспышки звезд**

За пять тысяч лет в человеческой истории сохранились сведения о более чем двухстах ярких вспышках звезд, если ограничиться такими, которые превышали по блеску 3-ю звездную величину. Самые яркие и долго наблюдавшиеся из них были как оказалось, сверхновыми - самым ярким по светимости и редким классом взрывных звезд.

Но до начала нашего столетия астрономы еще не различали новые и сверхновые звезды. На существование звезд, светимость которых в десятки и сотни раз превышает светимость новых звезд, впервые указал шведский астроном К. Лундмарк в 1919 г. Его заключение было основано на изучении спиральных туманностей, в которых к тому времени уже наблюдались вспышки звезд.

Впервые это случилось в 1885 г., когда на обсерватории в Дерпте (теперь-Тарту, Эстонской ССР), Э. Хартвиг обнаружил возле центра большой туманности Андромеды новую звезду, которая в максимуме блеска достигала 5-й величины. В этот момент она была намного ярче деталей окружающей ее туманности, хотя суммарный блеск всей туманности, занимающей на небе эллипс размерами  $3^\circ \times 2^\circ$ , на одну звездную величину превосходил блеск новой звезды 1885 г.

В то время природа спиральных туманностей, к которым относится туманность Андромеды, еще не была разгадана. С середины прошлого века конкурировали две гипотезы. Одна, ведущая начало от создателя звездной астрономии В. Гершеля, считала спиральные туманности звездными системами, "островными вселенными", как выражался немецкий естествоиспытатель А. Гумбольдт. Другая предполагала, что все туманности состоят из газа.

Некоторые астрономы думали, что спиральная туманность - это молодая звезда, окруженная газовыми рукавами, в которых зарождаются планеты. Спор о природе спиральных туманностей продолжался до конца первой четверти нашего столетия, пока гипотеза об их газовой природе не была отвергнута наблюдениями с большими телескопами.

Уже с телескопом диаметром 1.5 м в туманности Андромеды стали "открывать" новые, звезды, которые имели обычно 16-ю звездную величину в максимуме, а К. Лундмарк на фотографиях, полученных с этим телескопом, установил, что спиральные ветви туманности содержат множество слабых, находящихся на грани различения звезд. Только в 1925 г., применив телескоп с диаметром зеркала 2.5 м, американский астроном Э. Хаббл полностью подтвердил работу Лундмарка. Эти исследования, как уже ранее говорилось, положили начало внегалактической астрономии.

Но если туманность Андромеды - большая звездная система, то новая звезда, имевшая в максимуме почти такую же светимость, как сама туманность, должна быть колоссальным излучателем энергии, заключил в 1919 г. Лундмарк. К тому времени такие яркие вспышки были уже известны в десяти спиральных и одной неправильной туманности, а советский астроном И.А. Балановский в 1919 г. наблюдал такую вспышку в эллиптической туманности NGC 4486.

Оказалось, что мощные вспышки - не случайность, а распространенное явление. Такие мощные вспышки происходили, очевидно, и в нашей Галактике и наблюдались в древности. Лундмарк обратился к записям о вспышках новых звезд, сделанным со II в. до н. э. китайскими, японскими, европейскими и арабскими летописцами. Такие записи изучали А. Гумбольдт, Ж.Б. Био и Е. Циннер. Но Лундмарк пошел значительно дальше: он отметил, где это было возможно, сколько времени наблюдалась та или иная вспышка, насколько она была яркой и какова достоверность сведений о ней. Он был уверен, что среди отмеченных есть вспышки, аналогичные вспышке в туманности Андромеды. Но какие именно, установить тогда было еще очень трудно. Эту задачу решали еще долгое время и до конца пока не решили.

В 1934 г. В. Бааде и Ф. Цвикки назвали вспышки, подобные случившейся в туманности Андромеды, сверхновыми звездами, а Лундмарк в 1939 г. сформулировал такой определяющий их признак: сверхновыми звездами называются вспышки звезд, которые в максимуме блеска достигают светимостей нормальных галактик (т. е.  $-21 \leq M \leq -17$  абсолютных звездных величин).

Если сопоставить сверхновые звезды с новыми звездами, то обнаружится целый ряд различий между ними: и по светимостям, и по характеру изменения блеска и спектра, и по свойствам выбрасываемых ими газовых оболочек и центральных звездных остатков. Таким образом, это действительно особая разновидность взрывных звезд, и первоначально, до открытия остатков сверхновых, круг исследований их был практически ограничен вопросами, обычными для переменных звезд: кривыми блеска, амплитудами и абсолютными величинами, спектральными характеристиками и положением сверхновых в галактиках.

**Рис. 16.** Галактика NGC 4723 за 9 лет до вспышки (слева) и во время вспышки сверхновой (справа).

Правда, Бааде и Цвикки, давая им звучное имя "сверхновых", уже тогда, в поисках причин взрыва такого масштаба, указывали на вероятность гравитационного коллапса и образования нейтронных звезд, предсказанных теоретически советским физиком Л. Д. Ландау в 1932 г. Таким образом, этому классу взрывных звезд предстояло сыграть важную роль в фундаментальных исследованиях астрофизики.

В настоящее время основные сведения о сверхновых в стадии оптической вспышки получают по наблюдениям за ними во внегалактических туманностях (рис. 16). Число их уже превысило 500. Но что происходит с ними позже, когда они исчезают из поля зрения сильнейшего телескопа, стало известно только тогда, когда в нашей Галактике нашли остатки сверхновых.

К сожалению, вспышки сверхновых в Галактике наблюдаются удивительно редко. Последний раз такую вспышку видели перед самым началом телескопической эпохи в 1604 г. Ее наблюдал И. Кеплер, который спустя несколько лет и сконструировал один из первых телескопов. В силу того, в сущности, случайного обстоятельства, что с тех пор мы еще не наблюдали вспышек сверхновых в Галактике, сложилось своеобразное разделение проблем. По внегалактическим сверхновым астрономы изучают оптическую картину вспышки, а по остаткам галактических сверхновых, возрасты которых достигают многих тысяч лет, изучаются поздние стадии развития этого явления. Соответственно этому разграничению, мы сначала познакомимся с оптическим аспектом по интересным представителям внегалактических сверхновых, а далее - с галактическими сверхновыми и их остатками, играющими важную роль в эволюции Галактики и ее межзвездной среды.

## **Классификация внегалактических сверхновых**

Систематическое изучение каждого нового явления обычно начинается с его классификации. Какой же признак - информация о блеске или информация о спектре сверхновой - проще и более пригоден для классификации? Казалось бы, первый. Ведь для оценок блеска звезды и составления по ним кривой блеска годятся обычные телескопы с фотометрическими

приборами. При этом оценки блеска возможны, практически, до предельной звездной величины, которая улавливается используемым телескопом. Предельная же величина для спектрографа, установленного на этом же телескопе, в самых лучших случаях на четыре звездных величины хуже, и для получения спектров слабых звезд нужно прибегать к особым техническим ухищрениям.

В действительности же из-за ряда наблюдательных трудностей достаточно представительную кривую блеска сверхновой удается получить редко, а несколько спектров, пока звезда еще яркая - сравнительно часто. И все же кривые блеска были бы единственным выходом, если бы не обнаружилось важных различий в спектрах сверхновых. Это открытие было сделано американским астрономом Р. Минковским в 1940 г. и оказалось эффективной основой подразделения сверхновых на типы. Попытку разделить сверхновые на четыре класса по характеру их кривых блеска сделал в 1944 г. советский астроном П.Г. Куликовский. Он располагал кривыми блеска 23 сверхновых из числа 45 объектов, известных к тому времени. Эта классификация применения не получила. Однако в самые последние годы сложились условия для разработки универсальной классификации сверхновых звезд, сочетающей и спектральные и фотометрические признаки сверхновых. С этой современной классификационной системой мы познакомимся несколькими страницами далее, а сейчас рассмотрим спектральные классы сверхновых.

Изучая спектры сверхновых, Минковский показал, что их можно разделить на две группы и, более того, даже определить по спектру, сколько суток прошло после достижения сверхновой максимума блеска. Таким образом, получение спектрограмм решало сразу две задачи: и классификационную, и задачу определения даты максимума, а последнее немаловажно, так как сверхновая часто открывается уже после того, как она имела максимум блеска.

В чем же заключалась спектральная классификация сверхновых, установленная Минковским? Он обнаружил, что значительная часть сверхновых имеет очень сходные спектры, отличающиеся широкими полосами и отсутствием ярких линий водорода. Их он отнес к I типу. А ко II типу отнесены сверхновые, в спектрах которых отмечались яркие, линии водорода, но в отличие от новых звезд не было запрещенных линий. Минковский упоминал еще о "третьем типе" - нескольких малоизученных сверхновых, но в основном его классификация была, можно сказать, "двоичной": ее составляли "тип первый" и "тип не первый". Казалось бы, сильное упрощение, но двоичная операция весьма универсальна, она в отличие от других не имеет исключений. На ее принципе, как известно, работают логические системы.

Кривые блеска сверхновых I и II типов оказались существенно различными (рис. 17). Сверхновые I типа во многих отношениях проявляют себя более идеальными объектами: у них очень сходны не только спектры, но и формы кривых блеска, тогда как у кривой блеска сверхновой II типа, сверхновых II типа наблюдается значительная пестрота и в спектрах и в формах кривых блеска.

**Рис. 17.** Кривые блеска сверхновых I (вверху) и II (внизу) типа.

По горизонтали отложены фазы в сутках, по вертикали - звездные величины;  $m$  - звездная величина максимума блеска,  $ж$  - кривая блеска в желтых лучах (визуальная),  $с$  - в синих лучах (фотографическая); цифрами обозначены фотометрические классы сверхновых,  $M$  - максимум блеска,  $K$  - фаза замедления падения блеска сверхновой,  $L$  - "плечо" кривой блеска сверхновой II типа.

Рассмотрим кривые блеска сверхновых I типа в синем и желтом свете. Они характерны быстрым подъемом к максимуму и острой формой пика последнего. Затем синяя кривая блеска показывает резкое ослабление на три звездные величины, которое у разных сверхновых длится от трех до шести недель, после чего в точке  $K$  происходит "поворот": темп ослабления уменьшается и оно продолжается уже с медленной скоростью, по меньшей мере свыше двух лет. А у желтых кривых блеска заметного излома у точки  $K$  нет: ослабление после максимума происходит плавно. Отметим, кстати, что ослабление блеска сверхновой в желтых лучах приблизительно на одну звездную величину меньше, чем в синих, поэтому желтая кривая блеска на рис. 17 проходит выше.

В тех случаях, когда та же сверхновая наблюдалась и в желтых и в синих лучах, можно проследить за изменением ее показателя цвета по мере эволюции сверхновой. Оказывается, что до максимума сверхновая I типа имеет отрицательный показатель цвета, т. е. звезда становится голубой, а затем белой, после максимума она желтеет, и в момент, когда синяя кривая блеска испытывает "поворот" в точке  $K$ , сверхновая достигает наибольшего покраснения и снова начинает менять цвет, но уже в обратном направлении, становясь желтой и белой (рис. 18).

**Рис. 18.** Изменение показателей цвета сверхновых с фазой.

По горизонтали - фаза в сутках, по вертикали - показатель цвета в звездных величинах. Указаны типы сверхновых.  $K$  - фаза максимального покраснения, она совпадает с моментом начала замедления падения блеска, отмеченным той же буквой на рис. 17,  $L$  - фаза "плеча" у сверхновой II типа.

Синие кривые блеска сверхновых II типа сложнее, чем I типа (рис. 17). Прежде всего, после максимума блеск многих из них медленно уменьшается в течение примерно 70 суток на 2-3 и реже на 4-6 звездных величин, а затем в течение месяца резко падает на 2 величины. Эта смена темпа падения на кривой блеска вырисовывается как "плечо". Весь участок кривой блеска от главного пика до "плеча" является, в сущности, широким несимметричным максимумом кривой блеска. В конце быстрого ската на кривой блеска видна точка ( $K$ ), после которой падение блеска сверхновой II типа происходит, как и у звезд I типа, медленнее и ровнее. К сожалению, сверхновые II. типа наблюдались реже и лишь в одном случае немногим более года.

Желтые кривые блеска сверхновых II типа, в отличие от I типа, похожи на синие, но характеризуются еще более медленным ослаблением блеска. Показатели цвета у них изменяются с течением времени точно так же, как и у сверхновых I типа, если не считать того обстоятельства, что "плечо" вызывает некоторую заминку в росте покраснения перед достижением его максимума, соответствующего точке  $K$ .

Спектральная классификация, являясь всеохватывающей, делит сверхновые только на две группы и не может объяснить, например, разнообразие кривых блеска сверхновых II типа. Явно ощущается потребность надстроить еще один этаж в классификации: сделать ее более детальной с легко определяемым ведущим классификационным признаком, чутким к главным физическим свойствам этих объектов.

Таким критерием может служить скорость падения блеска в синих лучах в течение первых недель после максимума, рассчитанная на 100-суточный интервал (это делается для удобства выражения этой характеристики целыми числами). Эту характеристику мы назовем "фотометрическим классом" сверхновой и будем указывать ее после типа, разделяя их точкой. Например, самая яркая по блеску сверхновая 1885a в туманности Андромеды имеет фотометрический класс I.14, а самая яркая сверхновая II типа в галактике NGC 1313 относится к классу II.4. Для сверхновых I типа фотометрические классы заключены в пределах от 5 до 17, т. е. падение блеска от максимума до точки К у них происходит на 0.05-0.17 звездной величины в сутки, а для II типа выявлены классы от 1 до 10, т. е. ослабление блеска от максимума до конца "плеча" составляет 0.01-0.10 звездной величины в сутки.

Классы с небольшими темпами ослабления блеска удобно называть "младшими", а с большими - "старшими", избегая употребления выражений "быстрый" и "медленный", которые могут создать некоторую путаницу, как мы увидим в следующей главе при выяснении физической сущности фотометрической классификации. Обратим также внимание на то, что введенное нами понятие "фотометрического класса" оказалось пригодным для сверхновых обоих типов и сохранило поэтому универсальность классификации. На рис. 19 изображена схема классификации сверхновых по типам и фотометрическим классам с указанием характерных представителей и числа сверхновых, классифицированных к настоящему времени.

**Рис. 19.** Схема фотометрической классификации сверхновых. Указаны типичные представители сверхновых и число обнаруженных сверхновых данного класса.

В случае сверхновых I типа знание фотометрического класса, т. е. темпа ослабления блеска после максимума позволяет, кстати, восстановить форму кривой блеска сверхновой по небольшому наблюдавшемуся ее участку после максимума блеска, захватывающего точку К. В частности, если сверхновая была открыта после максимума, можно установить момент и звездную величину максимума.

В табл. 10 приводятся сведения о самых ярких сверхновых, а также материнских галактиках, как называют звездные системы, где произошли данные вспышки. Для вычисления абсолютной величины сверхновой, приведенной в одном из столбцов, достаточно знать видимый блеск ее в максимуме и расстояние до материнской галактики, которое устанавливается приемами, изложенными в главе II. Как видно из таблицы, абсолютные величины сверхновых I типа в среднем на две величины выше, чем у сверхновых II типа, хотя и среди последних встречаются равные сверхновым I типа по абсолютной величине. И те и другие в максимуме блеска в десятки тысяч раз превосходят по светимости обычные ярчайшие звезды и новые звезды в

период вспышки. Несколько сверхновых в максимуме блеска превосходили даже блеск своих материнских галактик.

**Таблица 10. Ярчайшие внегалактические сверхновые**

Обозначение	Тип и класс	Сверхновая				Материнская галактика		
		Время подъема блеска, сутки	Время начального падения, сутки	Блеск в максимуме, $m$		Обозначение, NGC	Тип	Видимая звездная величина, $m$
				видимая величина	абсолютная величина			
1885a	I. 16	23	21	5	-19	224	Sb	4
1895b	I. 7	18	38	8	-21	5253	S0	11
1972e	I. 9	19	36	8	-21	5253	S0	11
1937c	I. 11	21	29	8	-20	IC 4182	I	14
1954a	I. 12	21	21	9	-21	4214	I	10
1920a	I. 5	16	42	11	-19	2608	SBc	13
1921c	I. 6	17	40	11	-20	3184	Sc	10
1961h	I. 8	19	35	11	-20	4564	E	12
1962m	II. 4	20	70	11	-18	1313	SBc	11
1966j	I. 5	16	45	11	-19	3198	Sc	11
1939b	I.17	24	19	12	-19	4621	E	11
1960f	I. 8	19	40	11	-21	4496	Sc	13
1960r	I. 8	19	40	12	-20	4382	S0	10
1961v	II. 10	110	70	12	-18	1058	Sb	12
1963i	I. 14	22	21	12	-19	4178	Sc	13
1971i	I. 12	21	22	12	-19	5055	Sb	9
1974g	I. 8	19	29	12	-19	4414	Sc	11
1909a	II. 2	8	70	12	-18	5457	Sc	9
1979c	II. 5	25	70	12	-20	4321	Sc	11
1980k	II. 5	25	70	12	-20	6946	Sc	10
1980n	I. 10	20	31	12	-20	1316	E	10
1981b	I. 9	19	34	12	-20	4536	Sb	11

### Где и как часто вспыхивают сверхновые в галактиках

В конечном счете нас интересует природа сверхновых, т. е. мы хотим знать, что за звезды взрываются, как происходит этот взрыв, как развивается после взрыва процесс свечения, во

что, наконец, превращается взорвавшаяся звезда, и какое значение имеет это явление для эволюции звездных систем.

Для выполнения такой программы нужно провести всестороннее исследование сверхновых. В одних случаях нужны спектральные наблюдения, в других изучение кривых блеска, светимости, а часто и теоретические работы. Пока астрономы, в сущности, находятся только в самом начале исследования.

Одной из загадок пока остается вопрос о том, какие звезды взрываются. Позже мы познакомимся с рядом фактов, которые, по-видимому, говорят о вероятных кандидатах в сверхновые, но пока это лишь предположения. Важно иметь больше наблюдательных данных. Можно надеяться, в частности, что кое-что прояснится, когда мы узнаем, где и как часто вспыхивают сверхновые. В зависимости от этого под подозрением окажутся те или иные категории звезд, а остальные будут исключены из рассмотрения. Постепенно сужая круг возможных объектов, можно таким путем прийти к звездам, которые являются "предками" сверхновых.

В каких же местах галактик чаще вспыхивают сверхновые, что они больше "предпочитают": рукава или области вне их, центральную часть галактики или ее периферию? Впервые это было исследовано в 1944 г. П.Г. Куликовским. Он установил по 31 объекту в спиральных системах, что сверхновые преобладают в рукавах и, по-видимому, избегают центральные области. Эти выводы были полностью подтверждены последующими исследованиями, среди которых выделяется недавняя работа Х. Маза (Мексика) и С. ван ден Берга (Канада). Они располагали уже материалом о 84 сверхновых.

В 27 эллиптических галактиках, исследованных теми же авторами, также обнаружилась интересная особенность: вспышки сверхновых преобладали на периферии галактик. Возможно, что в передержанных на снимках центральных областях галактик сверхновые не могут быть замечены, если они уже значительно ослабли, а предыдущие снимки то разным причинам были получены более месяца назад. Но не исключается и другое, что сверхновые в эллиптических галактиках каким-то образом связаны со звездным населением, тяготеющим к периферии этих звездных систем. Таким населением являются звезды, в спектрах которых имеются особенности, свидетельствующие о бедности металлами их оболочек. Это, как мы знаем, говорит о "старости" данных звезд, особенно многочисленных в эллиптических звездных системах.

Изучение размещения сверхновых в галактике осложняется тем, что видя сверхновую на изображении галактики, мы не можем прямо установить, как близка она в действительности к ее главной плоскости. Приходится действовать в обход. Обычно собирают данные о расположении сверхновых относительно видимой большой оси изображений галактик одного и того же типа и по ним строится синтетическая картина. Таким путем вели анализ американский исследователь Х. Джонсон с канадцем Дж. Мак-Леодом, а затем наш молодой астроном А.В. Мионов. Они прикинули, как должна выглядеть картина размещения сверхновых на

изображении спиральной галактики, если они располагаются тесно к главной плоскости, и как - если они образуют сферический рой или какое-нибудь тело промежуточной формы. Оказалось, что ближе к действительности первый вариант.

Здесь нужно отметить, что сверхновые I и II типов ведут себя различно по отношению к галактикам разных классов. Если сверхновые I типа встречаются в эллиптических, спиральных и неправильных галактиках, то сверхновые II типа найдены только в спиральных галактиках типов Sb и Sc. Чем же вызвана такая "разборчивость" сверхновых?

Самое простое предположение - они относятся к разным звездным подсистемам. Спиральные галактики, мы знаем, имеют богатое звездное население плоской подсистемы: горячие звезды и межзвездный газ, образующие спиральную структуру, а эллиптические галактики этой системой вообще не обладают. Поэтому сверхновые II типа, безусловно, являются представителями плоской подсистемы звезд. Зато сферическая подсистема встречается и в спиральных и в эллиптических галактиках. Поэтому думали, что сверхновые I типа относятся либо к ней, либо к промежуточной подсистеме. Но это противоречит тенденции сверхновых в спиральных системах размещаться вблизи галактических плоскостей. А не принадлежат ли сверхновые I типа в эллиптических системах и некоторая часть их в спиральных к сферическим подсистемам, тогда как большинство сверхновых I типа в спиральных галактиках вместе со сверхновыми II типа относятся к подсистемам плоским? Такую догадку высказал в 1973 г. итальянский астроном Н. Даллапорта. Но подтверждения ее можно было, естественно, ожидать только со стороны теории. И действительно, анализ путей эволюции звезд, вспыхивающих как сверхновые, привел в 1978 г. И.С. Шкловского к заключению, что как сверхновые I типа должны вспыхивать звезды двух совершенно разных возрастов и, следовательно, звездных населений.

Займемся теперь установлением частоты вспышек сверхновых. Очевидно, что в зависимости от частоты под подозрением в причастности к катастрофам сверхновых окажутся многочисленные или, наоборот, редкие по численности категории звезд. Однако задача определения частоты вспышек сверхновых, или значения, обратного частоте, - среднего интервала между вспышками - оказалась весьма сложной.

Первоначальный путь определения частоты вспышек сверхновых был намечен работами Ф. Цвикки, который предложил "патрулировать" области неба, богатые яркими галактиками, чтобы регулярно проверять несколько тысяч галактик, содержащихся в этих областях, и обнаруживать в них сверхновые. Такое патрулирование было им проведено в 1937-1940 гг., а с 1955 г. оно ведется постоянно с участием обсерваторий ряда стран, в том числе и советских. Вот любопытные числа 10-летнего патрулирования 24 участков неба, опубликованные Р. Барбоном: просмотрено 2144 галактики ярче 15.7 величины, найдено 5 сверхновых. Подсчеты показывают, что весь просмотр снимков равносителен непрерывному наблюдению за одной галактикой в течение 14 233 лет. Деля это число на число обнаруженных сверхновых, получим 316 лет - интервал между вспышками в "средней" галактике.

Однако расчет интервала на "среднюю" галактику неверен. Нельзя сваливать в одну кучу галактики разных типов и светимостей. Мы, в сущности, не знаем ни тип, ни абсолютную величину "средней" галактики. Чтобы метод "патрулирования" дал правильные и высококачественные результаты, нужна очень большая работа по исследованию типов и абсолютных величин "патрулируемых" галактик.

С 1960 г. ряд исследователей - С. ван ден Берг (Канада), Ю.П. Псковский (СССР), Ф. Цвикки и А. Тамманн (Швейцария) - отмечали, что сверхновые чаще вспыхивают в более мощных по светимости и массам галактиках. Следовательно, средние интервалы между вспышками сверхновых должны вычисляться с учетом масс или светимостей галактик и их типов. Тамманн в обстоятельном исследовании 1974 г. нашел, что интервал между вспышками сверхновых в галактиках типа Sc равен 1.75 триллиона лет, деленных на массу галактики, выраженную в массах Солнца. Для Sb-галактик тех же масс этот интервал почти втрое больше: 5.3 триллиона лет, а для эллиптических галактик он составляет 143 триллиона лет, деленных на массу галактики. Тамманн провел подсчеты ожидаемых средних интервалов между вспышками сверхновых для ряда галактик Местной группы (табл. 11) и показал, что в туманности Андромеды должно наблюдаться много вспышек, хотя из-за сильного поглощения в ней не все сверхновые обнаружатся. Зато в небольшой спирали в Треугольнике вспышки сверхновых редки и совсем редкость - вспышки в галактиках малых масс.

**Таблица 11. Расчет средней частоты вспышек сверхновых в галактиках Местной группы**

Галактика	Тип	Средний интервал в годах между вспышками
Туманность Андромеды	Sb	20
Туманность Треугольника	Sc	167
Малое Магелланово Облако	I	1 460
Эллиптическая галактика М 32	E	20 000
Карликовая галактика Лев-II	E	3 000 000
Наша Галактика	Sb	110

Возникает также вопрос, какие сверхновые вспыхивают чаще: I или II типа? Мы знаем, что из почти пятисот сверхновых только около ста классифицировано по типам и большинство отнесено к I типу. В то же время, по абсолютной величине сверхновые I типа на две величины ярче сверхновых II типа. В. Бааде, первый заинтересовавшийся этим вопросом, обратил внимание на то, что в числе 5 сверхновых, обнаруженных при первом опыте патрулирования в галактиках ярче 13-й звездной величины, была только одна II типа, а остальные, видимо, принадлежали I типу. Учитывая абсолютные величины сверхновых того и другого типов, он пришел к выводу, что в действительности сверхновые II типа должны вспыхивать в шесть раз чаще чем сверхновые I типа. Для спиральных галактик это дало бы интервал в 50-100 лет.

В 1973 г. А. Тамманну удалось сделать непосредственный аккуратный подсчет числа вспышек сверхновых I и II типа в объеме, содержащем более 400 галактик. Он получил почти равное соотношение вспышек I и II типа в спиральных системах Sc и Sb.

Продолжающиеся патрульные наблюдения вместе с серьезным совершенствованием метода их использования дадут в дальнейшем более надежные сведения частоте вспышек сверхновых. Кроме того, имеется еще один важный путь изучения частоты вспышек - это изучение сверхновых в нашей Галактике. Здесь имеется несколько интересных возможностей, с которыми мы познакомимся в последующих главах.

## **Глава VIII. СПЕКТРЫ СВЕРХНОВЫХ ВО ВРЕМЯ ИХ ВСПЫШЕК**

### **Загадки спектров сверхновых**

Спектральные наблюдения внегалактических сверхновых могут помочь разобраться в физических процессах, идущих в их излучающих оболочках. Первые наблюдения спектров сверхновых были проведены еще в 1885 г., а в 1895 г. были уже получены первые спектрограммы. Однако вплоть до 1970 г. изучение спектров сверхновых ограничивалось установлением их типа, описанием спектра и его изменений. Что же скрывается за этими изменениями, оставалось неизвестным.

Самым непонятным и почти полностью нерасшифрованным являлся спектр сверхновых I типа, хотя именно их спектры уже наиболее широко наблюдались от 10 суток перед максимумом и до двух лет после него. В самом максимуме блеска и через неделю после него в спектрах этих сверхновых не наблюдалось резких деталей. Спектр выглядит сплошным, но его ультрафиолетовая область слабее, чем у обычных звезд, а на участке короче 3700 интенсивность спектра сверхновой стремительно снижается.

Изменения спектра со временем можно проследить по рис. 20. Через неделю после максимума становятся заметными яркие полосы и темные промежутки. Контраст между ними постепенно увеличивается. Но было неясно, что является физической реальностью спектра - яркая полоса или темный интервал? Это была одна из загадок спектра сверхновых. Но не единственная. В течение трех недель после максимума сверхновая желтеет и даже краснеет, а спектр ее, сохраняя все детали, слабеет в ультрафиолетовой части. Затем в течение четвертой недели яркая полоса в красной области, пересеченная ранее одним темным промежутком, разделяется на три части двумя новыми темными интервалами и постепенно начинает идти противоположный процесс - красная часть спектра слабеет по сравнению с ультрафиолетовой и соответственно цвет сверхновой снова из красного становится желтым и белым.

"Еженедельное" расписание изменений в цвете и спектре, приведенное выше, оказалось характерным для сверхновых фотометрического класса I.12. Для младших классов оно соответственно длиннее, а для старших - короче. Спектры сверхновых II типа изменяются аналогичным образом, но в первые недели у них ярче ультрафиолетовая часть спектра. Чтобы разобраться в причинах изменений спектра сверхновой, следовало попытаться расшифровать его детали, т. е. найти в нем спектральные линии, установить, каким элементам они

принадлежат. Первичная расшифровка совершенно неизвестного спектра, с чем в данном случае приходится иметь дело, задача очень трудная и редкая в астрофизической практике. Спектры обыкновенных звезд потому легко поддаются расшифровке, что большинство их линий в какой-то мере повторяет линии спектра Солнца и других звезд. Трудности же первичных отождествлений спектра Солнца и звезд были преодолены в прошлом веке. С тех пор астрофизика столкнулась с несколькими сложными проблемами полной расшифровки спектра. Одной из них было опознание ярких линий солнечной короны. На преодоление этой проблемы ушло около 70 лет. Другой сложной задачей явилось отождествление деталей спектров сверхновых. Для ее решения понадобилось более 80 лет, если, как и в предыдущем случае, начать отсчет от первых наблюдавшихся спектров сверхновых.

**Рис. 20.** Изменения со временем в спектре сверхновой 1971i, принадлежащей к I типу.

Под рамкой отмечены длины волн в ангстремах, выше - элементы и их ионы (отмечены знаком +), которым принадлежат важнейшие минимумы линий поглощения спектра сверхновой. По вертикальным рамкам отмечены логарифмы относительной интенсивности трех спектров сверхновой: а - спустя 2 суток после максимума блеска, б - то же спустя 27 суток, в - то же спустя 76 суток.

Не представляло трудностей лишь отождествление ярких линий водорода в спектрах сверхновых II типа, но и здесь было непонятно, почему в спектрах сверхновых I типа этих линий нет. Конечно, звезды, когда в их ядрах выгорает весь водород и гелий, могут в некоторых случаях взрываться. Но и тогда в их наружных оболочках, выбрасываемых взрывом, водород имеется в достаточном количестве. В астрофизике встречался пока единственный случай, когда водород, присутствуя, не проявлял себя в спектре звезды: у горячих и самых высоких по светимости сверхгигантов линии водорода очень слабы и даже отсутствуют. Причина этого явления - сочетание высокой разреженности и высокой температуры в оболочке сверхгиганта, приводящее к полной ионизации водорода.

Э.Р. Мустель указал недавно еще одну, противоположную реализующуюся, по видимому, в спектрах сверхновых I типа. Он обратил внимание на то, что ультрафиолетовая часть спектра сверхновой слаба, поэтому в оболочке должно вырабатываться мало квантов, возбуждающих линии водорода в видимой области спектра. Другими словами, если водород в оболочке сверхновой I типа имеется, он должен быть полностью нейтральным и, мало того, невозбужденным. В таком случае физические условия в сверхновых I и II типов должны существенно различаться. В чем состоит это различие, пока тоже загадка сверхновых.

Но что же представляют собой детали спектра сверхновой I типа? Еще в 1938 г. Р. Минковский выдвинул гипотезу, что все они - сложное сочетание неизвестных запрещенных линий. Действительно, в спектре сверхновой 1937с на 183-й сутки после максимума блеска появлялись две узкие яркие линии, без труда отождествленные Р. Минковским с запрещенными линиями нейтрального кислорода.

Своим видом они, однако, резко отличались от остальных деталей спектра. Тем не менее он предположил, что и остальные яркие детали в спектре образованы неизвестными запрещенными линиями. Вместе с тем Минковский обратил внимание на то, что яркие линии,

встречающиеся в спектрах самых горячих звезд, не совпадают с яркими деталями спектра сверхновой.

Особенно убедительным выглядело обнаружение Минковским четырех ярких деталей, которые немного перемещались в красную сторону у спектров, полученных несколько суток спустя. Такое смещение могло быть, утверждал Минковский, только в том случае, если спектр образован запрещенными линиями; в сущности, в нем видны только верхушки ярких линий, сливающихся в широкие полосы, а сам непрерывный спектр даже в максимуме блеска был, по видимому, в десятки раз менее ярк, чем эти полосы.

Но каким элементам и состояниям ионизации принадлежат эти запрещенные линии, оставалось неизвестным. Американские астрофизики Ф. Уиппл и Ц. Пэйн-Гапошкина по-другому подошли к этой загадке спектров сверхновых. Они рассчитали, каким должен быть спектр, составленный из ярких разрешенных линий наиболее распространенных во Вселенной химических элементов при температуре 15000-100000 К и при скорости расширения оболочки 6 000 км/с. Получился спектр, похожий на спектр сверхновой. Выходит, что и версия ярких запрещенных линий, защищаемая Минковским, и версия ярких разрешенных линий в равной степени возможны.

Что касается сверхновых II типа, то несмотря на обнаружение в их спектрах ярких линий водорода, остальные детали спектров были похожи на детали спектров сверхновых I типа и оставались загадочными.

Таким образом, складывалось впечатление, что взгляд на спектры сверхновых как на совокупность только ярких линий излучения является бесперспективным и от него следует отказаться. Не нужно рассматривать, по-видимому, спектры сверхновых как аналоги спектров газовых туманностей и горячих звезд, обладающих яркими линиями.

## **Линии поглощения в спектрах сверхновых**

Неудачи объяснения ярких деталей спектра сверхновой укрепляют точку зрения, которая исходит из того, что главными деталями его надо считать темные интервалы - расширенные и неглубокие линии поглощения. Нетрудно догадаться, что, принимая шаг за шагом выводы, следующие из гипотезы о существовании линий поглощения, мы придем к совершенно иному представлению о физических свойствах оболочек сверхновых, чем в случае оболочек с линиями излучения.

В спектрах сверхновых II типа, как и в спектрах новых звезд, в стадии после максимума присутствуют как линии излучения, так и линии поглощения, принадлежащие одному и тому же переходу между энергетическими состояниями атома водорода. Это, собственно, свидетельствовало о существовании линий поглощения в спектрах сверхновых, но, к сожалению, на этот факт не обращалось должного внимания.

Ситуация с выявлением линий поглощения в спектрах сверхновых I типа более сложна. В 1958 г. американский астрофизик Д. Мак-Лофлин, уже знакомый нам по исследованиям новых звезд, попытался расшифровать минимумы в спектрах одной из сверхновых как широкие линии поглощения нейтрального гелия и других элементов. Все эти линии оказались систематически

смещенными в фиолетовую сторону спектра. Это указывало на то, что оболочка, в которой они образуются, расширяется. Работу Мак-Лофлина остро раскритиковал Минковский, который правильно отмечал неубедительность случайных совпадений минимумов с некоторыми второстепенными линиями гелия, но отвергнуть целиком гипотезу присутствия линий поглощения в спектре сверхновой I типа он не смог.

Десять лет спустя после исследования, проведенного Мак-Лофлином, автор данной книги предложил объяснение обнаруженным в спектре сверхновой I типа линиям поглощения. Из этого объяснения следует простое правило отыскания линий, которые должны присутствовать в спектрах сверхновых. Было показано, что в случае спектров сверхновых мы имеем дело со значительным усилением линий поглощения некоторых элементов, эффектом светимости, известным по обычным звездам. Но только при изучении спектров звезд, переходе от карликов к сверхгигантам, мы сталкиваемся со сравнительно небольшим усилением линий поглощения, а в случае сверхновых эти эффекты светимости намного сильнее.

Какие же линии могут быть интенсивными в газовой оболочке сверхновой звезды, которая вследствие расширения становится все разреженной? Очевидно, те, которые усиливаются с понижением плотности газа, т. е. те, которые характерны для спектров звезд сверхгигантов. В этом и заключается общий рецепт для отбора ожидаемых в спектре сверхновой линий. Согласно соотношению, выведенному индийским астрофизиком М.Н. Саха, с увеличением разреженности оболочки в первую очередь должны усиливаться линии один раз ионизованных атомов легко ионизируемых элементов. В видимой области спектра таких линий среди самых интенсивных не так уж много. К легко ионизируемым относятся атомы кремния, магния, железа, серы, кальция, натрия и алюминия. Но один раз ионизованные атомы двух последних элементов не имеют интенсивных линий в видимом участке спектра.

В спектрах сверхновых, по-видимому, имеются также линии неионизованного гелия. Он относится к трудно ионизируемым элементам, и поэтому, а также благодаря высокому обилию гелия в звездах, эффект светимости не ослабляет существенно его линий. Что касается остальных элементов, то их роль в спектрах нормальных и сверхновых звезд невелика, потому что невелико их содержание в газовой смеси, характерной для звездных оболочек. Интенсивных линий меньше в красной части спектров звезд, поэтому в ней обычно разобраться легче. Вот и в спектре сверхновой, полученном вскоре после максимума блеска, обнаруживается минимум, соответствующий двум слившимся линиям один раз ионизованного кремния. Он оказался смещенным в фиолетовую часть спектра на величину  $\lambda$ . Но если это действительно линия ионизованного кремния, то в фиолетовой области спектра должны быть следы и другой пары интенсивных линий этого иона. И действительно, там был найден небольшой минимум с точно таким относительным спектральным смещением. Примерно на третьей неделе после максимума блеска оба минимума в спектре одновременно исчезают. Такие же относительные спектральные смещения имели и другие линии ионов наиболее распространенных элементов. Не нашлось случаев, когда бы интенсивная линия иона железа, магния или кальция отсутствовала в спектре сверхновой. К сожалению, линии некоторых

элементов располагаются в спектре близко друг от друга или просто налагаются, и в некоторых случаях трудно выяснить без специального анализа, какая из них вносит главный вклад в образующийся минимум в спектре. Но такие трудности встречаются при исследованиях почти каждого спектра звезды.

Здесь следует отметить, что вид линий поглощения в спектрах сверхновых не совсем обычен. Интенсивная линия в спектре нормальной звезды обычно резко контрастна, ее центр почти темен. В спектрах сверхновых минимумы менее контрастны, неглубоки. В чем же дело? Оказывается, в том, что мы наблюдаем расширяющуюся оболочку. Когда мы знакомимся со спектрами новых звезд, то видели, что линия поглощения в спектре расширяющейся оболочки смещается в фиолетовую сторону пропорционально скорости расширения оболочки. Это не единственное следствие расширения оболочки. Уменьшается и контрастность линии, а сама она расширяется. Эти изменения формы линии поглощения заметны уже в спектрах новых звезд, но они еще не так велики, какими оказываются в спектрах сверхновых звезд. Смещение, расширение и уменьшение контраста линии преобразуют ее в спектре сверхновой до неузнаваемости. Кстати, поскольку скорость расширения оболочек сверхновых достигает десятка тысяч километров в секунду, то слабые спектральные линии в их спектрах бесследно расплываются и можно заметить минимумы только самых интенсивных линий. Разыскивать второстепенные линии оказывается делом бесполезным.

В 1970 г. спектры сверхновых I типа исследовал Э.Р. Мустель. Он обратил внимание на сходство положения минимумов в спектрах сверхновых с положением главных линий (кроме водородных) в спектрах Солнца и новых звезд. Были отождествлены линии ионов железа, кальция и кремния, а впоследствии серы и неионизованного гелия, - т. е. те же, которые были выявлены на основании эффекта светимости. Кроме того, Э.Р. Мустель указал на возможное присутствие линии ионов остальных элементов группы железа: скандия, титана, ванадия, хрома и никеля. Роль этих ионов по сравнению с ионами железа второстепенна, так как их относительное содержание в газовой смеси невелико.

Многочисленные наблюдения спектров яркой сверхновой 1972e, проведенные американскими астрофизиками Дж. Оуком, Р. Киршнером, Л. Серлом и английским ученым М. Пенстоном, принесли новые подтверждения правильности предложенного в 1968 г. отождествления спектров сверхновых. В инфракрасной части спектра сверхновых ими был найден минимум, соответствующий трем слившимся линиям ионов кальция, присутствие которых вытекало из наличия в фиолетовой части спектров сверхновых Другой, пары его линий.

Так была решена задача первичной расшифровки основных деталей спектра сверхновой I типа. Этот успех вывел из тупика и вопрос о деталях спектров сверхновых II типа. В них были обнаружены те же линии поглощения, что и в спектрах сверхновых I типа, однако там, где располагаются линии водорода, остальные детали ими подавлены. Кроме того, если в спектрах сверхновых I типа характерными являются именно линии поглощения, то в спектрах

сверхновых II типа с красной стороны к линиям поглощения примыкают яркие компоненты, подобно тому, что наблюдается в спектрах новых звезд после максимума блеска.

Имеются еще и некоторые другие отличия в поведении линий в спектрах сверхновых I и II типов, о чем мы узнаем несколько дальше.

### **Температура излучающей поверхности сверхновой**

Пока не были расшифрованы спектры сверхновых, не существовало правильно обоснованных методов определения их температур. После того, как было установлено присутствие в спектрах сверхновых линий поглощения, а роль ярких линий оказалась несущественной, ситуация в корне изменилась: стало ясно, что излучение сверхновой целиком создается, ее непрерывным спектром теплового происхождения, т. е. фотосферой. Следовательно, для определения температуры могли быть пригодны способы, применяемые к обычным звездам.

Линии поглощения в спектрах сверхновых свидетельствовали о температурах порядка 10000 К, но никак не о температурах, на порядок-два более высоких, характерных для корональных условий. Об этом же говорила оценка температуры сверхновой по ходу изменения интенсивности спектра с длиной волны для фазы 20 суток после максимума, полученная французскими астрономами Д. Шалонжем и М. Бурнишон: 5300 К.

Очень простой и эффективный метод оценки температур сверхновых применил в 1971 г. Э.Р. Мустель: поскольку между температурами звездных фотосфер и показателями цвета имеется следующее соотношение:

$$T = 7900\text{К} / \text{пок. цв.} - 0.72$$

то по зависимости изменений цвета сверхновых мы можем определять их температуры. В частности, для фазы 20 суток после максимума получается 6000 К, а для более ранних 10-15 тыс. кельвинов.

И все же некоторое время применение этой формулы казалось рискованным, так как нам был известен только характер спектра в видимой части - от 3000 до 7000 , причем в фиолетовой части он был слабее, чем предписано законом Планка. Когда в 1973 г. исследовали инфракрасную область спектров сверхновых, сомнения рассеялись: на всем интервале от 24 000 до 3000 закон Планка соблюдался, а фиолетовый конец спектра был, по-видимому, ослаблен многочисленными слившимися линиями поглощения.

Прямое сравнение хода интенсивности по спектру сверхновой с требуемым по закону Планка при различных температурах позволяет определить, какой температуре лучше всего соответствует ее спектр в данной фазе. Не вдаваясь в подробности, укажем, что результаты подтвердили, применимость приведенной выше формулы.

**Рис. 21.** Кривые блеска сверхновых I и II типов с отметками температур, найденными по цвету или спектру объектов.

На рис. 21 изображены кривые блеска сверхновых обоих типов с отмеченными на них температурами.

В обоих случаях температуры изменяются с фазами и снижаются, пока сверхновая не достигает фазы К, после чего они снова, начинают расти. Следовательно, в фазе К фотосфера достигает наименьшей температуры. Что это значит? Разберемся, что представляет собой фотосфера сверхновой. Напомним, что фотосферу можно считать граничной поверхностью между прозрачной и непрозрачной для ее излучения зонами оболочки звезды. В сверхновой оболочка расширяется, и эта граница перемещается внутри последней. Сначала она тоже участвует в расширении, но с меньшей скоростью, близкой к скорости поглощающего слоя. При расширении оболочки ее наружные слои становятся все разреженнее, холоднее и прозрачнее на все большую глубину. Вследствие этого фотосфера отстает в расширении и останавливается, а затем начинает погружаться в глубь оболочки и вскоре попадает в более горячие медленно расширяющиеся слои, вследствие чего температура фотосферы снова возрастает.

Нетрудно установить, что формы кривых блеска сверхновых объясняются поведением фотосфер. Поскольку излучение сверхновых имеет тепловой характер, к ним применимо соотношение между радиусом, температурой и абсолютной величиной, приведенное в главе IV для случая обычных и новых звезд. Мы можем его записать также следующим образом, выражая на этот раз радиус фотосферы в километрах:

$$M = 29.15 - 2.5 \lg R^2 + 28400/T$$

Из этой формулы следует, что если радиус фотосферы растет, то увеличивается и блеск звезды, так как излучающая поверхность (фотосфера) растет пропорционально квадрату радиуса. Уменьшение же температуры, характеризуемое последним членом формулы, понижает блеск. Если вклад в блеск сверхновой, вносимый увеличением радиуса фотосферы, превосходит уменьшение блеска в результате ее охлаждения, то блеск звезды будет возрастать. Он достигнет максимума в тот момент, когда оба влияния уравниваются. Затем снижение блеска вследствие охлаждения начинает преобладать над ростом блеска, вызванным увеличением радиуса фотосферы, и, несмотря на продолжающийся рост поверхности фотосферы, будет происходить падение блеска сверхновой.

Если мы располагаем кривой блеска, оценками температур в соответствующих фазах по спектрам или показателям цвета и оценкой расстояния до сверхновой, мы можем по вышеуказанной формуле вычислять радиус фотосферы. Расчеты показывают, что он продолжает еще расти и после максимума блеска и становится наибольшим для сверхновых I типа в фазе К, а для сверхновых II типа - в фазе "плеча". Таким образом, если для сверхновых I типа фаза К отмечает сразу и момент наибольшего радиуса, и момент наименьшей ее температуры, то для сверхновых II типа фаза К соответствует только наименьшей температуре, а наибольший радиус фотосферы достигается несколько ранее - в фазе L. Между этими фазами блеск сверхновой II типа резко убывает, потому что уменьшаются и поверхность фотосферы и ее температура.

Обратим внимание на то, что без существенного пополнения энергии блеск сверхновой после фазы К быстро уменьшился бы, а не стал бы ослабевать в три раза медленнее, чем до этой

фазы. Существует ряд гипотез, объясняющих так называемую "накачку" энергии в оболочку сверхновой. Одни из них предполагают передачу энергии из центрального тела сверхновой в форме релятивистских частиц, либо рентгеновского излучения. Предполагается также медленное двухфазное выделение энергии при взрыве. В этом случае конкретным источником энергии может служить радиоактивный распад некоторых изотопов, образующихся при взрыве сверхновой.

Еще в 1950 г. было замечено, что радиоактивный бериллий-7, превращаясь с периодом полураспада около 55 суток в литий-7, мог бы выделить энергию, вполне соответствующую по форме наблюдаемой кривой блеска сверхновой I типа. Но для обеспечения требуемой светимости понадобилось бы столько бериллия, что в оболочке сверхновой и в межзвездном газе, в котором она потом рассеивается, лития-7 было бы в 100 раз больше, чем его обнаруживают спектральные наблюдения. То же получалось и при подборе других изотопов с аналогичным периодом полураспада, например, при превращении стронция-89 в иттрий-89, или деления калифорния-254 на два ядра.

В последние годы, однако, удалось преодолеть указанную трудность и обнаружить ряд наблюдательных фактов, говорящих в пользу радиоактивного механизма "накачки" энергии. По новым вариантам гипотезы источником энергии, поддерживающим свечение сверхновой I типа, является превращение никеля-56 в кобальт-56, а последнего - в стабильный изотоп железо-56.

### **Скорости расширения оболочек сверхновых**

Температуры и плотность газа оболочек сверхновых - не единственные физические факторы, определяющие явление сверхновой. Кроме них существует не менее важная характеристика, которая регулирует изменение с течением времени остальных характеристик оболочки - мы говорим о скорости расширения оболочки. Чем выше скорость расширения, тем быстрее падает плотность и наступает фаза максимального блеска. Скорость разлета сказывается и на всем развитии явления, т. е. на изменении температуры и форме кривой блеска.

В 1972 г. Э.Р. Мустель обнаружил, что относительные смещения линий поглощения в спектрах различных сверхновых I типа не одинаковы, а заключены в пределах значений от -0.02 до -0.046. Это свидетельствует о том, что сверхновые I типа имеют различные скорости расширения оболочек.

Относительное смещение спектральных линий, умноженное на скорость света, дает нам скорость расширения плотной части поглощающего слоя оболочки, а скорость расширения наружной границы оболочки на треть больше скорости плотного слоя. Таким образом, скорости расширения наружных границ оболочек сверхновых I типа могут составлять 8 - 18 тыс. км/с.

Следует отметить важное отличие в поведении смещения линий поглощения в спектрах сверхновых I и II типов. У спектральных линий сверхновых I типа оно почти неизменно на протяжении сотен суток, тогда как у спектральных линий сверхновых II типа оно систематически уменьшается по мере развития явления сверхновой. Тем не менее и у

сверхновых II типа установлено различие скоростей расширения границ оболочек от 4 до 12 тыс. км/с.

Различие в поведении линий поглощения связано, по всей видимости, с существованием различий в строении оболочек сверхновых I и II типов. Полную ясность в эту проблему вносит решение выдающимся советским, ученым Л.И. Седовым автомодельной задачи о точечном взрыве в газе, в котором плотность возрастает к центру по степенному закону (иными словами, в звезде). Расширяющаяся после взрыва оболочка имеет слой максимальной плотности. У сверхновых I типа, судя по формам их линий поглощения, этот слой расположен на четверть радиуса оболочки глубже ее наружной границы. В оболочке же сверхновой II типа, которая во много раз массивнее оболочки сверхновой I типа, максимум плотности находится значительно глубже. Поэтому наибольшее поглощение в каждый момент создает слой, прилегающий к фотосфере, и по мере перемещения последней в медленнее расширяющиеся слои скорость поглощающего слоя оболочки сверхновой II типа быстро понижается.

Несколько иную точку зрения высказывали Э.Р. Мустель и Н.Н. Чугай. Они полагали, что плотной является центральная область оболочки ("центральный остаток"), а линии поглощения в спектре сверхновой образуются в слоях, расположенных над ним. Эти слои прозрачны для излучения фотосферы, но в то же время имеют облачно-клочковатую структуру, способную поглощать часть излучения в спектральных линиях.

В 1975 г. при разработке фотометрической классификации сверхновых автор этой книги обнаружил, что между скоростями расширения оболочек и классами сверхновых имеется тесная связь. Ее характер показывает рис. 22. На первый взгляд, закономерность кажется парадоксальной: у медленно слабеющих сверхновых более высокие скорости разлета. Именно по этой причине мы говорим не о медленных и быстрых, а о старших и младших классах, используя индифферентные к понятию скорости эпитеты.

**Рис. 22.** Фотометрические классы сверхновых (они отложены по горизонтали) оказываются обусловленными величинами скоростей расширения их оболочек (они отложены по вертикали).

Чем выше скорость расширения оболочки, тем младше фотометрический класс сверхновой. Скорости оболочек сверхновых I типа выше, чем у сверхновых II типа.

Как показывает приведенная ранее формула, медленно слабеющая после максимума сверхновая и должна иметь высокую скорость расширения. Ведь у быстро расширяющейся оболочки быстрее растет поверхность фотосферы, поэтому такая сверхновая должна более стремительно подниматься к максимуму, но зато после него продолжающая расширение фотосфера будет сильнее сдерживать ослабление блеска, вызываемое только снижением температуры оболочки. А у сверхновой старшего класса картина будет обратная: обладая медленно расширяющейся оболочкой, звезда будет медленно увеличивать свой блеск и быстрее слабеет после максимума. То, что подъем блеска у сверхновых старших классов медленный, можно видеть на рис. 17.

По существу, различие в скоростях разлета оболочек сверхновых и составляет физическое содержание фотометрической классификации. Класс указывает нам по характеру кривой блеска

скорость разлета и изменение температурного режима оболочки сверхновой в зависимости от фазы развития явления. Между скоростью разлета оболочки и массой последней должна существовать взаимосвязь, что, по-видимому, позволит судить и об этой мало доступной прямым определениям характеристике оболочки.

Разделив радиус фотосферы на скорость его возрастания, либо изучив форму кривой блеска на подъеме к максимуму, мы можем найти время расширения оболочки. С его помощью можно уже вычислять и полные радиусы оболочек в различные моменты их эволюции. Такие характеристики вместе с упоминавшимися выше приведены в табл. 12.

Мы можем теперь кратко подытожить, что дало нам отождествление спектров сверхновых. Прежде всего, удалось выявить тепловой характер их излучения и найти физические характеристики фотосферы (ее температуру и движение затем установить факт расширения оболочек сверхновых в целом, и, наконец, объяснить изменение блеска и смысл фотометрической классификации сверхновых. Отождествление линий важнейших элементов позволяет также получить определенное представление о химическом составе газа оболочек сверхновых.

Однако возникает вопрос, насколько достоверны все эти выводы, имеется ли решающее доказательство, которое позволило бы расшифровку спектров сверхновых превратить из гипотезы в фундаментальный факт? Такое доказательство было найдено еще в 1973 г. английскими астрономами Д. Бренчем и Б. Пэтчеттом по идее американского астронома Л. Серла.

Таблица 12. Характеристики фотосфер сверхновых звезд			
Характеристика	Фотометрический класс		
	I. 6	I. 14	II. 2

*Стадия:* максимум блеска сверхновой

Длительность подъема к максимуму, сутки	14	17	8
Абсолютная звездная величина сверхновой, $M$	-21	-20	-18
Скорость разлета поглощающего слоя, км/с	-14 000	-8 000	-9 000
Скорость разлета наружной оболочки, км/с	-20 000	-10 000	-12 000
Радиус фотосферы, млрд. км	17	11	6
Радиус оболочки, млрд. км	24	15	8
Температура фотосферы, К	30 000	30 000	30 000

*Стадия:* максимальный радиус фотосферы

Фаза после максимума, сутки	44	25	70
Абсолютная звездная величина сверхновой, $M$	-19	-17	-17
Скорость разлета поглощающего слоя, км/с	-14 000	-8 000	-4 500
Радиус фотосферы, млрд. км	60	30	47

Радиус оболочки, млрд. км	100	40	80
Температура фотосферы, К	5 000	5 000	5 000
Фаза минимума температуры фотосферы, сутки	Та же	Та же	100
Минимальная температура фотосферы, К	5 000	5 000	4 000

*Стадия:* через полгода после максимума

Фаза после максимума, сутки	200	200	200
Абсолютная звездная величина сверхновой, $M$	-17	-14	-13
Скорость разлета поглощающего слоя, км/с	-14 000	-8 000	?
Радиус фотосферы, млрд. км	4	1	5
Радиус оболочки, млрд. км	370	157	216
Температура фотосферы, К	15 000	15 000	5 000

Если вычислить радиус фотосферы сверхновой по спектральным измерениям скорости его изменения (определяя эту скорость по смещению линий поглощающего слоя, непосредственно прилегающего к фотосфере), то, пользуясь также оценками температуры и формулой, приведенной на с. 115, можно вычислить абсолютную величину сверхновой по чисто спектральным характеристикам. С другой стороны ее можно найти по кривой блеска и расстоянию до материнской галактики. Результаты получились совпадающими. Таким путем теперь надежно решается и важная обратная задача: вычисляется коэффициент  $H_0$  в законе Хаббла.

Остановимся, в заключение, на определении плотности газа и масс оболочек сверхновых и их химического состава. По запрещенным линиям кислорода в спектре сверхновой 1937с, которые появились через полгода после максимума блеска, установлено, что в этот момент плотность газа наружной оболочки была ниже  $10^{-17}$  г/см<sup>3</sup>. По этой величине и по другим данным массы оболочек сверхновых I типа оцениваются в пределах от 0.1 до 0.5 солнечных масс, но об оценках масс оболочек каждой исследованной сверхновой пока не может быть и речи. Для оболочек сверхновой II типа тем же путем получены массы порядка одной массы Солнца. Как мы убедимся, сходные оценки получаются и для масс остатков оболочек сверхновых, наблюдаемых в нашей Галактике хотя способы их оценок несколько иные.

Что касается химического состава оболочек сверхновых, то, по-видимому, установлено, что в сверхновых I типа значительно ниже содержание водорода и, возможно, на первое место по обилию претендует гелий. В оболочках же сверхновых II типа обилие водорода, по-видимому, нормальное. Э.Р. Мустель нашел в спектре сверхновой I типа линии поглощения азота, а на поздних стадиях развития явления - также углерода и кислорода. Он полагает, что азот в оболочках сверхновых имеется в избытке. Излишек азота обнаружен некоторыми исследователями и в старых остатках оболочек сверхновых звезд. Почему так много именно азота? При термоядерных реакциях превращения водорода в гелий азот образуется как

побочный продукт. В избытке азота, кислорода и углерода исследователи пытаются найти причину взрыва сверхновой, как мы увидим это в последней главе.

Найденные Э.Р. Мустелем слабые линии азота и других элементов порождают новую проблему. Для возбуждения атомов гелия и азота нужны кванты высоких энергий, которых нет в холодной оболочке где возникают линии поглощения. По мнению Э.Р. Мустеля, эти атомы возбуждаются излучением из горячих слоев, лежащих ниже фотосферы сверхновой. Кроме того, позднее появление линий углерода и кислорода, по его мнению, свидетельствует о том что последними элементами богаты более глубокие слои оболочки сверхновой. Иными словами, оболочка по-видимому, имеет "слоистый" химический состав.

Мы уже упоминали о том, что в спектрах сверхновых в силу физических условий присутствуют интенсивные линии ионизованного железа, хотя содержание этого элемента в оболочках может быть обычным. Однако исключительный интерес представляет спектр сверхновой 1972e, полученный Р. Киршнером и Дж. Оуком в 1973 г., через 24 месяца после вспышки. В этот момент сверхновая, в полном соответствии со своей кривой блеска, имела уже 21-ю звездную величину, а в спектре ее была видна только узкая область 4600-5200 , целиком состоящая из ярких линий, принадлежащих, главным образом, запрещенным линиям ионизованного железа. Оболочка сверхновой на этой поздней фазе стала, по существу, туманностью, в которой атомы железа имеются в избытке. Этот факт, требующий еще всестороннего анализа, рассматривается сейчас как одно из подтверждений гипотезы о радиоактивном распаде, никель - кобальт - железо, поддерживающем свечение сверхновой I типа.

## **Глава IX. ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ**

### **Сверхновая, породившая Крабовидную туманность**

Первым о вспышках сверхновых в нашей Галактике заговорил в 1921 г. К. Лундмарк. Он считал, яркие вспышки, наблюдавшиеся в древние и средние века, были галактическими новыми и теми звездами, которые позже получили название сверхновых. Отмечая вспышку 1054 г., наблюдавшуюся в Китае, он указал, что место ее близко к крабовидной туманности - газовому сгустку волокнистого строения, напоминающему краба. Любопытно, что эту туманность тоже в 1921 г. изучали американские астрономы К. Лампланд и Дж. Дункан и обнаружили оба, что она систематически расширяется, а длительность разлета ее составляет почти девять веков.

Нам сейчас легко сопоставить эти факты и установить совпадение вспышки с образованием туманности, однако ни Лундмарк, ни американские исследователи такого вывода не сделали. Лишь через семь лет Э. Хаббл впервые мимоходом отметил это совпадение, а еще через десять лет Лундмарк уже уверенно говорил, что Крабовидная туманность образовалась в результате вспышки 1054 г. Он нашел видимую звездную величину вспышки и расстояние до "Краба" и получил ее абсолютную звездную величину, которая оказалась намного выше, чем у обычной

новой. Этим было доказано, что в 1054 г. в Галактике произошла вспышка сверхновой. Не менее важно было и установление того факта, что на ее месте осталась расширяющаяся туманность. Причиной же семнадцатилетней задержки, по-видимому, было то, что в наиболее авторитетной древнекитайской хронике говорилось, что "юго-восточнее "Тянь-Гуаня" в нескольких дюймах появилась звезда-гостья (так в Китае называли появления звезд и комет)". "Дюйм" в данном случае - это примерно полтора градуса дуги небесной сферы. Обычно считалось, что главной звездой созвездия "Тянь-Гуань" ("Небесный Барьер") являлась  $\zeta$  Тельца (рис. 23). Однако Крабовидная туманность расположена не к юго-востоку, а к северо-западу от этой звезды. Приходилось подозревать, что в китайском тексте ошибка.

**Рис. 23.** Созвездие Тельца и его окрестности.

На левом краю карты нанесены градусные деления, жирная линия с градусными делениями - эклиптика. Границы созвездия Тельца и других современных созвездий оконтурены пунктиром, главные звезды обозначены буквами греческого алфавита. Конфигурации китайских созвездий изображены сплошными линиями, их названия даны курсивом. Крабовидная туманность отмечена знаком X.

Но возможность ошибки решительно отвергается специалистами по истории науки в древнем Китае. В 1971 г. специалист по древнекитайской астрономии Хо Пин-ю (Малайзия) и американские синологи Ф. Паар и П. Парсонс указали еще один текст с аналогичным описанием вспышки юго-восточнее "Тянь-Гуаня". Следовательно, ошибки в хронике не было. Нужно искать другую причину путаницы в установлении места вспышки. Это, по-видимому, удалось автору этой книги.

На старинных китайских картах звездного неба почти нет созвездий с одинаковыми названиями, и только "Тянь-Гуаней" оказалось пять: в современных созвездиях Тельца, Девы, Стрельца, Близнецов и Козерога. Еще один из первых исследователей китайской системы созвездий Г. Шлегель в 1875 г. отметил, что каждый из этих "Небесных Барьеров" состоит из двух ярких звезд, но главное - то, что линия между этими звездами барьера обязательно пересекает эклиптику, - оставалось незамеченным. А ведь в этом и заключалось назначение этих специальных созвездий: они играли роль настоящих шлагбаумов, перекрывавших в пяти местах главное "небесное шоссе" - эклиптику, в области которой происходит движение небесных светил: планет, Солнца и Луны.

Шлегель и за ним другие считали второй звездой "Тянь-Гуаня" в Тельце слабую звезду южнее Тельца и не учитывали, что такой барьер не пересекает эклиптику. Это и была ошибка, повлекшая путаницу в установлении места вспышки сверхновой.

Естественной парой звезд, удовлетворяющей нашему требованию, являются и Тельца. Кстати, Гиппарх их называет "рогами" Тельца, который встречает ими светила, движущиеся по эклипике - роль, вполне аналогичная "Небесному Барьеру"! Почему же до сих пор не обращали внимания на Тельца как на естественный и, более того, главный яркий компонент "Тянь-Гуаня"? Потому, что не была выявлена связь барьеров с эклипстикой, а кроме того, эта звезда входила в число главных звезд соседнего созвездия "У-Че" ("Пять Колесниц"), расположенного на месте нашего созвездия Возничего. Но и это было несущественным

возражением, потому что "Тянь-Гуани" не совсем самостоятельные созвездия: в Стрельце и Близнецах они одновременно входят в состав соседних созвездий. То же самое и с "Барьером" в Тельце.

У китайцев было строго принято указывать положение "звезды-гости" по отношению к самой яркой звезде созвездия. В "Тянь-Гуане" в Тельце такой звездой мы теперь должны считать Тельца, и тогда спорный текст из китайской хроники получает ясное толкование: "юго-восточнее Тельца на расстоянии нескольких градусов". Юго-восточнее этой звезды, в семи градусах от нее, расположена Крабовидная туманность.

О Крабовидной туманности мы будем еще немало говорить в последующих главах, потому что она сыграла исключительную роль в астрофизических исследованиях. Поэтому особый интерес представляют подробные сведения о вспышке: ее блеске, цвете, их изменениях и других особенностях. Однако прямых сравнений блеска вспыхнувшей звезды с чем-либо почти не имеется. Все же попытку исследовать проблему сделали в 1942 г. голландский астроном Я. Оорт и американец Н. Мэйолл. Они установили по китайским текстам, что первый раз сверхновую заметили 4 июля, и она была видна даже засветло в течение 23 дней, а в ночное время наблюдалась до середины апреля 1056 г.

Если учесть, что мы можем видеть Венеру при незашедшем Солнце, когда ее блеск превышает звездную величину - 3.5, а сверхновая перестала быть видна ночью, после того как ее блеск упал до 5-й величины, то получим, что звезда ослабела на 8.5 звездных величин в течение 650 суток, в среднем на 1.3 величины за сто суток. Но теперь мы знаем, что такой медленный темп ослабления в сочетании с невысокой скоростью разлета оболочки (которая наблюдается у Крабовидной туманности) возможен только у сверхновых II типа.

Оорт и Мэйолл отвергли несколько упоминаний о более ранних датах наблюдений сверхновой, в частности японские записи, датируемые концом мая, поскольку тогда сверхновую заслоняло Солнце и видеть ее было невозможно, а также три китайских текста, утверждавших, что в 1054 г. "было затмение Солнца в дневное время и появилась "звезда-гостья" в "лунном доме Мао" (Плеядах)". Места и моменты всех затмений точно вычислены в "Каноне затмений" Т. Оппольцера, и затмение, о котором говорится, состоялось в майское новолуние в Южном Китае после полудня 9 мая 1054 г. Сейчас, спустя 40 лет после, работы Оорта и Мэйолла, мы можем утверждать, что и японские, и китайские тексты не содержали ошибок: сверхновую видели в мае. Заблуждались современные интерпретаторы. Но это стало ясно после того, как были разысканы сведения о наблюдениях сверхновой в Армении.

В 1969 г. советские исследователи И.С. Астапович и Б.Е. Туманян нашли в хранилище древнеармянских рукописей Матенадаране, а в 1975 г. окончательно расшифровали астрономический текст Этума Патмича. В переводе он гласил, что в 1054 г. "на диске Луны появилась звезда, когда было новолуние 14 мая в первой половине ночи". Мы уже знаем, что по современному календарю новолуние было 9 мая, а спустя сутки с небольшим, как показывают расчеты. Луна максимально приблизилась к сверхновой. Этот момент мог

наблюдаться в Ереване 10 мая при заходе Луны, которая спустя сутки после новолуния имела вид чрезвычайно узкого серпа. Но сверхновая находилась почти на четыре лунных диаметра ниже Луны. Н.С. Астапович убедительно показал, что это расстояние у горизонта могут существенно уменьшить три оптических эффекта: горизонтальный параллакс Луны, иррадиация и аномальное преломление света звезды у горизонта. Следовательно, могло наблюдаться поразительное зрелище яркой звезды в соседстве с лунным серпом.

Если Патмич видел сверхновую, то тексты, отмечавшие ее появление во время затмения, верны. Дело в том, что указание на "лунный дом Мао", по-видимому, относится только к Солнцу, которое в момент затмения действительно находилось в Плеядах. Возможно, в тексте отмечалось, что на потемневшем при затмении небе среди знакомых звезд увидели еще и "звезду-гостью". Когда затмение кончилось, она исчезла в дневном свете, следовательно, была еще недостаточно яркой и достигла максимума на следующий день. До начала июля, в течение почти двух месяцев, она могла быть ярче -3,5 звездной величины и при случае наблюдаться на синем фоне неба при еще не зашедшем Солнце. Длительное пребывание в максимуме также характерно, как мы знаем, для сверхновых II типа - это еще один аргумент в пользу такой классификации вспышки.

Помимо возможного наблюдения сверхновой в Армении теперь известны и другие обстоятельства, связанные со вспышкой 1054 г., достоверность которых условна, но они правдоподобно сочетаются с другими более надежными сведениями о сверхновой. Речь идет о наскальных изображениях в Северной Аризонской пустыне.

В 1955 г. американский археолог У. Миллер обнаружил там два наскальных рисунка необычного для североамериканских индейцев сюжета, а именно, содержащие мотивы лунного серпа и кружка, изображающего звезду (рис. 24). Один рисунок был в пещере на Белой Столовой горе и изображал молодую Луну с яркой звездой на нижнем роге, а другой, расположенный недалеко от первого на стене каньона Навахо, изображал серп, обращенный в другую сторону, т. е. старую Луну и звезду под ней.

#### **Рис. 24.** Аризонские наскальные изображения.

Левый рисунок найден в пещере Белой Столовой горы и изображает молодую Луну, сблизившуюся со звездой, правый рисунок находится на стене каньона Навахо; старая Луна и яркая звезда.

Остатки углей в очагах пещер и стиль рисунков в этой части каньона показали, что пещеры были населены индейцами Навахо в X-XII веках. Скорее всего, индейцы были поражены эффектным зрелищем соседства Луны и сверхновой 1054 г. Сближения Луны со звездами, находящимися на ее пути, происходят ровно через 27 суток и 7 часов. В частности, старая Луна сблизилась со сверхновой 4 июня 1054 г., вскоре после того, как она стала наблюдаться в Китае. Этому событию и мог соответствовать рисунок в каньоне. Что касается рисунка в пещере, то Миллер и астрономы, исследовавшие его позже, полагали, что древний художник перевернул изображение Луны, как это случается и с нашими современниками, если их врасплох просят нарисовать Луну по памяти. Для подтверждения этого факта были даже

устроены массовые эксперименты, подтвердившие невнимательность наших современников. Ну и как уже повелось, снова обвинили в ошибках древнего художника.

**Рис. 25.** Кривые блеска пяти галактических сверхновых.

По горизонтали - фаза в сутках, по вертикали - видимые звездные величины. 1 - китайская Сверхновая 185 г. 2 - Сверхновая 1006 г. 3 - Сверхновая 1054 г., 4 - Сверхновая Браге 1572 г., 5 - Сверхновая Кеплера 1604 г.

Но сопоставление с современным человеком не выдерживает критики. Луна в эпоху неолита и долгое время после него была для людей не простым ночным светильником, но и часами и календарем. По положению на небе и по фазе можно было судить о времени суток и дне в лунном месяце. Перепутать молодую Луну со старой было еще невозможно потому, что молодая Луна видна вечером, а старая под утро.

Было изображено, очевидно, два различных события. И.С. Астапович обратил внимание на то, что рисунок в пещере, считавшийся перевернутым, соответствует как раз майскому сближению Луны со сверхновой, которое видели 10 мая в Армении при заходе. Но в Аризоне этот момент был днем, Луна стала видна только через несколько часов, когда стала садиться. Расстояние между ней и звездой при заходе в Аризоне было уже не минимальным.

На рис. 25 изображена предполагаемая кривая блеска Сверхновой 1054 г. В максимуме она достигала -5-й звездной величины, а фотометрический класс был, вероятно, II.5.

## **Поиски галактических сверхновых**

В 1943-1945 гг. советский астроном Б.В. Кукаркин и американский астроном В. Бааде исследовали, независимо друг от друга, еще две галактические сверхновые. Это были самые яркие вспышки звезд накануне телескопической эпохи, известные как Новая Тихо Браге 1572 г. и Новая Иоганна Кеплера 1604 г. Наши современники воспользовались сравнениями блеска новых с блеском планет и соседних с ними звезд, приведенными в трудах Браге и Кеплера. Теперь можно точно вычислить звездные величины планет для любого момента в прошлом, и точно известны звездные величины звезд, видимых простым глазом. Это и позволило восстановить кривые блеска обеих ярких вспышек (они приведены на рис. 25). Неравно были разысканы еще и корейские исторические записи о Новой Кеплера, существенно пополнившие европейские наблюдения. Максимальный блеск Сверхновой 1572 г. по нашим определениям был -4.5, а Сверхновой 1604 г. -3.5, т. е. в обоих случаях он достигал блеска Венеры. Но самое интересное то, что их кривые блеска оказались не только определенно I типа, но обе лучше всего соответствовали фотометрическому классу I.12.

На местах вспышек сначала у Новой Кеплера, а затем и Новой Браге В. Бааде обнаружил слабые клочковато-волокнистые туманности. Хотя эти туманности в деталях отличаются от Крабовидной, это был все же новый признак для поисков сверхновых в нашей Галактике, в том числе тех, которые по тем или иным обстоятельствам не наблюдались как вспышки в прошлом. Поэтому было вполне естественным предположение, выдвинутое в 1946 г. Оортом, что большая волокнистая туманность в созвездии Лебедя тоже является остатком сверхновой,

давно затормозившимся в межзвездном газе. Таких волокнистых туманностей на небе найдено уже свыше трех десятков. Самые яркие из них изучены советскими астрофизиками Г.А. Шайном и В.Ф. Газе. Все эти остатки сверхновых имеют возрасты тысячи лет.

В 1948 г. были обнаружены первые сильные источники космического радиоизлучения, причем некоторые из них лежали в области Млечного Пути. Эти источники получили название Стрелец А (впоследствии оказавшийся в ядре Галактики), Кассиопея А и Телец А. В то время радиотелескопы определяли положение радиоисточника на небе очень грубо, но все же уже через год австралийский радиоастроном Дж. Болтон и его коллеги обнаружили, что открытый ими ранее радиоисточник Телец А по положению совпадает с Крабовидной туманностью.

Исследование этого радиоисточника на нескольких длинах волн показало, что интенсивность его увеличивается с переходом к более длинным волнам. Это был важный факт, последствия которого были осмыслены позже. Мы уже знаем, что нагретые небесные тела излучают волны и в радиодиапазоне, но если источник излучения тепловой, то его интенсивность на радиоволнах убывает с переходом к более длинным волнам. В случае же Крабовидной туманности ход изменения интенсивности радиоизлучения с длиной волны иной: интенсивность возрастает с увеличением длин волн. Это показывает, что радиоизлучение объекта имеет нетепловой характер. Забегая вперед, отметим, что кроме остатков сверхновых нетепловое излучение имеется у внегалактических источников: радиогалактик и квазаров.

Слабое нетепловое радиоизлучение порождает также межзвездная среда спиральных рукавов. Обнаружение нетеплового радиоизлучения у Крабовидной туманности толкнуло на поиски остатков сверхновых по этому новому признаку. В 1952 г. Бааде нашел на месте, где наблюдается радиоисточник Кассиопея А, слабую волокнистую туманность. Советские астрономы П.П. Паренаго и И.С. Шкловский высказали предположение, что это тоже остаток сверхновой, возможно, даже наблюдавшейся в древнем Китае (в созвездии Кассиопеи древние наблюдатели видели много, вспышек). Другие исследователи, например Минковский, не согласились с их точкой зрения.

Но в 1955 г. Р. Минковский смог измерить движение сгустков этой туманности и обнаружил, что она, несмотря на несходство с Крабовидной туманностью, также является частью быстро расширяющейся оболочки. Ему пришлось отказаться от своих возражений. По расширению туманности удалось установить возраст этой сверхновой. Новейшие исследования канадских астрономов К. Кампера и С. ван ден Берга указывают дату вспышки около 1653 г. с неуверенностью около 3 лет. Значит, она произошла совсем недавно, уже после вспышек Сверхновых Браге и Кеплера, в эпоху телескопов Яна Гевелия, а между тем, ее не видели в таком всегда доступном наблюдению, не заходящем в умеренных широтах нашего полушария созвездии Кассиопеи. Открытая благодаря радиоастрономии молодая сверхновая оказалась во многих отношениях исключительно интересным объектом.

К настоящему времени радиоастрономия позволила разыскать 135 нетепловых радиоисточников, принадлежащих нашей Галактике. Они являются остатками сверхновых

разного возраста. Только для сравнительно молодых объектов, достаточно детально наблюдавшихся в прошлые века нашими предшественниками, мы умеем по кривым блеска установить тип, а иногда даже фотометрический класс сверхновой.

## **Наблюдения сверхновых в древности**

Сбором сведений о старинных наблюдениях вспышек звезд, появлениях комет и других необычных явлений ученые занялись давно. Первые сводки таких данных, составленные по китайским, ближневосточным и европейским источникам, принадлежат французскому исследователю комет А.Г. Пингре, который в 1783 г. издал двухтомный труд "Кометография". Он пользовался некоторыми римскими и библейскими текстами, а также первыми переводами средневековой китайской энциклопедии "Вэньсянь тункао", составленной Ма Дуаньлинем, и некоторых других манускриптов, часть которых затем бесследно затерялась в эпоху Французской революции.

К сожалению, список Пингре был незаслуженно забыт и Гумбольдтом и Лундмарком. Полнейшее на сегодняшний день собрание всех явлений, считавшихся по тем или иным причинам вспышками звезд, составлено автором данной книги и вошло в международный "Общий каталог переменных звезд", регулярно пополняемый новыми данными.

С древнейших времен и до 1700 г. насчитывается около 200 вспышек, главным образом новых звезд, и розыски в летописях рукописях и хрониках продолжаются. Отметим, что до последнего времени считалось, что в Европе, Средиземноморье и на Ближнем Востоке наблюдалось мало вспышек: всего 5-7, а остальные видели в странах Дальнего Востока. Привлечение материалов Пингре, римских хроник показало, что на Западе было отмечено около 25 вспышек. Это уже серьезный вклад, который используется для перекрестного сравнения описаний вспышек.

Как же среди наблюдавшихся вспышек выявить сверхновые? Три яркие галактические сверхновые, о которых мы говорили на предшествующих страницах, достигали и превосходили звездную величину  $-3.5$ . И это не случайность. Чтобы вспышка звезды была легко обнаружена простым глазом, она должна быть по крайней мере 3-й звездной величины. Тогда она нарушает привычные фигуры созвездий и бросается в глаза. Такую величину в максимуме блеска будет иметь новая звезда, если она расположена от нас не далее тысячи световых лет. Зато сверхновая, вспыхнувшая в самой отдаленной части нашей Галактики, если бы межзвездное поглощение отсутствовало, была бы ярче нулевой звездной величины и наблюдалась, в зависимости от типа кривой блеска, от 3 до 8 месяцев. Таким образом, существует большая вероятность, что вспышка ярче нулевой звездной величины - это сверхновая звезда.

Вплоть до последних лет древнейшим дошедшим до нас сообщением о наблюдениях ярких светил было упоминание о комете 2296 г. до н. э., разысканное Пингре и содержащееся в записях устных преданий о первом китайском правителе Яо. Письменность в Китае возникла полутора тысячелетиями позже. Но несколько лет назад Дж. Михановским (США) была расшифрована глиняная дощечка шумеров (обитателей древней Месопотамии), на которой

также была записана древнейшая устная легенда о "втором божестве-солнце", показавшемся в южной стороне неба, но вскоре померкшем и исчезнувшем. Это явление относят к 3-4 тысячелетиям до н. э. и связывают со вспышкой сверхновой, после которой остался самый близкий к нам остаток - туманность Паруса X.

Определенные и достоверные сведения мы имеем теперь о вспышке, по-видимому, сверхновой, которая была замечена в Китае 7 декабря 185 г. н. э. и была видна до июля 186 или 187 г. Вот как описывается это явление: "В период Чжун-Цин, во второй год, 10-ю луну в день Квэй-Хао появилась необыкновенная звезда посредине Нан-Мэн. Она была величиной с бамбуковые счеты и последовательно показывала пять цветов. Постепенно она уменьшала свой блеск к 6-й луне после следующего года, когда исчезла". В этом описании имеется дата явления, его длительность и место на небе, указан его характер: неподвижность среди звезд, ослабление блеска и изменение цвета. Заметим, что это единственное упоминание о явлении 185 г., другие сведения до нас не дошли.

Созвездие "Нан-Мэн" - это и Центавра. В Лояне, древней столице Китая, оно поднималось над горизонтом на три градуса и было видно не более двух часов за ночь, поэтому звезда должна быть исключительно яркой, чтобы ее заметили. Полагали, что вспышка наблюдалась 7 месяцев, но Ф. Стефенсон приводит доводы в пользу того, что соответствующий иероглиф в тексте нужно переводить не как "следующего года", а в смысле "последующего года", и оценивает длительность в 20 месяцев.

По нашему мнению, решающим доводом, свидетельствующим о вспышке именно сверхновой, а не новой звезды, является последовательное изменение цвета вспышки. Новые звезды практически не изменяют своего цвета, тогда как сверхновые в максимуме белые, а затем последовательно становятся желтыми, красными, снова желтыми и белыми. Поскольку в тексте говорится о пяти цветах, первые наблюдения относятся к стадии белого цвета т. е. к максимуму блеска.

Каков же был максимальный блеск сверхновой? Прямых сведений текст не дает, но мы можем его рассчитать по длительности явления. Семимесячная видимость звезды у самого горизонта говорит о звездной величине вспышки не выше -4, а 20-месячная - от -4-й до -8-й звездной величины. Получается довольно широкий выбор, который может быть ограничен, если найти остаток сверхновой.

Между и Центавра найдено четыре нетепловых радиоисточника, т. е. остатка сверхновых. Находящийся посредине совпадает со слабой волокнистой туманностью. Недавно обнаружено его тепловое рентгеновское излучение - признак сравнительной молодости остатка сверхновой. Возраст его, вычисляемый по интенсивности радиоизлучения, меньше возраста остальных трех, но превосходит 1700 лет, т. е. получается старше наблюдавшейся вспышки, что следует отнести за счет грубости этого метода определения возраста. Расстояние до остатка 2-3 кпс, и поэтому сверхновая I типа, вспыхнувшая на таком расстоянии, после ее ослабления

межзвездным поглощением достигала бы -4-й величины, а в случае II типа была бы -2-й величины. По-видимому, лучше подходит I тип.

Попытки опознать вспышки сверхновых, описанные в старинных текстах, "с черного хода", пользуясь данными о галактических остатках сверхновых, были в большой моде лет двадцать назад. Слабым местом их были очень грубые указания хроник на области вспышек. Когда же стало возможным как-то, определять возрасты остатков, выявилась мнимость многих "отождествлений".

Важную роль теперь продолжают играть поиски старых текстов, в которых содержатся ценные астрономические сведения. Особенно поучительна в этом отношении история исследования Сверхновой 1006 г. Об этой вспышке, наблюдавшейся в южном созвездии Волка, у самого горизонта, найдены упоминания в семи японских, шести китайских, шести европейских, пяти арабских и одной корейской хрониках. Летописцы, описывающие явления, не всегда были профессиональными наблюдателями и очевидцами, но иногда встречаются и описания очевидцев. Таким был астролог Али бен Ридван, подробно описавший явление 1006 г., виденное им лично в молодости. Он хорошо помнил положение планет при появлении звезды, и американский исследователь Б. Голдстейн смог установить дату и место этого явления на небе. Сходные результаты он получил по китайским хроникам.

Как и в случае Сверхновой 1054 г., мы сталкиваемся здесь со скудостью сведений о блеске сверхновой. Любопытно, однако, что первое описание сверхновой 28 апреля, принадлежащее японским астрономам, отмечало бело-голубой цвет звезды, а последующие наблюдатели единодушно называют цвет звезды желтым и золотистым. Судя по этим сведениям, японцы видели эту сверхновую еще до того, как она достигла максимума блеска. В китайских источниках отмечалось также, что 1 мая блеск ее постепенно возрастал и приближался к блеску Венеры. В пяти источниках блеск сверхновой сравнивается с блеском неполной Луны, хотя никто не упоминает, что звезду видели и в дневное время. Конечно, в мае звезда восходила и заходила глубокой ночью. Даже если бы по блеску она была равна Венере, то производила бы огромное впечатление на фоне безлунной глубокой ночи, тогда как Венеру мы видим лишь в сумерки на светлом фоне зари. Тени от освещения сверхновой предметов также усиливали впечатление и служили, по-видимому, основанием для сравнений с неполной Луной. А фактически сверхновая могла казаться ярче Венеры, но слабее Луны в четверти. Али бен Ридван отмечает, что по "размерам" звезда превосходила Венеру в 2.5-3 раза. Это сравнение было "заочным", так как звезда восходила намного позже захода Венеры. Исследователи пытались пересчитывать оценку Али бен Ридвана, основываясь на старых арабских и на современных данных о видимых угловых размерах Венеры, но получилась бессмыслица. Али бен Ридван имел, очевидно, в виду, что звезда была ярче Венеры на 2-3 звездные величины. Поскольку в мае по вечерам Венера могла иметь -3-ю величину, сверхновая в максимуме блеска могла быть -6-й величины.

То обстоятельство; что в июле сверхновая должна была восходить в дневное время после полудня, но ее не видели на фоне дневного неба, свидетельствует что она в этом месяце, казалась слабее -3.5 величины. Когда она снова стала видна ночью, то еще выделялась по блеску среди окружающих звезд. С июля по конец ноября японские придворные астрономы девять раз сообщали о ее видимости императору. Китайские астрономы видели ее по утрам на востоке до самого конца года. В 1007 г. уже не было сведений о сверхновой. Правда, в одном источнике имеется сообщение, которое Голдстейн переводит как утверждение, что ее видели до 1016 г., но это явное недоразумение, так как в этом случае сверхновая в максимуме была бы так ярка, что долгое время сияла бы днем.

Рассмотрение обстоятельств видимости сверхновой говорит в пользу того, что это была сверхновая I типа. Среди нескольких источников нетеплового радиоизлучения в районе вспышки обнаружен один со следами газовых волокон и с характерным рентгеновским излучением. В 1979 г. недалеко от центра этого остатка сверхновой Ф. Швейцер и Дж. Миддледич обнаружили голубую звездочку 17-й величины, являющуюся, судя по спектру, белым карликом.

Забегая вперед, отметим, что к тому времени у двух остатков сверхновых - в Крабовидной туманности и Парусах X уже были найдены и детально исследованы слабые голубые центральные звездочки, которые оказались мигающими с высокой частотой - 30 и 10 раз в секунду соответственно. Однако колебаний блеска звездочки Швейцера обнаружено не было. Могло оказаться, что эта звездочка случайно проектируется на радиоисточник и является одним из обычных объектов галактического диска перед или за остатком сверхновой. Но, с другой стороны, это мог быть и первый обнаруженный звездный остаток сверхновой I типа! Необходимо было как следует разобраться. И в январе 1982 г. со спутника, вооруженного ультрафиолетовыми спектрометрами, были получены спектры этого объекта от 1200 до 3200 . В спектрах были обнаружены линии поглощения, принадлежащие расширяющейся оболочке остатка сверхновой, расположенного перед звездой; смещение их указало скорость расширения в 5 - 6 тыс. км/с. Это сыграло решающую роль в установлении подлинной схемы развития вспышек сверхновых I типа.

**Таблица 13. Галактические сверхновые**

Сверхновая, год вспышки	185	1006	1054	1181	1572	1592	1604
Созвездие	Центавр	Волк	Телец	Кассиопея	Кассиопея	Кассиопея	Змееносец
Страна или часть света, где заметили сверхновую	Китай	Азия, Африка	Азия, Америка	Азия	Европа, Азия	Корея	Европа, Азия
Длительность наблюдения, сутки	225	240	710	185	560	100	365
Видимая звездная величина в	-4	-6	-5	1	-4.5	2	-3.5

максимуме

Фотометрический класс	I тип	I. 14	II. 5	II. 3	I. 12	?	I. 12
Скорость расширения оболочки, км/с	-	-8 000	-7 000	-8 000	-10 000	?	-10 000
Остаток сверхновой	Есть	Есть	Телец А "Краб"	3C 58	Кассиопея В	Кассиопея А	Есть
Расстояние до остатка, кпс	2-3	4	2	8	5	3	10

Нам остается рассказать еще о яркой вспышке 1181 г., которую наблюдали, главным образом в Японии (Ф. Стефенсон насчитал шесть хроник, где она упоминалась), а так же в Китае и Европе. Она была видна полгода, одно время имела "сине-желтый" цвет и по блеску равнялась Сатурну. Вспышка произошла в созвездии Кассиопеи. Ослабление сверхновой на 4 величины за полгода характерно для II типа. На месте вспышки, установленном надежно, имеется открытый еще в 1952 г. радиоисточник нетеплового характера с яркой сердцевиной - "двойник" радиоисточника Телец А. Недавно здесь в сильно запыленном участке Млечного Пути удалось найти и волокнистую туманность, напоминающую Крабовидную. Это подтверждает принадлежность вспышки к сверхновым II типа.

### Как часты вспышки сверхновых в Галактике?

К настоящему времени мы располагаем сравнительно небольшим списком наблюдавшихся сверхновых (табл. 13); в то же время найдено 135 радиоисточников, являющихся остатками сверхновых. Большинство остатков имеет большой возраст, находятся в Млечном Пути в областях сильного межзвездного поглощения. Поэтому их вспышки вообще вряд ли могли быть видны. Но среди остатков найдены и такие, вспышки которых произошли в середине прошлого века, но не наблюдались по указанным выше причинам.

Поскольку мы сами находимся в Галактике, а вспышки сверхновых не только грандиозное зрелище, но и, как мы увидим позже, влиятельный фактор в жизни нашей Солнечной системы, вопрос о том, как часты вспышки сверхновых в Галактике, далеко не академический, но и жизненно важный.

По табл. 11 в главе VII мы получили интервал между вспышками сверхновых в нашей Галактике 110 лет с неуверенностью в 60 %, т. е. возможны средние интервалы от 44 до 176 лет. Эти расчеты сделаны по наблюдениям вспышек сверхновых в других спиральных галактиках и основаны на предположении, что наша звездная система относится к типу Sb. Если же она типа Sc, то интервалы между вспышками должны быть уменьшены в 10 раз. Естественно, такие неопределенные выводы нужно проконтролировать непосредственным изучением частоты вспышек сверхновых в нашей Галактике.

**Рис. 26.** Расположение семи галактических сверхновых в проекции на главную плоскость Галактики.

Сверхновые отмечены датами вспышек. С - центр Галактики, - Солнце, расстояние между ними 10 кпс. HI - граница распространения нейтрального водорода в Галактике, HII-граница распространения ионизованного водорода (т. е. ярких газовых туманностей).

Недавно Г. Тамманн попытался вычислить средний интервал между вспышками по пяти сверхновым нашего тысячелетия: 1006, 1054, 1572 и 1604 г. и Кассиопеи А. Сверхновая 1181 г. была им отброшена. Эти пять сверхновых расположены в секторе, имеющем центральный угол  $50^\circ$  с вершиной в ядре Галактики (т. е. сектор составляет седьмую часть Галактики, см. рис. 26). Если мы разделим 1000 лет на пять, то получим интервал в 200 лет между вспышками в секторе или, разделив еще на 7, получим интервал в 28 лет между вспышками сверхновых для всей Галактики. Но внутри сектора имеются значительные области, где сильное поглощение света могло скрыть от нас вспышки. Кроме того, данные о средневековых наблюдениях сохранились только для северного полушария планеты, и поэтому могли остаться незамеченными вспышки в созвездиях около южного полюса неба. Не будем входить в детали соответствующих исправлений, а укажем лишь, что Тамманн получил в конце концов средний интервал в 12 лет или 8 сверхновых в столетие с возможным отклонением на 5 вспышек в ту или иную сторону.

Но можно было бы пойти по менее сложному пути. Возьмем вместо сектора с его большими неопределенностями окрестность вокруг Солнца в радиусе 8 кпс. Тогда, поскольку она хорошо изучена оптическими, рентгеновскими и радиоастрономическими методами, мы можем быть уверенными, что в ней было только шесть, молодых остатков, приведенных в табл. 13 минимум за последние 1800 лет, начиная со вспышки 185 г., а на самом деле и за еще более длительный срок. Вне окрестности оказалась сверхновая Кеплера 1604 г., вспыхнувшая где-то над центром Галактики.

Отметим, что две из шести сверхновых относятся ко II типу, а остальные - к типу I. Попробуем установить, где же вообще могут вспыхивать в Галактике сверхновые этих типов. Сверхновые I типа, судя по вспышкам в других звездных системах, встречаются на любых расстояниях от центра, а говоря более определенно - в области распространения неионизованного водорода, являющегося, в сущности, в значительной части продуктом деятельности сверхновых звезд. Что касается сверхновых II типа, то они связаны с молодыми звездами, область распространения которых в галактиках четко очерчивается светящимися газовыми туманностями - облаками ионизованного водорода.

Радиус распространения неионизованного водорода в Галактике 21 кпс, ионизованного - 16 кпс. Нетрудно поэтому вычислить долю, какую составляет наша окрестность радиусом 8 кпс, по отношению к соответствующей области распространения ионизационных стадий водорода в Галактике: 0.15 для неионизованного и 0.25 для ионизованного. В сущности, это единственные множители, которые нам нужны для вычисления средних интервалов между вспышками сверхновых обеих типов. Взяв минимальный интервал 1800 лет, мы получаем для I типа  $1800:4 \cdot 0.15 = 67$  лет, а для II типа  $1800:2 \cdot 0.25 = 225$  лет, или, не различая типов, около двух сверхновых в столетие. Эти числа можно считать верными с погрешностью до 50%, но,

поскольку исследования радиоизлучения остатков сверхновых в зоне радиусом 8 кпс вокруг Солнца не обнаружили других объектов моложе 2500 лет, средние интервалы между вспышками, полученные выше, можно увеличить в 1.4 раза, а число вспышек за сто лет во столько же уменьшить.

Интересно отметить, что вспышки, наблюдавшиеся оптически, в течение двух Тысячелетий следовали друг за другом не с приблизительной равномерностью, "сериями": одна была во втором веке, затем был 8-вековой перерыв и в XI - XII веке произошли три вспышки, после чего снова была четырехвековая пауза, закончившаяся тремя вспышками, следовавшими в течение 32 лет на рубеже XVI - XVII веков. С тех пор длится новая четырехвековая пауза. "Серии" и "паузы" не заключают в себе особого физического смысла. Это чистые случайности в очередности малого числа событий. Так или иначе, но в течение последних четырех веков вспышки сверхновых происходили вне окрестности радиусом 8 кпс вокруг Солнца. Галактика "задолжала" нашей зоне по меньшей мере две сверхновых.

Положение Солнечной системы в Галактике таково, что нам оптически доступны наблюдения вспышек сверхновых примерно в половине ее объема, а в остальной части Галактики яркость вспышек приглушена межзвездным поглощением и удаленностью настолько, что даже в наше время они могут быть упущены и обнаружены после вспышки уже как радиоизлучающие остатки.

## **Глава X. РЕЛИКТЫ ОБОЛОЧЕК СВЕРХНОВЫХ**

### **Крабовидная туманность и другие**

Мы уже говорили, что история исследования сверхновых в нашей Галактике тесно связана с изучением вспышки 1054 г. и ее остатка - Крабовидной туманности. Это первая туманность, у которой было обнаружено расширение, начавшееся во время вспышки сверхновой. Она оказалась также первым сильным источником радиоизлучения, совпавшим с газовым остатком в нашей Галактике. Но этим не исчерпываются открытия, прославившие Крабовидную туманность. Она оказалась еще и первым объектом за пределами Солнечной системы, в котором обнаружено сильное рентгеновское излучение. В центре туманности одна из сравнительно слабых звездочек оказалась уникальным по свойствам объектом - звездным остатком сверхновой.

В этой главе мы познакомимся подробнее с газовыми остатками сверхновых, образовавшимися в результате выброса расширяющихся оболочек, а со звездными реликтами сверхновых встретимся в следующей главе.

Итак, почти каждый шаг в изучении остатков сверхновых начинается с Крабовидной туманности. Это, очевидно, связано с тем, что она самый близкий из молодых объектов такого рода. Как правило, если мы хотим привести яркий пример остатка сверхновой, то обычно вспоминаем Крабовидную туманность. Однако изучение остальных молодых и старых остатков

показало, что в случае Крабовидной туманности мы имеем скорее не типичный, а уникальный по целому ряду свойств объект, непохожий по существенным чертам на остальные.

Вообще остатки оболочек сверхновых очень разнообразны по виду на фотографиях, но более или менее сходны по свойствам радиоизлучения. Современные радиотелескопы позволяют получать подробные так называемые радиоизображения остатков сверхновых. Сочетание фотоснимка с таким радиоизображением наиболее правильно и наглядно характеризует вид остатка сверхновой.

Крабовидная туманность на снимках получается неоднородным газовым сгустком, в котором проступает сеть тонковолокнистых красных прожилок, создающих рисунок, напоминающий краба (рис. 27). Это волокнистое строение туманности особенно четко получается на снимках, полученных с красными фильтрами. Аморфная же масса туманности, видная между прожилками, имеет непрерывный спектр и создает 80% излучения туманности. Ее яркость возрастает к центру туманности. Таким же возрастанием к центру характеризуется и яркость радиоизлучения этого объекта (рис. 28). А в центре туманности, как уже упоминалось, обнаружен звездный остаток сверхновой.

**Рис. 27.** Фотография Крабовидной туманности. Снимок сделан на фотографической эмульсии, хорошо чувствительной к красным лучам. Видны многочисленные прожилки газовых волокон и слабый аморфный фон туманности. Стрелкой отмечена звезда, оказавшаяся пульсаром.

Кривая блеска сверхновой 1054 г. свидетельствует, что ее остаток (Крабовидная туманность) является остатком сверхновой II типа. В наших окрестностях Галактики обнаружен еще десяток таких радиоисточников с концентрацией яркости к центру. Они названы "плерионами". Число их, возможно, еще больше, если плерионами окажутся некоторые компактные галактические радиоисточники.

Типичными остатками сверхновых I типа являются оболочечные радиоисточники. Ряд таких остатков сверхновых найден в соседней неправильной галактике - Большом Магеллановом Облаке. Как мы знаем, в неправильных галактиках наблюдались вспышки только сверхновых I типа. Это лишний раз свидетельствует, что оболочечные радиоисточники - остатки сверхновых I типа.

**Рис. 28.** Фотография Крабовидной туманности с наложенными на нее линиями равной яркости радиоизображения на длине волны 11 см.

Оболочечным остатком сверхновой является и знакомый нам объект Кассиопея А. Хотя возраст этого остатка почти такой же, как Сверхновых Браге и Кеплера, он значительно превосходит их мощностью радиоизлучения и скоростью расширения оболочки. На снимках, полученных с красным фильтром на 5-метровом телескопе, заметно, что оптические детали этого остатка не образуют сплошной аморфной туманности, а состоят из мелких сгустков и волокон. Эти детали являются уникальной особенностью Кассиопеи А. Как видно из рис. 29, остаток сверхновой в радиоизлучении представляет собой горячую расширяющуюся оболочку, наиболее яркими частями которой являются толстые стенки, видимые сбоку. На фотографии же эта яркая в

радиоизлучении оболочка совсем не видна. Масса Кассиопеи А равна примерно массе Солнца, тогда как у обычных остатков сверхновых оболочки составляют десятые доли массы Солнца.

**Рис. 29.** Фотография Кассиопеи А (негатив).

Видны сгустки и волокна. На снимок наложены линии равной яркости радиоизображения источника на волне 11 см.

Является ли Кассиопея А остатком сверхновой I типа? По-видимому, да. Но такие массивные оболочки сверхновых не могут образовываться в эллиптических звездных системах, где все звезды старые и маломассивные. В случае Кассиопеи А мы встречаемся со взрывом звезды, масса которой составляет несколько масс Солнца. И все же это может быть сверхновая I типа. Дело в том, что в эллиптических галактиках вспыхивают сверхновые I типа только старших фотометрических классов (от 9-го и более).

**Рис. 30.** Волокнистая туманность в Лебеде. Ее угловые размеры около 3 градусов.

А сверхновые I типа младших классов (6 - 8) встречаются только в спиральных звездных системах. Они могут соответствовать взрывам массивных звезд.

Типичным старым остатком сверхновой считается система волокнистых туманностей в созвездии Лебеда, тоже показывающая характерное для подобных объектов радиоизлучение, расширение и оболочечную структуру (рис. 30). Известно еще несколько объектов, имеющих волокнистую структуру на снимках и оболочечную в радиоизлучении (табл. 14). Всего к 1985 г. оптические детали найдены у 40 из 135 остатков сверхновых нашей Галактики. Но большинство старых остатков не имеет следов туманностей, и их удастся опознать только по типичному для остатков сверхновых нетепловому радиоизлучению и оболочечной структуре радиоисточника. Остатки сверхновых найдены в соседних галактиках - в обоих Магеллановых Облаках и в туманности Андромеды.

**Таблица 14. Некоторые известные остатки галактических сверхновых**

Название остатка сверхновой	Вид, структура остатка		Расстояние, кпс	Диаметр, пс	Возраст к 1980 г., лет	Рентгеновское излучение в интервале 1-10 кэВ		Оценка средней скорости расширения, км/с
	на снимке	по радионаблюдениям				светимость, $10^{35}$ эрг/с	температура, млн. кельвинов	
Кассиопея А	См. рис. 29	Оболочечная	3	3.5	327	30	13 и 60	5500
Сверхновая Кеплера	Несколько волокон	Оболочечная	10	6.6	376	14	6	8600
Сверхновая Браге	Несколько волокон	Оболочечная	5	10.7	408	70	6 и 40	5000
Сверхновая 1181 г.	Одно волокно	Сердцевидное	8	12	799	5	-	7300
Крабовидная	См. рис. 27	-	2	3	926	30	6	1200

туманность								
Сверхновая 1006 г.	Несколько волокон	Оболочечная	4	40	974	0.1	2 и 20	1800
Сверхновая 185 г.	Несколько волокон	Оболочечная	2.5	28	1795	17	6	600
Возничий IC 443	Волокнистая туманность	Оболочечная	1.5	20	3000	0,5	10	700
Корма А	Волокнистая туманность	Оболочечная	2	20	6000	10	4 и 13	800
Паруса Х	Волокнистая туманность	Оболочечная	0.5	30	8000	8	2 и 4	500
Лебедь	См. рис. 30	Оболочечная	0.8	30	10000	0.2	2-3	390
Кассиопея НВ 21	Волокнистая туманность	Оболочечная	1	35	70000	0.1	0.7	<200

Мы уже говорили о расширении остатков сверхновых. Оно измерено непосредственно только у нескольких объектов. Например, только у трех упомянутых выше типичных остатков - Крабовидной туманности, Кассиопеи А и волокнистой туманности в Лебеде - пока удалось измерить расширение объектов не только по лучевым скоростям волокон, но и по систематическому перемещению этих деталей во все стороны на фотографиях, полученных в разные годы. Как можно видеть из данных табл. 14, весьма высокую скорость расширения имеет Кассиопея А. Крабовидная туманность, несмотря на свою относительную молодость, имеет умеренную скорость расширения, а у старых остатков она вообще невелика. Нужно отметить, что в Кассиопее А есть сгустки, не участвующие в быстром расширении.

Знакомясь с новыми звездами, мы отмечали, что по измерениям видимого расширения и лучевой скорости разлета материала оболочки можно надежно находить расстояние до объекта. Этим путем найдены расстояния и для трех наиболее исследованных остатков сверхновых. В случае Кассиопеи А и волокнистой туманности в Лебеде оболочка по форме близка к сферической. Не так получается в случае Крабовидной туманности, которая на снимках и в радиоизлучении имеет эллиптическую форму.

По направлениям перемещений волокон на снимках, полученных в разные эпохи, можно найти точку разлета, т. е. место, где находилась звезда в момент взрыва. Если расстояние, пройденное волокнами от точки разлета, разделить на их скорости, то получим время, прошедшее с начала разлета, при условии, что расширение оболочки шло равномерно. Но в случае Крабовидной туманности обнаружилось неожиданное расхождение: по скорости разлета волокон начало разлета относится к 1140 г. вместо 1054 г.! Это свидетельствует о том, что туманность расширяется с ускорением. Величина его очень невелика: всего 0.01-0.02 см/с<sup>2</sup>. Причину возникновения ускорения в свое время указал С.Б. Пикельнер: это воздействие на вещество туманности ее магнитного поля и космических лучей. С открытием звездного остатка в туманности стал понятным источник этого магнитного поля и космических лучей.

А ускоряются ли волокна в Кассиопее А? Анализ расширения системы ее волокон свидетельствует о том, что разлет начался в 1653 г. с точностью около трех лет. В эту эпоху европейские астрономы уже обладали телескопами, но никакой вспышки в не заходящем для наших широт созвездии Кассиопеи не видели. Обычно это объясняют сильным межзвездным поглощением в направлении этой сверхновой. Приводился, например, такой довод: в спектрах газовой детали Кассиопеи А, состоящей только из ярких линий без непрерывного спектра, нет ярких ультрафиолетовых запрещенных линий ионизованного кислорода, или они очень слабы, потому что межзвездное поглощение в первую очередь "съедает" излучение ультрафиолетовой области спектра.

В то же время, как мы уже говорили, стали известны корейские астрономические записи XVI в., в которых говорится, что в 1592 г. произошла вспышка в той части созвездия Кассиопеи, где теперь находится остаток. П. Броше полагает, что это и была вспышка Кассиопеи А. Между тем даты начала разлета и вспышки отличаются на 60 лет, поэтому ускорение разлета волокон должно быть выше, чем у Крабовидной туманности, но оно не обнаружено. Большинство астрономов сомневается, что корейцы видели вспышку именно Кассиопеи А.

### **Физические условия в остатках сверхновых**

Кое-какую информацию об условиях в сверхновых дает изучение внешнего вида остатка, обнаружение его расширения и структуры радиоизлучающей области в нем. Но главные сведения о них приносит анализ излучения. С этой целью исследуются спектры газовых сгустков, радиоизлучение остатков по мощности и по характеру спектра, а также рентгеновское излучение. И в конце концов они все вместе обрисовывают нам какую-то картину физических условий в типичном остатке сверхновой.

Спектры волокон и сгустков, встречающихся в остатках сверхновых, состоят из ярких линий водорода и ряда запрещенных линий, типичных для горячих газовых туманностей и оболочек новых звезд. Но если в центре обычной газовой туманности находится заметная очень горячая звезда, а в случае новой звезды, вероятнее всего, - тесная двойная звезда, то в центре остатка сверхновой долгое время не находили звезды, которая была бы способна поддерживать свечение этой туманности, и только недавно стало известно, что в центрах двух остатков сверхновых находятся объекты необычной природы - ультракарликовые нейтронные звезды, поддерживающие температуру и необычный по характеру режим излучения в остатках сверхновых.

В тех случаях, когда в оболочке остатка имеются клочки светящегося газа, можно получить и изучить спектры этих слабых деталей. Для этой цели стали применять электронно-оптические преобразователи и интерферометры Фабри - Перо. Этим путем московский астрофизик Т.А. Лозинская получила многочисленные спектры деталей в 14 объектах, удвоив число до сих пор спектрально исследованных остатков сверхновых. Когда же остаток оптически не наблюдается, можно лишь заключить, судя по радиоизлучению, что оболочка остатка наполнена горячим ионизованным газом, или, как его называют, плазмой.

По аналогии с газовыми туманностями, по яркости линий в спектрах сгустков можно выяснить конкретные условия, в каких эти линии возникали. Так же как в спектрах новых звезд, здесь встречаются два рода линий. Одни чувствительны к изменению электронной температуры в газовом волокне и служат поэтому для определения температуры, а другие чувствительны к изменению электронной концентрации и дают возможность ее оценить (в разных волокнах одного и того же остатка она может составлять от 3 000 до 300 электронов на 1 см<sup>3</sup>).

Однако с установлением электронной температуры волокон дело не так просто. Одни линии в их спектрах указывают температуру около 50 000 К, а другие - только 15000 К. Оказалось, что в волокне почти рядом сосуществуют два температурных слоя: разреженный горячий и плотный холодный, а между ними резкий переход. Почему это так, было объяснено С.Б. Пикельнером. По газовой оболочке сверхновой из места взрыва движутся волны сжатия. Там более знакома их разновидность-звуковые волны, но волны сжатия в сверхновой отличаются тем, что их скорость выше возможной в этой газовой среде для звуковых волн. Такие волны, движущиеся со скоростями, превышающими скорость звука, называют ударными.

В области, через которую прошла ударная волна, повышается температура газа (энергия движения волны сжимает газ и превращается в тепловую). Высокая тепловая энергия ударной волны в месте ее прохождения вызывает свечение газа. Сначала газ нагревается до высокой температуры, а потом постепенно остывает и сжимается. Поэтому основное излучение идет из слоя с температурой 15 000 - 30 000 К. А ионизация элементов, дающая запрещенные линии, происходит в тонком слое-горячего газа за фронтом (границей) ударной волны.

Предметом особых забот астрофизиков является выяснение химического состава газа в остатках сверхновых. В волокнах Крабовидной туманности Л. Волтье (Нидерланды) обнаружил двух-трехкратный избыток гелия по сравнению с его содержанием в обычном межзвездном газе, а ван ден Берг вместе с мексиканским астрономом М. Пеймбертом нашли в Кассиопее А, в ее медленно движущихся газовых сгустках, избыток азота, а в быстро движущихся волокнах - семикратный избыток кислорода и аргона.

Если бы газ в сгустках и волокнах остатков сверхновых был бы просто межзвездным газом, который обжат продуктами взрыва сверхновой, то его химический состав не был бы таким странным. Зато если этот газ был бы выброшен из сверхновой и являлся частью продуктов ее взрыва, то избыток некоторых химических элементов в таком газе вполне понятен с точки зрения звездной эволюции, завершённой звездой перед взрывом. Следует все же заметить, что изучение химического состава вещества волокон и сгустков началось совсем недавно и предстоит еще во многом разобраться, прежде чем сделать окончательные выводы.

Самой характерной особенностью остатков сверхновых является, пожалуй, их радиоизлучение. Как мы уже знаем, новые звезды испускают слабое радиоизлучение, связанное с высокой температурой их оболочек при вспышках. Остатки же сверхновых принадлежат к числу сильнейших радиоисточников нашей Галактики, если не считать, конечно, самого ядра

Галактики. Принципиальной особенностью радиоизлучения остатков является то, что оно не имеет теплового характера, т. е. его интенсивность систематически возрастает с длиной волны. Объяснение нетепловому радиоизлучению остатков сверхновых было дано И.С. Шкловским. В остатке, указывал он, должно быть сильное магнитное поле запутанного характера, удерживающее выработанные, сверхновой космические лучи. По традиции космическими лучами принято называть не электромагнитное излучение, а электроны, позитроны и атомные ядра и их осколки, имеющие скорости движения, близкие к световой, и, следовательно, огромные кинетические энергии. Такие частицы еще называются релятивистскими. Как мы уже говорили в главе II, эти релятивистские частицы движутся по спирали, обвивающей силовые линии магнитного поля, и излучают электромагнитную энергию узким пучком лучей по направлению своего движения. Излучение такого характера мы назвали синхротронным. Хотя большую часть космических лучей высокой энергии составляют атомные ядра, их синхротронное излучение незначительно, главная роль в синхротронном излучении принадлежит позитронам и электронам. Чем больше энергия частиц, тем короче длина волны излучения и меньше их число, поэтому в спектре синхротронного излучения интенсивнее область, где излучают релятивистские электроны с умеренными и малыми энергиями, т. е. в длинноволновой части спектра. Этим объясняется возрастание с длиной волны интенсивности в спектре синхротронного излучения.

И.С. Шкловский пришел к выводу, что непрерывный оптический спектр, наблюдаемый у Крабовидной туманности, создается более энергичными релятивистскими электронами, т. е. имеет тоже магнитно тормозную природу. Если это так, то излучение Крабовидной туманности было бы поляризованным, т. е. в известной степени "причесанным" - упорядоченным по направлению колебаний световых волн. На эту возможность указывал харьковский астрофизик - И.М. Гордон в 1954 г, В том же году поляризация света Крабовидной туманности была обнаружена В.А. Домбровским и М.А. Вашакидзе. Но радиоизлучение Крабовидной туманности оказалось поляризованным только в области, близкой к ее центру. И.С. Шкловский предполагает, что это связано с сильной запутанностью магнитного поля во внешних частях туманности. Открытие поляризации излучения Крабовидной туманности полностью подтвердило синхротронный характер ее непрерывного оптического и радиоволнового излучений.

В самом центре Крабовидной туманности, как мы увидим далее, обнаружены еще два удивительных источника радиоизлучения. Один из них - пульсар, а другой - радиоисточник размерами 0.001 пс. Имеются предположения, что этот компактный радиоисточник - рассеянное излучение пульсара в ближайших к нему окрестностях туманности.

Мы познакомились с видимым и радиоволновым излучениями. Кроме них в остатках сверхновых обнаружено чрезвычайно коротковолновое излучение, называемое рентгеновским и гамма-излучением. Собственно рентгеновским излучением является излучение с длинами волн от 900 до 0.12 , а более короткое. - гамма-излучением. Но чаще для описания этих излучений

используют энергетические единицы - килоэлектронвольты (кэВ), мегаэлектронвольты (1 МэВ = 1000 кэВ) и т. д. Между длинами волн излучения и энергиями фотонов  $E$  имеется простое соотношение: . Таким образом, рентгеновская область заключена между 0.01 кэВ и 100 кэВ, а излучение с фотонами более высокой энергии относится к гамма-области.

Рентгеновское и гамма-излучения могут быть, как и оптические, тепловыми (что соответствует температурам плазмы в миллионы Кельвинов) и нетепловыми (например синхротронными).

Впервые рентгеновское излучение остатков сверхновых было открыто с помощью ракетных экспериментов в 1963 г., когда в направлении Крабовидной туманности был обнаружен интенсивный источник такого излучения. С тех пор исследования, проводимые с ракет и аэростатов, позволили детально изучить его спектр от 0.15 кэВ до 1 миллиона МэВ (далее интенсивность источника уже ниже предела чувствительности аппаратуры). В излучении, идущем из внутренней зоны туманности, преобладает нетепловое синхротронное излучение, а на периферии туманности обнаружены следы мягкого (т. е. с энергиями ниже 2 кэВ) рентгеновского излучения теплового характера.

Мягкое тепловое рентгеновское излучение найдено и у Кассиопеи А и у остатка Сверхновой Тихо Браге. Оно соответствует температурам в несколько десятков миллионов кельвинов и порождается плазмой в их оболочках. В 1970 г. было обнаружено мягкое рентгеновское излучение близкого к нам старого остатка - волокнистой туманности в Лебеде, а позже и ряда других подобных ему остатков. Здесь температуры плазмы в оболочках от 2 до 10 млн. Кельвинов. К 1985 г. рентгеновское излучение зарегистрировано от 33 остатков сверхновых в нашей Галактике.

В 1964 г. И.С. Шкловский пришел к заключению, что в остатках сверхновых на поздних стадиях могут существовать условия для излучения линий, расположенных в рентгеновской области спектра. При температуре в 4 млн. кельвинов очень заметное излучение будет давать линия "водородоподобного" иона кислорода (т. е. имеющего возле ядра только один электрон). Ее длина волны 19 . Исследования рентгеновского излучения волокнистых туманностей в Лебеде и в Корме, проведенные недавно, блестяще подтвердили это предсказание.

Измерение интенсивности мягкого рентгеновского излучения в нескольких участках его спектра позволяет определить температуру плазмы позади фронта ударной волны в остатке сверхновой. Это открыло важные дополнительные возможности исследования физических условий в остатках. Температура плазмы пропорциональна квадрату скорости ударной волны, откуда можно вычислить и скорость расширения остатка. Следовательно, ее мы можем найти уже двумя путями: по лучевым скоростям его оптически наблюдаемых деталей и по температуре его плазмы

Серьезным испытанием достоверности оценок температуры плазмы, сделанным по рентгеновскому излучению остатка, явилось сравнение обеих оценок скорости расширения оболочки волокнистой туманности в Лебеде. (Сначала обнаружилось явное расхождение: по температуре плазмы скорость должна быть порядка 300 км/с, а по спектральным измерениям волокна имели скорость не более 120 км/с. Правда, когда в 1970 г. В.Т. Дорошенко

исследовала скорости газа этой туманности с помощью интерференционной спектроскопии, следы высоких скоростей обнаруживались, но только в 1976 г. Р. Киршнер и К. Тейлор в США и Т.А. Лозинская и В.Т. Дорошенко в СССР твердо установили спектрально наличие в этой туманности газа, движущегося со скоростями, требуемыми высокой температурой плазмы. Теперь ни высокие температуры, ни определяемые по ним высокие скорости расширения оболочек сомнений не вызывают.

Естественно, чем старше остаток, тем слабее его рентгеновское излучение и ниже температура плазмы. Среди близких к нам остатков сверхновых имеется несколько таких "великовозрастных", например, большая волокнистая туманность Симеиз 147 в Тельце, обладающая нетепловым радиоизлучением. У них настолько низок уровень рентгеновского излучения, что его обнаружить не удастся.

### **Эволюция остатка оболочки сверхновой**

В ранний период расширения оболочки разлет ее вещества вскоре становится равномерным, как говорят, инерционным. Хотя некоторое количество энергии на протяжении дальнейшей эволюции оболочки и поступает в нее непрерывно из пульсара, а известная доля энергии расходуется ею на излучение, эти потери и поступления невелики по сравнению с энергией, сообщенной оболочке при взрыве. Другими словами, несколько десятков тысяч лет оболочка сверхновой движется по законам расширения материала при сильном взрыве.

В физике процесс расширения или сжатия газа, в котором используется аккумулированная им энергия без существенных пополнений или потерь, называется адиабатическим. Закономерности адиабатического процесса газа особенно просты, и это облегчило изучение эволюции оболочек сверхновых.

Но по мере расширения остатка оболочки сверхновой начинает сказываться влияние разреженного межзвездного газа. Масса оболочки увлекает встречающийся межзвездный газ, делясь с ним своей кинетической энергией, другими словами, сообщая ему скорость, и в конечном счете тормозится сама. Расширение оболочки идет с высокой скоростью, превышающей скорость звука, следовательно, ее сопровождает ударная волна. За ударной волной, как мы знаем, остается область высоконагретой плазмы, которая сравнительно медленно остывает за счет излучения в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра.

Когда температура плазмы в оболочке сверхновой снижается до нескольких миллионов Кельвинов, начинает сказываться химическая однородность плазмы. Из наиболее распространенных химических элементов - водорода, гелия и кислорода - первым в плазме начинает обзаводиться одним электроном ион кислорода. В излучении атом кислорода с единственным электроном ведет себя во многом аналогично водороду. В частности, как мы уже знаем, на волне 19 он испускает интенсивную линию, аналогичную первой лаймановской линии водорода. С момента, когда появляются водородоподобные ионы кислорода и других элементов, начинается большая утечка энергии оболочки на излучение в линии 19 и ей подобных. Это знаменует конец адиабатической стадии эволюции оболочки.

Подробные расчеты структуры расширяющейся оболочки сверхновой в адиабатической стадии показали, что она имеет толщину примерно в одну десятую радиуса оболочки, а внутренняя полость заполнена очень горячей разреженной плазмой, оптически незаметной, но активной в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра.

А как эволюционирует радиоизлучение оболочки сверхновой? Мы уже знаем, что оболочка сверхновой имеет запутанное магнитное поле, которое удерживает образовавшиеся в сверхновой космические лучи. Последние, представляя собой релятивистские заряженные частицы, испускают в магнитном поле известное нам синхротронное излучение. По теории радиоизлучения остатков сверхновых, разработанной И.С. Шкловским, все релятивистские частицы в остатке уменьшают со временем в одинаковом отношении энергию. В таком случае, предположив, что полное число релятивистских частиц и полное число магнитных силовых линий оболочки сохраняется постоянным, можно найти закон изменения интенсивности радиоизлучения в зависимости от радиуса расширяющейся оболочки или от ее возраста, если ее расширение еще не заторможено межзвездной средой. Эта закономерность полностью подтвердилась наблюдениями радиоизлучения остатков сверхновых.

Важным подтверждением теории Шкловского было обнаружение предсказанного ею систематического ослабления потока радиоизлучения от молодых остатков сверхновых. Для Кассиопеи А теория предсказывала ослабление радиоизлучения на 1.7% в год, а наблюдения дали оценки от 0.85% до 2.24% в прекрасном согласии с предсказанием. Для Крабовидной туманности потери излучения предполагались всего в 0.3% в год, а предварительные наблюдения дают 0.47% с возможной погрешностью около 0.38%.

И.С. Шкловский на основании своей теории дал формулы для оценок расстояний до старых остатков сверхновых по видимым угловым размерам и яркости их радиоизлучения. Благодаря этому почти для любого остатка сверхновой можно находить расстояние.

Оценка возраста старых остатков сверхновых пока остается труднейшей проблемой. Положение существенно изменяется лишь теперь, когда стало возможным определять температуру плазмы в остатках по их рентгеновскому излучению, а по температуре находить скорость расширения остатка. Для волокнистой туманности в Лебеде получился возраст около 10 тыс. лет. Однако остатки старше этой туманности уже не имеют заметного рентгеновского излучения и их возраст пытаются оценивать по яркости их радиоизлучения, пользуясь выводами теории Шкловского.

Другой путь определения возраста, средних скоростей и диаметров остатков следует из установленного Т.А. Лозинской важного факта, что остатки сверхновых можно рассматривать как эволюционную последовательность однородных объектов, продолжающих адиабатически расширяться в межзвездной среде разной плотности.

Итак, остаток сверхновой расходует доставшуюся ему энергию взрыва на расширение и торможение в межзвездной среде, на свечение и радиоизлучение. Но без пополнения энергии от мощного источника здесь все же не обойтись. Расход энергии у молодых остатков

сверхновых оказывается так велик, что для ее пополнения нужна постоянная инъекция - приток энергии.

В обычных горячих газовых туманностях источником энергии является центральная звезда, снабжающая туманность ультрафиолетовыми квантами. Такой горячей звезды в молодых остатках сверхновых нет. Но в центре ближайшего молодого остатка сверхновой - Крабовидной туманности - находится слабая звездочка 16-й величины. Если она является обыкновенной звездой, скажем звездой главной последовательности, то ее энергии мало для поддержания свечения туманности. Кроме того, откуда в туманности появляются релятивистские электроны, мощное рентгеновское излучение в центре? Все это свидетельствует о том, что центральная звездочка в туманности не является обычной, а имеет совершенно удивительные свойства. Она должна быть, судя по ее слабому блеску, карликовой, но очень богатой энергией.

Но существуют ли в природе такие объекты? Ведь свойства, которые астрономы приписывали центральной звезде Крабовидной туманности, - всего лишь предсказание, требующее доказательств на независимых объектах, а в других молодых остатках сверхновых никаких подозрительных центральных звезд не обнаружено. И все же доказательства были получены. Об этом - в следующей главе.

## **Глава XI. ПУЛЬСАРЫ - ЕЩЕ ОДИН ВИД РЕЛИКТОВ СВЕРХНОВЫХ**

### **Пульсирующие радиоисточники**

В наше время астрофизика приносит сенсационных открытий больше, чем какая-либо другая наука, изучающая природу. Так, радиоастрономия только в шестидесятых годах обнаружила квазары, космические "мазеры", реликтовое тепловое излучение Метагалактики, пульсары. Родившаяся в том же десятилетии рентгеновская астрономия открыла в семидесятых годах сильные галактические источники рентгеновского излучения и среди них рентгеновские пульсары.

История открытия пульсаров весьма увлекательна. Дело в том, что к моменту их обнаружения радиоастрономия уже более десяти лет располагала мощными радиотелескопами, способными наблюдать радиоисточники с быстрыми колебаниями интенсивности (секунды и доли секунд), но радиоастрономам не верилось в реальность существования быстро пульсирующих радиоисточников. Ведь чтобы радиоисточник производил такие быстрые колебания радиоизлучения, он должен иметь очень малые размеры, такие, например, как наша планета. Но радиоизлучающих космических объектов такого размера астрономия не знала.

Конечно, радиоизлучение от далеких и поэтому малых по видимым угловым размерам радиоисточников (квазаров) испытывало небольшие беспорядочные колебания продолжительностью в секунды и их доли. Это явление обнаружено еще в 1964 г. и названо мерцанием радиоисточников. Причина мерцаний была установлена: прохождение радиоволн от удаленного радиоисточника через облака межзвездного газа (плазму). Изучение этих мерцаний представляло некоторый интерес для радиоастрономии: по их характеру можно было вычислять угловые размеры квазаров.

С точки зрения радиоастрономии это была одна из многих наблюдательных задач, имевших целью сбор сведений о квазарах, представлявших собой объекты неясной природы. Поэтому для исследования мерцаний на межзвездной плазме в Кембридже (Англия) на Маллардской радиообсерватории был достроен в 1967 г. радиотелескоп, который не выделялся среди существующих размерами антенны, но имел очень высокую чувствительность на своей волне приема (3.7 м) и приспособление для быстрой записи принимаемого радиосигнала.

Маллардская установка под руководством профессора А. Хьюиша стала получать интересные данные о мерцаниях удаленных радиоисточников, и среди них в августе того же года был обнаружен один довольно странный слабый радиосигнал. Сотрудница обсерватории мисс С. Белл, изучавшая эти записи, первоначально сочла его случайной помехой. Но тот же странный сигнал настойчиво продолжал появляться в записях и в конце концов заинтересовал радиоастрономов. Длительность радиосигнала (или его "пульс") оказалась всего треть секунды, но через период точно в 1.33 секунды или же через несколько таких периодов (иногда "корреспондент" молчал по несколько минут) снова появлялся слабый радиосигнал. Интенсивность сигнала от случая к случаю колебалась, но настораживало строгое соблюдение длины периода (рис. 31).

Не сигналы ли это разумных существ с других планетных систем? Однако записи радиосигналов не показали никакого разумного кода и следов какой-либо искусственной информации. Но не исключено, что это просто случайные сигналы с населенной разумными существами планеты. Вспомним, например, подсчеты И.С. Шкловского в его книге "Вселенная, жизнь, разум": наша Земля излучает во Вселенную довольно значительный поток радиоизлучения вследствие непрерывной работы многочисленных радиостанций, телепередатчиков, естественных и искусственных электрических разрядов в атмосфере и на поверхности планеты. Может быть и там, откуда идет пульсирующее радиоизлучение, происходит подобное?

Но если сигналы идут с какой-нибудь планеты, обращающейся по орбите вокруг центральной звезды, на периоде радиопульсаций должна сказываться скорость движения планеты по орбите, как сказывается и скорость движения Земли. Период пульсаций первого радиоисточника был измерен с точностью до десятиmillionной доли секунды, но никакой "собственной" орбитальной скорости радиоисточника обнаружено не было. Нет, это не было радиоизлучением планеты, подобной Земле.

**Рис. 31.** Несколько последовательных записей импульсов радиоизлучения пульсара CP 0808 ("кривые блеска"), полученных на радиоастрономической станции Физического института Академии наук СССР в Пущине. Каждый всплеск радиоизлучения своеобразен, некоторые всплески сильны, другие - очень слабы.

Кембриджские радиоастрономы вскоре нашли еще три пульсирующих радиоисточника, и окончательно стало ясно, что обнаружено новое явление природы, названное ими пульсарами. Объектами, которые имеют очень короткий период изменений, по представлению астрофизиков, могли быть тесные двойные звезды (в этом случае период пульсара - это период

обращения радиоизлучающей компоненты по орбите), либо белые карлики, у которых предполагается быстрая пульсация излучающей поверхности. Но до открытия пульсаров ни у тех, ни у других объектов не наблюдали да и не предполагали никакого значительного радиоизлучения. Кроме них пульсарами могли оказаться никогда еще не обнаруживавшиеся, но тем не менее давно предсказанные и разыскиваемые свыше 30 лет нейтронные звезды (предполагаемые продукты эволюции звезд с массами 1,4-2 массы Солнца). В пользу нейтронных звезд говорили явно небольшие размеры пульсаров, но и в теориях нейтронных звезд до открытия пульсаров явление пульсирующих радиоизлучений специально не предусматривалось, и в этом смысле обнаруженное явление пульсаров также было большой неожиданностью.

Сейчас известно уже более 320 пульсаров и среди них излучающие с таким коротким периодом, который не может быть ни у белых карликов, ни у двойных звезд. Были также выдвинуты и некоторые теоретические доводы, свидетельствующие о том, что пульсары не могут быть ни теми, ни другими. Таким образом, "конкурс выиграла" нейтронные звезды.

Важнейшей характеристикой пульсаров является длина периода между пульсациями. Известны пульсары с периодами от 0.033 до 4.3 с. Строгая периодичность всплесков радиоизлучения пульсаров не исключает медленного изменения их периодов со временем; Для обнаружения изменения нужны долгие и тщательные наблюдения с учетом влияния орбитального движения Земли на значение периода, чтобы исключить годовые колебания пульсации. Исследовано уже более 200 пульсаров, и у всех периоды систематически увеличиваются. Другими словами, пульсации со временем замедляются. Следовательно, чем длиннее период, тем старше пульсар. Но в таком случае, если считать прирост периода равномерным в течение всего времени существования пульсара, то, разделив период на скорость его изменения в год, мы найдем грубую оценку его возраста. Действительный возраст, как показывает теория, будет вдвое меньше. Возрасты пульсаров заключены между 918 годами и 18 млн. лет (табл. 15).

**Таблица 15. Несколько интересных пульсаров**

Наименование пульсара	Период пульсации, с	Длительность всплеска, с	Мера дисперсии, пс/см <sup>3</sup>	Расстояние, пс	Нарастание периода, миллионные доли с/год	Возраст, лет	Видимая звездная величина	Примечание
025+21	3.745	0.181	51	2000	1.26	14 млн.	-	Долгопериодический
031+21	0.033	0.003	57	2000	13.34	918	17	Оптический пульсар в Крабовидной туманности
011+22	0.335	0.006	97	1500	1.89	90 тыс.	-	Возможно, связан с остатком сверхновой IC 443 в Возничем
009+74	1.292	0.041	6	190	0.005	125 тыс.	Слабее 21	Один из первых открытых пульсаров
033+45	0.098	0.002	69	500	3.95	11 тыс.	25	Оптический пульсар в остатке сверхновой

								Паруса X
043+10	1.098	0.050	15	300	0.111	5 млн.	-	Открыт советскими астрономами
050+08	0.253	0.009	3	98	0.007	18 млн.	Слабее 24	Один из первых открытых, ближайший? старейший?
033+16	1.188	0.028	5	210	0.118	5 млн.	То же	Один из первых открытых
054-62	0.401	0.049	267	6000	-	-	Слабее 20	Вблизи остатка сверхновой
048-42	0.844	0.305	540	?	-	-	-	С наибольшей мерцательной дисперсией
045-19	4.308	0.070	20	670	-	-	-	Рекордно длинный период
013+16	0.059	0.010	167	5600	-	-	-	Пульсар в двойной системе
019+21	1.337	0.031	12	420	0.042	16 млн.	Слабее 23	В слабом оболочечном радиоисточнике
037-215	0.00156	-	100	2500	0.95	1 млн.	22	Самый быстрый пульсар, но старейший
021+51	0.529	0.007	23	760	0.096	3 млн.	-	Вблизи остатка сверхновой НВ 2 Кассиопее

В случаях, когда пульсары обнаружены внутри остатков сверхновых (Крабовидная туманность. Паруса X), их возрасты можно установить и другими способами. Для Крабовидной туманности прямо известна дата вспышки ее сверхновой. Новейшие оценки возраста остатка сверхновой Паруса X сходятся с возрастом, вычисленным по пульсару. Но этим еще не ограничиваются особенности названных пульсаров. В 1969 г. оба они испытали скачкообразное уменьшение периода. У пульсара Паруса X он уменьшился на 196 миллиардных долей секунды, после чего период снова стал систематически возрастать, а пульсар в Крабовидной туманности уменьшил период на 77 триллионных доли секунды. Оба эти пульсара наблюдаются и оптическими средствами.

Записи изменения интенсивности радиоизлучения пульсара - это своего рода кривые блеска его радиопеременности. Отдельные всплески, называемые также импульсами, у одного и того же пульсара крайне непостоянны по виду и интенсивности, но в среднем форма импульса оказывается устойчивой. Главная причина колебаний интенсивности всплеска - мерцание при прохождении радиоволн через межпланетную и межзвездную плазму. Особенно отличаются всплески у пульсара PP 0943, открытого на Пушинской радиоастрономической станции Физического института им. П.Н. Лебедева. Он дает всего 3-4 импульса в месяц при

периодичности слабых импульсов в 1.098 с. Некоторые пульсары имеют посередине интервала между главными всплесками еще промежуточный импульс (интеримпульс) меньшей силы.

Хотя период пульсации на всех длинах волн одинаков наблюдения показывают, что моменты всплесков на более длинных волнах наблюдаются позже. Величина запаздывания зависит от количества электронов межзвездной плазмы, находящихся на пути от пульсаров до наблюдателя. Эту величину, легко вычисляемую по наблюдениям запаздывания импульсов пульсара на разных длинах волн, принято называть мерой дисперсии.

Если бы межзвездная плазма в Галактике была размещена равномерно, то, разделив меру дисперсии на концентрацию электронов, мы получили бы оценку расстояния до пульсара (рис. 32). Но межзвездная среда неоднородна: газ в ней собран в облака, а возле горячих звезд есть области сильно ионизованного газа с высокой концентрацией электронов. Полагая среднюю концентрацию электронов в межзвездной среде равной 0.03 электрона на  $1 \text{ см}^3$ , можно грубо находить расстояние до тех пульсаров, которые находятся внутри галактического диска и излучение которых при следовании до наблюдателя не пересекало областей сильно ионизованного газа. Но если пульсар находится за пределами галактического диска, то по мере дисперсии можно найти лишь часть расстояния, пройденного его сигналом в галактическом диске, где присутствуют свободные электроны, а часть, пройденная вне диска, где концентрация электронов ничтожна, останется неизвестной.

**Рис. 32.** Прохождение короткого радиоимпульса от пульсара через межзвездную среду.

Попадая в облако межзвездной плазмы, обладающее повышенной концентрацией электронов, импульс испытывает дисперсию радиоволн и расплывается. Низкочастотные (т. е. длинноволновые) колебания импульса поэтому запаздывают.

В редких случаях расстояния до пульсаров можно оценить и другими способами. Так, расстояния до пульсаров, находящихся внутри остатков сверхновых, могут быть найдены по способам, применяемым для отыскания расстояний до этих остатков. Излучение далеких пульсаров, расположенных в области нашей Галактики, в своем следовании к Земле пересекает спиральные рукава. Холодный водород, сконцентрированный в них, поглощает излучение пульсара на волне 21 см. Вследствие вращения Галактики поглощение, создаваемое в каждом рукаве, будет по длине волны немного отличаться от поглощения в другом рукаве. Поэтому удастся расшифровать, какие рукава пересек сигнал от пульсара и где на схеме Галактики он должен находиться.

Поразительной особенностью радиопульсаров является то, что только в одном случае из свыше трехсот известных сейчас объектов обнаружено периодическое колебание периодов пульсара, свидетельствующее о том, что он является членом двойной системы. Между тем, двойные звезды в Галактике не редкость, а очень частый случай. Видимо, по каким-то причинам звезды, становящиеся радиопульсарами, не входят, как правило, в двойные системы, либо же при вспышке сверхновой связь между компонентами двойной системы разрывается и пульсар приобретает высокую пространственную скорость как камень, выпущенный из пращи.

Единственный радиопульсар, входящий в двойную систему, был открыт в 1974 г. Его период пульсаций составляет 0.059 с, а период обращения его по орбите равен 7 ч 46 мин. По законам орбитального движения расстояние между ним и вторым компонентом системы немного более радиуса Солнца. Вторым компонент, следовательно, может быть компактным объектом: белым карликом или нейтронной звездой без пульсарных характеристик. Но тогда почему не сбежал при вспышке из системы пульсар? Это пока не выяснено. Зато кроме радиопульсаров были найдены пульсары иного рода, оказавшиеся во всех случаях членами двойных систем.

В 1981 г. австралийские радиоастрономы обнаружили первый пульсар в соседней галактике - в Большом Магеллановом Облаке.

## **Оптические и рентгеновские пульсары**

Открытие пульсаров первоначально обошло стороной объект, с которого начиналось большинство важных открытий в остатках сверхновых,- Крабовидную туманность. Дело изменилось, однако, в 1968 г., когда сначала в Парусах X, а затем в "Крабе" были обнаружены радиопульсары с самыми короткими периодами.

В январе 1969 г. район пульсара в Крабовидной туманности был обследован оптическим телескопом с фотоэлектрической аппаратурой, способной регистрировать быстрые колебания блеска. Поиски оказались успешными: было отмечено существование оптического объекта с колебаниями блеска, имеющими такой же период, как и радиопульсар в этой туманности. Этим объектом оказалась звездочка 16-й величины в центре туманности, давно привлекавшая к себе внимание исследователей своей странностью. Она имела какой-то неразборчивый спектр без спектральных линий. Исследуя в 1942 г. Крабовидную туманность, В. Бааде указал на нее как на возможный звездный остаток сверхновой, а И.С. Шкловский в более поздние годы, подчеркивая возможную особую природу этой звезды, предполагал, что она является источником релятивистских частиц и фотонов высокой энергии. Но все это были лишь предположения, нуждавшиеся в наблюдательных доказательствах. И вот звезда оказалась оптическим пульсаром, имеющим одинаковые с радиопульсаром период и интеримпульсы, а физически - как мы установили - она должна быть нейтронной звездой, расход энергии которой достаточен для поддержания свечения и всех видов излучений Крабовидной туманности.

В прошлом проводились неоднократные специальные измерения положения пары центральных звезд туманности с целью обнаружить их годовое перемещение по небу (собственное движение). Если бы пульсар двигался только поперек луча зрения, то его скорость, судя по собственному движению и расстоянию Крабовидной туманности, была бы около 100 км/с. Но он имеет еще и скорость вдоль луча зрения - лучевую скорость. К сожалению, из-за отсутствия линий в спектре оптического пульсара ее измерить невозможно. Существует предположение, что звезда, которая в 1054 г. взорвалась как сверхновая, относится к группе горячих звезд классов O и B, называемой звездной ассоциацией Близнецы-I, пространственно расположенной по соседству с Крабовидной туманностью. В этом случае звезда должна иметь скорость примерно такого же порядка, как и вычисленная по собственному движению.

Интересно, что можно рассчитать место, где находился, судя по собственному движению, пульсар в момент взрыва сверхновой. Оказывается, оно неплохо совпадает с точкой, из которой, как кажется, разлетается вещество Крабовидной туманности. Это прямо свидетельствует о совместном происхождении пульсара и туманности в процессе взрыва звезды.

Естественно, что после открытия оптического пульсара были проведены поиски и в других остатках сверхновых, особенно в тех, где уже найдены радиопульсары. Но только в 1977 г. австралийским астрономам с помощью специальной техники удалось нащупать пульсацию в оптическом диапазоне исключительно слабой звездочки 25-й величины в остатке сверхновой Паруса X.

Третий оптический пульсар, P 1937-215, имел не менее интересную историю. Его нашли в 1982 г. в созвездии Лисички по радиоизлучению. Остатка сверхновой не найдено. Период пульсаций оказался рекордно коротким: в 20 раз меньшим, чем период пульсара в "Крабе", а возраст оценен в миллион лет.

**Рис. 33.** Форма импульсов и интеримпульсов оптического пульсара в Крабовидной туманности в рентгеновских и оптических лучах и на нескольких длинах радиоволн.

Еще один сюрприз преподнес пульсар в Крабовидной туманности: ракетными исследованиями с аппаратурой, чувствительной к мягким рентгеновским лучам, было найдено, что мягкое рентгеновское излучение туманности имеет несколько переменный характер: примерно 5% этого излучения колебалось с таким же периодом, что и пульсар. Таким образом, пульсар в Крабовидной туманности оказался не только оптическим, но и рентгеновским (рис. 33).

Когда после сообщений об открытии рентгеновского пульсара были переобработаны наблюдения жесткого рентгеновского излучения Крабовидной туманности, полученные в 1967 г. на стратостатах с автоматической рентгеновской аппаратурой, то оказалось, что 7% этого излучения тоже было пульсирующим.

Рентгеновский пульсар, таким образом, мог быть обнаружен ранее первых радиопульсаров, но этого не произошло, так как существование быстрых колебаний излучения тогда не предполагалось.

В баллонных (аэростатных) и ракетных экспериментах теперь измерили и гамма-излучение Крабовидной туманности. Оно тоже носит пульсирующий характер с тем же периодом. К 1971 г. обнаружены следы гамма-излучения этого объекта до энергий 150 МэВ. Причем, если судить по падению оптического и рентгеновского излучений с длиной волны у туманности и у пульсара, в рентгеновском и гамма-излучениях роль пульсара, систематически возрастает и в гамма-излучении господствует только излучение пульсара. Если сопоставить все электромагнитное излучение туманности и пульсара на всех длинах волн, то становится очевидным, что у оптических и рентгеновских пульсаций, по-видимому, одинаковый механизм излучения, а у радиопульсаций свой особый. Одинаковый период тех и других говорит лишь о том, что оба механизма работают у поверхности одного и того же объекта.

Но если так, то возможны и такие пульсары, у которых имеется только радиопульсация, а сильного оптического и рентгеновского излучения нет. Может быть, это и есть наблюдаемые типичные радиопульсары? Но тогда могут быть и оптические, и рентгеновские пульсары без сильного радиоизлучения. На такую возможность указал советский астрофизик В.Л. Гинзбург, ссылаясь при этом на историю исследования квазаров. Они тоже были обнаружены сначала по значительному радиоизлучению, оказались совпадающими со звездоподобными голубыми объектами, а затем было найдено множество таких звездоподобных голубых объектов без сильного радиоизлучения. И действительно, та же история повторилась с рентгеновскими пульсарами.

Первые исследования рентгеновских источников велись на ракетах. После тщательного изучения на месте некоторых источников были найдены оптические объекты, оказавшиеся на вид нормальными голубыми звездами. Это было загадочно.

Многое объяснилось, когда с 1970 г. начались интенсивные исследования уже с бортов спутников, оснащенных рентгеновскими телескопами. Вскоре было найдено, что два известных источника имеют в рентгене пульсации. Эти пульсации обнаруживали также периодические колебания, говорящие об орбитальных движениях этих чисто рентгеновских пульсаров. Источник Геркулес X-1 пульсировал с периодом 1.24 с и имел орбитальный период 1.70 сут, а Центавр X-3, соответственно, 4.842 с и 2.087 сут.

Более того, рентгеновское излучение источника Центавр X-3 периодически "выключается" совсем, когда этот объект при движении по орбите затмевается не излучающим в рентгене компонентом двойной системы. В принципе, по длительности паузы можно вычислить диаметр последнего. Он получился соответствующим диаметру сверхгиганта. Именно такой голубой сверхгигант и был обнаружен в 1973 г. на месте Центавра X-3. А источник Геркулес X-1 был отождествлен с одной из ранее известных переменных звезд.

Теперь обнаружены рентгеновские пульсары с периодами пульсаций от долей секунд до десятков минут. Основываясь на коротких пульсациях и на единстве природы наблюдаемого явления, следует заключить, что и здесь мы имеем дело с излучением нейтронных звезд. Но в отличие от нейтронных звезд, пульсирующих в радиодиапазоне, периоды рентгеновских пульсаров не возрастают со временем, а постепенно убывают. Рентгеновские пульсары имеют, по-видимому, другой источник энергии излучения, с которым мы познакомимся в конце этой главы.

Большой удачей для исследователей было обнаружение в 1979 г. в созвездии Орла уникального неппульсирующего источника рентгеновского излучения в остатке сверхновой, обозначенном W 50. Этот источник совпал с компактным радиоисточником в остатке сверхновой и со звездой 14-й величины, которая еще ранее попала в каталог звезд с необычными спектрами и получила наименование SS 433.

Спектр такого объекта, активного во всех спектральных диапазонах, заслуживал внимательного изучения. В нем не оказалось линий поглощения, зато каждая линия излучения выглядела

тройной: по обе стороны главных линий находились линии-спутники. Они систематически перемещались то навстречу друг другу, то в противоположном направлении периодом 164 дня. Доплеровское смещение "спутников" в крайних положениях соответствовало скорости излучающего газа  $-80000$  км/с и  $+80000$  км/с, т. е. превышало четверть скорости света! Вместе с тем, судя по наличию линий водорода, температура этого газа была порядка 10 000 К.

Поведение линий в спектре SS 433 объяснялось тем, что из его центрального объекта в противоположных направлениях били две сильные струи газа, а сама линия газовых струй обращалась с периодом 164 сут. Это вскоре подтвердилось, когда с помощью орбитального рентгеновского телескопа "Обсерватории им. Эйнштейна", было получено рентгеновское изображение SS 433. На "рентгеновском снимке" видны обе узкие струи, идущие от SS 433 до периферии остатка W 50.

Расстояние до SS 433 около 4 кпс, межзвездное поглощение достигает 8 звездных величин. С учетом этого обстоятельства оптическая светимость объекта получается 1038 эрг/с, рентгеновская 1035 эрг/с и в радиодиапазоне 1032 эрг/с. Энергия движущегося в струях газа равна 1038 эрг/с. Подсчитано, что эта энергия может разогреть оболочку W 50 за тысячу лет до температуры в несколько миллионов кельвинов.

Что же собой представляет этот экзотический объект? Путь к разгадке лежит в изучении самого объекта. Центральные компоненты спектральных линий SS 433 показывают перемещения с периодом 13 суток и изменения скорости движения от  $-73$  до  $+73$  км/с. По видимому, здесь мы наблюдаем тесную двойную систему, состоящую из оптически наблюдаемого горячего сверхгиганта классов O или B и невидимого в оптике рентгеновского компонента. Сверхгигант имеет массу более десяти солнечных, он раздулся до предельных границ собственной зоны тяготения пополняет, своим газом диск, окружающий по экватору вращения рентгеновский компонент. Плоскость диска перпендикулярна оси вращения компактного объекта, каким является рентгеновский компонент, а не лежит в орбитальной плоскости двойной системы. Поэтому диск и обе газовые струи ведут себя как наклонно вращающийся волчок, причем ось их вращения прецессирует (описывает конус), совершая один оборот за 164 сут (это известное явление прецессии вращающихся тел)

Рентгеновский компонент, пожирающий газ диска и выбрасывающий струи, может быть нейтронной звездой. Считается, что она может выбрасывать избыток захваченного газа у своих магнитных полюсов вдоль открытых силовых линий (в этом случае струи перпендикулярны газовому диску). По другой схеме нейтронная звезда отбрасывает избытки газа магнитным вращающимся полем в плоскости ее магнитного экватора. Выбор между гипотезами еще не сделан.

## **Нейтронные звезды - финал эволюции звезд средней массы**

Итак, после изучения пульсаров стало ясно, что ими, вероятнее всего, могут быть нейтронные звезды, существование которых было предсказано еще в 30-х годах Л.Д. Ландау. В их пользу

говорили малые размеры и чрезвычайно быстрое вращение и, наконец, то, что они рождаются в ходе взрывов сверхновых.

Предсказание существования нейтронных звезд связано с исследованиями заключительных стадий Звездной эволюции. В главе II мы рассматривали первоначальную и "ядерную" стадии эволюции звезд и отметили, что после накопления в центре звезды "золы" - элементов группы железа - повышение температуры за счет сжатия звездных недр уже не ведет к ядерным реакциям, сопровождающимся выделением энергии. Звезда вступает в заключительную, чисто гравитационную стадию эволюции.

Если при каждом переходе на новый "сорт" ядерного горючего сила тяготения к центру перевешивала газовое и световое давление внутренних слоев звезды и вызывала сжатие до включения новой ядерной реакции с выделением энергии, то теперь, поскольку "ядерная печь" звезды не разгорается, газовое давление уже не останавливает гравитационного сжатия и судьба звезды оказывается целиком в зависимости от ее массы.

В звездах малой массы (к моменту сжатия - не более 1.4 масс Солнца) гравитационное сжатие создает плотности  $10^4$ - $10^{10}$  г/см<sup>3</sup>. При таких плотностях происходит разрушение атомных структур. Вспомним, что атом состоит из ядра и окружающих его оболочек электронов. Давление отрывает электроны, оставляя ядра "голыми". В результате образуется вырожденный газ, упругость которого останавливает сжатие звезды. Возникает белый карлик.

Если же звезда имеет среднюю массу от 1.4 до 10 масс Солнца то давления вырожденного газа оказывается недостаточно для остановки гравитационного сжатия. По одной из теорий этого процесса при температуре выше 5 млрд. кельвинов в недрах звезды важное значение приобретают реакции с образованием нейтрино - элементарных частиц, не имеющих заряда и массы покоя и поэтому беспрепятственно проходящих через звездные недра. Образующиеся нейтрино уносят значительную долю энергии, выделяемой при гравитационном сжатии. Подсчитано, что нейтринная светимость (другими словами, энергетическая отдача нейтрино) в это время превосходит оптическую светимость звезды. Отвод энергии через нейтрино позволяет удваивать сжатие вещества за 1 секунду. Ни равновесие слоев звезды, ни плавное сжатие их при таких темпах становятся невозможными, гравитационное сжатие приобретает стремительный, катастрофический характер, наступает, как говорят астрофизики, гравитационный коллапс (рис. 34).

Имеется ли сила, способная остановить разогнавшиеся гравитацией слои звезды? Оказывается, такая сила существует и заключается в ядерном строении вещества. Когда сжатие создает плотности  $10^{12}$ - $10^{15}$  г/см<sup>3</sup>, т. е. плотности, какие по подсчетам физиков имеют атомные ядра, начинается разрушение атомных ядер. Они распадаются на нейтроны и протоны. Последние поглощают электроны вырожденного газа и превращаются в нейтроны (при этих реакциях продолжают выделяться нейтрино). Происходит, как говорят астрофизики, нейтронизация вещества звезды. Физически вещество звезды превращается в своего рода нейтронную

жидкость, имеющую ядерную плотность и характерную для жидкостей малую сжимаемость (упругость).

Внешне такая звезда представляет собой как бы гигантское ядро атома, перенасыщенного нейтронами, но нейтроны, и немногочисленные протоны в этом сверхядре сцеплены не внутриядерными, а гравитационными силами.

Упругость нейтронной жидкости и останавливает гравитационный коллапс на уровне ядерной плотности, если масса звезды не превышает двух солнечных масс. Если же масса звезды больше, то для задержки коллапса в звезде должен произойти сброс излишней массы путем взрыва или спокойного истечения. После остановки коллапса образуется нейтронная звезда. Но если образование белых карликов происходит, по-видимому, спокойно, без катастрофических взрывов, образование нейтронной звезды идет бурно. Нейтрино уносят лишь часть высвободившейся при сжатии гравитационной энергии, остальная ее часть расходуется на образование неустойчивых ядер, быстро распадающихся с выделением энергии в форме взрыва. При взрыве возникает ударная волна, выбрасывающая из звезды наружные слои, образуется расширяющаяся газовая оболочка, которую мы и наблюдаем как явление сверхновой.

**Рис. 34.** Три варианта финальной стадии звездной эволюции.

а - превращение в белый карлик, б - в сверхновую с нейтронной звездой в центре, в - в черную дыру - звезду, впадающую в релятивистский коллапс.

Что касается звезд, превосходящих по массе Солнце более чем в 10 раз, то даже после истечения части избыточной массы сила гравитации в этом случае оказывается больше силы упругости нейтронной жидкости, и коллапс будет продолжаться неограниченно (физике неизвестны сверхплотные состояния за рубежом ядерной плотности вещества). С точки зрения исследователя, наблюдающего явление этого коллапса звезды со стороны, сжатие в силу некоторых закономерностей теории относительности приостанавливается, когда радиус коллапсирующей звезды становится равным так называемому радиусу Шварцшильда, и звезда превращается в "черную дыру". Излучение такого объекта уже не сможет выходить наружу, и мы его не увидим. Однако, если эта звезда была компонентом двойной системы, ее притяжение скажется на характере движения другого компонента, который может быть обычной звездой. Такие двойные звезды с невидимыми компонентами встречаются. Если же коллапсирующая звезда является членом тесной двойной системы, то перетекающий со спутника газ будет разгоняться в гравитационном поле черной дыры до колоссальных скоростей и разогреется до температур в миллионы кельвинов. Мы можем обнаруживать свечение падающего на коллапсирующую звезду газа в рентгеновских лучах. Отметим, что радиусы черных дыр, или радиусы Шварцшильда массивных звезд составляют 1-3 км.

Но вернемся к нейтронным звездам. Их внутренняя структура изучалась еще до открытия пульсаров, и многое уже было установлено. Предполагается, что масса нейтронной звезды приблизительно равна массе Солнца, хотя может оказаться и немного больше или вдвое меньше. Радиус звезды около 10 км, плотность вещества в центре звезды достигает  $10^{15}$  г/см<sup>3</sup>,

т. е. около 1 млрд. т в см<sup>3</sup>. К поверхности плотность постепенно убывает. Граница чисто нейтронного вещества - сфера радиусом около 9 км, ее плотность около 10<sup>11</sup> г/см<sup>3</sup>, а температура всего нейтронного кома звезды. около 0,5 млрд. кельвинов. Во внешнем слое нейтронной звезды имеются уже и атомные ядра и электроны, плотность вещества снижается до 10<sup>7</sup> г/см<sup>3</sup>, а температура -до 1 млн. кельвинов.

**Рис. 35.** Строение нейтронной звезды по данным о радиоизлучении пульсара.

Если идти от периферии нейтронной звезды к ее центру, то, по современным представлениям, в ней можно выделить несколько удивительных по свойствам слоев (рис. 35). Самый внешний слой, где убывают и температура, и плотность, имеет такой же состав, как и вещество белых карликов, т. е. является плазмой из электронов и ядер (главным образом железа). Но расчеты показали, что при тех комбинациях температур и плотностей, которые имеются в оболочке нейтронной звезды, плазма может существовать не только в газообразном, но и в жидком и даже твердом виде! Поэтому предполагают, что под наружным тонким слоем (всего, скажем, в один сантиметр) расположена твердая корка плазмы. Под твердой же оболочкой находится нейтронная жидкость, в которой имеются отдельные протоны. Поэтому этот слой при высокой плотности и существенном влиянии ядерных сил может обладать удивительными физическими свойствами - сверхтекучестью и сверхпроводимостью. Как мы увидим далее, эти предположения о свойствах нейтронной жидкости нашли подтверждение в скачкообразных изменениях периодов пульсаров.

Эволюция нейтронной звезды после образования из обычной сравнительно проста. В результате нейтронного и электромагнитного излучений молодая нейтронная звезда в момент образования быстро остывает до своих обычных температур, после чего может существовать сотни миллионов и даже миллиарды лет, пройдя, очевидно, стадию пульсара. Пока неясно, все ли нейтронные звезды должны сначала становиться пульсарами или же есть среди них "немые". Ясно одно, что и после того, как угаснут пульсации электромагнитного излучения нейтронной звезды, она будет продолжать существовать в своем устойчивом состоянии.

### **Почему нейтронная звезда оказалась пульсаром?**

Наблюдения пульсаров убедили нас в том, что это нейтронные звезды. Но до открытия пульсаров быстрые колебания излучения нейтронных звезд теоретически не предсказывались. Теория, таким образом, прошла мимо важного свойства нейтронных звезд. Поэтому теоретикам пришлось искать ответ, почему нейтронная звезда должна быть пульсаром. В некотором отношении теория была близка к такому предсказанию, так как пульсация излучения несомненно была связана с важнейшими свойствами нейтронных звезд: быстрым вращением и большим магнитным полем. Тем не менее до сих пор нет полного объяснения возникновения пульсирующего излучения нейтронных звезд, хотя предлагаются различные гипотезы, объясняющие отдельные особенности явления.

Быстрое осевое вращение и связанный с ним короткий период вращения нейтронной звезды имеют простое механическое объяснение. Согласно закону, сохранения момента вращения

звезда, уменьшая вследствие гравитационного коллапса свой радиус с нормальных размеров до 10 км - примерно в сто тысяч раз, - должна уменьшить период своего обращения обратно пропорционально квадрату радиуса, т. е. в нашем случае в 10 млрд. раз. Если взять для примера период осевого вращения Солнца (около 25 суток), то он уменьшился бы до 0.002 с. Заметим, однако, что для звезды с массой Солнца и радиусом 10 км такой период вращения был бы невозможен из-за большой центробежной силы на поверхности, которая превысила бы силу тяготения звезды. В действительности самый короткий период для такого объекта не меньше 0.016 с. С таким периодом вращения начинается существование нейтронная звезда радиусом 10 км и с массой, равной солнечной (начальный период ее вращения был бы, по видимому, около 200 суток, что вполне соответствует реальному периоду вращения красного гиганта).

Как мы видели, после образования нейтронная звезда постепенно увеличивает период, другими словами, она тормозит свое осевое вращение. Подсчеты для пульсара Крабовидной туманности дают запас механической энергии осевого вращения около 1050 эргов, а изменение периода его пульсаций указывает на потери энергии вращения порядка 1038 эрг/с. С другой стороны, можно подсчитать мощность всего излучения самой Крабовидной туманности, окружающей пульсар. Она тоже получается около 1038 эрг/с. Следовательно, механическая энергия нейтронной звезды каким-то путем непрерывно превращается в электромагнитную, расходуемую на поддержание излучения Крабовидной туманности. Таким образом, изменение периода пульсации пульсара Крабовидной туманности подтвердило предположения И.С. Шкловского о том, что излучение этого остатка сверхновой поддерживается нейтронной звездой.

Посмотрим теперь, откуда возникает большое магнитное поле нейтронной звезды. При сжатии звезды вследствие гравитационного коллапса магнитный поток (т. е. число силовых линий магнитного поля звезды) должен сохраняться неизменным. Вследствие этого при сжатии радиуса звезды в сто тысяч раз ее поверхность уменьшится в десять миллиардов раз и соответственно возрастет число силовых линий на единицу, поверхности звезды (напряженность магнитного поля) - у обычных звезд напряженность магнитного поля на поверхности 100-1000 Э (например, в солнечных пятнах), следовательно, у нейтронной звезды оно будет  $10^{12}$ - $10^{13}$  Э.

При таком большом магнитном поле в нем сосредоточена магнитная энергия звезды; около  $10^{43}$  эргов. Плотность ее получается около 4 кг/см<sup>3</sup>, тогда как плотность плазменной оболочки нейтронной звезды близка к плотности межзвездной среды, Таким образом, в плазменной оболочке господствует необычайно сильное магнитное поле. Именно в его свойствах, очевидно, заключаются секреты пульсирующего излучения.

**Рис. 36.** Дипольный характер магнитного поля пульсара.

Магнитная ось (а) пульсара не совпадает с осью его вращения (б). Излучение пульсара направлено в конусе (в) вдоль магнитной оси и воспринимается нашей аппаратурой, когда магнитная ось с излучающим конусом

пересекает наш луч зрения ( $\gamma$  - магнитные силовые линии, д-траектория заряда.  $e^-$  - синхротронное излучение, СЦ - диаметр "светового цилиндра", на поверхности которого скорости частиц, участвующих во вращении нейтронной звезды, достигают скорости света).

Американский астрофизик Т. Голд указал на важную роль магнитного поля (магнитосферы) нейтронной звезды в образовании космического излучения идущего из остатков сверхновых. Магнитосфера жестко, как одно целое, вращается вместе со звездой, поэтому заряды, находящиеся в ее плазменной оболочке, могут ускоряться центробежной силой осевого вращения звезды вдоль тех магнитных силовых линий, которые удаляются от поверхности звезды (рис. 36). Но очевидно также, что на расстоянии от звезды, где скорость разгона приблизится к световой, магнитное поле уже не может удорожать заряды и они вылетают из своей центрифуга в качестве знакомых нам релятивистских электронов, протонов, позитронов и легких ядер, т. е. космических лучей. Заряды, набирая в магнитосфере скорость, уносят значительную долю энергии вращения нейтронной звезды, вследствие чего ее вращение должно систематически тормозиться. Как мы знаем, космические лучи, выскользнув из магнитосферы звезды, оказываются в магнитной ловушке, созданной запутанным магнитным полем остатка сверхновой. Они и создают синхротронное излучение, например, Крабовидной туманности во всех областях длин волн.

Но должны ли быстро исчерпаться заряды, если магнитное поле выметает их из магнитосферы звезды? Нет, из основ теории, электромагнетизма известно что вращающееся магнитное поле индуцирует вокруг себя электрическое поле. Напряженность его над поверхностью нейтронной звезды около  $10^{11}$  В/см. Это электрическое поле постоянно срывает с поверхности звезды заряды в магнитосферу и поддерживает ее плотность на одном уровне.

Удивительно точная периодичность импульсов пульсара и их кратковременность указывают на излучение в узком пучке подобно прожектору. Иногда его сравнивают с маяком, на башне которого находится источник направленного света, равномерно вращающийся вокруг вертикальной оси. С моря корабли видят такой маяк в темноте как равномерно вспыхивающий (пульсирующий) сигнал. Изменение поляризации радиоизлучения пульсара в течение всплеска свидетельствует, что источник пульсирующего излучения на нейтронной звезде также участвует во вращении.

В зависимости от природы излучателя он может находиться, вероятно, либо на поверхности, либо в магнитосфере, вращающейся вместе со звездой.

Как показывают наблюдения, область, где образуется пульсирующее излучение, очень невелика, но дает очень мощные потоки -  $10^{14}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> в радиоволнах  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> - в оптических волнах. Таким мощным потокам при малых размерах излучающих областей (о чем свидетельствуют, как мы уже говорили, малые длительности всплесков сравнительно с периодом пульсации) соответствует невообразимой величины температура:  $10^{24}$  кельвинов. Реальные температуры такой величины отсутствуют даже в центрах самых горячих звезд и вряд ли осуществлялись в начальную эпоху расширения Вселенной. Если такая температура излучающей области была бы реальна, то мы обнаружили бы очень сильное гамма-излучение,

энергетически намного превосходящее действительно обнаруживаемое радиоизлучение. Между тем сильного гамма-излучения не наблюдается, следовательно, излучение имеет явно нетепловой характер, и высокая яркость его говорит не об особом тепловом режиме, а о специфическом физическом процессе такого свечения. Полагают, что пульсирующее излучение нейтронных звезд возникает в результате процесса с энергетической накачкой, такой, какая осуществляется в мазерах и лазерах {в мазерах излучение атомов и молекул происходит в радиодиапазоне, а в лазерах в оптическом). В астрофизике найдено несколько явлений такой природы: некоторые всплески радиоизлучения Солнца и излучение космических мазеров. Именно мазерные процессы могут создавать высокие по яркости, прожекторно направленные и поляризованные пучки излучения, которые аналогичны наблюдаемым у пульсаров.

Первоначально предполагалось, что источниками такого излучения могут быть своего рода пятна на поверхности нейтронной звезды (было даже предположение о вулканах в кристаллизованной коре), но вскоре стало ясно, что здесь важную роль играет характер магнитного поля нейтронной звезды. В космосе мы чаще встречаемся с двухполюсным (дипольным) магнетизмом, примером могут служить магнитные поля планет Земли и Марса, хотя магнитное поле Солнца имеет иной характер. Но существуют, по-видимому, и звезды с дипольным моментом магнитного поля. Силовые линии в нем идут от поверхности звезды только у магнитных полюсов. Именно вдоль магнитной оси нейтронной звезды и должны работать центрифуга, рождающая космические лучи, и мазерный механизм излучения. Правда, если магнитная ось и ось вращения совпадают, то это излучение будет замечено лишь в том случае, когда ось направлена на наблюдателя, и объект не будет казаться пульсирующим. Но это исключительно редкий случай. Существование пульсаров свидетельствует о том, что обычно магнитная ось не совпадает с осью вращения нейтронной звезды. В этом случае будет осуществляться пульсация излучения по принципу вращающегося маяка.

Из сказанного следует, что не все молодые нейтронные звезды могут нами наблюдаться в виде пульсаров, а только те, у которых магнитная ось при вращении оказывается близкой к лучу зрения. Поэтому конус пучка излучения пульсара пересекает - его. Но такие совпадения, естественно, редки из-за узости пучков, вследствие чего в большинстве остатков оболочек сверхновых и не обнаружено пульсаров, хотя именно они, может быть, ответственны за излучение остатков. Просто сигналы их маяков проскальзывают далеко от Земли.

Итак, только что образовавшаяся нейтронная звезда является пульсаром, но, расходуя свою энергию вращения на рождение космических лучей, она за 10-100 млн. лет должна исчерпать значительную часть своей энергии и погасить свое пульсирующее излучение. К этому времени мощность пульсара слабеет, вырабатываемые им релятивистские частицы имеют малую энергию и не выметают так далеко межзвездный газ вокруг магнитосферы звезды, как это они делали раньше. При мощности излучения пульсара ниже  $10^{25}$  Вт размеры зоны выметенного межзвездного газа становятся меньше радиуса действия сил гравитации и газ уже может падать на плотную поверхность нейтронной звезды.

Падение межзвездного газа на нейтронную звезду оказывается неожиданным подарком для нее. Но здесь не получается простое повторение явления радиопульсара. Гигантское тяготение звезды разгоняет падающие к ее поверхности частицы до скоростей около 100000 км/с. Кроме того, частицы, ионизуясь излучением звезды, становятся заряженными и подвергаются воздействию магнитного поля звезды, которое гонит заряды вдоль силовых линий к ее полюсам. Именно возле магнитных полюсов, где силовые линии входят в поверхность звезды, частицы сталкиваются с поверхностью. При этом значительная доля их массы (20-50%) превращается в энергию. Это в десятки раз более эффективный источник энергии чем термоядерные процессы (о нем впервые упомянул Я.Б. Зельдович). Таким путем плазма нейтронной звезды у магнитных полюсов нагревается до десятков миллионов кельвинов и начинает излучать рентгеновские лучи. Нейтронная звезда снова, проявляет себя как пульсар, но на этот раз как рентгеновский.

Несмотря на малую плотность межзвездного газа его все же оказывается достаточно, чтобы продлить стадию пульсара вдвое. Если же нейтронная звезда образовалась в тесной двойной системе, то материалом для питания энергией рентгеновского пульсара становится газ, выбрасываемый соседней нормальной звездой. Если эта звезда имеет высокую температуру на поверхности, то сильный поток энергии из ее недр сдувает в окружающее пространство, разреженную плазменную оболочку (звездную корону, а само явление, как мы знаем, носит название "звездного ветра"). Частицы звездного ветра, приходящие к нейтронной звезде, и становятся добычей рентгеновского пульсара. Когда же звезда представляет собой разреженный холодный сверхгигант, заполняющий целиком зону, где собственная сила его тяготения превышает тяготение пульсирующего компаньона, то, как мы уже видели в случае новых звезд (см. рис. 14), через брешь в зоне тяготения вещество от сверхгиганта попадает в зону тяготения нейтронной звезды. Естественно, что рентгеновская стадия пульсара в тесной двойной системе может длиться намного дольше, чем у одинокой нейтронной звезды.

В тесной двойной системе между стадией радиопульсара и стадией пожирания межзвездного вещества рентгеновским пульсаром имеется кратковременная эпоха, когда магнитосфера нейтронной звезды уже слаба для создания сильного радиоизлучения, но достаточно сильна, чтобы отбрасывать частицы звездного ветра. Получается явление, похожее на отбрасывание воздушным винтом сильного потока воздуха. По аналогии эта переходная стадия носит название "пропеллера".

Завершая на этом описание свойства пульсаров и гипотез, объясняющих основные, их свойства, мы должны отметить, что, несмотря на большой размах наблюдательных и теоретических исследований пульсаров, а еще ранее - нейтронных звезд, пока еще не найдено окончательной, универсальной схемы, объясняющей все явления, наблюдаемые в пульсарах. Но неослабевающий интерес к ним создает уверенность, что в недалеком будущем теория пульсаров будет завершена.

В конце концов пульсары оказались частью проблемы сверхновых звезд, неожиданной по богатству фактов иллюстрацией финальной стадии ядра взорвавшейся звезды. Это с новой силой возвращает астрофизиков к изучению центральной проблемы: к причинам взрыва сверхновой, к механизму ее взрывного процесса, к стадии разгорания ее вспышки, когда внешняя и внутренняя области звезды устремляются в противоположных направлениях - оболочка разлетается, а ядро сжимается в нейтронную звезду. Уже сейчас, до окончательного решения основных загадок пульсаров, приобретает важность вопрос о взаимодействии нейтронной звезды с остатком сверхновой. И таких вопросов в проблеме сверхновых еще немало.

## **Глава XII. НЕСКОЛЬКО ТРУДНЫХ ВОПРОСОВ**

### **Поиски "Взрывчатки"**

Все явления, связанные со сверхновыми, - оптически наблюдаемая вспышка, расширяющийся остаток оболочки и пульсар - говорят о быстром выделении гигантских количеств энергии в короткое время, т.е. о сильном взрыве как причине явления сверхновой. Действительно, по данным о кривых блеска, температурах сверхновых при вспышке и расстояниям до них получают оценки энергии, выделяемой при вспышке в виде излучений, порядка  $10^{50}$ - $10^{51}$  эргов. Кроме того, огромные массы и высокие скорости расширения оторванных от звезд оболочек свидетельствуют о больших расходах и кинетической энергии. В зависимости от масс и скоростей расширения она оценивается в  $10^{50}$ - $10^{52}$  эргов. Таким образом, непосредственно при взрыве должно высвободиться такое количество энергии, чтобы получилась расширяющаяся оболочка с наблюдаемым оптическим явлением.

Но кроме энергии, выделяемой при взрыве, расширяющийся остаток оболочки сверхновой накапливает солидную энергию магнитного поля - порядка сотой доли энергии, выделенной при взрыве. Это поле удерживает рождающиеся в магнитосфере нейтронной звезды космические лучи, энергия которых также составляет 1% энергии взрыва. По своему происхождению эти виды энергии, по-видимому, не связаны со взрывом звезды, а возникают в результате потери вращательной энергии нейтронной звезды.

Примерно 20 тыс. лет оболочка сверхновой представляет собой горячий плазменный шар, запирающий космические лучи, пока температура его не снизится до 1 млн. кельвинов. После этого магнитная ловушка оболочки ослабевает и космические лучи вырываются из нее. От оболочки сверхновой остаются просто клочья межзвездного газа с невысокой температурой, а пульсар излучает все виды радиации прямо в межзвездное пространство. Он живет еще долгое время после исчезновения оболочки сверхновой.

Что же взрывается в звезде? Самое высокое выделение энергии на грамм расходующегося ядерной реакции горючего получается при превращении четырех ядер водорода в ядро гелия при высоких температурах с образованием электронов и нейтрино. Но, как высока ни будет температура, эти реакции пойдут медленно, не путем взрыва. Поэтому были изучены другие

ядерные реакции. Оказалось, что при температурах в 1 млрд. кельвинов становятся очень быстрыми (т. е. носят характер взрыва) реакции между ядрами водорода и ядрами легких элементов (углерод, кислород, азот и др.). Если бы почему-либо температура недр Солнца поднялась до 1 млрд. кельвинов, то эти ядерные реакции прошли бы в течение одной секунды и Солнце взорвалось бы. Но, поскольку в нашем Солнце ядер легких элементов очень мало, при взрыве выделилось бы всего  $10^{49}$  эрг энергии. Следовательно, при взрыве сверхновой в ее недрах должно быть легких элементов намного больше, чем в Солнце. Другими словами, это, действительно, должна быть проэволюционировавшая до конца ядерной стадии звезда. Легкие ядра - продукты старых ядерных котлов этой звезды - образуют несколько последовательных зон между внешней водородной оболочкой и железным ядром звезды (рис. 36). Именно эти легкие ядра могут быть взрывчаткой, и выделяющейся при их детонации энергии вполне достаточно, чтобы возникло явление сверхновой.

В каком же случае может получиться взрыв такой набитой легкими ядрами звезды? Это было исследовано английскими астрофизиками Ф. Хойлом и У. Фаулером. По их расчетам, когда звезда с массой в десяток солнц дошла в своей эволюции до образования негорючей железной сердцевины, ее внешние слои начинают падать к центру, чтобы поддержать газовое давление в недрах стывущей звезды. При сжатии растут энергия, давление, температура недр. Идут как бы инстинктивные поиски нового ядерного горючего. Но, как ни возрастает температура в железном сердце звезды, новый ядерный котел не включается. Наоборот, начинаются реакции с поглощением энергии, ведущие, например, к расщеплению ядра железа на 13 ядер гелия и 4 нейтрона.

Теперь за каждую секунду размеры звезды уменьшаются в 2 раза. К концу второй секунды катастрофического сжатия могут сложиться условия для его остановки. Таким тормозом может быть образование белого карлика, если масса сжимающейся звезды невелика (менее полутора масс Солнца), или взрыв с образованием нейтронной звезды (вспышка сверхновой). Но, чтобы произошел взрыв, быстрое сжатие должно существенно нарушить структуру звезды.

Оказывается, если звезда успевает при таком сжатии спокойно перестраиваться, т.е. соответствующим образом перераспределять выделяющуюся при сжатии энергию, повышая температуру в центре, то взрыв не произойдет. Для взрыва нужно, чтобы скорость сжатия звезды обогнала скорость звука в ее недрах, тогда спокойное отступление звездных слоев превратится в беспорядочное. Но такая ситуация возникает тогда, когда в центре звезды замедляется повышение температуры, а в зонах легких ядер она будет высока. Таким охлаждающим процессом, как мы видели, может быть расщепление ядер железа.

Кроме того, в центре звезды при больших давлениях идут реакции взаимодействия электронов с элементарными частицами, ведущие к образованию нейтрино и антинейтрино, например, "урка"-процесс (взаимодействие с ядрами), процесс Чу (с позитронами) и процесс Б.М. Понтекорво (с ионами). Звездные недра с обычными плотностями не задерживают не имеющих зарядов и массы покоя нейтрино, и они беспрепятственно выходят из звезд, унося с собой

значительные порции энергии. Но в катастрофически сжимающейся массивной звезде внутреннее строение нарушено: сердцевина с ее массой около одной солнечной быстро сжимается, формируясь в нейтронную звезду. В этот важный момент температура в ней доходит до 200 млрд. Кельвинов, а плотность - до  $10^{12}$  г/см<sup>3</sup>. На какие-нибудь несколько десятых долей секунды звезда вспыхивает как точечных размеров нейтринная звезда. Ее мощность излучения достигает  $10^{52}$  эрг/с - в  $10^{18}$  раз выше, чем полная мощность излучения нашего Солнца. В виде нейтрино будет излучено около  $10^{52}$  эрг.

Но при высоких плотностях всепроникаемость нейтрино оказывается ограниченной: они не могут уйти из звездного ядра, не отдав энергии, вследствие чего температура внешних слоев ядра звезды повышается, поднимается и газовое давление - универсальный стоп-кран, останавливающий сжатие звездного ядра.

Однако наружные слои звезды еще некоторое время продолжают падать к центру, и на периферии звездного ядра создается высокое давление, вызывающее детонацию одного из сортов легких ядер, а может быть, и просто тепловой взрыв от избытка энергии, вынесенной сюда нейтрино и антинейтрино. При этом взрыв в любом случае должен освободить энергию в  $10^{52}$  эргов. Образующаяся взрывная волна выбрасывает наружные слои в пространство. Это и наблюдается как вспышка сверхновой звезды. При ядерном взрыве сверхновой происходят быстрые процессы образования остальных тяжелых элементов таблицы Менделеева. Сверхновые, по-видимому, единственные "фабрики", производящие элементы с атомными весами больше, чем у железа. Поэтому при их взрывах должна образовываться точно такая же смесь тяжелых атомных ядер, какую обнаруживают в звездах, газовых туманностях (т. е. в доступных спектральному анализу сгущениях межзвездного газа) и метеоритах. Химический состав этих небесных тел в достаточной степени исследован спектрально и оказывается довольно однородным в пределах, объектов одного возраста и звездной подсистемы, за исключением, может быть, содержания самых легких химических элементов - водорода и гелия, относительное содержание которых служит еще более чувствительным показателем не только поколения, но также и возраста самих небесных тел.

В зависимости от того, какой сорт легких ядер в действительности детонирует при явлении сверхновой, будет, очевидно, различным химический состав выбрасываемый при взрыве оболочки. В частности, оказалось, что чисто тепловой (неядерный) взрыв, происходящий вследствие накопления тепловой энергии в оболочке массивной звезды в ходе переноса энергии всепроникающими нейтрино, привел бы к реакциям, создающим тяжелые ядра в количествах в двести раз превышающих наблюдаемые в смеси химических элементов небесных тел.

Расчеты и гипотезы, о которых здесь говорится, относятся к сверхновым, образовавшимся при взрывах массивных звезд. Это сверхновые II типа. Перед самым взрывом звезда была, по-видимому, каким-то предельным случаем красного сверхгиганта, т. е. звездой с массивной протяженной и холодной водородной оболочкой.

Детали процесса разлета оболочки сверхновой II типа исследовались советскими учеными В.С. Имшенником, Д.К. Надежиным и Э.К. Грасбергом, а в США - С. Колгейтом, Р. Уайтом и Р. Шевалье. По их расчетам после взрыва ударная волна должна идти по разреженной оболочке протяженностью до 10 млрд. км. Такая оболочка могла образоваться на предшествующем взрыву этапе эволюции звезды вследствие истечения газа с ее поверхности. Вычисленные кривые блеска оказались сходными с наблюдаемыми у сверхновых II типа, если только масса взрывающейся звезды не превосходила 8 масс Солнца. У более массивных звезд гравитационный коллапс идет без взрыва и выброса оболочки, но сопровождается сильной вспышкой нейтринного излучения которую смогут обнаруживать нейтринные телескопы недалекого будущего.

## **Загадочные "предки" сверхновых I типа**

В подборе категорий звезд, которые могут дать вспышки сверхновых I типа, имеются большие трудности. Дело в том, что этот тип сверхновых наблюдается как в спиральных, так и в эллиптических галактиках. Явление вспышек сверхновых в последних выглядит довольно загадочным, так как в этих звездных системах не идет процесс образования звезд новых поколений. Там все звезды стары, их возраст насчитывает десятков миллиардов лет, и массивные звезды давно исчезли. Установлено, что в эллиптических галактиках сейчас переживают "водородный век" звезды с массами, не превосходящими массу Солнца.

По расчетам Хойла и Фаулера взрывы возможны и у звезд, превращающихся в белые карлики, если масса звезды в финале несколько превышает максимально допустимую массу для белого карлика (1.43). Есть несколько исследований этого интересного случая. Так, советские астрофизики Г.С. Бисноватый-Коган и З.Ф. Сеидов считают, что как сверхновые могут загораться старые звезды с возрастом в миллиарды лет, которые при превращении в белые карлики были довольно горячими и немного больше по массе, чем допустимая масса белого карлика. Остывание такого "кандидата" в белые карлики тянется очень долго. Он ведет себя уже как белый карлик ("реликтовый белый карлик" по выражению И.С. Шкловского), но лишь после достаточного остывания, сопровождающегося сжатием звезды, оказывается, что его масса "великовата": сил упругости белого карлика не хватает для остановки сжатия, он срывается в коллапс, происходит взрыв, вспышка и выброс оболочки ударной волной.

И.С. Шкловский нарисовал такую картину эволюции звезды перед катастрофой при превращении в белый карлик. За два-три десятка тысяч лет существования горячего сверхгиганта он выбрасывает в межзвездную среду значительную массу своей оболочки. Сильный звездный ветер сверхгиганта раздувает ее в огромный пузырь, который астрономы наблюдают как планетарную туманность. Горячая звезда в ее центре эволюционирует в белый карлик и, в случае избыточной массы, может взорваться. Однако такая картина вспышки сверхновой снова характерна только для объектов в спиральной галактике, поскольку массивных звезд-одиночек нет в эллиптических звездных системах. Маловероятно, с другой

стороны, что сверхновые I типа в эллиптических и спиральных галактиках рождались в ходе разных процессов.

Таким образом, наличие сверхновых I типа в эллиптических галактиках требует иного механизма эволюции звезд перед вспышкой, одинакового и для молодых и для очень старых звезд. На мысль об этом наводит также отсутствие линий водорода в спектрах сверхновых I типа. Это свидетельствует о том, что "предки" сверхновых I типа имели какую-то особую "биографию". Каким-то образом, но не путем истечения в межзвездную среду, они потеряли значительную часть или весь водород в оболочках, который не мог сгореть во внутренних слоях, потому, что в звездах обычно не происходит глубокого перемешивания вещества между ядром и оболочкой.

По мнению И.С. Шкловского, остается единственная причина бесследной, потери водорода звездой, приемлемая и для условий в эллиптической галактике: его похищение соседней звездой в тесной двойной системе. Этот механизм был исследован около двадцати лет назад французским астрофизиком Э. Шацманом. В этом случае водород из оболочки не попадает в межзвездное пространство, а остается в двойной системе. О поразительных явлениях в тесных двойных системах мы говорили, разбирая феномены новых звезд и пульсаров. Уже там один из компонентов забирает часть вещества у "донора", но размеры "хищений" не были катастрофическими. Теперь мы, очевидно, встретились с поистине трагическими по размерам событиями: с так называемым "звездным канибализмом".

Расчеты эволюции тесных двойных систем показывают, что между их компонентами в некоторых случаях происходит обмен массами. Этот обмен вовлекает в процесс эволюции значительную часть звездного вещества системы, благодаря чему существенно продлевается и время жизни звезд с массами, превышающими солнечную. В эллиптических галактиках и сейчас могут существовать тесные двойные звезды, у которых один из компонентов имеет массу больше 1.4 , что является необходимым условием для вспышки сверхновой I типа, хотя одиночные звезды с такой массой в эллиптических галактиках уже давно сошли со сцены.

Пока сделаны расчеты только для случаев массивных начальных компонентов, т.е. для эволюции в сверхновые I типа звезд младших фотометрических классов, которые обнаружены только в спиральных галактиках. У звезд меньших масс будут более длинные сроки эволюции, но, по-видимому, те же принципиальные стадии. Схема эволюции изображена на рис. 37. Указаны массы компонентов в каждой стадии и размеры грушеобразных зон, где собственное тяготение звезды превышает тяготение компаньона. Размер зон тем больше, чем массивнее компонент, поэтому изменение размеров зон наглядно показывает эволюцию соотношения масс компонентов.

В начале эволюции масса главной звезды имеет 20, а ее компаньона 6. Первые 6 млн. лет идет бурная эволюция массивной звезды: из горячей компактной звезды он превращается в голубой сверхгигант, обладающий массивной водородной оболочкой, заполняющей всю "грушу" и перетекающей через точку контакта в зону звезды-спутника (рис. 37, а). В этой стадии система

может стать новоподобной звездой, а в случае меньших масс пройти стадию новой звезды. Но через полмиллиона лет эта стадия заканчивается, поскольку вся оболочка сверхгиганта перетечет к соседу: компаньоны обменялись массами (рис. 37, б)! Спутник "съел" весь водород оболочки главной звезды, и она стала по массе меньше его. Вскоре наступает и финал: ограбленная звезда коллапсирует, происходит вспышка сверхновой, и на ее месте в зависимости от массы либо остается черная дыра или нейтронная звезда, либо она исчезает полностью (рис. 37, в).

**Рис. 37.** Схема эволюции тесной двойной системы с первоначальными массами компонентов и . Центры масс системы на различных стадиях эволюции размещены на одной вертикали, пунктиром даны зоны вокруг компонентов где их тяготение превышает тяготение соседа, К - контактная точка зон. Указаны массы компонентов и возраст системы с начала ее эволюции в млн. лет, P - период орбитального обращения системы в днях. Дальнейшая эволюция системы нам уже знакома: бывший спутник становится, голубым сверхгигантом, который, в свою очередь "кормит" своим газом рентгеновский пульсар (рис. 37, г). К счастью для новообразовавшегося сверхгиганта, небольшая масса нейтронной звезды не позволяет ей взять полный "реванш" и вернуть себе все отданное ранее вещество. Пульсар немедленно перерабатывает захваченный газ в рентгеновское излучение, которое покидает систему уже навсегда. Когда оболочка сверхгиганта остынет до 10000 К, звездный ветер ослабеет, питание, пульсара оскудеет. Дальнейшая судьба системы пока не изучена.

### **Радиоактивная "накачка" энергии в оболочке сверхновой I типа**

Итак, в случае сверхновых I типа предполагается, что перед взрывом звезда была богата легкими элементами и лишена водородной оболочки, т. е. была компактна. Чтобы в этих условиях было согласие с наблюдаемыми спектрами и кривыми блеска, в звезде должно идти медленное выделение энергии. По схеме советских исследователей Д.К. Надежина и В.П. Утробина, энергия переносится в разреженную часть звезды вблизи поверхности, где образуется ударная волна, которая выбрасывает наружные слои звезды в окружающее пространство. Они показали также, что ни перенос энергии с помощью нейтрино ни сгорание остатков термоядерного топлива (кислорода) недостаточны даже при их совместном действии для объяснения мощности вспышки сверхновой I типа.

Как уже упоминалось, конкретный механизм поддержания энергии свечения оболочки сверхновой I типа, по-видимому, радиоактивный. Расчеты термоядерной эволюции звезды перед взрывом, проведенные в 1968 г. в США Д. Боданским, Д. Клейтоном и У. Фаулером, показали, что в зоне горения кремния должен накапливаться радиоактивный изотоп никель-56, который с периодом полураспада 6 суток превращается в радиоактивный кобальт-56, а последний уже с периодом полураспада 77 суток - в стабильные ядра железа-56. В обоих процессах выделяется энергия в виде гамма-излучения. Если бы эти оба периода были на четверть короче, то кривая выделения энергии при этих процессах вполне соответствовала бы

по форме кривой блеска сверхновой I типа. Отсюда, по величине светимости сверхновой, нетрудно вычислить количество никеля-56, кобальта и железа, образовавшихся при взрыве.

В 1975 г. М. Левенталь и С. Мак-Колл (США) предположили, что после взрыва сверхновой I типа остается горячий белый карлик со значительным содержанием никеля-56 (0.2-0.4 ). Высокая плотность на поверхности этого объекта как раз и способна уменьшить в нужной степени периоды полураспада обоих радиоактивных процессов, сохраняя одновременно "стерильной" разлетающуюся оболочку (т. е. нормальной по химическому составу). В 1983 г. Ч. Ву, М. Левенталь и их сотрудники изучили спектр звездочки в центре остатка Сверхновой 1006 г., полученный на спутнике, оснащенный ультрафиолетовым спектрометром. В спектре звезды, являющейся белым карликом, случайно расположенным позади остатка сверхновой, обнаружились линии поглощения этого остатка, смещенные в синюю часть. Линии принадлежали кремнию в трех стадиях ионизации и ионизованному железу и свидетельствовали о расширении оболочки сверхновой со скоростью порядка 5-6 тыс. км/с.

Однако проведенные до сих пор теоретические расчеты показывают, что при взрыве сверхновой I типа центральное тело не образуется, а происходит полный разлет оболочки. Поэтому получила развитие еще и другая версия, согласно которой указанные радиоактивные процессы идут в самой оболочке. Доказательства верности гипотезы усиленно ищут путем анализа спектральных данных. В частности, в пользу нее говорит спектр Сверхновой 1972 г. полученный Р. Киршнером и Дж. Оуком на 725-е сутки после максимума блеска. В нем присутствуют запрещенные линии ионизованного железа. Следы кобальта-56 в первые недели после вспышки сверхновой в спектрах надежно не установлены. Тем не менее грубые подсчеты количества железа, поставляемого сверхновыми в межзвездную среду, оказываются соответствующими наблюдаемым оценкам. Правда, получается, что сверхновые I типа являются его монополярными "поставщиками". Кроме того, И.С. Шкловский обнаружил, что гамма-излучение Вселенной как раз несколько повышено в том интервале энергий, где излучают ядра изотопов, кобальта-56 при превращении их в железо.

Пока, видимо, рано судить о том, какой вариант радиоактивной гипотезы реализуется в сверхновых I типа, но, судя по всему, это скоро выяснится.

## **Роль сверхновых в эволюции Галактики и образовании Солнечной системы**

Изучение сверхновых показывает их важную роль в эволюции вещества Галактики и ее основных компонентов - звезд, газа и космических лучей. Все вещество Галактики, за исключением той доли, которая застряла в белых карликах, прошло через "лаборатории" сверхновых, чтобы превратиться затем в звезды новых поколений и более богатый тяжелыми элементами межзвездный газ.

Вспышки сверхновых звезд и длительная жизнь их остатков существенно влияют на эволюцию межзвездного газа. Около трети энергии вспышек сверхновых выделяется в форме рентгеновского и ультрафиолетового излучений, которые нагревают и ионизуют разреженный межзвездный газ. При торможении оболочек сверхновых межзвездным газом их энергия

расширения переходит в энергию, движения этого газа. В главной плоскости Галактики, где вспышки следуют с интервалами меньшими, чем время существования их остатков, эти затормозившиеся остатки могут сливаться, образуя своего рода коридоры горячего газа и гигантские пузыри. Плавая в холодном газе Галактики, эти пузыри горячей плазмы всплывают над нею и, остывая, превращаются в газовые облака, обладающие значительной скоростью. Эти облака над Галактикой обнаружены по их радиоизлучению в линии водорода на волне 21 см.

Вспышки сверхновых действуют и на межзвездную пыль. Ударные волны, порождаемые сверхновыми в межзвездном газе, испаряют отдельные пылинки, а с другой стороны, сгребают массы пылинок в плотные газо-пылевые комплексы и способствуют в последних зарождению звезд. В созвездии Большого Пса обнаружено газовое кольцо, богатое звездами. Оно является остатком сверхновой имеющим возраст 800 тыс. лет. Звезды в нем, очевидно, родились из газа и пыли, уплотненного остатком сверхновой.

Наше Солнце и планеты образовались около 5 млрд. лет назад из газо-пылевого досолнечного облака, содержавшего практически все химические элементы таблицы Менделеева. Это богатство элементами - следствие вспышек сверхновых в районе формирования Солнечной системы, поскольку мы не знаем в природе других мест, кроме недр сверхновых, где могли бы образоваться тяжелые атомные ядра. Исследования состава древнейших земных пород, образцов, доставленных с Луны, и большинства метеоритов показывают, что приблизительно в 85% тяжелых элементов в них имеют возраст 9-10 млрд. лет, т. е. возникли в начальный период образования Галактики, когда в звезды превратилось очень много газа и было поэтому много вспышек сверхновых. Выброшенный тогда из сверхновых материал успел распределиться по всей Галактике. Примерно 11-13% тяжелых элементов имеют возраст около, 5 млрд. лет, т. е. являются веществом одной из сверхновых, вспыхнувших перед образованием Солнечной системы. Остальные несколько процентов приходятся на промежуток между этими возрастными периодами.

Исследования древнейших по возрасту метеоритов - так называемых углистых хондритов - показали, что перед формированием из облака Солнца и планет вблизи него произошли, по-видимому, даже две вспышки сверхновых с интервалом в сто миллионов лет.

Здесь следует подчеркнуть существенное различие между метеорными пылинками и метеоритами. Они различаются между собой и степенью рыхлости, и своей биографией. Метеорные тела, попадая в атмосферу Земли, сгорают в ней без остатка на стокилометровой высоте (метеоры), и только несгоревшие "шлаки" оседают впоследствии на поверхность планеты. Астрономам удалось выяснить, что представляют собой метеорные тела до попадания в атмосферу: это очень рыхлые образования из кристаллов различных соединений, слившиеся и сцепившиеся в крупные хлопья - своего рода "космический снег" или, скорее, "космический смог". На рост таких пылинок в условиях низкой температуры и большой разреженности космического пространства уходят миллионы и миллиарды лет. Ведь, чтобы пылинки росли, нужны встречи между ними при относительно небольших скоростях и возникновение

придгяжения вследствие разности электрических зарядов пылинок, а не под действием их тяготения. Таким путем вокруг ядер гжельых элементов конденсируются и кристаллизуются легкие молекулы межзвездного газа. Слипание в "снежный ком" идет медленно, но непрерывно.

При сосредоточении таких хлопьев в одном месте межзвездного пространства в значительном количестве в него будут плохо проникать рентгеновские и космические лучи, поддерживающие температуру межзвездной среды, поэтому в таком облаке из "космического смога" температура понизится до нескольких Кельвинов выше абсолютного нуля. Это обстоятельство ускоряет рост конденсации и кристаллизации пылинок. Образуется газо-пылевое облако, и начинается процесс формирования звезд и планет.

Мы не будем здесь вдаваться в подробности - предполагаемых путей возникновения планет из газо-пылевого облака. Это сложные процессы, главные стадии которых еще далеко не ясны. Нам здесь хотелось лишь показать, что в создании планетной системы определенную роль сыграли взрывы сверхновых, в ходе которых были созданы ядра тяжелых атомов, рсновная масса межзвездного газа и пыли.

Но с образованием планетной системы, как мы сейчас увидим, роль сверхновых, в истории, нашей планеты, по-видимому, не кончается.

### **Картина вспышки близкой сверхновой**

Представим себе, что недалеко от нас, скажем на расстоянии 10 пс, вспыхнула сверхновая звезда. Что мы будем видеть на небе и какие последствия это вызовет на Земле? Этот вопрос был изучен И.С. Шкловским и В.И. Красовским в 1957 г. Согласно описанию, приведенному в книге И.С. Шкловского "Сверхновые звезды", события будут развиваться так.

Примерно в течение одного месяца на небе разгорелась бы яркая звезда, достигая в максимуме блеска -18-й видимой звездной величины. Если вспомнить, что блеск Солнца составляет -27 звездных величин, а Луны в полнолуние -12.6 звездной величины, то сверхновая будет в это время создавать освещенность на Земле в 1000 раз большую, чем Луна, и всего в 1000 раз меньшую, чем Солнце. Такая звезда была бы хорошо заметна в дневное время, а ночью от нее было бы так же светло, как в период белых ночей в Ленинграде. Без преувеличения можно было бы сказать, что с момента появления сверхновой вся наблюдательная астрономия вскоре свелась бы к наблюдениям сверхновой. Да и как могло бы быть иначе? Ведь, даже когда звезда находилась бы за горизонтом, она вызывала бы сильное свечение неба.

Дело в том, что основное свечение звезды в период максимума блеска приходится на крайнюю ультрафиолетовую область спектра. Это излучение ионизовало бы на долгий срок в 100 тыс. лет весь межзвездный водород на несколько десятков парсеков вокруг звезды. Ультрафиолетовое излучение сверхновой было бы в сотни раз интенсивнее ультрафиолетового излучения Солнца. Оно вызвало бы необыкновенно яркое свечение верхних слоев атмосферы - полярное сияние, охватывающее всю ночную сторону Земли. К счастью, само ультрафиолетовое излучение, губительное для живых земных организмов, не дошло бы в

опасных размерах до поверхности нашей планеты, было бы поглощено верхними слоями атмосферы.

Яркое свечение сверхновой продолжалось бы несколько лет, пока звезда не перестала бы быть видимой простым глазом. Но вокруг звезды, ставшей почти незаметной, образовалась бы яркая расширяющаяся туманность. Через 30 лет ее размер составлял бы  $1^\circ$  на небе, а через триста лет - уже около  $10^\circ$ . Затем размеры ее росли бы медленнее из-за торможения оболочки в межзвездной среде. Но все-таки через 10 тыс. лет расширяющаяся оболочка сверхновой достигла бы Солнечной системы. Наша планетная система погрузилась бы в эту оболочку, что имело бы уже серьезные последствия для живых организмов на нашей планете.

И без того светлое ночное небо Земли было бы покрыто причудливыми волокнистыми облаками, своей яркостью подобными Млечному Пути. Но, как мы знаем, внутри оболочки сверхновой заперты релятивистские частицы, обладающие высокими энергиями. Они обрушились бы на Землю и другие планеты. Интенсивность потоков этих космических лучей в сто раз иногда и более превышает интенсивность космических лучей в нормальную эпоху. Известно, что, попадая в атмосферу Земли, релятивистские частицы называемые также первичными космическими лучами, распадаются и образуют ливни вторичных, более мягких (с меньшим запасом энергии) космических лучей. Но при возрастании интенсивности космических лучей значительно повысится количество первичных космических лучей, достигших земной поверхности.

Появление мощных космических лучей у поверхности Земли оказало бы важное влияние на судьбу живых организмов. Средняя радиоактивность воздуха в приземном слое составляет 0.12 Р (рентген) в год; из них на радиоактивность, рождаемую космическими лучами, приходится треть. При повышении же космического излучения в 100 раз уровень радиоактивности повысится в 30 раз, а временами - и значительно больше. Для состояния здоровья людей эта доза вовсе не опасна. Но важно другое. Повышенная космическая радиация существовала бы несколько десятков тысяч лет. и вызвала бы мутации, опасные для будущих поколений.

И.С. Шкловский и В.И. Красовский предположили, в частности, что исчезновение динозавров, полностью господствовавших на Земле в юрский период и вдруг быстро вымерших в конце мелового периода, возможно, было связано со вспышкой близкой сверхновой, вызвавшей повышение уровня космического излучения на сотню тысяч лет. Как известно, радиоактивность является одной из причин мутаций передающихся по наследству. При повышении уровня радиации число мутаций возрастает. Организмы с коротким циклом созревания малочувствительны к повышению радиации, тогда как имеющие длительный цикл созревания резко реагируют на небольшие дозы радиации. Мутации могут способствовать улучшению того или иного биологического вида но чаще всего это относится к молодому, возникающему виду. Старый же биологический вид, развившийся, от мутаций страдает чаще и деградирует. Жертвой чувствительности к радиации, возможно, оказались динозавры, бывшие в меловую эпоху господствующим классом животных. А развившиеся теперь классы млекопитающих и птиц тогда были еще молодыми с крепкой наследственностью,

улучшавшейся даже от "космических биологических экспериментов". Можно полагать, что будущая вспышка сверхновой была бы опасна наиболее развитым классам животных.

Изменение наследственности вследствие мутаций, вызываемых радиоактивностью среды, - не только важный двигатель эволюции живой природы. По мнению И.С. Шкловского, не исключено, что и сама жизнь на нашей планете могла зародиться в океане вследствие длительного повышения уровня радиации, вызванного вспышкой сверхновой вблизи нашей планетной системы примерно 2-3 млрд. лет назад.

Какой же остаток сверхновой является ближайшим к нам, и не вызвал ли он повышение радиоактивности на Земле в прошлом? Таким остатком является объект Паруса X, находящийся на расстоянии 500 пс, а может быть, и чуточку ближе. Его возраст 8 тыс. лет (табл. 14). В то же время возраст его пульсара оценивается в 11 тыс. лет (табл. 15); некоторые подсчеты дают, правда, и 5 - 6 тыс. лет. При уровне наших знаний об эволюции пульсаров такой разброс оценок возрастов не слишком велик. Выходит, что "второе солнце" древних шумеров могло оказаться вспышкой близкой сверхновой Паруса X, если датировка события верна.

Но заслуживает внимания и оценка 11 тыс. лет В 1965 г. ленинградские ученые акад. Б.П. Константинов и Г.Е. Кочаров предположили, что повышенная доза осадков радиоактивного углерода в отложениях пород может быть следствием усиления проникающей радиации (гамма и рентгеновское излучение) на поверхности Земли в результате вспышки близкой сверхновой. Эта радиация может вызывать реакции с ядрами азота, содержащегося в атмосфере, в ходе которых возникает радиоактивный углерод. Заметим здесь, что именно радиоактивный углерод, присутствующий в отложениях органического происхождения, был первым классическим средством для датировки палеонтологических и археологических находок. Этот метод был предложен в 1947 г. американским физико-химиком У. Либби, удостоенным Нобелевской премии.

В 1980 г. космохимик Р. Брекенридж (США) нашел в отложениях позднечетвертичного периода, взятых в десяти разных местах земного шара, слои с органическими остатками и богатым содержанием радиоактивного углерода, по которому возраст этих остатков был оценен в 10-11 тыс. лет! Этот факт бесспорно указывал бы на воздействие сверхновой Паруса X и давал бы ее точный возраст, если бы удалось отыскать следы других сверхновых, например, 1054 г. Иначе просто установлена дата гигантской общеземной катастрофы.

**Рис. 38.** Положение большой радиоизлучающей "петли" на карте неба.

Заметим, кстати, что, по расчетам И.С. Шкловского, при частоте вспышек сверхновых одна в сто лет в Галактике вспышки на расстоянии до 10 пс от Солнца в среднем повторяются через 1.5 млрд. лет, а в радиусе до 20 пс от него уже через 200 млн. лет, на расстояниях до 30 пс через примерно 60 млн. лет и т. д. - обратно пропорционально кубу расстояния от Солнца.

В связи с этим интересна особенность радиоизлучения нашей Галактики, обнаруженная еще 30 лет назад при одном из ранних исследований интенсивности радиоизлучения всей части неба, доступной наблюдениям в Северном полушарии. Кроме ярко излучающего в радиодиапазоне пояса Млечного Пути на небе была обнаружена большая радиоизлучающая петля (или шпора, отрог), идущая через созвездия Стрельца, Змееносца, Геркулеса, Волопаса, Девы и по ряду южных созвездий. По форме петля представляет собой круг небесной сферы диаметром около  $110^\circ$  с центром в созвездии Волка (рис. 38).

Природа этого радиоизлучающего объекта неясна. Наряду с другими гипотезами была предложена для его объяснения и гипотеза о том, что петля представляет собой остаток оболочки сверхновой, вспыхнувшей на расстоянии 130 пс около 30 тыс. лет назад. В пользу гипотезы говорит нетепловой характер радиоизлучения петли, но в ее области не найдено оптического свечения, сходного с волокнами остатков. Правда, в радиоизлучении волокнистая структура обнаружена. Исходя из этой гипотезы, И.С. Шкловский и Е.К. Шеффер предсказали присутствие в петле мягкого рентгеновского излучения, подобного найденному в волокнистых туманностях. Спустя год, в 1972 г., оно было действительно обнаружено. Температура излучения около 2 млн. Кельвинов.

Если петля была остатком сверхновой, то повторения вспышки сверхновой вблизи Солнца следует ожидать не скоро, срок биологической безопасности можно оценить в 100 млн. лет.

Однако не исключено, что в недалеком будущем мы станем очевидцами вспышки сверхновой в нашей Галактике на расстоянии в 1 - 3 кпс от Солнца. Блеск такой сверхновой достигнет 10-й звездной величины, если она не вспыхнет в области с сильным межзвездным поглощением. Наблюдение такой вспышки станет выдающимся научным событием в астрономии. Несомненно, будет собран исключительный по ценности и объему информации материал. Его анализ даст решение многих загадок о природе сверхновых, над решением которых сейчас упорно трудятся астрономы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основное содержание нашей книги составлял рассказ о самых мощных взрывных звездах - новых и сверхновых. Читатель убедился, что со вспышками таких звезд связаны важные и сложные явления. Знакомясь с ними, мы не только встретились с удивительными процессами, но и с чрезвычайно экзотическими образцами звездного мира.

В случае новых звезд большой неожиданностью для астрономов, как мы видели, оказалось их вхождение в состав двойных систем. Правда, эта особенность обнаружена лишь у части новых звезд, однако найдены убедительные объяснения, почему ее нельзя обнаружить в остальных случаях. Теперь создается теория новых звезд, объясняющая этот феномен эволюцией тесной двойной звезды.

Вообще в последнее время исследование тесных двойных звезд стало особенно важным и по ряду других причин. Эти "сиамские близнецы" звездного мира оказались замешанными не только в историю с новыми звездами. Им приписывается и решающая роль в образовании

быстродвижущихся звезд-бегунов, вылетающих, как из пращи, из тесной двойной системы при взрыве одного из компонентов, который становится сверхновой звездой. Мы видели, что все больше аргументов свидетельствует о том, что сверхновые I типа тоже непосредственно связаны с тесной двойственностью их "предков". Очень правдоподобные расчеты моделей эволюции двойных систем прямо выводят нас к рентгеновским пульсарам.

Что касается явления сверхновых звезд, то мы видели, что сведения о них до сих пор чрезвычайно отрывочны: мы знаем, например, подъем к максимуму блеска у одной сверхновой и снижение после него у другой, спектры - только у части сверхновых и, наконец, остатки сверхновых с возрастными, начиная от трехсот лет и более. Ни для одной сверхновой мы пока не знаем сразу всех характеристик. Долгое время это обстоятельство, особенно усугубляемое тем, что сверхновые в Галактике очень редки, запутывало картину. Однако те факты, которые удастся выяснить тем или иным путем, оказываются настолько важными для астрофизики, что астрономы уже примирились с фрагментарным характером сведений об этом уникальном классе звезд. Можно также считать, что глубокая систематизация свойств сверхновых уже позволяет в значительной степени преодолеть неполноту данных об отдельных сверхновых.

Кроме того, буквально на наших глазах улучшается положение с наблюдениями сверхновых. Ярчайшая сверхновая нашего столетия - так называемая 1972e, обнаруженная в созвездии Центавра, наблюдалась современными средствами около двух лет; было получено множество оценок блеска и спектров, что дало интенсивный толчок исследованиям спектров сверхновых, описанным на страницах этой книги.

В то же время, крупные телескопы с диаметрами зеркал 6-4 м, вошедшие в строй в истекшем десятилетии, в сочетании с электронно-оптическими преобразователями существенно расширили возможности детального исследования остатков сверхновых. Почти половина известных сейчас газовых остатков сверхновых была открыта оптическими методами в последнем десятилетии. Серьезным подспорьем в исследовании этих остатков было, как мы знаем, развитие их рентгеновских наблюдений. В целом эти исследования уже сейчас создают связную картину эволюции остатков сверхновых, хотя ее детали до конца еще к проработаны.

Явления сверхновых, несмотря на сравнительную редкость, играют первостепенную роль во многих сторонах жизни звезд и в возникновении планетных систем. Однако в этой области исследований предстоит еще большая и кропотливая работа для перехода от разнохарактерных, труднодоказуемых гипотез и грубых прикидочных расчетов, порою обнаруживающих странное согласие и с той и с другой версиями (так бывает, когда мало наблюдательных данных или очень грубы предположения), к проверенной наблюдениями единственно верной теории.