В. Г. ГОРБАЦКИЙ

КОСМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1967

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последние годы ознаменованы бурным прогрессом в изучении Вселенной. К важнейшим из полученных результатов относятся обнаружение исключительных по своей силе космических катастроф — взрывов в ядрах галактик и открытие сверхзвезд — очень далеких объектов необычайно высокой светимости. Эти открытия привлекли внимание не только физиков и астрофизиков, но также и всех, интересующихся развитием науки.

Со взрывными процессами часто сталкивались и ранее при исследованиях звездного мира. Недавние открытия подтвердили большую роль взрывов в жизни не только звезд, но и гигантских звездных систем. Однако до сих пор не имелось последовательного и доступного для неспециалистов изложения сведений о всех видах космических взрывов — от солнечных вспышек до взрывов в ядрах галактик. Цель предлагаемой книги — в какой-то мере заполнить этот пробел.

Основное место в книге уделено физической стороне рассматриваемых космических явлений. Вместе с тем в ней производится много численных оценок, необходимых для более полного представления о взрывах. Применяемые для таких оценок несложные формулы в большинстве своем знакомы всем, изучавшим физику в средней школе. В тех случаях, когда требуется вывод формулы, он основывается на простых рассуждениях. Хотя часто они и

недостаточно строги, но отражают физическую сущность вопроса.

Объяснение природы описываемых в книге явлений составляет одну из наиболее сложных современных проблем физики. Естественно поэтому, что чтение книги, не ограничивающееся восприятием лишь внешней стороны дела, потребует от читателя известных усилий. Автор надеется, что за трудности, с которыми встретится читатель, он будет хотя бы частично вознагражден открывшейся перед ним величественной картиной грандиознейших процессов жизни Вселенной.

По мнению автора, книга доступна всем обладающим средним образованием. Представляется несомненным, что знакомство с методами, которые применялись при получении тех или иных выводов, делает эти выводы гораздо более убедительными для читателя. Поэтому в книге уделено сравнительно большое внимание описанию методов исследования, хотя, из-за ограниченности ее объема, их не во всех случаях удалось изложить достаточно подробно. К счастью, сейчас есть ряд хороших книг, по которым читатель, заинтересовавшийся тем или иным вопросом, затронутым в тексте, может ознакомиться с ним подробнее. Список таких книг, далеко не полный, дается в «Заключении».

Некоторые из затрагиваемых в книге вопросов до сих пор рассматривались только в научных статьях и систематически обсуждаются впервые, например, роль взрывов в эволюции небесных тел. Это обстоятельство может сделать книгу интересной и для более квалифицированного читателя.

Автор глубоко благодарен С. А. Каплану и В. В. Иванову, ознакомившимся с книгой в рукописи и сделавшим множество чрезвычайно ценных замечаний, а также Г. Б. Гельфрейху за ряд советов относительно § 5 книги и Э. А. Дибаю за замечания по §§ 8 и 9.

§ 1. ЧТО ТАКОЕ ВЗРЫВ?

Взрывные процессы встречаются в природе так часто, и используются в различных областях техники настолько широко, что, вероятно, сейчас нет никого, кто не имел бы представления о взрывах. Но для понимания столь сложных явлений, как взрывы в звездах, общих представлений о взрывах недостаточно. Во-первых, явления, называемые взрывами, бывают вызваны различными причинами. Так взрыв парового котла происходит, когда давление пара в котле вследствие перегрева превышает допустимое, а снаряд взрывается в результате химической реакции сгорания взрывчатого вещества. Во-вторых, взрывы различны и по своим внешним особенностям. То, что мы видим при электрическом разряде, не похоже на явления, наблюдаемые при землетрясении. Прежде чем заниматься изучением космических взрывов, нужно выяснить, что же все-таки оказывается самым существенным в явлении взрыва, какие процессы следует относить к взрывным?

Обычно взрывом называют такое изменение физического состояния тела, которое сопровождается очень быстрым превращением энергии и выделением ее в окружающую среду. Это определение позволяет объединить в понятии взрыва, казалось бы, столь несходные процессы, как ядерный взрыв и вспышка молнии, удар метеорита о Землю и взрыв баллона с газом и другие.

Непременным условием всякого взрыва должна быть быстрота перехода одной формы энергии в другую. Если процесс перехода растянут во времени, то характерные черты взрыва не возникают. Например, в ядерном реакторе непрерывно освобождается энергия за счет медленно протекающих ядерных реакций, но это не является взрывом. Если же реакция сильно ускоряется и количество

энергии, которое должно выделиться за часы, освобождается за несколько секунд, то может произойти взрыв.

В этом параграфе мы займемся изучением общих свойств взрывов, случающихся в земных условиях. При взрыве происходит превращение химической, ядерной, электрической или механической энергии, в зависимости от природы взрыва, в тепловую энергию и излучение. В некоторых случаях существенная часть освободившейся при взрыве энергии уносится из области взрыва частицами — протонами, электронами и другими. Наконец, большая кинетическая энергия может быть приобретена отдельными частями взорвавшегося тела.

Значительная часть энергии, освобожденной в процессе взрыва, преобразуется в энергию движения окружающей среды; это обычно и воспринимается как самая характерная черта взрывного процесса. При взрыве бомбы, например, происходит сильное расширение воздуха из области взрыва. Движение среды возникает главным образом за счет тепловой энергии, либо непосредственно выделившейся при взрыве, либо образованной из других видов освобожденной энергии. Поэтому для понимания сущности взрывных явлений полезно вспомнить основные понятия, относящиеся к тепловой энергии.

Что же имеется в виду, когда говорят об освобождении тепловой энергии? О выделении тепла судят по тому факту, что тела, твердые, жидкие или газообразные, прилегающие к точке взрыва, нагреваются, т. е. их температура увеличивается. Всякое тело состоит из отдельных частиц — атомов или молекул. Под температурой тела понимается мера средней энергии движения составляющих его частиц. Чем больше температура, тем быстрее движутся частицы. Следовательно, при взрыве возрастает кинетическая энергия частиц, находящихся в области взрыва. Так, например, при взрыве пороха в патроне в результате очень быстро протекающей химической реакции горения образуется нагретый газ. Химическая энергия, содержащаяся в порохе, перешла в кинетическую энергию частиц газа.

Частицы нагретого газа при столкновениях друг с другом обмениваются энергией, но суммарная энергия всех частиц газа, находящихся в данном объеме, при этом не меняется. Кинетическая энергия каждой частицы равна половине произведения массы частицы на квадрат ее скорости v. Если сложить энергии всех частиц газа и сумму

разделить на их число, то получим величину средней энергии частицы $\frac{1}{2}m\overline{v^2}$. Здесь $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости, а величину $\sqrt{\overline{v^2}}$ называют средней квадратичной скоростью *). В газе всегда имеется некоторая доля частиц со скоростями, значительно превышающими среднюю квадратичную скорость, а также частицы со скоростями, меньшими $\sqrt{\overline{v^2}}$.

Температуру тел принято определять в так называемой абсолютной шкале (в градусах Кельвина, обозначаемых ° К). В этой шкале начало отсчета соответствует нулевой энергии частиц. Эксперименты показали, что скорости частиц газа должны уменьшаться до нуля, с приближением его температуры к значению — 273°,16 по применяемой в обыденной жизни шкале Цельсия (° С). Поэтому начало отсчета абсолютной температуры — нуль градусов Кельвина — совпадает с указанным значением в ° С.

Абсолютная температура T и средняя кинетическая энергия частиц связаны соотношением

$$\frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2}kT, \qquad (1)$$

где $\frac{3}{2}k$ — коэффициент пропорциональности. Он оказывается отличным от единицы, потому что масштаб шкалы температур выбирался из соображений практического удобства. Величина k, называемая постоянной Больцмана, в системе единиц CGSE имеет значение $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град*.

По формуле (1) можно вычислить среднюю скорость движения частиц газа в зависимости от температуры. Так, например, при температуре 15° С, соответствующей 288° К, средняя квадратичная скорость молекулы азота, имеющей массу $46{,}5 \cdot 10^{-24}$ *г***), равна 467 *м/сек*.

*) Средняя квадратичная скорость не совпадает, вообще говоря, со средней скоростью. Это можно видеть хотя бы на примере системы из двух частиц, имеющих скорости v_1 и v_2. Для нее $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2}{2}$, а квадрат средней скорости равен $(\overline{v})^2 = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2}{4}$. Обычно $\overline{v^2}$ и $\overline{v}^2$ для газа разнятся не очень сильно.

**) Массу молекулы можно найти, разделив массу грамм-молекулы на число молекул в ней (число Авогадро, равное $6{,}0 \cdot 10^{23}$).

Частицы нагретого газа движутся во все стороны; он стремится занять больший объем, т. е. расшириться. Если при движении в некотором направлении частицы встречают препятствие (для простоты примем, что это твердая стенка), то они, ударяясь в стенку, стремятся ее сдвинуть. Для того чтобы удержать преграду, требуется приложить силу. Величина этой силы, отнесенная к единице площади стенки, представляет давление газа.

Наиболее заметные последствия взрывов, в частности, их разрушающие действия, обусловлены именно давлением нагретого газа. Поэтому стоит уделить внимание вопросу о том, как частицами создается давление и как его величина связана с температурой и плотностью газа. Формула, которую мы сейчас получим, будет полезной нам в дальнейшем, при изучении космических явлений.

Если частица массы m движется со скоростью v, то говорят, что она обладает количеством движения mv. Количество движения в системе тел есть величина сохраняющаяся — оно без участия внешних сил не может ни исчезнуть, ни возникнуть,— таков один из основных законов физики. Пусть за 1 *сек* в 1 $см^2$ стенки ударяет N частиц, движущихся перпендикулярно к ней со скоростью v. В том случае, когда частицы прилипают к стенке, они передают ей ежесекундно количество движения, равное Nmv. В случае же, когда частицы отражаются от стенки как мячики, они изменяют направление скорости на противоположное. Полное изменение скорости частицы равно тогда $v-(-v)=2v$, поэтому количество движения, передаваемое ими 1 $см^2$ стенки, составляет $2Nmv$.

Согласно хорошо известному из физики закону Ньютона, изменение количества движения за единицу времени равно действующей силе. В данном случае такой силой является сила, удерживающая стенку, поскольку именно благодаря ей стенка остается на месте, а частицы отражаются. Эта сила, как мы уже говорили, и представляет давление газа, которое, следовательно, равно $2Nmv$.

Допустим, что газ заключен в куб и частицы газа могут двигаться лишь перпендикулярно к граням куба, причем все они имеют одно и то же значение скорости. Тогда в сторону каждой из граней будет направляться одна шестая доля всех частиц. За одну секунду до преграды долетят лишь те из частиц, которые находятся от нее на расстоянии, не большем чем v. Более далекие частицы

за это время долететь до грани не успеют. Следовательно, за секунду на один квадратный сантиметр каждой грани попадает одна шестая часть от общего числа частиц, заключенных в столбике с основанием 1 $см^2$ и высотой v. Если число частиц в 1 $см^3$ газа n, то, поскольку объем этого столбика численно равен v, он содержит всего nv частиц, из которых ударяет в данную грань $N = \frac{1}{6} nv$ частиц. Поэтому для величины давления на грань получается выражение $\frac{1}{3} nmv^2$.

Сделанные нами предположения о характере движения частиц, конечно, не осуществляются в действительности. На самом деле частицы газа движутся с различными скоростями и под всевозможными углами к преграде. Но, тем не менее, оказывается, что и при точном вычислении давления получается такая же величина $\frac{1}{3} nmv^2$, причем под v надо понимать среднюю квадратичную скорость частиц газа. Так как согласно формуле (1) $m\bar{v}^2 = 3kT$, то величина давления, обозначаемая нами P, определяется соотношением

$$P = nkT. \qquad (2)$$

Формула (2) является другой формой записи известного из школьного курса физики закона Клапейрона. Действительно, число частиц n в 1 $см^3$ равно числу частиц в грамм-молекуле A (числу Авогадро), деленному на занимаемый ею объем V. Подставляя в формулу (2) вместо n отношение $\frac{A}{V}$ и учитывая, что произведение $Ak = 6 \cdot 10^{23} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-16} = 8{,}3 \cdot 10^7$ *эрг/град · моль* и есть величина универсальной газовой постоянной R, получаем выражение закона Клапейрона: $PV = RT$.

Стенка, в которую ударяют частицы газа, считалась нами «идеально отражающей». Это означает, что частицы после отражения имеют ту же скорость (по величине, но не по направлению), что и до столкновения. Если же величина скорости в результате столкновения меняется, т. е. стенка не является идеальным отражателем, то при ударе меняется и кинетическая энергия частицы. Пусть скорость частицы, летящей к стенке, равна v_1, а после столкновения она имеет скорость v_2. В случае, когда v_2 меньше v_1,

частица потеряла энергию, равную разности $\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$. Потерянная энергия распределилась между атомами, составляющими стенку, и заставила их двигаться быстрее (атомы в твердом теле также находятся в движении, но оно имеет колебательный характер). Температура стенки увеличилась: газ, отдав часть своей энергии, нагрел преграду. Если же температура стенки выше, чем газа, то налетающие частицы газа снабжаются в момент столкновения дополнительной энергией, отбираемой у частиц стенки и, отразившись, имеют скорость бóльшую, чем до удара. Таким образом, нагретое твердое тело, соприкасаясь с более холодным газом и отдавая газу часть своей энергии, нагревает его.

Вернемся теперь к изучению взрывов. После того как энергия, послужившая источником взрыва,— химическая, ядерная или другая — преобразуется в тепловую энергию, давление газа, образовавшегося при взрыве (или имевшегося ранее во взрывающемся теле), сильно возрастает. Сила давления, действуя на окружающие тела, заставляет их двигаться и, значит, совершает работу. Таким путем часть энергии взрыва переходит в механическую (кинетическую) энергию.

На этом принципе основано действие двигателя внутреннего сгорания, в цилиндрах которого происходит серия небольших взрывов. Давление газа, образовавшегося при взрыве горючей смеси, заставляет двигаться поршень и через его посредство, например, автомобиль. Энергия взрывов при этом частично расходуется на нагрев цилиндра и поршня.

В тех случаях, когда взрыв происходит внутри твердого тела и давление оказывается настолько большим, что силы сцепления между частями тела не могут ему противостоять, происходит разрыв тела. Оторвавшиеся при этом части обладают кинетической энергией. Так происходит взрыв снаряда, который на своем конечном этапе сводится к преобразованию тепловой энергии в механическую.

Процессы перехода тепловой энергии в энергию движения жидкости или газа значительно сложнее описанного. В этих случаях движение осуществляется в форме взрывной волны — хорошо известного всем явления. Действием взрывной волны, например, выбиваются стекла в доме, находящемся довольно далеко от места сильного взрыва.

Взрывную волну иначе называют ударной волной. Сейчас мы схематически рассмотрим образование ударной волны, причем ограничимся лишь ударными волнами в газе — с жидкостями при изучении космических взрывов не приходится иметь дела.

Ударная волна представляет собой особую форму движения газа. В повседневной жизни мы все время встречаемся с различными видами движения воздуха. В частности, колебательное движение воздуха происходит при распространении звука. Источник звука периодически вызывает сжатие прилегающего к нему слоя воздуха. В этом слое давление возрастает и воздух в нем стремится расшириться, в свою очередь сжимая следующий, примыкающий к нему слой. Последовательность быстро чередующихся сжатий и разрежений воздуха и представляет собой звуковую волну. В обычных условиях скорость распространения этой волны в воздухе около 330 *м/сек*.

Изменения плотности воздуха при сжатиях и разрежениях в звуковой волне очень малы. Поэтому говорят, что звуковые колебания представляют собой слабые возмущения состояния воздуха. Скорость распространения таких возмущений определяется движением молекул. Ведь расширение сжатого слоя газа происходит в результате разлета составляющих его частиц и следующий слой сожмется лишь тогда, когда «почувствует» действие частиц расширяющегося слоя. Поэтому-то найденное нами выше значение средней квадратичной скорости молекул азота по порядку величины соответствует экспериментальному значению скорости звука*). Следовательно, чем выше температура газа, тем быстрее в нем распространяются звуковые колебания.

Взрыв обычно сопровождается сильным возмущением состояния газа, которое и называется ударной волной. Возникновение ударной волны связано с быстрым и сильным сжатием газа. Этот процесс удобно рассматривать, представив себе, что в очень длинную трубу, наполненную газом, ускоренно вдвигается поршень. Предположим, что скорость поршня увеличивается скачками (рис. 1) — ведь ускоренное движение всегда можно приближенно

---

*) Совпадение оказывается не вполне точным, потому что сжатие воздуха производится не только молекулами, летящими в направлении распространения звука, но и движущимися под углом к нему, так что скорость их в данном направлении меньше.

представить как результат большого числа скачкообразных изменений скорости.

В первую очередь сожмется газ вблизи поршня. Так как вначале скорость поршня мала, то возмущение газа слабое и распространяется со скоростью звука. Оно не может сразу охватить весь газ, заключенный в трубе. Поэтому в газе существует область, затронутая возмущением (волна сжатия), и невозмущенная область.

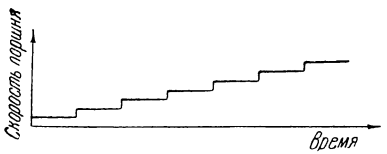

Рис. 1. Изменение скорости поршня со временем.

В результате сжатия газ нагревается. (Это явление, хорошо известное всякому, заметно хотя бы при накачивании велосипедной камеры.) Дело в том, что работа, производимая при вдвигании поршня в трубу, лишь частично расходуется на сообщение газу кинетической энергии. Частицы газа сталкиваются с движущимся поршнем и после отражения от него обладают большей кинетической энергией, чем до столкновения. Поршень отдает частицам свою кинетическую энергию, причем полученная ими энергия распределяется среди других частиц. В результате средняя энергия частиц, т. е. температура газа, увеличивается. Так как частицы газа обладают преимущественной скоростью в направлении движения поршня (ведь они получают от него некоторое количество движения), то весь газ в волне сжатия движется как целое в том же направлении, что и поршень.

При следующем скачкообразном увеличении скорости поршня по газу снова распространится возмущение. Поскольку газ нагрет предыдущим сжатием, оно пройдет быстрее первоначального и поэтому нагонит границу волны сжатия. Но перегнать эту границу возмущение не может, потому что скорость всех звуковых волн в невозмущенном газе (впереди волны сжатия) одна и та же. Догнав границу, второе возмущение увеличит перепад давления и плотности на ней. Последующие возмущения, возникающие при дальнейшем ускорении поршня, продолжают увеличивать резкость перехода от области сжатого газа к невозмущенному.

При обычных течениях газа температура и плотность в нем плавно меняются от точки к точке. В рассматриваемом же случае создается иное положение. Когда скорость

поршня станет достаточно большой, будет заметно, что состояние газа скачкообразно изменяется (рис. 2). Та поверхность, на которой происходит это изменение, называется фронтом ударной волны. Сила волны определяется перепадом давления на ее фронте. Чем больше давление за фронтом по сравнению с давлением в невозмущенном газе, тем сильнее волна.

Практически фронт ударной волны — это очень тонкий слой газа, внутри которого и меняются величины, характеризующие состояние газа — плотность, температура и давление. Фронт волны движется в ту же сторону, что и поршень (быстрее поршня), захватывая все новые области газа. При этом газ уплотняется и нагревается, получая одновременно некоторую скорость в направлении движения волны.

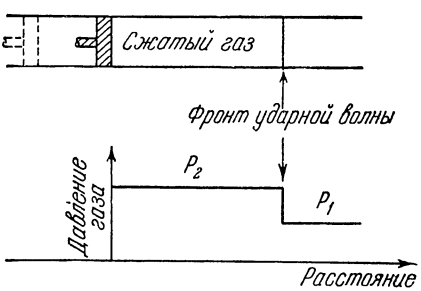

Рис. 2. Распределение давления в газе, по которому распространяется ударная волна. Пунктиром представлено начальное положение поршня.

В образовании ударных волн при взрывах роль поршня играет расширяющийся газ, давление в котором, как мы уже отмечали, возрастает в результате его нагрева. Если условия расширения во все стороны одинаковы, то фронт волны имеет форму сферы с центром в точке взрыва. После того как продукты взрыва расширились и охладились, давление в волне падает. Волна ослабляется, потому что ее энергия затрачивается на нагрев и приведение в движение все новых масс газа, а компенсации потерь энергии не происходит.

Количество вещества, захватываемое фронтом сферической ударной волны, возрастает при ее движении от точки взрыва. На расстоянии R от этой точки оно пропорционально R^2, т. е. площади сферы. Поэтому сила сферической волны уменьшается с расстоянием гораздо быстрее, чем, например, сила образованной поршнем в трубе плоской волны.

В энергию ударной волны может переходить в конечном счете энергия, выделившаяся при взрыве в других

формах, а не только тепловая. Так, например, излучение, возникшее в процессе ядерного взрыва, за очень короткое время нагревает воздух вблизи точки взрыва. Давление там увеличивается и при расширении нагретого воздуха создается ударная волна, распространяющаяся на большое расстояние.

Действие сильной ударной волны сказывается, во-первых, в том, что ею приводятся в движение большие массы вещества и, во-вторых, в нагревании газа, вызывающем его свечение. Оба эти обстоятельства оказываются очень важными для исследования космических взрывов, так как по движению и свечению небесных тел можно судить о силе космических взрывов и других их особенностях.

В заключение этого параграфа, до того как перейти к изучению космических взрывов, скажем о количественных характеристиках взрывов. Прежде всего, взрывы различаются по количеству освобождаемой энергии. В качестве условной единицы принимается энергия, выделяемая при взрыве одного килограмма сильного взрывчатого вещества — тринитротолуола (ТНТ). Она равна 10^6 калорий. Одна калория эквивалентна $4{,}18 \cdot 10^7$ эргов (единиц энергии в системе CGSE) или 4,18 джоуля (единиц энергии в системе СИ)*). Значит, взрыв одного килограмма ТНТ приводит к освобождению энергии в количестве $4{,}2 \cdot 10^{13}$ *эрг* или $4{,}2 \cdot 10^6$ *дж*. По выделению энергии мегатонная термоядерная бомба соответствует миллиону тонн или 10^9 *кг* ТНТ. Следовательно, взрыв такой бомбы дает $4{,}2 \cdot 10^{22}$ *эрг* энергии.

Действие взрыва на окружающую среду зависит не только от общего количества освободившейся энергии, но и от того, насколько быстро она выделяется. При делении энергии взрыва на время, за которое выделилась энергия, получаем величину, называемую мощностью взрыва. Если, например, взрыв мегатонной бомбы занимает 1/1000000 секунды, то ее мощность составляет $\frac{4{,}2 \cdot 10^{22}}{10^{-6}} = 4{,}2 \cdot 10^{28}$ *эрг/сек или* $4{,}2 \cdot 10^{21}$ *дж/сек*. Единица мощности, соответствующая одному джоулю за секунду, назы-

*) В дальнейшем мы будем пользоваться системой CGSE, а читатель при желании сможет перевести ту или иную величину в систему единиц СИ, пользуясь указанным соотношением.

вается ватт, а в тысячу раз большая величина — киловатт. Таким образом, мощность мегатонной бомбы составляет $4{,}2 \cdot 10^{18}$ киловатт, тогда как мощность самых крупных гидроэлектростанций не превосходит нескольких миллионов киловатт. Для выработки энергии, равной освободившейся при взрыве мегатонной бомбы, требуется более десяти суток работы электростанции мощностью 4 миллиона киловатт. Величина мощности особенно существенна для земных взрывов, так как именно ею определяется разрушающее действие взрыва.

§ 2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ

Выяснение природы земных взрывов обычно не вызывает затруднений. Не только при созданных искусственно, но и при естественных взрывах бывает известно, преобразование какой энергии вызвало взрыв. Основное внимание обращается на изучение эффектов, сопровождающих взрывы, таких, как ударные волны, звуковые волны, свечение. Эти явления регистрируются непосредственно при помощи различных приборов.

При исследовании же космических взрывов зачастую трудно сказать с уверенностью, каков источник энергии взрыва. Этот вопрос может быть решен только после тщательного изучения всех доступных наблюдению явлений, вызванных взрывом.

Трудности в исследовании космических взрывов, как и других астрономических явлений, обусловлены главным образом чрезвычайной удаленностью космических объектов от наблюдателей. Расстояние даже до ближайшего к Земле небесного тела, Луны, более чем в девять раз превосходит длину земного экватора. Солнце же находится в 400 раз дальше от Земли, чем Луна, — на расстоянии 150 миллионов километров. И даже эта величина оказывается очень малой по сравнению с расстоянием, отделяющим нас от соседних звезд.

Для действия любого прибора, используемого при изучении взрыва, нужно, чтобы до прибора дошла некоторая часть энергии, освободившейся при взрыве. Получаемая земными наблюдателями доля энергии взрыва, происшедшего на отдаленном небесном теле, ничтожно мала, потому,

что эта энергия при удалении от точки взрыва, распространяясь по пространству, занимает все больший объем. Назовем потоком энергии F количество ее, проходящее через площадку в 1 $см^2$, расположенную перпендикулярно к направлению распространения энергии за 1 *сек*, и найдем, как меняется F с расстоянием от точки взрыва. Пусть носителями энергии являются частицы, разлетающиеся от этой точки. Если частицы в пространстве не поглощаются и новые там не возникают, то при неизменной скорости частиц энергия, проходящая через любую сферу с центром в точке взрыва, одинакова. Энергия же, приходящаяся на 1 $см^2$, обратно пропорциональна площади сферы и, значит, квадрату ее радиуса. Поэтому поток энергии в данном месте обратно пропорционален квадрату расстояния до точки взрыва, т. е. для потоков F_1 и F_2 на расстояниях r_1 и r_2 имеем соотношение

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \qquad (3)$$

Эта формула остается справедливой независимо от того, о какой энергии идет речь, если только она распространяется одинаково во всех направлениях (или в пределах конуса с вершиной в точке взрыва). В частности, для световой энергии формула (3) дает хорошо известный из курса физики закон ослабления силы света с удалением от источника. Если на пути к наблюдателю энергия данного вида исчезает, например, механическая энергия переходит в тепловую, то поток энергии уменьшается быстрее, чем следует из формулы (3).

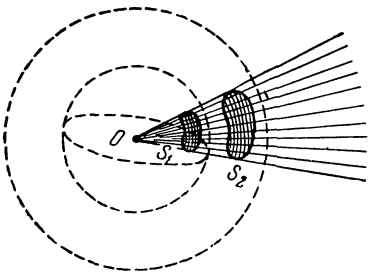

Рис. 3. Распространение энергии от точки взрыва. Поток энергии изменяется обратно пропорционально площади сферы с центром в точке взрыва.

Приборы на Земле не в состоянии зарегистрировать механическую энергию даже очень сильных взрывов, происходящих на звездах. Ударные волны, распространяющиеся в межзвездном газе, затухают на сравнительно малом расстоянии от точки

взрыва. Кроме того, скорости ударных волн в сотни и тысячи раз меньше скорости распространения излучения. Луч света, чтобы дойти от ближайших звезд до Земли, затрачивает годы. А механическая энергия взрыва, если бы и дошла до Земли, то настолько ослабленной и с таким опозданием, что ее невозможно было бы приписать тому или иному взрыву.

Так же плохо обстоит дело с непосредственной регистрацией на Земле всех других видов энергии звездного взрыва, кроме электромагнитного излучения (одной из форм которого является видимый свет). Существует, правда, теоретическая возможность наблюдения частиц, летящих со скоростью, почти равной скорости света, таких, например, как нейтрино. Однако приборы, регистрирующие частицы высоких энергий, пока не обладают достаточной чувствительностью, чтобы «замечать» столь слабые потоки частиц от звездных взрывов, какие можно ожидать на Земле. Вместе с тем, поскольку частицы, обладающие зарядом (электроны, протоны), вследствие различных воздействий движутся в пространстве не прямолинейно, приписать происхождение наблюдаемых частиц конкретному звездному взрыву невозможно.

Практически единственным источником информации о космических взрывах пока остается электромагнитное излучение, идущее из области взрыва. Поэтому они изучаются теми же методами, которые применяют в астрономии для исследования физических свойств небесных тел — ведь только излучение этих тел и может быть наблюдаемо. О том, как, анализируя доходящее до нас излучение небесных тел, узнают о происходящих на них процессах, и рассказывается в этом параграфе.

Электромагнитное излучение возникает при неравномерном (ускоренном) движении электрических зарядов. Любой заряд создает в прилегающем пространстве электрическое поле. Так называют область, в которой проявляется действие этого заряда на любой другой заряд. Движущиеся заряды создают также и магнитное поле. Это хорошо известный факт, демонстрируемый простыми опытами. Например, все знают, что вблизи проводника с током обнаруживается действие силы на магнит, а это и означает присутствие магнитного поля. Ток же представляет собой движущиеся заряды. Таким образом, вблизи движущегося заряда существуют два поля — электри-

ческое и магнитное*). О них говорят как о едином электромагнитном поле.

При изменении величины или направления скорости заряда создаваемое им электромагнитное поле также меняется. Всякое изменение поля распространяется со скоростью 300 000 *км/сек* (эту скорость принято обозначать буквой *с*). Эти изменения поля представляют собой электромагнитные волны. Так, например, электрон, оторвавшийся от атома и летящий прямолинейно, при встрече с протоном, имеющим противоположный заряд, испытывает действие поля протона. Направление скорости движения электрона изменяется под действием силы притяжения к протону. Электрон движется не по прямой, а по кривой, называемой гиперболой. В процессе движения кинетическая энергия электрона уменьшается — часть ее переходит в энергию электромагнитного поля и уносится в пространство. Такой процесс называется излучением при свободно-свободных переходах, потому что электрон остается свободным, не связанным с атомом.

В том случае, когда электрический заряд колеблется, т. е. его движение повторяется с некоторым периодом, поле, создаваемое зарядом, меняется также периодически. Распространяющиеся изменения поля называются электромагнитными колебаниями. Они представляют собой весьма важный вид электромагнитных волн, так как всякое изменение поля, в частности, и при свободно-свободном переходе, можно представить как сумму колебаний.

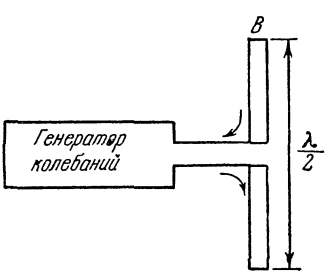

Рис. 4. Дипольный излучатель. Генератор колебаний периодически изменяет направление движения зарядов в диполе.

Простейший прибор для образования электромагнитных колебаний — его называют дипольным излучателем — можно составить из двух отрезков проводника, соединенных с генератором (рис. 4). Генератор заставляет электроны в проводнике двигаться попеременно в ту и другую сторону.

*) На самом деле поле от любого заряда охватывает все пространство, но его напряженность убывает быстро и практически поле можно обнаружить лишь достаточно близко от заряда.

Энергия, переносимая электромагнитными волнами, распространяющимися от такого излучателя, возникает в результате работы силы, изменяю ей направление движения зарядов в проводнике.

Период создающихся колебаний определяется периодом силы, действующей на заряды. Вместо периода колебания удобнее характеризовать частотой, равной числу колебаний за 1 *сек*. Для увеличения частоты колебаний, т. е. для того, чтобы электроны в проводнике чаще меняли направление своего движения, нужно затратить за то же время больше работы. Следовательно, с возрастанием частоты электромагнитных колебаний растет и мощность излучения, как в случае, когда колеблется совокупность зарядов, так и при колебаниях отдельного заряда — электрона.

Наряду с частотой колебаний, которую мы обозначим ν, используется величина, называемая длиной волны и обозначаемая λ. Длина волны связана с частотой простым соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \tag{4}$$

Смысл соотношения (4) очевиден. Действительно, за одну секунду волна проходит расстояние, равное c, и на отрезке такой длины должны уместиться все испущенные за это время волны. Число волн равно ν, поэтому расстояние между соответствующими точками двух соседних волн, скажем, между их гребнями, будет $\frac{c}{\nu}$.

Длина волны электромагнитного излучения определяется характером источника колебаний. В отношении ее величины нет ограничений, т. е. может существовать излучение с любой длиной волны. Свойства излучения зависят от λ. Поэтому различают тот или иной вид электромагнитного излучения в зависимости от того, какова область длин волн (диапазон), соответствующих данному виду. Так, излучение с длинами волн от нескольких тысяч метров до нескольких миллиметров относят к радиоизлучению. В радиодиапазоне в свою очередь выделяются области длинных, средних, коротких, метровых, сантиметровых и миллиметровых волн.

Излучению, видимому глазом, соответствует довольно узкая область шкалы длин волн от $\lambda = 4 \cdot 10^{-5}$ *см* до

$\lambda = 7 \cdot 10^{-5}$ *см*, называемая оптическим диапазоном Еще сравнительно недавно, лет тридцать-сорок назад, при исследовании небесных тел приходилось ограничиваться их излучением лишь в этом участке шкалы. При $\lambda = 4 \times \times 10^{-5}$ *см* излучение воспринимается как имеющее фиолетовый цвет, а при $\lambda = 6{,}5 - 7 \cdot 10^{-5}$ *см* — красный. Длины волн больше $7 \cdot 10^{-5}$ *см* соответствуют так называемому инфракрасному излучению. Инфракрасный диапазон смыкается с диапазоном миллиметровых волн.

Разделение шкалы длин волн на диапазоны условно и вызвано главным образом тем, что существующие приемники могут регистрировать излучение лишь в какой-либо одной области длин волн. Так, например, радиоприемники совершенно нечувствительны к излучению оптического диапазона, а глаз не воспринимает радиоволн.

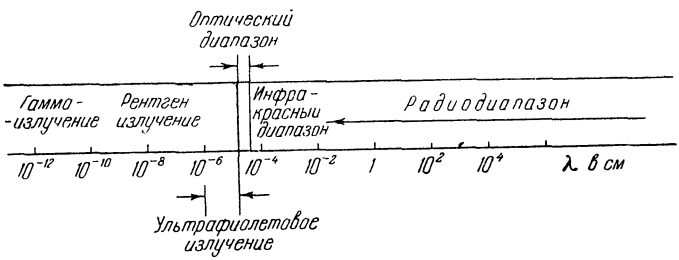

Рис. 5. Шкала длин волн электромагнитного излучения.

Кроме того, способность проникать сквозь земную атмосферу также неодинакова для излучения различных длин волн. Атомы и молекулы, составляющие атмосферу, рассеивают и поглощают энергию электромагнитных колебаний, но по-разному, в зависимости от частоты колебаний. Например, оптическое излучение сильно рассеивается в облаках, но мало рассеивается при их отсутствии, а излучение в миллиметровом диапазоне поглощается молекулами воды, находящимися в атмосфере, гораздо сильнее, и это поглощение существенно даже при отсутствии облаков. Для метровых и сантиметровых радиоволн земная атмосфера сравнительно прозрачна. Излучение же с большими длинами волн поглощается и отражается внешними слоями атмосферы. О причинах этого явления подробно говорится ниже (§ 5).

Таким образом, указание на диапазон длин волн излучения определяет характер приемника излучения и доступность этого излучения для наблюдений сквозь атмосферу. Нижние слои атмосферы Земли совершенно непрозрачны, в частности, для излучения с длинами волн, лежащими в интервале от $3 \cdot 10^{-5}$ *см* до 10^{-6} *см*. Наблюдение излучения небесных тел в этом диапазоне (ультрафиолетовое излучение) возможно только при условии вывода прибора из нижних слоев атмосферы и осуществляется путем установки соответствующих приборов на космических ракетах и искусственных спутниках Земли. Но даже в таких условиях в области от $\lambda = 9 \cdot 10^{-6}$ *см* до 10^{-6} *см* доступно наблюдению лишь излучение Солнца и тел солнечной системы. Излучение звезд в этом промежутке длин волн до Земли не доходит, потому что разреженный газ, заполняющий межзвездное пространство, для него непрозрачен.

Часть шкалы длин волн, соответствующая значениям λ от 10^{-6} *см* до 10^{-8} *см*, называется областью рентгеновского излучения, а излучение более коротких волн называют гамма-лучами. Эти виды излучения не проходят сквозь толщу земной атмосферы и их, как и ультрафиолетовое излучение, приходится наблюдать, вынося аппаратуру за ее пределы.

Представление о том, что электромагнитное излучение имеет волновую природу, подтверждается рядом опытов. Однако этому представлению, казалось бы, противоречат другие факты, указывающие, что в ряде случаев излучение ведет себя как поток частиц. На самом деле, никакого противоречия нет, а указанное обстоятельство объясняется сложностью явления. Электромагнитное излучение нельзя полностью описать, сопоставляя его лишь с одной из двух возможных форм переноса энергии — частицами или волнами. В нем проявляются и свойства частиц, и свойства волн. Мы не имеем возможности здесь останавливаться на обсуждении этого интереснейшего вопроса, так как ушли бы далеко от темы книги.

В дальнейшем мы часто будем пользоваться представлением об излучении, как о потоке частиц. Эти частицы называют квантами излучения или фотонами. Фотоны летят всегда со скоростью c и при этом каждый из них обладает энергией $h\nu$, где h — так называемая постоянная Планка, равная в системе единиц CGSE $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*. При данном потоке энергии число квантов в нем

тем меньше, чем выше частота излучения. Поэтому свойства излучения, как потока частиц, сильнее проявляются при малых длинах волн. Излучение в радиодиапазоне в большинстве случаев удобнее представлять как волны. Ультрафиолетовое, рентгеновское и, тем более, гамма-излучение проявляют себя в основном как частицы. Это играет существенную роль в устройстве приемников для излучения того или иного вида.

Хотя в настоящее время техника наблюдения ультрафиолетового и рентгеновского излучений быстро развивается, почти вся имеющаяся информация о небесных телах и взрывах на них получена из наблюдений оптического и радиоизлучения *). Ниже мы будем говорить главным образом об этих видах излучения.

В качестве приемников, регистрирующих оптическое излучение, помимо глаза служат фотопластинки и фотоэлементы. Недостатком фотопластинок как приемника излучения является их малый «коэффициент полезного действия». Из тысячи попавших на пластинку фотонов только один-два регистрируются ею, оставляя след. Гораздо более эффективным приемником оказывается фотоэлемент, преобразующий энергию излучения в энергию движения электронов. У современных приборов этого типа, применяемых для изучения небесных тел, коэффициент использования светового потока высок — из каждых десяти фотонов, попавших в прибор, регистрируется один-два.

Человеческий глаз, являющийся очень чувствительным приемником излучения, как прибор имеет большой недостаток: результаты наблюдений слабых потоков излучения нельзя быстро и автоматически зафиксировать. Поэтому сейчас наблюдения непосредственно глазом производятся редко. Существуют, помимо указанных, и другие приемники оптического излучения, о которых здесь мы рассказывать не будем.

Для того чтобы увеличить количество энергии излучения, поступающей в приемник, применяют телескопы. Телескоп-рефлектор имеет параболическое зеркало, обладающее способностью собирать в одной точке — фокусе — все падающие на него лучи. Количество света, собирае-

---

*) Исключение в этом отношении представляет Солнце, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения которого в последние годы успешно наблюдаются со спутников и ракет.

мого телескопом, во столько раз больше попадающего непосредственно в глаз, во сколько площадь зеркала превосходит площадь зрачка. У самого крупного из современных оптических телескопов диаметр зеркала равен 5 *м*. Площади зеркала и зрачка относятся как квадраты их диаметров. Так как диаметр зрачка 0,5 *см*, то зеркало этого телескопа собирает в $\frac{(500)^2}{(0,5)^2} = 10^6$ раз больше энергии, чем глаз.

При наблюдениях излучения в радиодиапазоне для увеличения количества принимаемой энергии используют радиотелескопы. Излучение собирается металлической антенной — параболической либо плоской. Размеры параболических антенн измеряются десятками метров, а плоских — сотнями метров. Поскольку по площади собирающей энергию поверхности радиотелескопы во много раз превосходят оптические, то они способны обнаруживать очень слабые источники излучения, недоступные пока для оптических наблюдений. Собранная антенной энергия радиоизлучения по кабелю направляется в приемник, где сигналы усиливаются, модулируются и затем идут в записывающее их устройство.

Какая же информация извлекается из наблюдений электромагнитного излучения? Конечно, прежде всего такими наблюдениями определяется положение источника излучения на небе, форма источника, а при известном расстоянии до излучающего небесного тела также размеры тела и общее количество излучаемой энергии. Этих сведений обычно недостаточно для того, чтобы определить физическое состояние небесного тела, и тем более, для выяснения природы происшедшего на нем взрыва. Гораздо более обширную информацию о физическом состоянии небесных тел получают, исследуя не общее, или, как говорят, интегральное их излучение, а излучение в отдельных узких промежутках длин волн. Для лучшего понимания методов таких исследований познакомимся подробнее с процессами, обусловливающими излучение тел. Так как подавляющее большинство небесных тел состоит из газа, причем имеющего высокую температуру, то мы ограничимся описанием процессов свечения нагретого газа.

Газ, как и все другие тела, состоит из атомов, представляющих собой системы заряженных частиц. Вокруг ядра атома, имеющего положительный заряд, движутся

электроны, заряд которых отрицателен. Если заряд ядра равен суммарному заряду электронов, то атом называют нейтральным, а в том случае, когда это условие не выполняется — ионом. Простейшим из всех является атом водорода, обладающий всего одним электроном. Ядро атома водорода называется протоном. У следующего по сложности атома — гелия — ядро, вчетверо превосходящее по массе ядро атома водорода, состоит из двух протонов и двух частиц, называемых нейтронами, лишенных заряда и очень близких по своей массе к протону. Электронов в атоме гелия также два.

Энергия движения электрона в поле ядра не может быть произвольной. Для каждого атома существует некоторый набор (совокупность) допустимых значений энергии электрона — энергетических состояний атома. О причинах, вызывающих эту особенность строения атомов, рассказать здесь не представляется возможным, так как соответствующая теория слишком сложна. Отметим только, что указанный факт подтвержден огромным числом физических экспериментов.

Ядро атома и электрон взаимно притягиваются как частицы, обладающие противоположными зарядами. Эта сила притяжения уравновешивается другой силой, возникающей вследствие движения электрона вокруг ядра *). Чтобы удалить электрон от ядра, перевести его на орбиту большего радиуса, нужно совершить работу против силы электростатического взаимодействия его с ядром. Если же, наоборот, электрон приблизится к ядру, то в атоме освободится некоторая энергия. Вследствие указанной выше особенности строения атома — допустимости только некоторых определенных значений энергии электрона, атом может поглощать и отдавать энергию только отдельными порциями, соответствующими разности энергий двух допустимых для него состояний. Часто говорят не о состоянии, а об энергетическом уровне электрона. Каждому состоянию атома соответствует некоторое определенное значение энергии электрона и переход атома из одного состояния в другое представляет собой изменение энергетического уровня электрона.

---

*) Такое представление о характере сил, действующих в атоме, является весьма неточным, но для качественного объяснения процессов свечения газа оно достаточно.

В атоме, не испытывающем внешних воздействий, электрон движется по той из возможных орбит, которая является ближайшей к ядру. Это состояние атома, в котором он обладает наименьшей энергией, называется основным. Атом, находящийся в основном состоянии, не способен излучить энергию — ведь нет таких более низких энергетических уровней, на которые мог бы перейти электрон. Заметим,

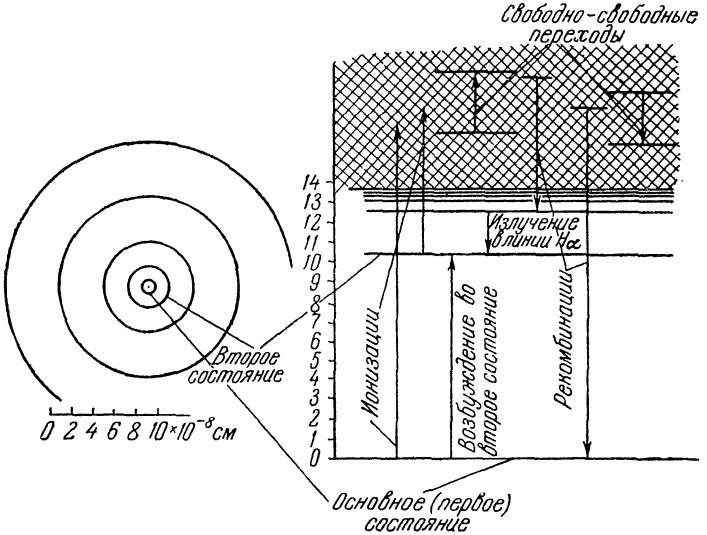

Рис. 6. Атом водорода и его энергетические уровни. Слева: круговые орбиты электрона (внизу дан масштаб), справа: схема энергетических уровней с обозначением различных переходов электрона. Заштрихованная область соответствует свободному электрону (гиперболические орбиты). Слева указана энергия состояний в электронвольтах (1 *эв* = 1,60 · 10^{-12} *эрг*), отсчитываемая от основного состояния, энергия которого принята равной нулю.

что в соответствии со сказанным нами ранее электрон должен был бы излучать и в этом состоянии, поскольку всякий заряд, двигаясь не прямолинейно, излучает. Но в масштабах атома, как говорят, в микромире, происходит нарушение законов, установленных при опытах с электромагнитным полем и выведенных теоретически для тел больших масштабов — макромира. В микромире существуют особые законы, изучаемые в специальной области физики, которая называется квантовой механикой.

Частицы, составляющие газ, при столкновениях обмениваются кинетической энергией. Эти столкновения не всегда бывают похожими на удары упругих шаров. В том случае, когда атом сталкивается с частицей, кинетическая энергия которой больше разности энергий какого-либо из допустимых состояний атома и основного состояния, атом может перейти из основного состояния в другое. Такой процесс называют возбуждением атома. Он заключается в переходе электрона на более высокий энергетический уровень. В рассматриваемом случае возбуждение атома происходит за счет тепловой энергии газа.

Атом остается возбужденным, как правило, очень малое время — порядка стомиллионной доли секунды, по истечении которого он возвращается в основное состояние либо сразу, либо через промежуточные состояния. При этом атом испускает электромагнитное излучение — один или несколько фотонов. Общая энергия фотонов равна той кинетической энергии, которая была затрачена на возбуждение атома. Таким образом, в конечном счете часть тепловой энергии газа перешла в энергию излучения.

Если кинетическая энергия частицы, сталкивающейся с атомом, достаточно велика, то электрон может быть удален на большое расстояние от ядра, т. е. попросту выбит из атома. При таком процессе, называемом ионизацией столкновением, образуются ион и свободный, не связанный с атомом электрон. Свободные электроны входят в состав газа и могут обмениваться энергией с другими частицами. Возбуждение и ионизация атома возможны, вообще говоря, при столкновении его с любой частицей, лишь бы энергия частицы была достаточно большой. Но особенно эффективными в этом отношении являются электроны.

В газе происходят и процессы, обратные только что рассмотренным, т. е. переход энергии излучения в тепловую энергию. Так случается, например, когда атом встречает фотон, энергия которого больше, чем нужная для ионизации. Тогда происходит отрыв электрона от атома, причем свободный электрон за счет избытка энергии фотона снабжен некоторой кинетической энергией, распределяющейся затем среди других частиц. По-иному происходит преобразование энергии, когда фотон не может ионизовать атом, а лишь возбуждает его. Если за то время, которое атом остается возбужденным, он успеет столкнуться с какой-либо частицей, то может передать ей энер-

гию, затраченную на возбуждение. Кинетическая энергия частицы увеличится, атом же перейдет в основное состояние без излучения. Так как фотон в конечном счете исчезает, то говорят, что в этом процессе произошло истинное поглощение излучения, т. е. его энергия перешла в тепловую энергию газа.

Атомы можно заставить излучать, лишь предварительно снабдив их энергией. Помимо частиц самого газа, возбуждение атомов способны вызывать частицы, попадающие в газ извне, если они обладают достаточной кинетической

Рис. 7. Спектр излучения водорода.

энергией, или падающее на газ электромагнитное излучение — поток фотонов. Возбужденные тем или иным способом атомы испускают излучение не любой длины волны, а лишь такие фотоны, энергия которых равна разности энергий атома в каких-либо двух состояниях из допустимого набора их

Количество энергии, излучаемой телом, зависит от длины волны излучения. Эту зависимость называют спектром излучения тела. В спектре излучения газа, не содержащего ионизованных атомов, излучение сосредоточено только в узких промежутках шкалы длин волн. Эти пики излучения называют эмиссионными спектральными линиями. Величина соответствующего промежутка шкалы длин волн называется шириной линии. Каждая линия соответствует переходу между двумя энергетическими уровнями электрона в атоме, т. е. фотон в частоте этой линии излучается при переходе электрона с уровня, на котором он обладает большей энергией, на уровень с меньшей энергией. Ширина линии хотя и мала, но все же отлична от нуля, так как энергия атома в возбужденном состоянии не является строго определенной. В силу специфики строения микромира можно утверждать лишь, что существует интервал значений, правда, очень узкий, в котором лежит и значение этой энергии — энергетический уровень, как говорят, не резок, а «размазан».

Спектр излучения газа, содержащего ионы и свободные электроны (такой газ называют плазмой), отличается от спектра неионизованного газа. Электроны плазмы, сое-

диняясь с ионами, образуют нейтральные атомы,— происходит, как говорят, рекомбинация атомов. Полная энергия атома, образовавшегося из свободного электрона и иона, меньше, чем она была у этих частиц до их соединения: ведь для того, чтобы преобразовать атом в две отдельные частицы, надо затратить энергию. Излишек энергии при рекомбинации уходит из системы электрон — ион в форме излучения. Ионами могут захватываться электроны с любой кинетической энергией и, значит, уходящий излишек энергии в разных случаях различен. Поэтому при рекомбинациях плазма будет излучать фотоны не в отдельных частотах, а в широком интервале частот. О таком излучении говорят, что спектр его непрерывный.

Непрерывным спектром обладает также излучение плазмы, возникающее при свободно-свободных переходах. Изменение энергии электрона при таком переходе зависит от условий столкновения с протонами. Поэтому при различных столкновениях излучаются фотоны разной энергии, что и создает сплошной спектр.

Помимо указанных процессов, образование сплошного спектра излучения в телах большой плотности, как твердых, так и газообразных, вызывается сильными взаимодействиями между атомами. Эти взаимодействия приводят к смещению энергетических состояний атомов и перекрытию спектральных линий.

Если между телом, излучение которого имеет непрерывный спектр, и наблюдателем находится разреженный газ, то вид спектра усложняется. Это тело испускает фотоны с любой частотой, но атомы газа могут возбуждаться только теми из них, частоты которых соответствуют какой-либо спектральной линии. Лишь в этом случае энергия фотона превращается в энергию возбуждения атома. При обратном переходе возбужденного атома в исходное состояние такой же фотон будет излучен атомом, но направление, в котором он полетит, может быть любым и очень мало вероятно, чтобы оно совпало с первоначальным направлением*). Поэтому, как правило, фотон, летевший

*) При большом количестве фотонов в частоте данной линии они могут оказать такое действие на возбужденный атом, что излучаемый фотон полетит в том же направлении, в каком летел фотон, возбудивший атом (так называемое вынужденное излучение). При изучении небесных тел в ряде случаев, например для радиодиапазона, этот эффект важен.

в сторону наблюдателя, в результате описанного процесса (называемого рассеянием света) не дойдет до наблюдателя.

Существует и другая возможность — возбужденный атом перейдет в исходное состояние не сразу, а последовательно, проходя через другие состояния. Электрон «прыгает» на нижние энергетические уровни до тех пор, пока не вернется на исходный. В этом случае фотон, вызвавший возбуждение атома, исчезает, а вместо него испускается несколько фотонов меньшей энергии.

Наконец, возбужденный атом, столкнувшись с какой-либо частицей, может передать ей энергию возбуждения. Тогда фотон также исчезнет, его энергия превратится в тепловую энергию газа. Все перечисленные процессы

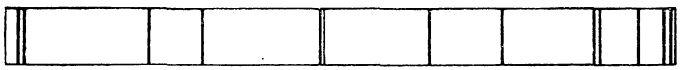

Рис. 8. Спектр с линиями поглощения (часть спектра Солнца).

уменьшают число доходящих до наблюдателя фотонов в частоте данной линии, по сравнению с количеством тех, у которых частота не соответствует линии. Такие фотоны, если даже и исчезают, например, при ионизации ими атомов, то в гораздо меньшей степени. Способность атома захватывать ионизующий фотон несравненно слабее, чем способность к возбуждению. На десятки тысяч исчезнувших (поглощенных) фотонов с частотой линии приходится один поглощенный фотон непрерывного излучения с близкой частотой. Поэтому на почти неослабленном ярком фоне непрерывного излучения в месте, соответствующем спектральной линии, будет наблюдаться узкая темная полоска. Такие полоски называются спектральными линиями поглощения и являются важнейшей особенностью спектров излучения звезд. В спектре Солнца они были обнаружены еще в начале XIX в. и названы фраунгоферовыми линиями (по имени впервые исследовавшего их ученого).

Взаимодействие излучения с веществом должно вызывать, как мы видим, ряд особенностей у наблюдаемых спектров небесных тел. Они-то и дают возможность опре-

делять из наблюдений спектров физические свойства этих тел. Обычно для получения спектра лучи из телескопа, воспринимающего только общее излучение звезды, направляют в прибор, называемый спектрографом. В простейшем и широко употребляемом в астрономии призменном спектрографе используется свойство призмы преломлять лучи различных длин волн в разной степени. Собранное телескопом излучение небесного тела, представляющее собой смесь излучений различных длин волн, узким пучком падает на призму. На фотопластинке, поставленной за призмой, вследствие неодинакового преломления лучей, составляющих пучок, получается полоска*). Каждой длине волны в полоске соответствует определенное место и это дает возможность исследовать излучение с той или другой длиной волны. Наблюдения излучения в довольно узких участках шкалы длин волн проводятся также и без спектрографов, при помощи фильтров, которые пропускают свет только с некоторыми определенными значениями длины волны, а остальное излучение задерживают.

По наблюдаемому спектру определяется энергия, излучаемая телом в различных длинах волн. На основе этих данных, особенно относящихся к спектральным линиям, находят температуру излучающего газа, давление в нем и его химический состав.

Определение химического состава основано на том, что атому каждого из элементов, как и каждому иону, соответствует своя система спектральных линий, связанная с набором энергетических уровней данного атома. Спектры атомов различных элементов и ионов тщательно исследованы в лабораториях и рассчитаны теоретически. Благодаря этому можно, наблюдая в спектре излучения некоторую последовательность спектральных линий, установить, какому элементу они принадлежат. Тем самым устанавливается присутствие данного элемента в излучающем теле. В спектрах небесных тел обычно наблюдается очень много линий и разобраться в том, какие из них принадлежат тому или иному элементу, бывает очень трудно, тем более, что далеко не все линии данного элемента находятся в оптическом диапазоне.

---

*) Иногда призма ставится на пути лучей, входящих в телескоп. Получаемые этим путем спектры недостаточно пригодны для детальных исследований.

После того как определен качественный состав излучающего тела, находят и относительное содержание атомов различных элементов путем сравнения соответствующих им спектральных линий. Как правило, чем больше количество атомов данного элемента в излучающем (или поглощающем) слое газа, тем ярче этот элемент себя проявляет, т. е. принадлежащие ему спектральные линии сильнее выделяются на фоне непрерывного излучения. Принцип таких исследований, как мы видим, достаточно прост, осуществление же их требует весьма большой работы.

Относительная интенсивность спектральных линий одного и того же элемента зависит от температуры газа. Возрастание кинетической энергии и скорости частиц газа, выражающееся в повышении его температуры, вызывает более частое возбуждение атомов. Порции энергии, получаемые атомами при столкновениях, увеличиваются, и поэтому электроны в атомах переходят на более высокие энергетические уровни. Соответственно возрастает роль фотонов, связанных с переходами с высоких уровней, а это сказывается в соответствующем изменении вида спектра.

При повышении температуры газа возрастает также число ионизованных атомов газа, так как увеличивается ионизующая способность частиц. Поэтому с ростом температуры появляются и усиливаются линии, принадлежащие ионам. Для отрыва от атома каждого следующего электрона необходима бóльшая энергия, чем для отрыва предыдущего. Следовательно, появление в спектре линий, принадлежащих атомам, лишенным двух и более электронов, показывает, что энергия частиц газа, а значит, и его температура, достаточно высоки.

Сопоставляя результаты наблюдений линий с выводами лабораторных исследований и теоретических расчетов строения атомов, узнают, какая доля атомов находится в том или ином энергетическом состоянии и каково содержание ионизованных атомов по отношению к нейтральным. По этим данным определяется температура излучающего тела.

Содержание ионов по отношению к числу нейтральных атомов того же элемента, так называемая степень его ионизации, зависит не только от температуры, но и от плотности газа. Это обстоятельство используют для определения плотности по спектральным линиям, принадлежащим нейтральным атомам и ионам того или иного элемента. При

более высоких температурах сравнивают линии однократно и двукратно ионизованных атомов.

Извлекаемая из наблюдений излучения небесных тел информация не ограничивается перечисленными характеристиками их состояния. Оказывается, по спектральным линиям можно обнаружить присутствие в пространстве, занимаемом газом, магнитного поля и найти напряженность поля. Подобные определения широко распространились в последние годы, так как выяснилось, что магнитные поля играют существенную роль в различных процессах, протекающих во Вселенной и, в частности, в космических взрывах. В связи с этим целесообразно сказать здесь хотя бы коротко о влиянии магнитного поля на свойства излучения.

Как было обнаружено еще в 1896 г., если излучающий газ находится между полюсами сильного магнита, то на месте каждой из эмиссионных линий появится несколько отдельных линий: говорят, что линии в магнитном поле расщепляются на составляющие или компоненты. Расстояние между компонентами зависит от напряженности поля. Это явление, получившее название эффекта Зеемана (по имени открывшего его голландского ученого), связано с влиянием магнитного поля на движение любого помещенного в поле электрического заряда. Влияние поля сказывается и на движении электрона в атоме. Магнитное поле изменяет набор допустимых энергетических состояний: вместо одного возникает несколько близких состояний, у которых различие в величине энергии пропорционально напряженности поля. Соответственно, вместо одной линии, возникающей при переходе электрона с этого энергетического уровня, наблюдается несколько линий, причем расстояние между компонентами линии оказывается пропорциональным напряженности поля.

Внешнее магнитное поле не только расщепляет линию, но и придает особый характер излучению, испускаемому в каждой из компонент. Это излучение обладает особыми свойствами: оно оказывается поляризованным.

В явлении поляризации света проявляются волновые свойства электромагнитного излучения. Процесс распространения электромагнитных волн заключается в периодическом изменении напряженности поля вдоль луча. Так как напряженность представляет собой силу, то она характеризуется не только величиной, но и направлением, и вол-

на распространяется в направлении, перпендикулярном к напряженностям электрического и магнитного полей. Если во всех точках вдоль волны напряженность электрического поля (вектор поля) остается в одной и той же плоскости (рис. 9), то представляемое этой волной излучение называют линейно поляризованным.

Хотя для излучения каждого атома существует определенная плоскость колебаний, зависящая от ориентации атома, и поэтому испускаемый им свет поляризован, излучение, идущее от небесных тел, обычно не поляризовано. Дело в том, что это излучение создается большим числом

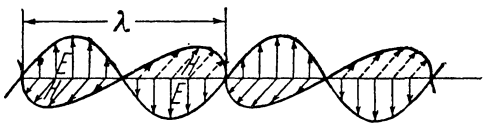

Рис. 9. Распространение линейно поляризованного электромагнитного излучения. Электрический вектор E во всех точках волны находится в одной и той же плоскости.

атомов, расположенных друг относительно друга произвольным образом и все время меняющих свою ориентацию по отношению к наблюдателю. Поэтому в наблюдаемом излучении небесных тел нет преимущественной плоскости колебаний электрического вектора.

Поляризованный свет может получаться из неполяризованного естественным путем. Так, например, если электромагнитное излучение рассеивается на атомах, то свет, идущий под прямым углом к направлению падающего излучения, оказывается поляризованным. Обнаружение поляризации света производится при помощи кристаллов некоторых веществ, обладающих замечательным свойством. Они пропускают только такое излучение, у которого плоскость вектора поля параллельна некоторому направлению, называемому осью кристалла. Если при повороте кристалла количество пропускаемого им света изменяется, то это значит, что свет частично поляризован, т. е. состоит из смеси линейно поляризованного и неполяризованного света. Если же при некотором положении кристалла свет вовсе не проходит сквозь него, то этот свет полностью линейно поляризован.

Обнаружение линейной поляризации излучения, идущего от некоторых космических тел, позволило сделать очень важные выводы о характере космических взрывов. Об этом будет идти речь в соответствующем месте книги. Что же касается поляризации, возникающей в эффекте Зеемана, то она имеет другой характер — это так называемая круговая поляризация. Вектор напряженности электрического поля в случае излучения, обладающего круговой поляризацией, меняет направление, но определенным образом, а именно, конец его описывает окружность. В зависимости от того, происходит ли вращение по часовой стрелке (если смотреть навстречу излучению) или в противоположном направлении, говорят о левой или правой круговой поляризации. Излучение в линии, расщепленной магнитным полем, при наблюдении вдоль него обладает круговой поляризацией. При этом направления поляризации боковых компонент расщепленной линии (а только они и видны при таком наблюдении) противоположны и зависят от того, направлено ли поле слева направо или справа налево. При наблюдении в плоскости, перпендикулярной к напряженности поля, видны три компоненты, причем излучение в каждой из них линейно поляризовано. Из наблюдений расщепления линий в магнитном поле можно, таким образом, найти не только напряженность поля, но и его направление.

Как мы говорили выше, важнейшей характеристикой всякого взрыва является количество освободившейся при взрыве энергии. Кинетическую энергию, получившуюся в результате космического взрыва, можно определить, находя скорости движения космических тел. Иногда это делают, наблюдая движение непосредственно в телескоп. В большинстве же случаев, скорость движения небесного тела определяют по спектру. При этом пользуются так называемым принципом Доплера, согласно которому частота излучения, испускаемого любым источником, зависит от скорости движения источника по отношению к наблюдателю. Указанную зависимость нетрудно получить путем простых рассуждений.

Если источник излучения и наблюдатель не смещаются друг относительно друга, то частота излучения, воспринимаемого наблюдателем, не отличается от частоты испускаемого излучения, которую обозначим ν_0. Расстояние от источника до наблюдателя проходится светом за неко-

торое время t и равно поэтому ct. Допустим теперь, что расстояние между ними увеличивается со скоростью v. За время t движущийся источник, как и неподвижный, испускает tv_0 волн. Ранее это количество волн укладывалось на отрезке длиной ct, а при движении оно должно укладываться на отрезке длиной $ct + vt$. В случае неподвижного источника длина одной волны λ_0 излучения, принимаемого наблюдателем, равна $\frac{ct}{tv_0}$. Если же источник и наблюдатель удаляются друг от друга, то принимаемое излучение будет иметь длину волны, равную $\lambda = \frac{ct + vt}{tv_0}$. Следовательно, между λ и λ_0 существует такая зависимость:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 \frac{v}{c} . \qquad (5)$$

С удалением источника от наблюдателя длина волны излучения растет, а частота соответственно уменьшается. При сближении источника с наблюдателем последний воспринимает излучение с меньшей длиной волны. В непрерывном излучении этот эффект трудно заметить, но на спектральных линиях, обладающих малой шириной, он сказывается сильно. В зависимости от направления движения спектральная линия, образованная движущимся источником, смещается в сторону коротких волн (к фиолетовому концу спектра) или длинных волн (к красному концу). Величина смещения равна $\lambda_0 \frac{v}{c}$.

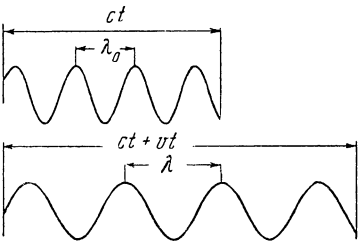

Рис. 10. Изменение длины волны излучения вследствие движения источника.

Нормальное положение линии в спектре, т. е. ее длина волны λ_0, определяется экспериментально или путем расчетов. Сравнивая наблюдаемое положение линии в спектре излучения небесного тела с ее нормальным положением, находят величину сдвига линии $\lambda_0 \frac{v}{c}$ и по ней скорость движения этого тела v вдоль луча зрения по отношению к наблюдателю. По земным масштабам такие определения

не очень точны — в лучших случаях ошибка имеет порядок 1 *км/сек*, но так как скорости космических тел измеряются десятками и сотнями километров в секунду, эта точность является вполне удовлетворительной. К сожалению, указанным путем можно найти не всю величину скорости тела, а только проекцию скорости на луч зрения.

Все сказанное об излучении в оптическом диапазоне применимо, вообще говоря, и к радиоизлучению. Правда, радиоизлучение небесных тел дает иного рода сведения об их физическом состоянии, чем те, которые получены из оптических наблюдений. Дело в том, что большинство частот спектральных линий атомов, важных для исследований состояния космических объектов, расположено в оптической и ультрафиолетовой областях шкалы электромагнитных волн. В радиодиапазоне мало пригодных для наблюдений линий. Однако из наблюдений излучения небесных тел в радиочастотах можно узнать об их специфических свойствах, не проявляющихся в других длинах волн. Кроме того, радиоизлучение обладает чрезвычайно ценной особенностью: оно не только проходит сквозь те слои атмосферы, которые не пропускают излучение в оптическом диапазоне, но проникает и через области межзвездного пространства, заполненные облаками холодного газа и пыли и непрозрачные для видимого излучения. Поэтому имеющиеся сведения о строении удаленных от Солнца частей нашей звездной системы были получены в основном путем исследований космического радиоизлучения.

§ 3. СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Космический взрыв заключается в быстром изменении состояния какого-либо небесного тела. Следовательно, перед тем как рассматривать различные виды космических взрывов, необходимо получить отчетливое представление о формах вещества и энергии, присущих различным телам. Выяснение вопросов, относящихся к разным видам энергии, мы отложим до следующего параграфа, а здесь кратко охарактеризуем строение небесных тел, т. е. опишем состояния, в которых находится вещество в доступной нашим наблюдениям области Вселенной.

Взрывы могут происходить на любых небесных телах, включая Луну и планеты солнечной системы. Но в этой

книге мы не будем говорить о взрывах на планетах и их спутниках, так как по своей природе они, вероятно, гораздо ближе к земным взрывам (извержениям вулканов, землетрясениям), чем к звездным. Поэтому мы не будем останавливаться и на описании солнечной системы, тем более, что ее строение широко известно по многочисленным популярным книгам.

Как показывают наблюдения, Вселенная является в основном звездной, т. е. преобладающая часть имеющегося в ней вещества сосредоточена в звездах. Естественно, что мы больше внимания уделим звездам, а также и Солнцу. Хотя Солнце является самой обычной звездой, но благодаря ее особому положению (сравнительной близости к земным наблюдателям) о ней известно гораздо больше, чем о других звездах.

Знакомясь с любыми космическими явлениями, полезно возможно скорее привыкнуть к масштабам звездного мира, т. е. к расстояниям, отделяющим нас от звезд, к размерам звезд и звездных систем. Эти масштабы сильно отличаются от земных, и для определения расстояний в Космосе применяются свои, особые методы.

В исторически первом и до последнего времени главном способе определения расстояний до тел солнечной системы и ближайших звезд используется явление так называемого параллактического смещения. Как хорошо известно, при перемещении наблюдателя предмет, близкий к нему, кажется смещающимся относительно более далеких предметов, составляющих фон. Величина этого кажущегося параллактического смещения предмета зависит как от того, насколько переместился наблюдатель, так и от расстояния между ним и предметом. Параллактическое смещение при одинаковом сдвиге наблюдателя тем меньше, чем дальше находится предмет.

Расстояния от Земли до тел солнечной системы ничтожно малы по сравнению с расстояниями до звезд. При перемещении наблюдателя по земной поверхности направление на звезду практически не меняется. Но для двух наблюдателей, видящих, например, Луну из разных точек Земли в один и тот же момент, направление на нее будет различным и соответствующее смещение Луны заметно на фоне звезд. Расстояние между наблюдателями, так же как видимое угловое смещение Луны (при переходе от одного наблюдателя к другому), нетрудно измерить и затем получить

расстояние от Земли до Луны. Оно оказывается равным в среднем 380 000 *км**). На этом расстоянии радиус Земли укладывается шестьдесят с лишним раз. Аналогичным способом определено и расстояние от Земли до Солнца. Оно составляет около 150 миллионов километров, что в 400 раз больше расстояния до Луны.

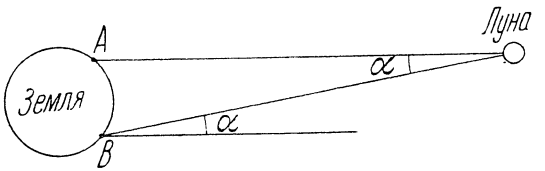

Рис. 11. Определение расстояния до Луны. Непосредственно измеряется угол α и дуга AB на земной поверхности.

Как мы уже сказали, перемещение по земной поверхности практически не влияет на видимое положение звезд. Однако перемещение наблюдателя вместе с Землей при ее движении вокруг Солнца за полгода на 300 миллионов километров уже сказывается на видимом положении близких звезд относительно более далеких. Эти изменения очень малы — меньше одной секунды дуги, но, применяя очень точные астрономические инструменты, их определяют вполне уверенно, если они больше 0″,01. Из таких измерений нашли, что даже ближайшие к нам звезды находятся в сотни тысяч раз дальше, чем Солнце. Чтобы преодолеть это расстояние, фотону, летящему со скоростью 300 000 *км/сек*, требуется несколько лет. Таков порядок расстояний между звездами. Для измерения столь больших расстояний в астрономии

Рис. 12. Параллактическое смещение звезд вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца.

*) Так как Луна движется не по окружности, то ее расстояние от Земли неодинаково в разные моменты.

пользуются двумя единицами: световым годом и парсеком; 1 световой год равен $9{,}5 \cdot 10^{17}$ *см*, 1 парсек (*пс*) равен 3,26 светового года. Расстояние до ближайшей к Солнцу звезды (α из созвездия Центавра) составляет 4,3 светового года.

На таких огромных расстояниях дисков звезд увидеть нельзя. Даже при наблюдениях с помощью самых больших телескопов все звезды представляются точечными источниками света. Для определения размеров всех, за исключением Солнца, звезд приходится применять косвенные методы, основанные на определении их температур. А температуры, как мы уже говорили, можно находить по спектру идущего от светила излучения.

Спектры почти всех звезд содержат множество линий поглощения. Из этого заключают, что внешние слои звезды, ее атмосфера, состоят из разреженного газа. Тот фон, на котором видны линии поглощения — непрерывное излучение — возникает на более глубоком уровне, в слоях, называемых фотосферой звезды.

Путем анализа линий поглощения в спектре Солнца нашли, что температура газа, составляющего атмосферу Солнца, близка к 4700° К. У большинства других звезд температура в атмосфере отличается от этого значения не более чем в 2—3 раза, хотя существуют и очень горячие звезды с температурами порядка 100 000° К. В зависимости от того, линии каких элементов преобладают в спектре звезды, ее относят к тому или иному спектральному классу. Спектральный класс звезды определяется значениями температуры и давления в ее атмосфере. В табл. 1 приводятся обозначения спектральных классов буквами латинского алфавита (эти обозначения сложились исторически и порядку букв не следует придавать особенного смысла). Там же указываются элементы, спектральные линии которых наиболее характерны для данного класса, а также средние для класса температуры, находимые по этим линиям. На детализации этой классификации мы не останавливаемся. Заметим, что Солнце относится к классу G.

При существующих в атмосферах звезд условиях вещество не может находиться ни в каком другом состоянии, кроме газообразного. При этом газ атомарный и лишь у самых холодных звезд (их называют звездами поздних классов) атмосферы содержат молекулы, представляющие

Таблица 1

Обозначение спектрального класса	O	B	A	F	G
Характерные линии (элемент)	Ионы гелия	Нейтральные атомы гелия	Водород	Водород и ионы металлов	Ионы и атомы металлов
Температура в °K	30 000°	20 000°	10 000°	8000°	6000°

Обозначение спектрального класса	K	M	S	C
Характерные линии (элемент)	Атомы металлов и различные молекулы	Молекулы окиси титана TiO	Молекулы окиси циркония ZrO	Молекулы циана CN
Температура в °K	4000°	3000°		

собой соединение двух или большего числа атомов. При температурах, превосходящих 4000°, даже самые устойчивые молекулы распадаются (диссоциируют). Помимо химических соединений, указанных в таблице, в атмосферах холодных звезд имеются и другие, но эти наиболее заметно себя проявляют в поглощении света.

По спектрам звезд находят и химический состав звездных атмосфер. Они сильно отличаются от земной атмосферы по относительному содержанию различных элементов. Почти во всех звездах наиболее распространенным элементом оказывается водород, составляющий около 60% всей массы газа. Следующим по массе является гелий, а на все более тяжелые элементы — кислород, азот, углерод, металлы — приходится лишь 1—2% от общего количества газа. Только у очень небольшого числа звезд наблюдается повышенное содержание тяжелых элементов и сравнительно малое содержание водорода.

Физические условия в атмосферах звезд характеризуются не только высокой температурой, но и очень малой плотностью вещества. Число частиц в 1 $см^3$ газа, составляющего солнечную атмосферу, порядка 10^{14}, что в сотни тысяч раз меньше, чем число частиц в таком же объеме воздуха у поверхности Земли. При температурах в тысячи и десятки тысяч градусов газ плохо пропускает излучение с длинами волн оптического диапазона. Слой, содержащий всего несколько граммов газа на 1 $см^2$ площади, непрозрачен даже для излучения в непрерывном спектре. Увидеть, что происходит в звезде глубже этого слоя, нельзя — луч света непосредственно оттуда не доходит до наблюдателя. Следовательно, количество вещества в доступных для наблюдения областях звезды весьма мало́, в расчете на 1 $см^2$ ее поверхности, по сравнению с соответствующим количеством земной атмосферы. Напомним, что на 1 $см^2$ поверхности Земли приходится более 1 *кг* воздуха.

В звезде нет резкой границы между атмосферой и более глубокими слоями. По мере углубления в звезду плотность газа возрастает. Так как непрозрачность газа очень быстро увеличивается с ростом плотности и температуры, толщина атмосферы составляет очень малую долю размера звезды. За поверхность звезды принимается, грубо говоря, тот уровень, глубже которого ничего не видно. Расстояние этого уровня от центра и считается радиусом звезды. При определении радиусов звезд по их излучению основываются на общих законах излучения, к которым мы и перейдем.

Из повседневного опыта хорошо известно, что чем сильнее нагрето тело, тем больше энергии оно излучает. Этот факт имеет место как для твердых тел, так и для газа. Однако излучательная способность различных тел не одинакова. Эксперименты показали, что она связана со способностью тела поглощать попадающее на него излучение. Лучше всего поглощают свет тела черного цвета. Идеальное тело, которое могло бы поглощать все падающее на него электромагнитное излучение, называют абсолютно черным телом. Все реальные природные тела отражают некоторую долю падающей на них энергии и поэтому могут лишь в той или иной степени приближаться по своей поглощательной способности к абсолютно черному телу. Например, сравнительно хорошо воспроизводит свойства такого тела металлический шар, окрашенный в черный цвет.

Для абсолютно черного тела имеет место зависимость между его температурой и количеством энергии, излучаемой с единицы поверхности. Опытным путем было обнаружено и затем доказано теоретически, что энергия E, излучаемая с единицы поверхности абсолютно черного тела за единицу времени, должна быть пропорциональной четвертой степени его абсолютной температуры T:

$$E = \sigma T^4. \tag{6}$$

Коэффициент пропорциональности σ в этом соотношении, называемом законом Стефана — Больцмана, в системе единиц CGSE равен $5{,}7 \cdot 10^{-5}$ *эрг/град*$^4 \cdot$ *сек* $\cdot$ *см*^{2}.

Излучение абсолютно черного тела обладает еще одним важным свойством. Зависимость количества излучаемой энергии от длины волны излучения (т. е. спектр излучения) полностью определяется значением температуры тела. Чтобы не усложнять изложения, мы не будем приводить формулу, выражающую эту зависимость, и ограничимся графическим представлением спектра абсолютно черного тела при различных значениях температуры (рис. 13).

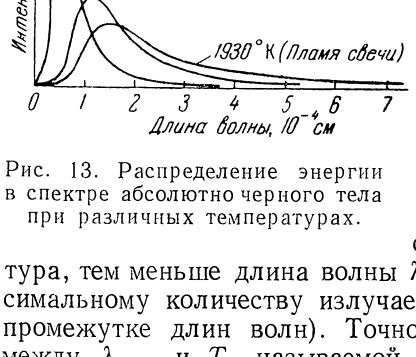

Рис. 13. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела при различных температурах.

Как видно из этого рисунка, чем выше температура, тем меньше длина волны λ_{max}, соответствующая максимальному количеству излучаемой энергии (в единичном промежутке длин волн). Точное выражение зависимости между λ_{max} и T, называемой законом Вина, имеет вид

$$\lambda_{max} = \frac{0{,}28}{T}, \tag{7}$$

если λ_{max} выражать в сантиметрах, а T в °К.

Основной вклад в излучение вносит та область длин волн, которая близка к λ_{max}. Это излучение определяет цвет тела. Таким образом, из закона Вина можно найти, как при изменении температуры излучающего тела должен меняться его цвет. Так, например, при $T = 4500°$ значение $\lambda_{max} = 6{,}5 \cdot 10^{-5}$ *см*, что соответствует излучению

красного цвета. При температуре, близкой к 6000°, имеем $\lambda_{max} \approx 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ *см*. Излучение в этой длине волны желтого цвета.

Ни одна из звезд не обладает полностью свойствами абсолютно черного тела. Но, поскольку вещество фотосферы хорошо поглощает излучение, считают, что излучение фотосферы близко к излучению абсолютно черного тела. Это предположение является довольно грубым, так как наблюдатель воспринимает одновременно излучение различных слоев звезды. При углублении в звезду температура повышается. В тех слоях, где образуются линии поглощения, т. е. в атмосфере звезды, температура ниже, чем в фотосфере, являющейся основным источником излучения в непрерывном спектре. Кроме того, в разных участках длин волн прозрачность фотосферы неодинакова, поэтому излучение в этих участках соответствует различным температурам. Тем не менее, предположение о том, что звезды являются идеальными излучателями, не приводит обычно к значительным ошибкам в их радиусах, находимых по излучению.

Общее количество энергии, излучаемой звездой за 1 *сек*, называется светимостью звезды. Ее принято обозначать буквой L. Считая, что звезда, радиус которой равен R_*, излучает как абсолютно черное тело с температурой T, светимость получим, умножив энергию E, определяемую соотношением (6), на площадь поверхности звезды:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4. \tag{8}$$

Для нахождения радиуса из формулы (8) нужно, помимо температуры, знать и светимость звезды. Она определяется по тому количеству энергии, которое достигает наблюдателя, при известном расстоянии до звезды.

Найдем, для примера, светимость Солнца; она укажет нам порядок этой величины, характерный для многих звезд. Непосредственными измерениями получено, что за 1 *сек* на 1 $см^2$ поверхности Земли попадает от Солнца $1{,}4 \times \times 10^6$ *эрг* энергии. Эта величина называется солнечной постоянной. Но столько же энергии должно падать за 1 *сек* на любую площадку площадью в 1 $см^2$, если она удалена от Солнца так же, как и Земля, и расположена перпендикулярно к солнечным лучам. Следовательно, общее количество энергии, излучаемой Солнцем за 1 *сек*, находится

путем умножения солнечной постоянной на площадь сферы, радиус которой равен расстоянию от Земли до Солнца. Светимость Солнца $L_\odot$ (знаком $\odot$ обозначают величины, относящиеся к Солнцу) равна: $4\pi(1{,}5 \cdot 10^{-13})^2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^6 = 3{,}9 \cdot 10^{33}$ *эрг/сек*.

Найдем теперь по формуле (8) величину $R_\odot$. В качестве $T_\odot$ примем приближенное значение 6000°, которое находится из закона Вина: мы знаем, что Солнце желтого цвета, а, как отмечалось выше, такой цвет имеет тело с температурой 6000°. Это значение относится к фотосфере Солнца. То же самое значение температуры фотосферы Солнца получается, если определять ее по наклону кривой, характеризующей зависимость излучаемой в непрерывном спектре энергии от длины волны излучения. Используя формулу (8), имеем: $R_\odot \approx 700\,000$ *км*. Так как видимый радиус Солнца в угловой мере и расстояние до Солнца известны, то $R_\odot$ находится и независимо от сделанных предположений. Оказывается, что найденное нами значение $R_\odot$ очень близко к наблюдаемому.

Для других звезд применение формулы (8) дает единственный способ определения их размеров (если не касаться сравнительно малого числа звезд, находящихся в фотометрических двойных системах; о них будет сказано позже). Значение температуры звезды, входящее в (8), оценивается по ее излучению в непрерывном спектре и называется эффективной температурой. Температура, определяемая по линиям поглощения и соответствующая атмосфере звезды, приблизительно на 15 — 20 % ниже эффективной температуры. Для Солнца значение эффективной температуры равно 5800°, а температура возбуждения 4700°.

При определении светимости звезды по количеству принимаемой от нее энергии излучения эта звезда сравнивается с каким-либо из тех источников, для которых излучаемая энергия известна, например с Солнцем. При этом учитывается, что поток энергии изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения (см. § 2). Расстояния до ближайших звезд, удаленных от Солнца не более чем на 100 световых лет, определяются по их параллактическим смещениям. Для других звезд эти смещения настолько малы, что их не удается измерить,

а значит, нельзя узнать расстояния, необходимые для определения светимостей. В таких случаях используются более сложные способы непосредственного определения светимостей звезд. В основе их лежит полученная путем исследования ближайших звезд зависимость между величиной светимости звезды данного спектрального класса и рядом особенностей в линиях поглощения ее спектра. Спектры же можно получать и для очень далеких звезд. Для них сначала по спектру находят светимости, а затем по светимостям можно определить и расстояния.

По светимостям звезды сильно различаются друг от друга. Солнце относится к звездам относительно малой светимости. Звезды подобные Солнцу и более слабые, излучающие энергию порядка 10^{33} *эрг/сек* или меньше, называют карликами. Самые слабые карлики обладают светимостью в тысячи раз меньшей, чем у Солнца. Наряду с этим существуют звезды, называемые гигантами и сверхгигантами, превосходящие Солнце по светимости в сотни и тысячи раз.

Между светимостями и температурами звезд обнаружена зависимость. Если для каждой звезды определить светимость, скажем, в единицах $L_{\odot}$, и спектральный класс, характеризующий температуру, а затем нанести соответствующие точки на график, то получится диаграмма, подобная изображенной на рис. 14. Впервые такая диаграмма была построена астрофизиками Герцшпрунгом и Ресселом. Подавляющее большинство звезд попадает в область так называемой главной последовательности. Для них, как мы видим, светимость, радиус и температура связаны не только соотношением (8). Температурой определяется светимость, правда, не вполне точно: можно указать некоторый сравнительно узкий промежуток возможных значений светимости, соответствующих данной температуре.

В правой верхней части диаграммы выделяется группа звезд — гигантов и сверхгигантов. Их мало по сравнению со звездами типа Солнца, но они благодаря своей высокой светимости заметны на гораздо бо́льших расстояниях, чем карлики. Поэтому создается впечатление многочисленности гигантов и сверхгигантов.

Радиусы звезд лежат в очень широких пределах. У карликов, относящихся, как видно из диаграммы, к спектральным классам G, K и M, они порядка $0{,}1\ R_{\odot}$—$1R_{\odot}$.

Гиганты и сверхгиганты ранних спектральных классов — О, В, А — имеют радиусы порядка $5R_\odot$—$10R_\odot$. Температуры гигантских звезд классов К и М низки и их большая

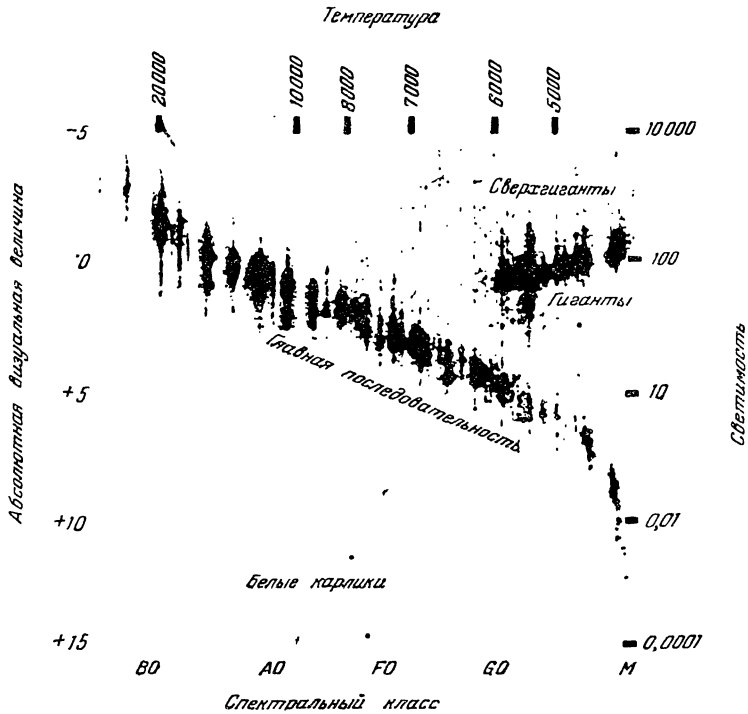

Рис. 14. Диаграмма спектр — светимость.

светимость связана с огромными размерами поверхности. Радиусы у них в сотни раз превосходят солнечный.

Среди звезд часто встречаются (приблизительно одна звезда из каждых десяти) особенные, с очень малыми радиусами. Их называют белыми карликами. Температура белого карлика больше, чем у Солнца (поэтому цвет его излучения голубой или белый), а светимость в десятки раз меньше. Используя соотношение (8), нетрудно получить, что эти звезды очень малы по сравнению с Солнцем и по своим размерам скорее напоминают планеты.

Наряду с радиусом и светимостью одной из важнейших характеристик звезды является ее масса. У небесных тел

массы можно находить только по создаваемому ими тяготению. Начнем с определения массы Солнца. Она находится по тому действию, которое Солнце оказывает на соседние тела, в частности на Землю. Это действие определяется законом всемирного тяготения Ньютона:

$$F = G\frac{M_1 M_2}{r^2}. \qquad (9)$$

Он выражает величину силы притяжения F, действующей на тело с массой M_1, со стороны тела с массой M_2 при расстоянии между телами, равном r. Коэффициент пропорциональности G называется постоянной тяготения. В том случае, когда M_1, M_2, r и F выражены в системе единиц CGSE, величина $G = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ $см^3 \cdot сек^{-2} \cdot г^{-1}$. Она определена путем измерения в лаборатории силы взаимодействия двух тел с известными массами. Так как это взаимодействие очень слабое, такой опыт, принципиально простой, является технически весьма сложным.

Если относительная скорость двух тел, притягивающихся друг к другу по закону Ньютона, достаточно мала, то они движутся вокруг общего центра тяжести. Квадрат периода обращения P пропорционален кубу среднего расстояния между ними:

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}. \qquad (10)$$

Положив $M_2 = M_\odot$, а за M_1 приняв массу какой-либо планеты, получаем из (10) один из законов движения планет вокруг Солнца, установленных Кеплером в XVII в. из наблюдений, еще до открытия Ньютоном закона всемирного тяготения *). Применим формулу (10) к системе Солнце — Земля, пренебрегая действием других планет. Период обращения для Земли, как известно, называется годом и содержит $60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365\ \frac{1}{4}$ *сек*. Используя это значение P и величину среднего расстояния от Земли до Солнца $a = 150\,000\,000$ *км*, получаем, что $M_\odot + M_{\text{Земли}} = 2 \cdot 10^{33}$ *г*.

---

*) Выражение закона Кеплера в его первоначальной форме не содержало массы планеты, но так как эта масса всегда гораздо меньше солнечной, то заметной ошибки не получалось.

Так как масса Земли (находимая по известной величине ускорения силы тяжести g на земной поверхности) равна всего $6 \cdot 10^{27}$ *г*, то следовательно, для $M_\odot$ имеем значение $2 \cdot 10^{33}$ *г*, что в 330 000 раз превосходит массу Земли.

Мы получили представление о том, каков порядок величины массы звезды. Аналогичным путем по соотношению (10) находят массы других звезд, входящих в двойные системы. Двойной звездой называется такая система из двух звезд, в которой обе они, взаимно притягиваясь, движутся вокруг центра тяжести системы. Подобные системы весьма распространены в звездном мире — в них входит более 20% всех звезд. Двойной звездой оказалась и самая яркая из звезд неба — Сириус. Многолетние наблюдения обнаружили, что ее смещение на небесной сфере не прямолинейно, каким оно должно было бы быть, если бы вызывалось только движением по отношению к Солнцу. Причина, вызывающая искривление пути — присутствие вблизи другой звезды. Она видна лишь в телескоп. Обе звезды движутся по эллиптическим орбитам вокруг центра тяжести системы с периодом около 50 лет. Звезды удалены друг от друга на расстояние в двадцать раз большее, чем Земля от Солнца.

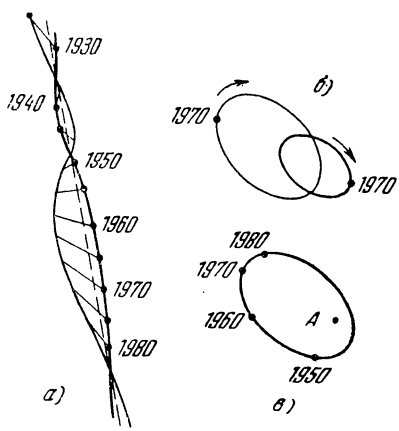

Рис. 15. Видимая орбита Сириуса. *а*) Жирной кривой показано движение главной звезды, тонкой кривой изображено движение спутника; *б*) движение компонентов вокруг общего центра тяжести (здесь центр тяжести предполагается неподвижным, а на рис. *а*) его движение относительно Солнца обозначено пунктирной кривой); *в*) движение спутника вокруг главной звезды.

Такие двойные системы, у которых, благодаря большому расстоянию между компонентами (составляющими), обе звезды наблюдаются непосредственно, называют визуально двойными звездами. Из наблюдений визуально

двойных звезд находят расстояние между компонентами a и период обращения P, что дает возможность по формуле (10) определить и сумму масс компонент. Если наблюдаются движения каждой из компонент в отдельности, а не только относительное движение одной из них, то определяется масса каждой из звезд.

В том случае, когда в двойной системе компоненты настолько близки, что не разделяются при наблюдении в телескоп, движения их изучают по спектрам. При обращении вокруг центра тяжести системы каждой из звезд, скорость ее по отношению к наблюдателю все время меняется.

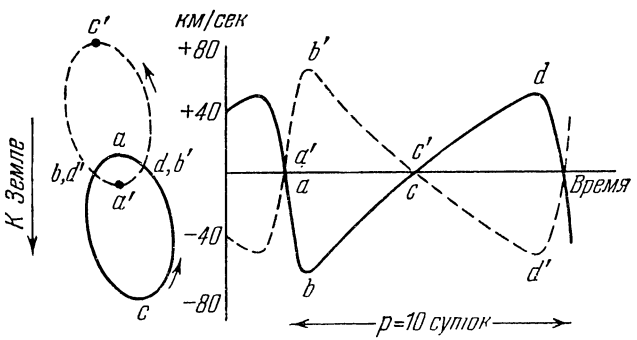

Рис. 16. Движения в спектрально двойной системе ζ Большой Медведицы. Слева показано движение компонентов относительно общего центра тяжести; справа — кривые скоростей компонентов.

Это изменение сказывается в периодическом смещении спектральных линий, вызванном эффектом Доплера. Системы, у которых наблюдаются только периодические смещения линий в спектрах, называют спектрально двойными. Периоды обращения звезд в спектрально двойных системах сравнительно малы и лишь в редких случаях измеряются годами. Обычно же они составляют несколько суток, а иногда даже доли суток. Наблюдения спектрально двойных систем также дают сведения о массах звезд, но менее полные, чем получаемые по визуально двойным звездам.

Расположение звезд в двойной системе может быть таким, что при своем движении звезды по очереди полностью

или частично загораживают друг друга от наблюдателя, находящегося на Земле. Луч зрения наблюдателя лежит в орбитальной плоскости (плоскости, в которой движутся звезды) или близок к ней. В этом случае систему называют фотометрически двойной или затменной переменной, так как затмения приводят к видимым изменениям в наблюдаемом излучении системы. Фотометрических двойных

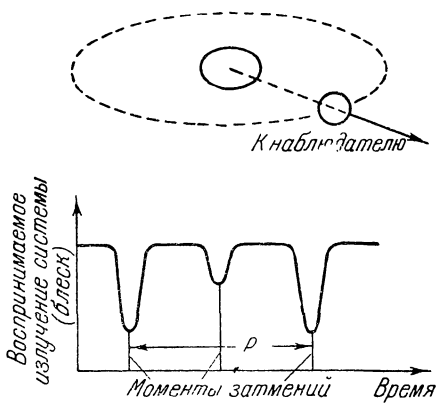

Рис. 17. Схематическое изображение затменной переменной в момент затмения. Кривая представляет периодическое изменение наблюдаемого излучения звезды, вызванное повторяющимися затмениями (вследствие различной яркости обеих звезд изменение блеска в минимуме зависит от того, какая из звезд затмевается).

систем известно не очень много, потому что ориентация орбитальной плоскости любой двойной системы по отношению к земному наблюдателю является произвольной и только у малой доли систем эта плоскость расположена так, что наблюдаются затмения. Тем не менее, исследование фотометрических двойных систем дало очень много сведений не только о массах звезд, но также о строении звезд и особенностях их свечения.

Итак, наши знания о массах звезд основываются только на результатах изучения двойных систем. Но, как правило, звезды, входящие в эти системы, по всем призна-

кам аналогичны одиночным звездам. Поэтому считают, что имеющиеся данные о массах характеризуют все звезды. У большинства звезд массы не очень сильно отличаются от солнечной. Самая массивная звезда обладает массой приблизительно $100M_\odot$. У красных карликов массы в 5—10 раз меньше, чем у Солнца.

Обнаружена зависимость между величиной светимости звезды L и ее массой M. Эта зависимость может быть представлена, как пропорциональность светимости приблизительно третьей степени массы: $L \sim M^3$. Она не является строгой, а, как говорят, статистической, т. е. возможны довольно значительные отклонения от этой зависимости в ту или иную сторону. Кроме того, указанной зависимости следуют не все звезды, а лишь звезды главной последовательности. Современные представления о строении звезд позволили получить такую зависимость L от M и теоретически.

Двойные системы являются простейшим видом небесных объектов, называемых звездными системами. Звездная система — это группа звезд, характеризуемых какими-либо общими свойствами, относящимися в первую очередь к движениям звезд и их положению в пространстве. Иногда в системе, состоящей из нескольких звезд (три, четыре и более), они находятся настолько близко друг к другу, что связаны силами взаимного притяжения и достаточно долгое время движутся около общего центра тяжести Такие системы названы кратными звездами. Очень интересным примером кратной звезды может служить Кастор — самая яркая из звезд созвездия Близнецов. Еще в XVIII в. она была известна как визуально двойная, а в XIX в. была обнаружена третья звезда системы на расстоянии, в 12 раз большем, чем взаимная удаленность звезд пары. Исследование же спектров показало, что каждая из этих трех звезд является спектрально двойной системой. Таким образом, Кастор представляет собой шестерную систему.

В системах другого вида — звездных скоплениях — число звезд значительно больше, а связь звезд друг с другом гораздо слабее, чем в кратных звездах. Звездные скопления делятся на два вида — рассеянные, или открытые, скопления и шаровые скопления. Рассеянное скопление — это группа из нескольких десятков или сотен звезд, приблизительно одинаково удаленных от Солнца и имеющих

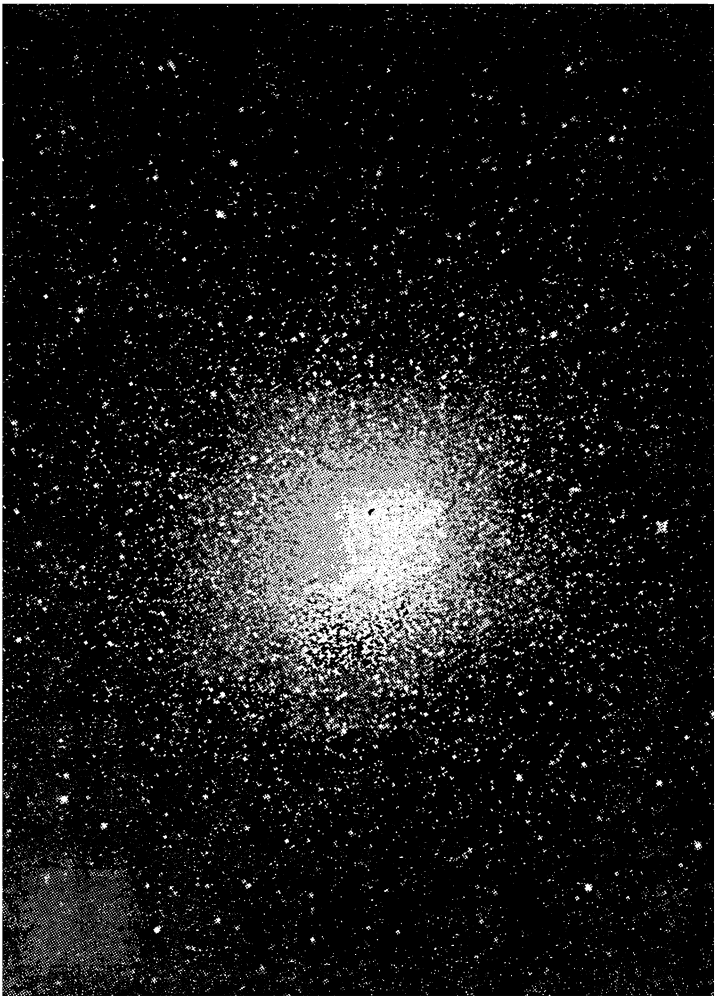

Рис. 18. Шаровое скопление (М 13).

очень близкие как по величине, так и по направлению скорости движения. Одно из самых известных скоплений такого типа, Плеяды, содержит более 250 звезд, но лишь несколько из них видны невооруженным глазом. Рассеянные скопления занимают огромные области пространства — их размеры 10 — 100 световых лет.

Шаровые скопления получили такое название, потому что они имеют почти сферическую форму. Это очень компактные группы звезд. При диаметре всего в несколько раз большем, чем размер рассеянного скопления, шаровое скопление содержит сотни тысяч звезд. Поэтому вблизи центра скопления изображения звезд сливаются, образуя просто яркую область. Число звезд, приходящихся на единицу объема, скажем, на куб с ребром в 10 световых лет, внутри шарового скопления в десятки раз больше, чем в окружающем его пространстве. На звезды шаровых скоплений действует тяготение со стороны других звезд скопления. Это действие гораздо сильнее, чем в открытых скоплениях, так как в последних расстояния между звездами относительно велики.

Звездные скопления того и другого вида входят в состав грандиозной звездной системы, называемой Галактикой. Одной из звезд Галактики является Солнце. Основная часть звезд, составляющих Галактику, содержится в Млечном Пути. При телескопических наблюдениях различных участков этой светлой полосы, пересекающей весь небесный свод, видно, что она состоит из слабых звезд, неразличимых простым глазом. Звезды, входящие в Галактику (подсчеты показали, что общее число их превышает сотню миллиардов), расположены главным образом вблизи некоторой плоскости (галактической плоскости). Галактика оказывается сильно сплюснутой системой звезд, и если бы ее можно было увидеть с ребра, то она выглядела бы приблизительно так, как изображено на рис. 19.

При наблюдении Галактики в плане (сверху) можно было бы заметить другую ее особенность. Звезды в Галактике не распределены равномерно по диску, а концентрируются в так называемых спиральных рукавах, идущих из ее центра. Хотя мы находимся вблизи галактической плоскости и не можем посмотреть на нее сверху, заключение о виде Галактики удалось сделать по результатам подсчетов звезд на фотографиях в различных областях неба и, в особенности, по радионаблюдениям. О том, как выглядит

Галактика в плане, можно судить по виду других аналогичных ей звездных систем. Фотография подобной системы приводится на рис. 20. Солнце расположено в одном из спиральных рукавов Галактики на расстоянии 30 000 световых лет от ее центра. Радиус Галактики — около 50 000 световых лет.

Рис. 19. Спиральная галактика, видимая с ребра (NGC 4565).

Своеобразно расположены в Галактике шаровые скопления. Все они находятся в ее центральной области, причем довольно симметрично относительно центра, создавая как бы его оболочку. Говорят, что шаровые скопления образуют сферическое гало (ореол) Галактики.

Все звезды Галактики испытывают силу взаимного притяжения. Звезды, находящиеся в центральной области, действуют как целое на звезды, расположенные ближе к периферии. Поэтому тяготение заставляет периферийные звезды, включая Солнце, вращаться вокруг центра Галактики наподобие того, как планеты вращаются под действием тяготения Солнца. Это движение происходит в согласии с законом Кеплера, т. е. период обращения и расстояние до центра связаны соотношением (10).

Период обращения Солнца вокруг центра Галактики нетрудно найти, зная расстояние Солнца от центра и его

Рис. 20. Спиральная галактика, видимая «в плане» (NGC 5457).

скорость. Поскольку во вращении Галактики не участвуют объекты, расположенные за ее пределами, так называемые внегалактические туманности, то, определив по отношению к ним скорость Солнца, тем самым нашли скорость его обращения v. Она составляет около 280 *км/сек**). Солнце совершает полный оборот вокруг центра Галактики за время $P = \frac{2\pi a}{v}$, где a — его расстояние до центра. Используя известные значения a и v, находим, что $P = 260$ миллионам лет. Теперь легко по формуле (10) получить и ту массу M, тяготение которой вызывает движение Солнца (массой Солнца по сравнению с M можно, конечно, пренебречь). Оказывается, что общая масса всех звезд, находящихся ближе к центру Галактики, чем Солнце, равна двумстам миллиардам солнечных масс. Период обращения, а значит, и угловая скорость, изменяется с расстоянием от центра Галактики и, следовательно, она вращается не как твердое тело.

Звездные системы содержат, помимо звезд, где вещество уплотнено, сконцентрировано, также и вещество в рассеянном или диффузном состоянии, характеризующемся крайне малой плотностью. Космический взрыв обычно сопровождается рассеянием вещества и какая-то доля наблюдаемого ныне диффузного вещества возникла, по-видимому, в результате бурных процессов, вызвавших переход части звездной массы в форму разреженного газа. Исследование состояния и движения диффузного вещества в области космического взрыва является источником очень важных сведений о характере взрыва.

Звезды весьма различаются по своей средней плотности, т. е. по степени концентрации в них вещества. Но даже у самых разреженных звезд плотность во много раз больше, чем у диффузной среды. Для сравнения посмотрим, каковы же средние плотности звезд, определяемые как отношение массы звезды к ее объему. Их легко найти, воспользовавшись тем, что́ нам уже известно о массах и радиусах звезд. Средняя плотность наибольшая у белых карликов. В одном кубическом сантиметре вещества белого карлика

---

*) Помимо участия в общем движении вокруг центра Галактики, звезды движутся хаотически друг относительно друга. Как правило, эти скорости составляют 10—20 *км/сек*, что гораздо меньше, чем значение скорости, обусловленной вращением Галактики.

содержится масса порядка одной тонны, а у некоторых из них и в десятки раз большая. Это соответствует содержанию приблизительно 10^{30}—10^{31} частиц в 1 $см^3$. Средняя плотность газа в Солнце в 1,4 раза превосходит плотность воды, так что на 1 $см^3$ приходится в миллионы раз меньше частиц, чем на такой же объем вещества белого карлика. Самые большие по объему звезды, красные гиганты, являются и наименее плотными. Они содержат в 1 $см^3$ в среднем 10^{15}—10^{16} частиц, что в тысячи раз меньше, чем число частиц в 1 $см^3$ воздуха у поверхности Земли. Но даже эта величина огромна по сравнению с плотностью диффузного вещества *).

В среде, заполняющей пространство между звездами, на 1 $см^3$ приходится всего несколько атомов. Распределение газа в пространстве крайне неравномерно. Основная его часть собрана в огромные облака, где плотность в 10—15 раз выше средней. Облака, тянущиеся на сотни и даже тысячи световых лет и подчас имеющие массу, которая в десятки тысяч раз превосходит солнечную, хаотически движутся со скоростями несколько километров в секунду. Помимо газа, в этих облаках часто содержатся твердые частички поперечниками 10^{-4}—10^{-5} *см*. Концентрация таких частиц, составляющих межзвездную пыль, удивительно мала — на 1 $км^3$ приходится всего 40—50 пылинок. Однако вследствие своей большой протяженности облака оказываются либо полностью непрозрачными для излучения расположенных за ними звезд, либо излучение этих звезд доходит до нас сильно ослабленным. Пыль по массе составляет всего 1—2% от общей массы межзвездного вещества.

Участки неба, занятые сравнительно близкими к нам газово-пылевыми облаками, представляются темными на фоне окружающих их областей, где видно множество далеких звезд. Такие облака называют темными диффузными туманностями. О размерах, плотностях и расстояниях от нас диффузных туманностей судят по вызываемому ими ослаблению общего излучения далеких звезд и по тому, как они поглощают излучение в различных длинах волн. Газ, заполняющий межзвездное пространство, спо-

*) Приведенные цифры не характеризуют, конечно, состояния газа в центральных областях звезд, где плотность значительно выше средней. Так, в центре Солнца плотность превосходит 100 $г/см^3$.

собен поглощать излучение в спектральных линиях. Поэтому в спектрах далеких звезд, излучение которых проходит сквозь толщу межзвездного газа, появляются дополнительные линии поглощения, называемые межзвездными. По интенсивности и смещению этих линий находят распределение поглощающего вещества в пространстве и скорости движения туманностей.

Мощным средством изучения межзвездной среды служат радионаблюдения. В большей части пространства температура межзвездного газа низка, порядка 100° К, и он не способен ни испускать оптическое излучение, ни поглощать его. Практически все атомы водорода при такой температуре находятся в основном энергетическом состоянии, а для перевода атома из этого состояния в ближайшее возбужденное энергии оптических квантов недостаточно. Но у атома водорода основной энергетический уровень состоит из двух очень близких так называемых подуровней, разность энергий которых соответствует энергии фотона с длиной волны 21 *см*. Фотоны с такой длиной волны, относящейся к хорошо наблюдаемой части радиодиапазона, могут и поглощаться и излучаться межзвездным водородом. Благодаря этому счастливому обстоятельству, удалось изучить распределение холодных облаков диффузного вещества в далеких областях Галактики, в том числе и в недоступных для оптических наблюдений ее частях, закрытых более близкими к нам газово-пылевыми облаками. Пылью радиоизлучение почти не ослабляется.

Газово-пылевые облака — темные туманности — располагаются сравнительно тонким слоем вблизи галактической плоскости, причем преимущественно, как и звезды, в спиральных рукавах. Если бы мы могли взглянуть на Галактику с ребра, то заметили бы в ее плоскости симметрии темную полосу, подобную той, которая видна на рис. 21. Это фотография одной из спиральных звездных систем, похожей на Галактику и видимой с ребра. Темная полоса в ее плоскости симметрии создается слоем межзвездного вещества, сильно поглощающего свет звезд, расположенных в этой плоскости.

Между звездой и межзвездной средой нет резкой границы. Плотность газа в атмосфере звезды с удалением от фотосферы уменьшается постепенно и достигает значений, характерных для межзвездного газа, лишь на довольно большом расстоянии. Так, например, в самых внешних

областях атмосферы Солнца, на расстоянии от его поверхности, равном нескольким радиусам Солнца, на 1 $см^3$ все еще приходится 10^4—10^5 атомов, что в тысячи раз больше, чем в межзвездной среде.

Внешние области атмосферы Солнца, называемые солнечной короной, являются, по существу, обширной

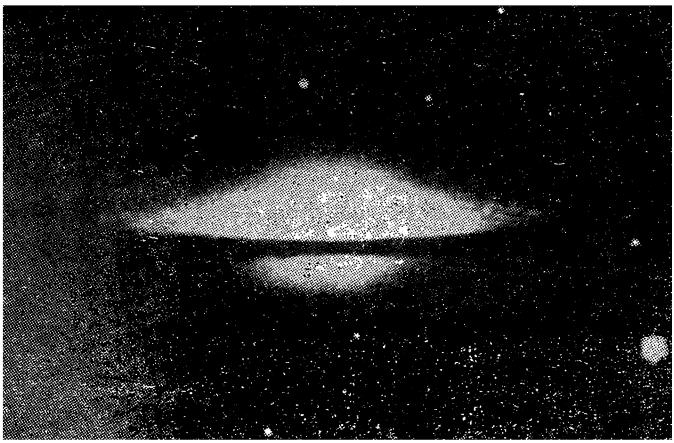

Рис. 21. Темный слой поглощающего свет вещества хорошо заметен на этом снимке спиральной галактики NGC 4594, видимой с ребра.

газовой оболочкой. В той или иной форме газовые оболочки существуют, по-видимому, у всех звезд. В дальнейшем нам придется подробно рассматривать оболочки звезд, возникающие при сильных космических взрывах. Взрыв может как создать оболочку, так и действовать на уже имеющуюся оболочку звезды. Именно благодаря изучению газовых оболочек взрывающихся звезд мы и располагаем довольно обширными данными о природе космических взрывов. В связи с выдающейся ролью газовых оболочек в интересующей нас проблеме рассмотрим подробнее процессы их свечения.

Одной из причин, вызывающих свечение диффузного вещества, является действие на разреженный газ излучения горячей звезды. Этот процесс особенно хорошо исследован для так называемых планетарных туманностей, по существу, представляющих собой гигантские звездные оболочки.

Обычно планетарные туманности имеют вид светлого диска или кольца, в центре которого расположена звезда *). Мы видим лишь проекцию туманности, а на самом деле она сферической формы. Поперечники планетарных туманностей огромны — порядка светового года. Общее оптическое излучение планетарной туманности во много раз сильнее, чем излучение центральной звезды в той же спектральной области. Следовательно, излучение туманности не может быть просто рассеянным в ней излучением звезды. Особый характер свечения туманности подтверждается и видом ее спектра. В нем главную роль играют эмиссионные линии, принадлежащие атомам водорода, гелия, дважды ионизованным атомам кислорода и другие, тогда как в спектре центральной звезды этих линий нет. Как мы уже говорили выше, спектр, состоящий из эмиссионных линий, характерен для излучения нагретого разреженного газа. Каким же путем возбуждается свечение планетарных туманностей, откуда, в данном случае, берется излучаемая энергия? Ответ на этот вопрос был дан еще в тридцатые годы. Разработанная тогда теория свечения планетарных туманностей сыграла важную роль в объяснении свечения звездных оболочек и, следовательно, в истолковании различных явлений, связанных со звездными взрывами.

Центральная звезда обычно имеет очень высокую температуру — порядка 100 000°. Из закона Вина следует, что при такой температуре основная часть энергии испускается звездой в области длин волн $3 \cdot 10^{-6}$—$5 \cdot 10^{-6}$ *см*. Излучаемые в этой области фотоны, имеющие энергию на порядок бо́льшую, чем фотоны оптического участка спектра, способны ионизовать атомы водорода, гелия и других элементов, составляющих туманность. В плазме, образованной излучением звезды, происходят рекомбинации атомов.

Ион, соединяясь с электроном, в одних случаях сразу образует атом в основном состоянии, в других же сначала получается возбужденный атом. Возбужденный атом, переходя в состояния с меньшей энергией, излучает фотоны, соответствующие спектральным линиям. Таким образом,

---

*) Первые наблюдатели этих туманностей назвали их планетарными из-за чисто внешнего сходства с дисками некоторых планет солнечной системы. Никакого отношения к планетам они не имеют.

в планетарных туманностях источником энергии свечения служит излучение горячей центральной звезды в невидимой ультрафиолетовой области спектра. Оно перерабатывается в туманности в оптическое излучение, преимущественно в частотах спектральных линий. Описанный процесс переработки излучения называется флуоресценцией.

Флуоресценция будет осуществляться беспрепятственно только при том условии, что атом за время перехода в другое состояние не столкнется с частицей (или фотоном), которая может возбудить его или отнять у него энергию. По спектру туманностей мы видим, что переходы атомов в состояния с меньшей энергией происходят. Следовательно, концентрация частиц в среде, составляющей туманность, и число фотонов, приходящихся на единицу ее объема, достаточно малы. Эти же условия выполняются в оболочках звезд и межзвездном газе. Поэтому расположенный вблизи горячих звезд (классов О и В) газ должен излучать, причем спектр его излучения (подобно спектру планетарных туманностей)состоит из эмиссионных линий. Если же температура звезды недостаточно высока, то излучение звезды неспособно возбуждать свечение газа, находящегося около нее.

Светящиеся области межзвездной среды называют светлыми диффузными туманностями. Помимо туманностей, излучение которых возникает путем флуоресценции, существуют и другие светлые туманности. Они видны, потому что содержащаяся в них пыль отражает свет близких звезд. Такую туманность можно сразу отличить по ее спектру, так как он аналогичен спектру освещающей звезды.

Видя спектр, состоящий из эмиссионных линий, мы вправе заключить, что в светящемся газе происходят возбуждение атомов и ионизация, сопровождающаяся рекомбинациями. Однако причиной ионизации вовсе не обязательно должно быть излучение горячей звезды. Возможно, например, что сталкиваются два газовых облака, летящие навстречу друг другу со скоростью десятков километров в секунду. Часть кинетической энергии облаков будет сначала затрачена на ионизацию атомов путем столкновений. Рекомбинируясь, эти атомы будут излучать энергию, в значительной доле, в частотах линий. В подобных случаях, с которыми мы встретимся в дальнейшем, в энергию излучения переходит, в конечном счете, кинетическая энергия газа.

Исследование эмиссионных линий в спектрах туманностей и звездных оболочек дает много сведений о характере источника свечения (в частности, о температуре звезды, возбуждающей свечение, если оно связано с флуоресценцией) и о состоянии излучающего газа. Так, например, о плотности газа можно судить по яркости туманности, которая определяется числом фотонов, излучаемых ею в той или иной спектральной линии. Эти фотоны возникают при рекомбинациях, т. е. при встречах ионов с электронами. Частота встреч зависит от того, насколько велика скорость частиц (определяемая температурой газа) и какова концентрация частиц в газе. Количество испускаемых единицей объема туманности за одну секунду фотонов определяется по интенсивности линии. Эту же величину в зависимости от температуры и плотности газа находят путем расчетов по известным характеристикам атомов. Сравнение наблюдаемой величины с выводами теории дает значения температуры и плотности газа, составляющего данную туманность. Указанным путем получили, что в 1 $см^3$ объема планетарной туманности содержится 10^3—10^4 атомов, а концентрация атомов в светлых диффузных туманностях в 10—100 раз меньше. Температура же у тех и у других около 10 000° К.

Мы рассмотрели различные формы, в которых наблюдается вещество, составляющее Галактику. Основная его часть — более 90% по массе — собрана в звезды, остальное приходится на темные и светлые туманности *). Выходя за пределы Галактики, мы встречаем вещество в этих же видах. Окружающее пространство содержит другие звездные системы — галактики, многие из которых очень похожи на нашу звездную систему, а другие по внешности сильно от нее отличаются. Нет оснований считать, что хотя бы у некоторых из галактик звездная и диффузная формы вещества не являются преобладающими.

Среднее расстояние между галактиками порядка миллиона световых лет. В пространстве, доступном наблюдениям с самыми большими из современных телескопов — вся эта область называется Метагалактикой — содержится свыше десяти миллиардов галактик. Галактики имеют

*) Некоторая доля, вероятно, очень малая по сравнению с количеством звездного вещества, может быть сконцентрированной в крупных телах, подобных планетам солнечной системы.

тенденцию к скучиванию. Встречаются группы или скопления галактик, насчитывающие сотни и тысячи членов. Между галактиками нет абсолютной пустоты, но вещество, заполняющее межгалактическое пространство, очень разрежено. Сейчас нет единого мнения о возможном значении плотности межгалактической среды, но вряд ли она содержит более десяти атомов в одном кубическом метре. Простой подсчет, который может сделать сам читатель, покажет ему, что бо́льшая часть вещества в Метагалактике сосредоточена в галактиках, а значит, и в масштабах Метагалактики звездная форма существования вещества оказывается главной. Однако недавние открытия грандиознейших явлений в Метагалактике, таких, как сверхзвезды или взрывы в ядрах галактик, заставляют задуматься о том, нет ли во Вселенной каких-то иных, еще не изученных форм существования вещества.

§ 4. ЭНЕРГИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Займемся теперь вопросом о роли различных видов энергии во Вселенной. О важности этого вопроса для интересующей нас проблемы космических взрывов не приходится много говорить, так как все процессы во Вселенной, в том числе и взрывы, связаны с переходом энергии из одной формы в другую. Не зная, в каких формах содержится энергия в данном небесном теле, невозможно понять природу происшедшего на нем взрыва.

Общего определения понятия «энергия» через какие-то другие, более простые понятия в науке нет. Представление же о различных видах энергии и способах вычисления количества энергии того или иного конкретного вида имеется у каждого, изучавшего физику. При всем видимом многообразии форм энергии ее почти всегда можно представить либо как потенциальную, либо как кинетическую энергию, хотя для некоторых видов (например, энергии магнитного поля) это трудно *).

Энергия, зависящая только от взаимного положения тел, называется потенциальной, безразлично, рассматриваем ли мы положение планеты относительно Солнца,

*) Подробное и сравнительно доступное обсуждение вопроса о формах энергии читатель может найти в «Фейнмановских лекциях по физике», т. I, гл. 14 (Изд-во «Мир», 1965).

положение частицы газа среди других частиц или положение электрона в атоме. Кинетическая же энергия обусловлена движением тел или частиц. Когда движение системы тел или частиц проявляется в достаточно больших, макроскопических, масштабах, то мы говорим о кинетической энергии в обычной форме, изучаемой в механике. Рассматривая движение фотонов, мы также имеем дело с кинетической энергией. И движениям в микромире, например, движениям молекул твердого тела, частиц внутри атома, или атомов в газе соответствует кинетическая энергия. Обычно кинетическую энергию микроскопических движений относят к внутренней энергии тел. Другая часть внутренней энергии создается взаимодействием частиц, составляющих тело, и связана с расположением частиц в теле — это потенциальная энергия.

Огромным числом физических опытов показано, что энергия не может ни исчезать, ни появляться вновь. В этом заключается закон сохранения энергии. Если рассматривать некоторую физическую систему, не учитывая ее взаимодействия с другими системами, то можно утверждать, что в такой системе сумма потенциальной и кинетической энергии остается постоянной. Однако полностью изолировать систему от других тел невозможно и высказанное утверждение верно лишь приближенно. Любая физическая система обменивается энергией с другими телами и в одних случаях этим можно пренебречь, а в других нельзя. Например, изучая движение планет вокруг Солнца, не учитывают действия на них других звезд, поскольку расстояния до звезд очень велики. Но на движении солнечной системы в целом влияние звезд, составляющих Галактику, сказывается: как мы знаем, в результате их притяжения Солнце движется вокруг центра Галактики. Существуют и другие виды воздействий — какая-то доля излучения звезд доходит до планет, на них падают космические лучи и т. п. Таким образом, сущность закона сохранения энергии не в постоянстве ее количества в данной системе, а в невозможности для энергии исчезнуть или быть созданной.

Как нам уже известно, в доступной наблюдениям области Вселенной основная доля вещества находится в звездах. Поэтому стоит начать изучение распределения энергии во Вселенной именно с оценки энергии, заключенной в звездах. Если не говорить о самых внешних слоях холод-

ных звезд, то можно считать, что звезды состоят из газа, содержащего только ионы и электроны. Так как водород является преобладающим химическим элементом, то число частиц в газе, составляющем звезду, грубо говоря, вдвое больше числа атомов водорода — ведь каждый атом дает две частицы, протон и электрон. Молекулярный вес водорода равен единице и, следовательно, средний молекулярный вес звездного вещества близок к $^1/_2$.

Частицы газа движутся, и их общая кинетическая энергия составляет тепловую энергию, заключенную в звезде. Наряду с этим, каждая из частиц газа притягивает другие по закону всемирного тяготения. Это действие гораздо существеннее, чем электростатическое. Хотя плазма состоит из заряженных частиц, она в целом является нейтральной — в любом достаточно большом ее объеме сумма положительных зарядов равна сумме отрицательных. Следовательно, вещество, находящееся в данном объеме плазмы, не испытывает силы электростатического взаимодействия со стороны другого объема. Этого нельзя сказать о тяготении — действие на любую частицу всех других частиц складывается. Таким образом, потенциальная энергия звезды практически обусловлена только тяготением.

Оценим величину потенциальной энергии звезды. Она определяется работой, которую нужно затратить против сил тяготения, чтобы «разнести» звезду по частицам на такие расстояния, где их действие друг на друга становится ничтожно малым и им можно пренебречь. В этом положении потенциальную энергию можно считать равной нулю. Поскольку для того, чтобы прийти к состоянию тела с нулевой энергией, работа должна быть затрачена, то потенциальную энергию тела следует считать отрицательной. Энергия же, за счет которой можно совершить работу, в данном случае тепловая, является положительной.

Вычисление работы против сил тяготения, требуемой для «разнесения» звезды, производится при помощи методов высшей математики. Принцип этого вычисления сравнительно несложен. Предполагают, что от звезды последовательно отрываются тонкие слои вещества и вычисляют работу, которую нужно затратить на удаление каждого из слоев, а затем суммированием находят работу по удалению всех слоев. Точное вычисление возможно также лишь

при известной структуре звезды. Поскольку распределение плотности в звезде нам не известно, придется ограничиться только порядковой оценкой величины потенциальной энергии.

Предположим, что от звезды сразу отрывают слой, заключающий в себе половину ее массы, и уносят этот слой на бесконечно большое расстояние. Для упрощения примем также, что масса этого слоя сосредоточена в таком же, как и оставшаяся масса, шаре, т. е. мы считаем, что звезда состоит из двух равных частей, центры которых удалены друг от друга на расстояние $\frac{R_*}{2}$, где R_* — радиус звезды. Сила взаимодействия этих частей определяется формулой (9), в которой нужно положить $M_1 = M_2 = \frac{M_*}{2}$ (M_* — масса звезды) и $r = \frac{R_*}{2}$. Однако и при таком упрощении остается трудность — мы умеем вычислять работу лишь в случае, когда сила постоянна, а при удалении масс друг от друга величина силы уменьшается.

Поскольку сила убывает с расстоянием быстро, мы подсчитаем только ту работу, которая потребуется, чтобы увеличить расстояние между центрами масс вдвое — от $\frac{R_*}{2}$ до R_*. Силу же на этом пути будем считать постоянной и тем самым в какой-то мере компенсируем неучтенную нами работу на расстояниях, бо́льших, чем R_*. Тогда величина потенциальной энергии U получится равной

$$U = -F\frac{R_*}{2} = -G\frac{\left(\frac{M_*}{2}\right)^2}{\left(\frac{R_*}{2}\right)^2}\frac{R_*}{2} = -G\frac{M_*^2}{2R_*}. \qquad (11)$$

Вычислим значение U по формуле (11) для Солнца. Ранее мы нашли, что $M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ *г*, а $R_\odot = 7 \cdot 10^{10}$ *см*. При этих значениях получаем, что потенциальная энергия Солнца порядка 10^{48} *эрг*. Если сделать точное вычисление, то получим величину в несколько раз большую — ведь «дробление» звезды не заканчивается «разнесением» ее на две части.

Следует помнить, что величину U нельзя считать запасом энергии звезды, а, наоборот, это энергия, которая должна была выделиться, если звезда образовалась путем

сжатия рассеянного вещества. При уменьшении радиуса звезды, например, вдвое, потенциальная энергия ее U увеличится по абсолютной величине в два раза, оставаясь отрицательной, т. е. будет равной $2U$. Следовательно, энергия, равная U, перешла в другие формы. Теоретически запас потенциальной энергии в звезде можно было бы считать неограниченным, если бы радиус звезды мог стать сколь угодно малым. На самом же деле звезда способна сжаться только до некоторого конечного объема, и энергия, выделяющаяся при сжатии, всегда остается конечной.

Можно доказать, опять-таки используя методы высшей математики, важное утверждение, называемое теоремой о вириале. Согласно этой теореме во всякой устойчивой системе частиц, не испытывающих действия внешних по отношению к ней сил и взаимодействующих по закону тяготения, выражаемому формулой (9), имеет место следующая зависимость между потенциальной энергией U и тепловой энергией T системы:

$$2T = -U, \tag{12}$$

т. е. удвоенная величина тепловой энергии равна величине потенциальной, взятой с обратным знаком. Звезду с большой точностью можно считать системой частиц, не подверженных внешним воздействиям, потому что другие звезды почти не влияют на составляющие ее частицы. Поэтому формула (12) применима к звезде, и при ее помощи легко оценивается тепловая энергия звезды. Для Солнца она, так же как и потенциальная энергия, порядка 10^{48} *эрг*.

Тепловая энергия звезды распределяется на все составляющие звезду частицы, но не в одинаковой мере. В недрах звезды температура выше, чем в ее поверхностных слоях и, соответственно, энергия движения частиц там больше. Тем не менее, интересно вычислить среднюю для всей звезды энергию, приходящуюся на одну частицу. Эта величина позволит найти среднее значение температуры в звезде.

Подсчитаем число частиц в Солнце. Принимая, что оно целиком состоит из водорода, находим число N атомов в Солнце, равное отношению его массы к массе $m_{\text{Н}}$ атома водорода *) ($m_{\text{Н}} = 1{,}65 \cdot 10^{-24}$ *г*). Так как $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ *г*,

*) Масса $m_{\text{Н}}$ получается делением массы грамм-атома на число Авогадро.

то получаем $N \approx 10^{57}$. Учитывая, что в Солнце атомы ионизованы, имеем для общего числа частиц в нем значение, примерно равное $2 \cdot 10^{57}$.

Отношение общей тепловой энергии Солнца к числу содержащихся в нем частиц порядка 10^{-9} *эрг*. Средняя энергия частицы газа связана с его температурой формулой (1), из которой при $\frac{m\bar{v}^2}{2} \approx 10^{-9}$ *эрг* получаем, что температура в недрах Солнца составляет в среднем около $5 \cdot 10^6$ °К. В его центральных областях температура выше полученного среднего значения и составляет, как найдено из более подробных расчетов, около 15 миллионов градусов.

Не представляет трудности и оценка величины газового давления внутри Солнца. Для нее можно применить формулу (2). Среднее значение n — числа частиц в 1 $см^3$ солнечного вещества — определяется, как отношение общего числа частиц, только что найденного нами, к объему Солнца, равному $\frac{4}{3}\pi R_{\odot}^3$. Выполнив соответствующие вычисления, получим для n значение около $4 \cdot 10^{23}$ частиц/$см^3$, а для давления P величину $P \approx 3 \cdot 10^{14}$ *дин*/$см^2$, т. е. сотни миллионов атмосфер.

Столь огромная (по земным масштабам) величина давления в недрах звезды может вызвать удивление и даже недоверие. Но легко понять, что звезда при малом давлении в ней просто не могла бы существовать и «спалась» бы к центру под действием собственного тяготения. Действительно, как обстоит дело, например, на Земле? Мы знаем, что вес тела обусловлен притяжением этого тела в направлении к центру Земли. Давление атмосферы — это ее вес, приходящийся на единицу земной поверхности; оно составляет около 1 *кг* на 1 $см^2$, что и называют давлением в одну атмосферу. При углублении внутрь Земли к весу атмосферы добавляется вес расположенного над данным уровнем слоя Земли. Давление быстро возрастает с удалением от поверхности вглубь Земли и в ее центральных областях достигает нескольких миллионов атмосфер.

Аналогичное положение имеет место и в звезде. На любом уровне в ней давление определяется весом слоя газа, находящегося над этим уровнем. Так как масса звезды очень велика, то и вес, приходящийся на единицу площади слоя, расположенного, например, по середине

между ее центром и поверхностью, гораздо больше соответствующей величины для Земли. Газ, составляющий звезду, может противостоять этому весу лишь благодаря очень большому давлению в нем, которое обусловлено как значительной плотностью, так и высокой температурой вещества.

Звезды разных классов различаются по величине температуры и давления в их недрах. Полученные для Солнца значения характерны для большинства звезд. У самых холодных звезд температура в центральной области несколько ниже, но и она составляет несколько миллионов градусов. Газ, обладающий столь высокой температурой, должен излучать огромное количество энергии. Образовавшиеся в нем фотоны, поглощаясь атомами и затем снова излучаясь, постепенно продвигаются во внешние слои звезды. Достигнувшие поверхности звезды фотоны испускаются ею в пространство и какую-то долю их мы воспринимаем как свет звезды.

Как мы убеждаемся, внутри звезды должно содержаться, помимо обычного газа, состоящего из частиц вещества, множество фотонов, составляющих «фотонный газ». Подсчитаем общую энергию фотонного газа, т. е. энергию заключенного в звезде излучения.

По своим излучательным свойствам недра звезды очень сходны с абсолютно черным телом. Относительно любого объема внутри звезды можно считать, что он поглощает всю падающую на него энергию и поэтому с поверхности, ограничивающей этот объем, должно излучаться столько же энергии, сколько им поглощается. Любая поверхность внутри звезды излучает как поверхность абсолютно черного тела.

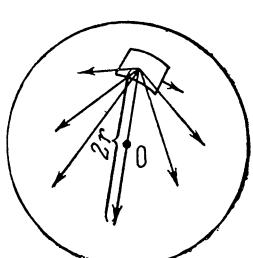

Рис. 22. Распространение излучения внутри шарового объема.

Представим себе шаровую поверхность очень малого радиуса r, охватывающую некоторый объем внутри звезды. В этой области, а значит, и на предполагаемой шаровой поверхности температура T практически одинакова. С поверхности шара внутрь его излучается за 1 *сек* количество энергии, равное $4\pi r^2\sigma T^4$. Фотоны находятся внутри шара лишь то время, которое им требуется, чтобы пролететь

сквозь него со скоростью c *). Фотон, движущийся вдоль радиуса, затрачивает на путь сквозь шар время $\frac{2r}{c}$. Но фотоны испускаются поверхностью во всех направлениях и летят не только вдоль диаметра шара, но и по хордам. Более детальный расчет позволяет найти, что путь фотона в шаре в среднем составляет $\frac{4}{3}r$. Следовательно, в каждый данный момент в объеме шара содержится энергия излучения, равная $4\pi r^2 \cdot \sigma T^4 \cdot \frac{4}{3}\frac{r}{c}$.

Разделив полученную величину на объем шара $\frac{4}{3}\pi r^3$, найдем плотность излучения, т. е. количество энергии излучения, приходящейся на 1 $см^3$. Как мы видим, она равна $\frac{4\sigma}{c}T^4$. Точно вычислить общее количество энергии излучения в звезде $E_{изл}$ можно лишь при известных значениях T для каждой области звезды. Однако правильный порядок величины $E_{изл}$ получим, умножив плотность излучения, соответствующую средней температуре звезды, на объем звезды:

$$E_{изл} \approx \frac{4\sigma}{c} T_{ср}^4 \cdot \frac{4}{3}\pi R_*^3 . \qquad (13)$$

В (13) величина R_* означает радиус звезды. Используя известные значения $T_{ср}$ и R_* для Солнца, мы находим, что $E_{изл\odot} \approx 10^{43}$ *эрг*. Таким образом, энергия излучения, заключенного в Солнце, гораздо меньше, чем его тепловая энергия. Это же справедливо и для других звезд.

Звезда непрерывно излучает энергию со своей поверхности в пространство, причем это есть, по существу, излучение нагретого газа и обеспечивается оно тепловой энергией звезды. Тепловая энергия, содержащаяся в звезде, должна все время восполняться, иначе она за сравнительно короткий срок вся израсходуется на излучение. Например, для Солнца, излучающего ежесекундно $3{,}9 \cdot 10^{33}$ *эрг*, заключенной в нем тепловой энергии не хватило бы даже на тридцать миллионов лет. Мы же знаем, хотя бы по данным геологии, что излучение Солнца было приблизи-

*) Если часть фотонов поглощается, то вместо них в этом объеме образуется такое же число фотонов. Поэтому в данном рассуждении поглощение излучения можно не принимать во внимание.

тельно таким же, как и в настоящее время, более миллиарда лет.

Очевидно, что затраченная на излучение энергия Солнца не могла сколько-нибудь существенным образом пополниться за счет преобразования потенциальной энергии. Даже если Солнце возникло из очень разреженного облака, потенциальная энергия которого (в указанном выше смысле) была близка к нулю, то освободившаяся при сжатии облака до теперешнего размера Солнца энергия порядка 10^{48} *эрг* не могла обеспечить столь длительного свечения.

Аналогичная ситуация имеет место и для других звезд, по крайней мере тех из них, которые близки по своей светимости и массе к Солнцу. Значит, в звездах существуют какие-то возможности пополнения тепловой энергии — запасы энергии в скрытом виде. Оценка этих запасов станет для нас возможной после того, как мы ознакомимся с одним из очень важных положений теории относительности, а именно с эквивалентностью массы и энергии.

Теория относительности заставила отказаться от привычного представления о массе тела, как величине постоянной. Оказывается, что масса зависит от скорости движения тела. Изменение величины массы как меры сопротивления тела действию на него силы обусловлено законом сохранения количества движения. Количество движения не может возникнуть из ничего, без участия силы. Если, в частности, сила F, действующая на тело, постоянна, то за время t она изменит количество движения mv (m — масса тела, v — его скорость) от величины $(mv)_0$ до значения $(mv)_t$, причем

$$(mv)_t - (mv)_0 = Ft. \qquad (14)$$

Одно из основных положений теории относительности состоит в том, что невозможно никакое движение со скоростью, большей чем скорость света c. Если скорость тела в начале действия силы была уже близка к c, то сколько бы сила ни действовала, она не может существенно ее увеличить. Количество же движения будет возрастать и при достаточном большом времени действия силы величина $(mv)_t$ может стать сколь угодно большой. Следовательно, при скоростях движения, близких к c, масса тела под действием силы растет, т. е. увеличивается сопротивление, оказываемое телом изменению состояния его движения. Чем быстрее движется тело, тем больше его инерция. Зависимость массы тела от скорости его движения

определяется формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (15)$$

вывод которой потребовал бы слишком много места и поэтому здесь мы его не приводим. С ним можно познакомиться, в частности, по книге «Беседы о теории относительности» Б. Г. Кузнецова (изд. АН СССР, 1963).

Величина m_0 представляет собой значение массы тела при равной нулю скорости и называется массой покоя. Зависимость массы от скорости сказывается лишь при значениях v в десятки тысяч километров в секунду. Даже при огромной в земных условиях скорости $v = 1000$ *км/сек* и, соответственно, величине $\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{90000}$, значение m отличается от m_0 менее, чем на 0,002%. Поэтому изменение массы, вызванное движением, заметно только у очень быстрых частиц, движущихся со скоростью, близкой к скорости света, например у частиц, разгоняемых магнитным полем в ускорителе (синхрофазотроне), или у частиц, составляющих космические лучи. Если $\frac{v}{c}$ намного меньше единицы, то соотношение (15) между массой и скоростью приближенно можно записать в виде

$$m = m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2}. \qquad (16)$$

При $\frac{v}{c} \leqslant \frac{1}{10}$ это соотношение верно с точностью до 0,005%*).

*) Так как при $\frac{v}{c}$ достаточно малых, $\frac{v^4}{c^4}$ очень мало по сравнению с $\frac{v^2}{c^2}$, то имеем $\left(1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)^2 = 1 - 2\cdot\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4} \approx$ $\approx 1 - \frac{v^2}{c^2}$. Поэтому

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)^2}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}} =$$

$$= 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4} + \ldots \approx 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}.$$

Здесь мы воспользовались известной формулой для суммы бесконечной геометрической прогрессии (со знаменателем, в данном случае, $\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}$).

Таким образом, оказывается, что вследствие движения тела масса его увеличивается на величину кинетической энергии, деленной на c^2. Если это увеличение массы, равное $m - m_0$, обозначить Δm, то получим важную формулу

$$\Delta m = \frac{E}{c^2}. \qquad (17)$$

Сделанное нами ограничение, что v намного меньше c, вызвано только стремлением к упрощению вывода и не является существенным. Эта формула верна при любом значении $\frac{v}{c}$.

Соотношение (17) устанавливает связь между массой и энергией. Хотя оно нами здесь выведено для случая, когда E кинетическая энергия, но поскольку эта энергия есть результат преобразования энергии других видов, можно утверждать, что всякой энергии соответствует некоторая масса. Энергия и масса не одно и то же: говорят, что они эквивалентны, т. е. изменение энергии тела всегда пропорционально изменению его массы.

Вследствие эквивалентности массы и энергии, телу свойственна определенная энергия, если оно и не движется. Массе покоящегося тела, равной m_0, соответствует энергия покоя $E_0 = m_0c^2$. При некоторых условиях энергия E_0 может превратиться в другие виды энергии, например, в излучение. Такое превращение называют аннигиляцией («уничтожением»). То, что процессы аннигиляции наблюдаются в действительности, блестяще подтверждает заключение теории относительности о связи массы и энергии. Одно из таких многократно наблюдавшихся явлений — аннигиляция электрона при встрече с другой частицей, называемой позитроном. По своей массе и по величине электрического заряда эти частицы не отличаются друг от друга, но знаки зарядов у них противоположны. Соединяясь, электрон и позитрон перестают существовать и при этом возникает излучение. Энергия получившихся фотонов составляет $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ *эрг*, что в точности равно произведению удвоенной массы электрона $2{,}9 \cdot 10^{-28}$ *г* на квадрат скорости света.

Массе звезды M_* соответствует энергия M_*c^2. Для Солнца, например, $M_\odot c^2 = 1{,}8 \cdot 10^{54}$ *эрг*. Это значение в сотни тысяч раз превышает тепловую энергию Солнца, что и

понятно, поскольку средние скорости движения частиц, составляющих Солнце, малы по сравнению со скоростью света. Величина $M_{\odot}c^2$ определяет полный запас энергии звезды. Но далеко не вся эта энергия способна в условиях звезды перейти в другие виды энергии.

Полная аннигиляция возможна только в том случае, когда частицы и соответствующие античастицы содержатся в одинаковом количестве. О Солнце и других звездах Галактики нет оснований думать, что они в сколько-нибудь существенной части состоят из антивещества. Поэтому хотя в них и вырабатывается энергия путем рассматриваемых ниже термоядерных реакций, но это приводит лишь к незначительному уменьшению массы звезды.

Определим изменение массы вещества в результате выработки энергии при реакциях так называемого протон-протонного цикла. Эти реакции, по современным воззрениям, являются источником энергии свечения Солнца и подобных ему звезд. Они сводятся к образованию ядер атомов гелия из ядер атомов водорода — протонов.

Ядра всех атомов, кроме водорода, являются сложными. Они состоят из положительно заряженных частиц — протонов и частиц почти такой же массы, лишенных заряда — нейтронов. Напомним, что ядро атома гелия (называемое также α-частицей) состоит из двух протонов и двух нейтронов. Частицы в ядре атома связаны особыми внутриядерными силами, действие которых сказывается только при очень малых расстояниях между частицами. Для того чтобы удалить, например, из α-частицы протон, нужно произвести работу против внутриядерных сил, т. е. затратить энергию. Эта энергия называется энергией связи протона в α-частице. При соединении же двух протонов и двух нейтронов в α-частицу должна освобождаться энергия, равная их энергии связи.

Не останавливаясь пока на условиях, при которых может происходить образование α-частиц из протонов, рассмотрим последовательные этапы этого цикла. Если при встрече двух протонов (мы условно обозначаем протон буквой p) им удастся достаточно сблизиться, то возможно образование ядра атома дейтерия (тяжелого водорода D^2), которое состоит из протона и нейтрона. Нейтрон, входящий в состав D^2, получается из протона. Превращение протона в нейтрон сопровождается испусканием положительно заряженной частицы — позитрона e^+ (о ней мы уже говори-

ли выше), и особой частицы, не имеющей заряда — нейтрино (обозначают ее ν). Кроме того, при соединении частиц выделяется фотон очень большой энергии — γ-квант. Реакция образования D^2 схематически записывается следующим образом:

$$p + p \rightarrow D^2 + e^+ + \nu + \gamma. \qquad (I)$$

Позитрон e^+ в дальнейшем аннигилирует, встретившись с каким-либо свободным электроном, и при этом получаются еще два γ-кванта.

Ядро дейтерия, соединяясь с достаточно близко подошедшим к нему протоном, образует новую частицу — ядро изотопа гелия He^3, содержащее два протона и нейтрон. Эта реакция также протекает с выделением энергии в виде γ-кванта:

$$D^2 + p \rightarrow He^3 + \gamma. \qquad (II)$$

Получившееся ядро He^3 может вступать в различные реакции, но в звездах наиболее частой является реакция между двумя частицами He^3. Она происходит согласно следующей схеме:

$$He^3 + He^3 \rightarrow He^4 + p + p + \gamma, \qquad (III)$$

т. е. ведет к образованию α-частицы (He^4), двух протонов и γ-кванта.

Таким образом, в итоге протон-протонного цикла реакций вместо четырех протонов получаются α-частица, несколько γ-квантов и нейтрино. Масса покоя α-частицы m_{He^4} меньше массы четырех протонов $4m_p$. Величина разности $4m_p - m_{He^4}$ и определяет количество вещества, эквивалентного выделившейся энергии, а отношение $\frac{4m_p - m_{He^4}}{4m_p}$ есть доля массы, соответствующей энергии, вырабатываемой в реакциях протон-протонного цикла. Она составляет $\frac{4 \cdot 1{,}0081 - 4{,}0039}{4 \cdot 1{,}0081} = 0{,}007$ (значения масс здесь взяты в единицах атомного веса). Как мы видим, масса вещества в результате протон-протонного цикла уменьшается всего на семь десятых процента от массы водорода, содержавшегося в веществе.

Термоядерные реакции происходят в плазме лишь при определенных условиях, не реализующихся, например, во внешних слоях звезд или в межзвездной среде. Далеко

не при каждой встрече двух протонов образуется ядро атома дейтерия. Протоны, как одинаково заряженные частицы, испытывают действие электростатического отталкивания, тем большее, чем ближе они находятся друг к другу. Протон как бы окружен преградой, препятствующей сближению с ним другой положительно заряженной частицы. Поэтому употребляют особое выражение — говорят, что у протона существует потенциальный барьер. Внутриядерные же силы притяжения очень быстро убывают с расстоянием и только при расстояниях между частицами порядка 10^{-13} *см* или меньших они превосходят силы электростатического отталкивания. Следовательно, ядро атома дейтерия образуется лишь в том случае, когда относительная скорость сталкивающихся протонов настолько велика, что соответствующая ей кинетическая энергия достаточна для преодоления потенциального барьера. Один из протонов, пробившись через барьер в область действия внутриядерных сил, превращается там в нейтрон. Аналогичный потенциальный барьер одноименно заряженным частицам приходится преодолевать и при других термоядерных реакциях.

Если температура плазмы недостаточно высока, скажем, 3—5 миллионов градусов, то протонов с необходимым для преодоления потенциального барьера значением скорости почти нет и протон-протонная реакция не идет. При температурах же, близких к 15 миллионам градусов, сравнительно большая доля частиц имеет энергию, позволяющую им подойти к другой частице достаточно близко для образования более сложного ядра. Таким образом, одно из необходимых условий протон-протонного цикла — это высокая температура плазмы — порядка $15 \cdot 10^6$ °K. С другой стороны, для того чтобы встречи протонов происходили часто, требуется высокая концентрация этих частиц. Оба эти условия выполняются в центральных областях Солнца и сходных с ним звезд. Водород является преобладающим элементом в Солнце и в недрах его ионизован. Число протонов в центральных областях Солнца составляет примерно 10^{26} *см*$^{-3}$, а температура там 15 миллионов градусов. Идущие в Солнце реакции протон-протонного цикла обеспечивают наблюдаемый выход энергии излучения $3{,}9 \cdot 10^{33}$ *эрг/сек*.

Энергия при протон-протонном цикле выделяется преимущественно в форме γ-квантов, и при взаимодействии

с веществом звезды превращается в тепловую энергию. Некоторая часть энергии уносится нейтрино. Эта частица обладает замечательным свойством — она настолько слабо взаимодействует с любыми другими частицами, что практически беспрепятственно проходит сквозь толщу Солнца. Поток нейтрино из Солнца и других звезд пронизывает все пространство и находящиеся в нем тела, включая Землю, не производя при этом никаких непосредственно заметных эффектов *).

Преобразование всего водорода, содержащегося в Солнце, в гелий может дать $2 \cdot 10^{33} = 0{,}6 \cdot c^2 \cdot 0{,}007 \approx 7{,}6 \cdot 10^{51}$ *эрг*. При наблюдаемом в настоящее время расходе энергии на излучение, этого количества должно хватить на $2 \cdot 10^{18}$ *сек*, т. е. на десятки миллиардов лет.

Все описанные виды энергии относятся к внутренней энергии звезды. Но звезда обладает и механической энергией, обусловленной, во-первых, движением ее как целого, и во-вторых, взаимодействием звезды с другими телами входящими в звездную систему.

По наблюдаемым спектрам звезд было обнаружено, что многие из них сравнительно быстро вращаются вокруг своей оси. Скорость движения на экваторе звезды, созданная вращением, составляет десятки, а иногда даже сотни километров в секунду. Медленное вращение, приводящее к экваториальным скоростям в несколько километров в секунду, по спектрам звезд заметить трудно. Однако хорошо известно, что Солнце вращается и линейная скорость вращения на его экваторе равна 2 *км/сек*. Можно полагать, что звезды, у которых по спектрам не удалось обнаружить вращения, все же обладают вращательной скоростью такого же порядка или даже несколько большей.

Значение скорости в различных точках внутри вращающейся звезды не одинаково и зависит от расстояния данной точки от оси вращения. Поэтому для точного вычисления кинетической энергии необходимо знать распределение вещества внутри звезды. Если считать, что вещество звезды не очень сильно сконцентрировано в ее центральных областях, то порядковую оценку кинетической энергии вращения можно получить, приняв всю массу звезды сосредоточенной на одном и том же расстоянии от оси вращения,

---

*) Произведенными недавно опытами были зарегистрированы (в очень малом числе) нейтрино солнечного происхождения.

скажем, на расстоянии $\frac{R_*}{2}$, где R_* — радиус звезды. При угловой скорости вращения, равной ω, линейная скорость массы в этой модели составит $2\pi\frac{R_*}{2}\omega$ и для кинетической энергии вращения $E_{вр}$ получится формула

$$E_{вр} = \frac{1}{2} M_* (\pi R_* \omega)^2. \qquad (18)$$

Так как находимая из наблюдений Солнца линейная скорость на его экваторе $2\pi R_\odot \omega_\odot = 2 \cdot 10^{-5}$ *см/сек*, то для его энергии вращения получаем величину $E_{гр\odot} \approx 10^{43}$ *эрг*. Она мала по сравнению с тепловой энергией. У звезды, вращающейся с большой скоростью, например, 300 *км/сек* на экваторе, энергия вращения может достичь 10^{47} *эрг*. Указанное значение скорости близко к предельно возможному, потому что при существенно большей скорости звезда должна быть разорвана на части центробежными силами. Следовательно, даже у наиболее быстро вращающихся звезд энергия вращения меньше тепловой энергии *).

Механическая энергия звезд, входящих в двойную систему, может быть весьма значительной. Пусть, например, две звезды с массами, равными солнечной ($M_1 = M_2 = M_\odot$), вращаются вокруг общего центра тяжести, причем расстояние a между ними такое же, как от Солнца до Земли. Поскольку скорость V у обеих звезд одна и та же, то их кинетическая энергия равна $\frac{1}{2}(M_1 + M_2) V^2 = M_\odot V^2$. Скорость V связана с периодом обращения соотношением $P = \frac{2\pi \cdot \frac{a}{2}}{V} = \frac{\pi a}{V}$. Используя это соотношение и формулу (10), получаем, что $V^2 = \frac{GM_\odot}{2a}$, а кинетическая энергия их $\frac{GM_\odot^2}{2a}$. При $a = 1{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*, кинетическая энергия звезд составляет 10^{46} *эрг*. В случае же, когда расстояние между компонентами системы в сто раз меньше (такие системы встречаются сравнительно часто), их энергия

*) Так как на поверхности многих звезд существуют магнитные поля, следовало бы оценить и магнитную энергию звезды. Сейчас это сделать трудно, поскольку нам неизвестны поля внутри звезд. Вероятно, магнитная энергия значительно меньше тепловой.

равна 10^{48} *эрг*, т. е. такого же порядка, как и тепловая энергия звезд. Таким образом, чем более тесной является двойная система, тем больше энергия входящих в нее звезд. Этот вывод следует, как легко видеть, и из теоремы о вириале (соотношение (12)).

В звездных системах, занимающих большой объем и содержащих много звезд, таких, как шаровые скопления Галактики, помимо кинетической энергии звезд и туманностей и потенциальной энергии их тяготения, содержится «рассеянная» энергия. В нее включается энергия различных излучений, в частности, излучения звезд, космических лучей и магнитная энергия, распределенные по всему пространству, занимаемому звездной системой.

Каждая из звезд Галактики обладает собственным, так называемым пекулярным движением относительно других звезд. Эта скорость в среднем равна 10—20 *км/сек*. Следовательно, на каждую звезду приходится кинетическая энергия порядка 10^{45} — 10^{46} *эрг*. Скорости звезд, вызванные вращением всей Галактики вокруг ее центра, больше пекулярных, и составляют несколько сотен километров в секунду. Это дает около 10^{48} *эрг* на каждую звезду Галактики, а на всю систему 10^{59} — 10^{60} *эрг*. Согласно теореме о вириале такого же порядка должна быть и потенциальная энергия Галактики.

Величина «рассеянной» энергии в Галактике в тысячи раз меньше полученной величины механической энергии и, по-видимому, не превышает 10^{56} *эрг*. Поскольку плотность этой энергии — содержание энергии в единице объема — очень мала, то большое количество ее не может достаточно быстро перейти в другие виды и, вероятно, роль таких форм энергии в возникновении космических взрывов не столь существенна, как энергии, сосредоточенной в плотных небесных телах.

§ 5. ВЗРЫВЫ НА СОЛНЦЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Благодаря нашей близости к Солнцу, даже сравнительно слабые явления на его поверхности, которые мы большей частью не замечаем на других звездах, хорошо наблюдаются. Более того, в ряде случаев их последствия непосредственно ощущаются обитателями Земли. К таким

явлениям относятся и небольшие по космическим масштабам взрывы на поверхности Солнца, называемые хромосферными вспышками. Очень малой доли энергии, выделившейся при хромосферной вспышке и достигшей Земли, оказывается достаточно, чтобы изменить состояние земной атмосферы, вызвав нарушения радиосвязи, полярные сияния и другие эффекты. Поэтому изучение природы хромосферных вспышек представляет не только теоретический интерес. Поняв их характер, мы получим возможность предсказывать хромосферные вспышки и заблаговременно принимать меры к уменьшению вредных последствий действия вспышек на различные области человеческой деятельности.

Прежде чем детально рассматривать хромосферные вспышки, обратимся к другим процессам, происходящим во внешних слоях Солнца и тесно связанным со вспышками. В первую очередь речь пойдет о пятнообразовательной деятельности Солнца. Пятна представляют одну из наиболее заметных и хорошо известных особенностей поверхности Солнца.

Мы уже отмечали, что поверхность любой звезды, а значит, и Солнца, определяется условно, как тот слой, глубже которого ничего нельзя увидеть вследствие непрозрачности звездного вещества. Эта поверхность и примыкающие к ней слои Солнца называемые, как мы знаем, фотосферой, не находятся в спокойном состоянии. При наблюдении в телескоп обнаруживается, что фотосфера состоит из светлых ячеек или зерен. Ячейки эти, называемые гранулами, имеют в поперечнике 500—1500 *км* и отделены друг от друга более темными прожилками. Они оказываются очень недолговечными образованиями. За несколько минут одни гранулы исчезают, а на месте их появляются другие.

Гранулы представляют собой видимые нами внешние области газовых масс, поднимающихся из глубины фотосферы. Этот газ имеет более высокую температуру (приблизительно на 100° К), чем окружающая его среда, плотность его соответственно меньше плотности среды и поэтому он «всплывает» к поверхности Солнца. Там газ излучает часть своей энергии в пространство, охлаждается, и затем, становясь тяжелее окружающей среды, погружается вглубь фотосферы, уступая место новым порциям нагретого газа. Такой способ переноса части тепловой энергии из недр

Солнца к его поверхности называется конвективным переносом.

Время от времени среди гранул появляется множество небольших темных областей, которые, сливаясь, образуют пятно. В поперечнике пятно может быть от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч километров. Чаще пятна располагаются группами, причем в группе имеется два самых больших «главных» пятна. Область, занимаемая группой пятен, иногда составляет заметную долю всего

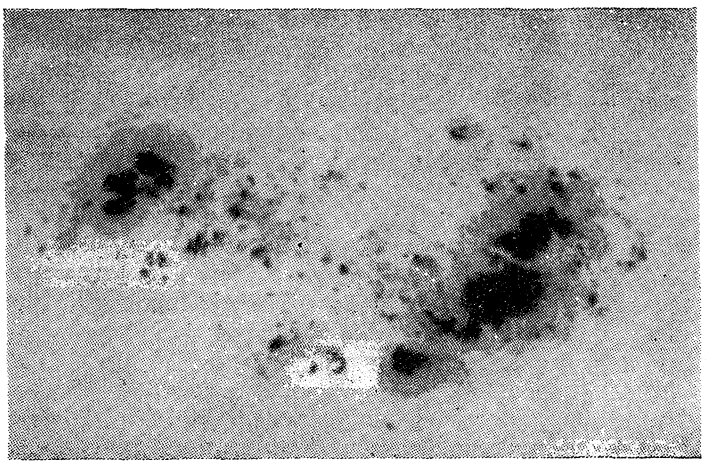

Рис. 23. Строение большой группы солнечных пятен.

диска Солнца. Продолжительность жизни пятен бывает различной — одни из них существуют день-два, а другие наблюдаются месяцами.

Часто группа пятен, двигаясь по диску Солнца, скрывается за его краем, а затем, приблизительно через 14 дней, появляется на противоположном краю диска. Такое движение является, очевидно, следствием вращения Солнца, о котором мы говорили выше. Интересно, что пятна, расположенные вблизи солнечного экватора, движутся по диску быстрее, чем удаленные от экватора. Отсюда заключают, что Солнце вращается не как твердое тело. Точки, находящиеся на экваторе, совершают полный оборот вокруг оси Солнца за 25 суток, а точки на широте 30° — за 26,2

суток. Причины этого явления не выяснены, но оно, согласно некоторым теориям, может играть существенную роль в пятнообразовательной деятельности Солнца и связанных с этим процессах.

Темная внутренняя область пятна называется его тенью. Внешние, более светлые области, имеющие волокнистое строение, составляют полутень пятна. Температура внутри тени пятна на 1000—1500° ниже, чем температура поверхности Солнца вне пятна. Соответственно, излучательная способность газа в пятне слабее. Излучение с единицы площади пропорционально, как мы знаем, четвертой степени температуры. Поэтому различие в температуре между пятном и фотосферой на 25—30% приводит к уменьшению яркости в пятне в несколько раз по сравнению с фотосферой. Оно кажется темным лишь по контрасту с более яркой фотосферой, являющейся фоном. Сама же по себе яркость пятна очень велика — ведь газ в нем имеет температуру в несколько тысяч градусов.

Поскольку поверхность Солнца внутри пятна излучает меньше энергии, чем вне его, то в этом месте фотосферы существуют какие-то факторы, препятствующие выносу энергии на поверхность. Пониженное излучение пятен связывают с наблюдаемым присутствием в них сильных магнитных полей.

Исследуя эффект Зеемана в спектрах выходящего из пятен излучения, нашли, что напряженность поля во многих из них достигает нескольких тысяч эрстед *), причем пятно занимает иногда площадь в сотни миллионов квадратных километров. Поле такого порядка создается в центре кольца радиусом 5 *см*, если пропускать по нему ток силой 1000 *а*. Для сравнения напомним, что напряженность магнитного поля Земли, действующего на стрелку компаса, составляет несколько десятых долей эрстеда.

В области, занятой группой пятен, поле присутствует не только в самих пятнах, но и в пространстве между ними. Там оно слабее, чем в пятнах — его напряженность порядка десятков, а иногда и сотен эрстед, и распределено очень неоднородно.

*) Единица напряженности магнитного поля в системе СИ называется ампервиток на метр (*ав/м*). Между единицами напряженности в системах CGSE и СИ имеет место следующее соотношение: $1\ э = \frac{10^3}{4\pi}\ ав/м$.

По поляризации излучения в компонентах линий, расщепленных вследствие эффекта Зеемана, определяется направление магнитного поля в пятнах. Оказывается, что магнетизм одного из больших, главных пятен в группе обычно противоположен магнетизму другого главного пятна в том смысле, в каком противоположны северный и южный магнитные полюса Земли. Внутри пятна магнитные силовые линии направлены приблизительно перпендикулярно к поверхности Солнца, т. е. получается, что линии как бы входят в одно из главных пятен группы и выходят из другого.

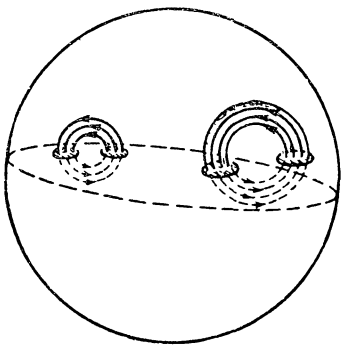

Рис. 24. Схема, иллюстрирующая связь солнечных пятен с магнитными полями.

Хорошо известно, что силовые линии магнитного поля не могут прерываться — они замкнуты. Поэтому из указанного расположения линий в группе пятен сделали вывод о присутствии под поверхностью Солнца изогнутого пучка силовых линий (силовой трубки), т. е. подобия подковообразного магнита, полюсам которого и соответствуют пятна. Некоторые явления в атмосфере Солнца, о которых мы скажем немного позже, показывают, что и над поверхностью Солнца силовые линии образуют подобие дуги или петли. Таким образом, солнечные пятна представляют собой места пересечения кольца, состоящего из магнитных силовых линий, с поверхностью Солнца: часть кольца находится под солнечной поверхностью, а другая часть — над ней.

Присутствием под пятнами сильного магнитного поля объясняют и их более низкую, чем у остальной поверхности Солнца, температуру. Как мы уже говорили, значительная доля энергии, излучаемой Солнцем, выносится из глубоких слоев путем конвекции, т. е. движения к поверхности относительно горячих масс газа. Так как этот газ содержит ионизованные атомы, то он является плазмой. Магнитное поле влияет на движение заряженных частиц и, в частности, его действие на плазму таково, что оно препятствует конвективным движениям под пятном. Поэ-

тому в пятне на поверхность выносится меньше энергии, чем в соседней с ним области Солнца. В результате пятно оказывается более холодным, значит и не столь ярким, как остальная фотосфера. Участки же вблизи пятна местами становятся горячее, как показывает присутствие около пятен более ярких областей фотосферы, называемых факелами.

Над фотосферой Солнца находится атмосфера — слой газа, способный поглощать излучение только в спектральных линиях и, соответственно, испускающий излучение также лишь в этих длинах волн (речь здесь идет об оптическом излучении). Общее излучение атмосферы на фоне яркой фотосферы обычно незаметно, так как глаз воспринимает свет, испускаемый фотосферой во всем оптическом диапазоне, а доля линий в нем невелика. Однако оно хорошо видно во время полного солнечного затмения, когда фотосфера Солнца закрыта диском Луны. Та часть атмосферы, которая проектируется на неосвещенное небо, образует светлое кольцо вокруг Солнца. Спектр излучения этого кольца состоит из эмиссионных линий, как и должно быть, поскольку излучает слой горячего газа, прозрачный в частотах непрерывного спектра. Сравнительно большая доля излучения кольца приходится на линию водорода, расположенную в красной области спектра (ее обозначают H_α). В результате цвет наблюдаемого слоя атмосферы Солнца красный; этот слой назвали хромосферой — цветной сферой (слово «хрома» по-гречески означает цвет). Хромосфера простирается до высоты 15—20 тысяч километров над поверхностью Солнца. Строение ее неоднородно. Она представляется состоящей из отдельных светлых волокон, которые доходят до самых внешних разреженных областей атмосферы, называемых солнечной короной.

Так как хромосфера окутывает всю поверхность Солнца, то в линиях должны излучать не только те ее части, которые проектируются на небо, но и области, проектирующиеся на диск. Как мы уже говорили, общее излучение фотосферы «забивает» атмосферное излучение. Но в частотах линий наблюдаемое излучение хромосферы гораздо больше, чем фотосферы в тех же участках длин волн. Поэтому если наблюдать диск Солнца в очень узкой области спектра — внутри линии, будет восприниматься в основном излучение находящихся над диском областей хромосферы и лишь в малой части—излучение фотосферы. Подобные наблюде-

ния производят при помощи прибора, называемого спектрогелиографом, который фиксирует излучение, идущее от Солнца лишь в узком промежутке длин волн. Фотографии Солнца, снятые в лучах какой-либо из сильных спектральных линий, дают распределение излучения в этой линии

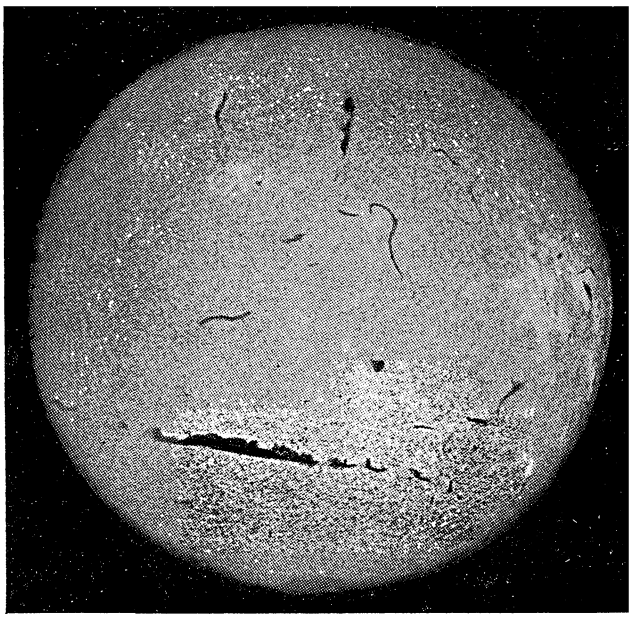

Рис. 25. Спектрогелиограмма Солнца в лучах $H\alpha$ (4 апреля 1959 г.).

по диску Солнца и являются, по существу, снимками хромосферы.

На снимках Солнца — спектрогелиограммах, полученных, например, в лучах, соответствующих водородной линии $H\alpha$, обнаруживается ряд интересных особенностей. Оказывается, что различные области хромосферы излучают неодинаково — на диске видны темные и светлые области. Светлые участки, называемые флоккулами, в которых излучение хромосферы в линии $H\alpha$ относительно сильнее, располагаются поблизости от солнечных пятен. Темные же области очень вытянуты и напоминают волокна.

Волокно кажется темным лишь вследствие контраста с более яркими соседними областями диска Солнца. Когда вследствие вращения Солнца волокно попадает на край диска, то на фоне темного неба оно представляется очень ярким. В этом случае мы наблюдаем явление солнечного протуберанца. Темное волокно существует сравнительно долго, до нескольких месяцев, лишь медленно меняя свою форму. Вблизи пятен на спектрогелиограммах наблюдаются

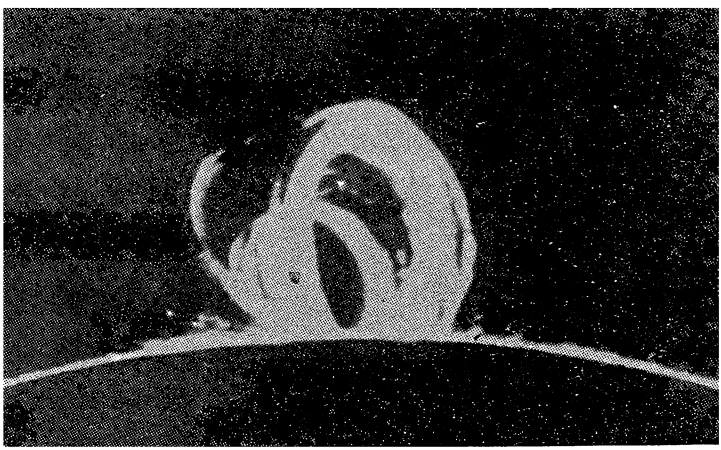

Рис. 26. Протуберанец над группой солнечных пятен.

и быстро меняющие свой вид относительно темные образования меньших, чем волокна, размеров. На краю диска они также имеют вид ярких выступов — протуберанцев. В отличие от долго живущих протуберанцев, называемых спокойными (которые соответствуют темным волокнам), эти протуберанцы называют эруптивными, т. е. имеющими характер извержения.

Для исследования движений протуберанцев была применена кинематографическая съемка их. Она наглядно продемонстрировала, что эруптивные протуберанцы часто движутся от поверхности Солнца с огромными скоростями в несколько сотен километров в секунду. В других случаях наблюдаются движения, направленные, наоборот, в сторону солнечной поверхности. Иногда кажется, что протуберанец как бы втекает в пятна.

Природа протуберанцев до сих пор остается во многих отношениях загадочной. По-видимому, протуберанцы являются уплотнениями в веществе, составляющем самые внешние слои солнечной атмосферы, и видны на краю диска Солнца благодаря своему повышенному относительно этих слоев излучению в спектральных линиях. Однако ни причины образования таких уплотнений, ни характер их движения теорией не объяснены. В ряде случаев протуберанец располагается в виде дуги, т. е., как можно полагать, вдоль магнитных силовых линий, тянущихся от одного пятна к другому. Движения протуберанцев часто также направлены вдоль силовых линий поля. Вероятно, магнитные силы играют важную роль в происхождении и развитии протуберанцев.

В образовании пятен и протуберанцев проявляется активность Солнца. Степень солнечной активности периодически изменяется. В одни годы число пятен и их общая площадь больше, в другие — меньше. Время, когда «запятненность» Солнца наибольшая, называется эпохой максимума солнечной активности. В этот период на Солнце наблюдается также наибольшее число волокон и флоккулов. От одного максимума до следующего проходит немногим больше 11 лет — период, называемый циклом солнечной активности. В течение цикла меняется не только «запятненность» Солнца, но и область преимущественного возникновения пятен. После минимума активности, в начале цикла, пятна появляются сравнительно далеко от экватора, на широтах 30—35°. К максимуму активности средняя широта пятен составляет 16°.

Деятельность Солнца имеет важнейшее значение для всех земных процессов. На окружающей нас среде сильно сказываются и различные проявления солнечной активности, которые влияют, в частности, на состояние земной атмосферы и жизнедеятельность различных организмов. В рамках этой книги невозможно сколько-нибудь подробно рассказать о всех действиях солнечной активности на Землю. О том же, какие эффекты вызываются солнечными взрывами, мы скажем после краткого описания этих взрывов.

Само название взрыва — хромосферная вспышка — показывает, что взрывы происходят в атмосфере Солнца. При вспышке яркость значительного участка солнечной поверхности вблизи группы пятен (обычно в месте, зани-

мавшемся флоккулом) внезапно резко возрастает. Как правило, это связано с увеличением излучения в линиях водорода, но иногда, при очень сильной вспышке, растет излучение во всех частотах. В последнем случае вспышка видна в белом свете на фоне фотосферы. Более слабые вспышки наблюдают при помощи спектрогелиографа.

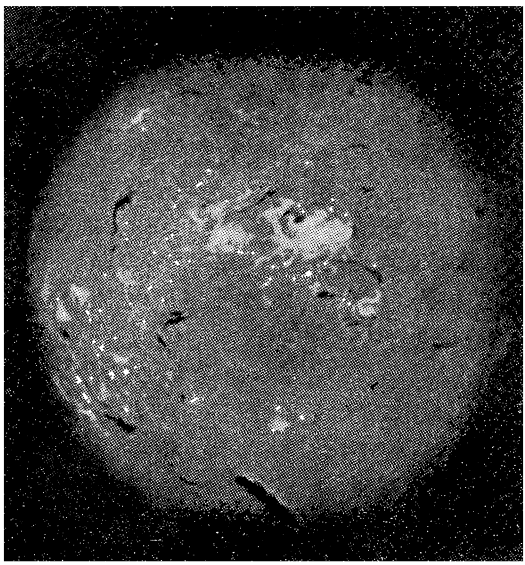

Рис. 27. Большая хромосферная вспышка при наблюдениях в лучах Hα (18 сентября 1957 г.).

Возрастание яркости в области вспышки продолжается не более нескольких минут. Затем яркость падает и через 30—60 минут оказывается такой же, какой была до вспышки. Размер области повышенной яркости при большой вспышке может составлять десятки тысяч километров. В годы солнечной активности может случаться по нескольку вспышек за день и сами они бывают более сильными. В эпоху минимума солнечной деятельности вспышек меньше, а очень сильных совсем не бывает. В соответствии с отмеченным выше изменением средней широты пятен за время солнечного цикла, в максимуме активности

вспышки происходят в областях более близких к экватору, чем в минимуме.

В районе вспышки происходят бурные движения светящегося газа со скоростями в несколько сотен километров в секунду. Они направлены главным образом вверх от поверхности Солнца, образуя газовые фонтаны, которые поднимаются на сотни тысяч километров. Хотя часть поднявшегося вещества может возвратиться к поверхности Солнца, множество данных указывает на выбрасывание из области вспышки в пространство быстро летящих частиц. Показательны в этом отношении наблюдения радиоизлучения солнечной короны при вспышках.

Самые внешние слои Солнца, называемые солнечной короной и простирающиеся на сотни тысяч километров от его поверхности, испускают очень слабое оптическое излучение. Оно заметно только в том случае, когда излучение фотосферы загорожено (экранировано) либо Луной либо искусственным экраном. Корона Солнца находится в особом состоянии. Температура в ней составляет 1—2 миллиона градусов. Почти все атомы в короне ионизованы, поэтому она содержит много свободных электронов. Солнечная корона благодаря своей очень высокой температуре является источником радиоволн, причем в дециметровом и метровом диапазонах более мощным, чем фотосфера Солнца. Радиоизлучение короны наблюдают и вне затмений.

Условия распространения радиоволн в среде определяются концентрацией в ней свободных электронов. Электронную концентрацию в короне нашли из оптических наблюдений, причем оказалось, что она уменьшается с увеличением расстояния данной точки от фотосферы. Вследствие падения концентрации свободных электронов к периферии короны, радиоизлучение с малой длиной волны может выходить из глубоких слоев ее, а излучение больших длин волн лишь из наружных. Подробное рассмотрение причин указанного явления отвлекло бы нас от изложения более существенных для этой книги вопросов. Но отметить этот факт нужно, так как он оказывается важным для исследования хромосферных вспышек.

Хромосферная вспышка сопровождается резким увеличением радиоизлучения той области короны, которая расположена над местом вспышки; в этих случаях говорят о «всплесках» радиоизлучения. Всплески бывают различными по своему характеру. Одни (их принято называть

всплесками III типа) происходят через несколько секунд после начала вспышки. Определение уровня в короне, с которого принимается радиоизлучение всплеска, привело к выводу, что фактор, вызывающий появление этих всплесков, распространяется по короне от поверхности Солнца со скоростью около 100 000 *км/сек*. Через несколько минут после начала вспышки возникают более продолжительные всплески (II типа), источник которых движется по короне наружу со скоростью порядка тысячи километров в секунду.

В качестве возможного механизма образования всплесков радиоизлучения короны при хромосферных вспышках принимают плазменные колебания. Если в некотором объеме плазмы возникает избыток заряженных частиц, например, электронов, по отношению к ионам, то совокупность зарядов, расположенных в этом объеме, начинает колебаться. Колебания зарядов создают, как мы знаем, электромагнитное излучение. Вызвать такие колебания можно, в частности, пропуская сквозь плазму поток быстрых заряженных частиц. Частота колебаний пропорциональна $\sqrt{n_e}$, где n_e — значение электронной концентрации в плазме. Величина n_e для короны известна и соответствующая ей частота колебаний близка к наблюдаемой. Таким образом, если указанное предположение о характере наблюдаемого радиоизлучения справедливо, то можно сделать вывод о выбрасывании из области вспышки заряженных частиц. При этом группа частиц, создающая всплески III типа, пролетает сквозь корону со скоростями порядка 100 000 *км/сек*. Что же касается всплесков II типа, то их связывают с прохождением по короне и хромосфере ударной волны, которая возникает при расширении газа в области вспышки. Эта волна также создает плазменные колебания.

Этим выводом из наблюдений радиовсплесков подтвердился известный уже десятки лет факт выбрасывания из области хромосферной вспышки потоков частиц. Многочисленные свидетельства существования таких потоков получены при исследовании явлений в земной атмосфере, следующих за вспышкой, в первую очередь так называемых магнитных бурь. На состояние атмосферы влияют как попадающие в нее из Солнца частицы, так и излучение вспышки, изменяющие электрические свойства внешних атмосферных слоев. Нам придется несколько подробнее

познакомиться с этими свойствами, прежде чем мы сможем продолжить рассказ о действии вспышек на Землю.

Осуществление прямой радиосвязи на больших расстояниях показывает, что радиоволны способны огибать земную поверхность. Но, поскольку радиоизлучение, как и свет, является одной из форм электромагнитного излучения, они должны распространяться прямолинейно. Противоречие между этими фактами лишь кажущееся. Дело в том, что верхние слои атмосферы Земли на высотах порядка 100 *км* и более способны отражать радиоволны. Отражаясь последовательно от этих слоев и от Земли, радиоизлучение может распространиться далеко за пределы прямого видения.

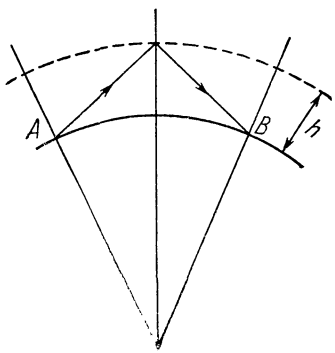

Рис. 28. Схема отражения радиоволн от ионосферы.

Хорошо известно, что лишь проводящие электричество тела могут достаточно эффективно отражать и рассеивать радиоволны. Сама возможность дальних радиопередач указывает на электропроводность внешних слоев земной атмосферы. У поверхности Земли атмосфера состоит почти исключительно из нейтральных атомов. На высотах же 80—300 *км* в атмосфере содержится сравнительно много ионов и свободных электронов. Эти хорошо проводящие электричество слои атмосферы называют ионосферой.

Отражение волны, идущей из некоторой точки на поверхности Земли, т. е. изменение ее направления таким образом, что она снова начинает двигаться к земной поверхности, происходит вследствие постепенного искривления пути волны в ионосфере. Электронная концентрация в ионосфере увеличивается с высотой, а это и вызывает все усиливающееся преломление радиоволн и соответственное изменение направления волны.

Для того чтобы отразиться к земной поверхности, волна должна проникнуть на какую-то глубину в ионосферу. При этом происходит частичное поглощение энергии, переносимой волной. Механизм процесса поглощения принципиально не очень сложен. Электроны, содержащиеся в ионосфере, под

действием электромагнитного поля, переносимого волной, приходят в состояние колебательного движения и в свою очередь испускают электромагнитное излучение. Но часть своей энергии движения электроны передают тяжелым частицам — ионам и нейтральным атомам, которые при движении практически не излучают. Поэтому какая-то доля попавшей в ионосферу энергии выключается из излучения, перейдя в другие виды энергии. Следовательно, чем меньше нейтральных атомов содержится в слое, отражающем радиоволны, тем меньше потери энергии при отражении волн.

Способность ионосферы к отражению радиоволн зависит от длины волны излучения. Очень короткие радиоволны, например, применяемые для передачи телевизионных изображений, не отражаются ионосферой, а свободно проходят сквозь нее в пространство. Потому-то прием телевизионных передач и возможен лишь в пределах области прямого видения станции. Волны же длиной около 10 *м* и более длинные почти полностью задерживаются ионосферой *). При этом излучение с длиной волны до 30 *м* отражается верхними ее слоями, а более длинноволновое проникает лишь в самые нижние области ионосферы.

Возможность прохождения радиоволн сквозь ионосферу или их отражения определяется концентрацией свободных электронов в ней. Чем больше электронов приходится на единицу объема, тем меньше длина волны излучения, которое отражается этим слоем.

Короткие (15—30 *м*) радиоволны лучше всего распространяются в ночное время. Этот факт известен каждому радиолюбителю, так же как и то, что зимой прием радиосигналов осуществляется лучше, чем летом. Поскольку дальность распространения радиоволн определяется степенью поглощения их в ионосфере, то из указанных фактов следует, что короткие волны слабее поглощаются ионосферой ночью и в зимнее время. Изменение времени суток и времени года связано только с изменением положения Земли по отношению к Солнцу. Поэтому очевидно, что зависимость условий распространения радиоволн от вре-

---

*) Ночью излучение с длиной волны 10—30 *м* способно проходить сквозь ионосферу.

мени обусловлена влиянием излучения Солнца на состояние ионосферы.

В чем же заключается действие Солнца на ионосферу? Солнце, наряду с оптическим излучением, испускает фотоны с бóльшей частотой, в частности, в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Энергии этих фотонов достаточно не только для того, чтобы разбить молекулы кислорода и азота, составляющие атмосферу, на атомы, но и чтобы ионизовать получающиеся атомы. При ионизациях и образуются те свободные электроны, которые делают ионосферу непрозрачной для радиоизлучения. Количество ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, попадающее в тот или иной слой ионосферы, и определяет концентрацию свободных электронов в этом слое.

В той области, где излучение Солнца в данный момент не попадает в ионосферу, т. е. над ночной стороной Земли, атомы не ионизуются, но рекомбинации их происходят. Поэтому концентрация свободных электронов в ионосфере ночью уменьшается. Радиоволны в это время достигают более высоких слоев в ионосфере, при отражении от которых потери энергии меньше, чем в нижних слоях.

Зимой же Солнце находится низко над горизонтом и его лучи, прежде чем попасть в достаточно глубокие слои атмосферы, должны пройти сквозь бóльшую толщу, чем летом, когда лучи падают почти отвесно. Поэтому ультрафиолетовое излучение зимой поглощается в верхней атмосфере, и до нижних слоев ионосферы, лежащих на уровне 100—120 *км* над земной поверхностью, доходит сильно ослабленным. Ионизация в этих слоях оказывается меньшей чем летом, и радиоволны проникают в более высокие слои атмосферы, где при отражении они теряют сравнительно мало энергии.

Хромосферные вспышки сопровождаются резкими нарушениями состояния ионосферы, которые сказываются в первую очередь в изменении условий приема радиосигналов. Значительно падает уровень сигналов, принимаемых на коротких (10—30 *м*) волнах. Это явление, называемое «замиранием», связано с увеличением поглощения волн. Волны отражаются в это время нижними слоями ионосферы, где, следовательно, содержание свободных электронов возрастает. При сильной вспышке концентрация их увеличивается на порядок по сравнению с той, которая была до вспышки. Таким образом, можно заключить, что

хромосферная вспышка приводит к скачкообразному возрастанию потока фотонов большой энергии от Солнца.

Изменение при вспышке свойств нижних слоев ионосферы дает возможность регистрировать хромосферные вспышки независимо от оптических наблюдений. Особенно интересно в этом отношении усиление очень длинноволновых (более 1 *км*) радиосигналов, образуемых грозовыми разрядами. Такие сигналы, называемые атмосфериками, возникают непрерывно (потому что всегда где-то происходят грозы) и создают в приемниках некоторый шум и потрескивание. Ионизация нижних слоев ионосферы при вспышке существенно улучшает их отражательную способность для указанных длин волн. Поэтому трески и шумы в приемнике при вспышке возрастают: атмосферики, созданные далекими разрядами и ранее не замечавшиеся, теперь принимаются.

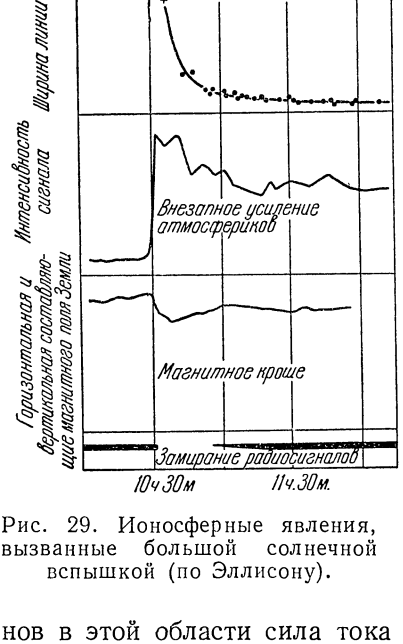

Рис. 29. Ионосферные явления, вызванные большой солнечной вспышкой (по Эллисону).

В электропроводном слое атмосферы всегда циркулируют электрические токи. Они создают магнитное поле, которое составляет часть общего магнитного поля Земли. При увеличении концентрации свободных электронов в этой области сила тока увеличивается, потому что возрастает проводимость среды и соответственно уменьшается ее сопротивление. В результате при вспышках происходят изменения напряженности магнитного поля Земли, так называемое магнитное кроше. («Кроше» по-французски означает крючок; это название отражает вид излома кривой, характеризующей напряженность поля при вспышке; см. рис. 29.)

Вызванные одной из больших вспышек ионосферные явления иллюстрируются рис. 29. В верхней его

части показано, как изменялась при этой вспышке ширина эмиссионной водородной линии H_α в спектре области, занятой вспышкой. Ведь оптически вспышка, как мы уже говорили, сказывается в усилении интенсивности излучения, идущего с некоторого участка солнечной поверхности в частотах водородных линий. Оно обусловлено образованием в спектре этого излучения широких эмиссионных линий. Ширина линии в какой-то степени характеризует яркость вспышки, а значит и количество излучаемой ею за единицу времени энергии.

Как мы видим, ионосферные эффекты возникают почти одновременно с началом вспышки и постепенно ослабевают, в соответствии с уменьшением ее яркости. Они связаны с усилением ультрафиолетового излучения Солнца. Поэтому из наблюдений ионосферы во время вспышек следует вывод об образовании в области вспышки не только оптического, но также ультрафиолетового и рентгеновского излучений.

Оценим энергию, излучаемую большой вспышкой в частоте линии H_α. Охватываемая такой вспышкой площадь порядка тысячной доли площади всего солнечного диска. Линия H_α занимает около 0,001 всей оптической области спектра. Во всей этой области солнечный диск излучает 10^{33} *эрг/сек*. В участке спектра, занимаемом линией H_α, до вспышки с ее площади излучается приблизительно $10^{33} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \approx 10^{27}$ *эрг/сек*. При вспышке яркость в линии H_α в несколько раз превышает яркость в непрерывном спектре. Если вспышка продолжалась 5—10 минут (ее максимальная фаза), то всего в линии ею будет излучено около 10^{30} *эрг*. Эта величина и определяет общее количество энергии во всей оптической области спектра, потому что излучение в других линиях меньше, чем в H_α. Что же касается ультрафиолетового и рентгеновского излучений вспышки, то, как показывают ионосферные данные и заатмосферные наблюдения, их энергия в несколько раз, а возможно, и на порядок, больше, чем оптического. Следовательно, общая энергия фотонов, излучаемых при большой хромосферной вспышке, порядка 10^{31} *эрг*. Это соответствует энергии взрыва миллиарда мегатонных бомб.

Возмущения ионосферы, создаваемые коротковолновым излучением вспышки, возникают, как мы только что отмечали, одновременно с оптическими явлениями, потому что оба вида излучения распространяются с одинаковой

скоростью. Наряду с этими возмущениями, приблизительно через сутки после вспышки, на Земле происходят другие связанные с ней явления — магнитные бури и усиление полярных сияний. Магнитной бурей называют сильные и длительные (в среднем они продолжаются сутки или двое) нарушения состояния ионосферы над всей поверхностью Земли. Во время бури нарушается радиосвязь на всех частотах и даже проводная связь. Это показывает, что верхние области ионосферы изменяют свои свойства и частично разрушаются. Во внутренних ее слоях сильно увеличивается ионизация и соответственно растут электрические токи, так что создаваемые этими токами магнитные поля в свою очередь индуцируют токи в линиях связи. Те же ионосферные токи вызывают сильные колебания наблюдаемой напряженности магнитного поля Земли, что и послужило основанием для названия «магнитная буря».

Возникновение магнитных бурь связывают с действием на ионосферу Земли заряженных частиц, протонов, электронов и атомных ядер, выбрасываемых из области хромосферной вспышки. Частицы, ускоренные ударной волной, действию которой приписываются медленно распространяющиеся по короне всплески радиоизлучения Солнца II типа, достигают окрестностей Земли. Там они захватываются ее магнитным полем и попадают в область так называемых радиационных поясов Земли, удаленных на тысячи километров от ее поверхности. Обладая большой энергией, потоки этих частиц могут прорываться в ионосферу и производить разрушение части ионосферы, а также ионизацию атомов в ней сверх той, которая вызвана ультрафиолетовым излучением Солнца. Обычно эти возмущения следуют за теми вспышками, которые произошли вблизи центра солнечного диска. Следовательно, потоки частиц, выбрасываемые из области вспышки и бомбардирующие земную атмосферу, направлены приблизительно перпендикулярно к поверхности Солнца. Потоки эти представляют собой облака плазмы, содержащие также и магнитные поля. Силовые линии поля связаны с плазмой, как говорят, «вморожены в нее», и переносятся вместе с облаками.

Заряженные частицы движутся вдоль магнитных силовых линий на высоте в несколько тысяч километров над поверхностью Земли (в радиационных поясах Земли); у магнитных полюсов силовые линии расположены ближе к поверхности Земли. Поэтому заряженные частицы там

проникают и в более глубокие слои атмосферы. Сталкиваясь с атомами и молекулами, частицы передают им часть своей энергии и возбуждают таким путем свечение атмосферы, называемое полярным сиянием.

Частицы, вызывающие магнитные бури и полярные сияния, должны проходить расстояние от Солнца до Земли (150 млн. *км*) приблизительно за сутки. Значит, их скорость 1500 — 1600 *км/сек*, что приблизительно соответствует скорости распространения радиовсплесков II типа. Это нужно считать средней скоростью, так как «размазывание по времени» явления магнитной бури показывает, что не все частицы достигают Земли одновременно. Выбрасывание же всех их происходит, по-видимому, или в момент вспышки или сразу же за ним *).

Изучение действия потоков частиц на магнитное поле Земли показало, что масса всей струи плазмы, выброшенной при вспышке, порядка 10^{18} *г*. При скорости этого вещества 1500 *км/сек* его кинетическая энергия составляет около 10^{34} *эрг*. Таким образом, энергия, выделяющаяся при большой хромосферной вспышке в форме кинетической энергии выбрасываемых частиц (корпускулярное излучение), в тысячи раз больше энергии оптического излучения **).

Заметим, что и при отсутствии вспышек Солнце испускает потоки частиц, составляющих так называемый «солнечный ветер». Однако скорости частиц солнечного ветра в десятки раз меньше, чем скорости в потоках, образованных вспышками.

При очень сильных вспышках на Земле наблюдается еще один интересный эффект — возрастание интенсивности космических лучей. Космические лучи, о которых подробнее будет говориться позже, представляют собой частицы (ядра атомов и электроны), движущиеся со скоростью, близкой к скорости света, и обладающие поэтому

*) Потоки светящегося газа, движущиеся вверх от области вспышки («вспышечные выбросы»), имеют скорость в 2—3 раза меньшую, чем указанная. Следовательно, либо это различные потоки, либо за время своего пути до Земли поток ускоряется. Вблизи Солнца потоков со скоростями порядка 1500 *км/сек* не наблюдалось.

**) Существующие отрывочные данные о рентгеновском излучении вспышек позволяют думать, что его энергия, хотя и сильно превосходит оптическую, но меньше энергии корпускулярных потоков.

большой энергией. Они заполняют космическое пространство. Тем из частиц, энергия которых достаточно велика (жесткое излучение), сравнительно слабое магнитное поле Земли нигде не препятствует проникать к поверхности Земли и они наблюдаются на всех широтах. Частицы с меньшей энергией (мягкое излучение) отклоняются магнитным полем и попадают преимущественно в область магнитных полюсов Земли.

Увеличение интенсивности космических лучей в высоких широтах замечается приблизительно через час после сильной хромосферной вспышки. Так как в экваториальных областях Земли аналогичный эффект отсутствует, то можно говорить об образовании при вспышке только мягких космических лучей. Учитывая, что на путь от Солнца до Земли им требуется в 3—4 раза больше времени, чем фотонам, получаем величину скорости этих частиц порядка 100 000 *км/сек*. Энергия протонов (которые составляют основную долю частиц космических лучей солнечного происхождения) при такой скорости достигает 10^{-3} *эрг* на одну частицу. Так как всего при вспышке в форме космических лучей освобождается до 10^{32} *эрг*, то общее количество быстрых частиц, образованных вспышкой, составляет примерно 10^{35}, что дает 10^{10} *г* вещества. Вероятно, эти частицы, проходя через солнечную корону, теряют там некоторую часть своей энергии, вызывая всплески радиоизлучения III типа.

Потоки космических лучей и фотонов большой энергии от хромосферной вспышки при встрече их с космическим кораблем могут быть опасными для участников полета. Эти частицы способны проходить сквозь толстый слой вещества, и космический корабль не является надежной защитой от них. Для безопасности космонавтов полеты лучше совершать в то время, когда вспышек нет или они слабые. Поэтому исследование природы вспышек и причин их возникновения, которое позволит прогнозировать вспышки, имеет первостепенное значение для космонавтики.

За время большой хромосферной вспышки (500—1000 *сек*) в сравнительно малой части хромосферы выделяется приблизительно столько же энергии, сколько излучается Солнцем за 1 *сек*. Каков же источник столь огромной энергии? Окончательного ответа на этот вопрос пока нет. Как мы сейчас увидим, данные наблюдений указывают на связь вспышек с магнитными полями.

Между солнечными пятнами противоположной полярности существует точка, в которой напряженность магнитного поля равна нулю, а по обе стороны от нее напряженность возрастает, и направления силовых линий противоположны. Такие точки называют нейтральными. Хромосферные вспышки обычно происходят около нейтральных точек и сопровождаются изменениями конфигурации поля вблизи места вспышки, а в ряде случаев и уменьшением напряженности поля. Поэтому распространено мнение о том, что энергия вспышки черпается из энергии магнитных полей. Предполагаемый процесс перехода магнитной энергии в кинетическую энергию и в излучение сложен и не до конца выяснен. О нем мы здесь говорить не будем, а оценим лишь энергию, заключенную в поле.

Вспышка охватывает объем хромосферы, расположенный над площадью порядка 10^{19}—10^{20} *см*^{2} (около одной тысячной площади диска). Высота хромосферы около $2 \cdot 10^9$ *см*. Поэтому величина указанного объема — приблизительно 10^{29} *см*^{3}. Напряженность поля в активной области вблизи пятен, там, где случаются вспышки, может составить несколько сотен эрстед. Энергия магнитного поля $E_{\text{маги}}$ в единице объема — плотность магнитной энергии — связана с напряженностью поля H соотношением

$$E_{\text{маги}} = \frac{H^2}{8\pi} \qquad (19)$$

(вывод этой формулы занял бы слишком много места). Используя формулу (19), получаем, что при $H = 100$ эрстед величина $E_{\text{маги}} \approx 4 \cdot 10^2$ *эрг*. Таким образом, весь рассматриваемый объем содержит 10^{32}—10^{33} *эрг* магнитной энергии. Если бо́льшая часть ее может очень быстро перейти в энергию излучения или кинетическую, то произойдет взрыв той же силы, что и большая хромосферная вспышка. Но все же создается впечатление, что магнитной энергии для больших вспышек недостаточно, тем более, что вспышка вначале занимает сравнительно малый объем. По-видимому, окончательный ответ на вопрос об источнике энергии хромосферных вспышек связан с исследованием не только их, но и других космических взрывов. Однако вряд ли можно сомневаться в существовании какой-то связи между хромосферными вспышками и магнитными полями.

Даже если будет доказано, что магнитные поля играют в процессе вспышки определяющую роль, природа вспышек

станет полностью ясной лишь после того, как будет понят механизм, приводящий к возникновению полей на Солнце. Общепринятой теории происхождения магнитных полей нет ни для Солнца, ни для других космических тел. В одних теориях предполагается, что сильные магнитные поля существуют в центральных областях Солнца и часть их энергии периодически выносится во внешние слои Солнца. В то же время в одной из недавних теорий ее автор исходит из присутствия у Солнца слабого (напряженностью около 1 эрстеда) общего магнитного поля, силовые линии которого расположены, как предполагается, в тонком слое вблизи поверхности Солнца. Различие в скорости вращения Солнца на разных широтах может приводить к периодическому возникновению сильных полей в экваториальных областях Солнца. Эта теория неплохо объясняет наблюдаемые особенности цикла солнечной активности, но встречается со значительной трудностью энергетического характера. Энергия полей в конечном счете есть преобразованная кинетическая энергия вращения Солнца, точнее, та часть кинетической энергии, которая обусловлена бóльшей угловой скоростью движения экваториальных областей. Ее, как показал расчет, может хватить на образование магнитных полей лишь в течение нескольких тысяч лет. Таким образом, как это часто бывает в науке, объяснение одной группы явлений ставит нас перед необходимостью решить не менее сложные задачи, в данном случае, найти, чем вызывается и поддерживается различие скорости вращения Солнца на разных широтах.

§ 6. ВСПЫШКИ ЗВЕЗД

Звездные взрывы по силе могут быть весьма различными. Начав с самых слабых из них, мы затем перейдем к взрывам гораздо большего масштаба — вспышкам новых звезд. Взрыв на звезде проявляется, прежде всего, в резком увеличении ее излучения, т. е. в возрастании яркости звезды. Поэтому такие взрывы и называют вспышками.

Мощность оптического излучения даже большой хромосферной вспышки на Солнце не составляет и одной тысячной от мощности излучения всего Солнца. Такая относительно слабая вспышка на звезде типа Солнца или более яркой не может быть замечена с современными сред-

ствами наблюдений, поскольку звезды удалены от нас не менее чем на несколько световых лет. Вероятно, вспышки, по мощности аналогичные хромосферным, свойственны очень многим, если не всем, звездам. Но для того чтобы их можно было увидеть, звезда в оптической области спектра должна излучать в сотни раз меньше энергии, чем Солнце. Поэтому самые слабые из звездных взрывов, по масштабу соответствующие хромосферным вспышкам, могут наблюдаться лишь у звезд-карликов, причем самых близких, на расстояниях не более 30—50 световых лет, так как на бóльших расстояниях эти звезды вообще не видны.

Наименее яркими звездами являются, как мы знаем, красные карлики. Обладая вдвое меньшей, чем у Солнца, температурой и на порядок меньшим радиусом, они излучают по сравнению с ним в сотни раз меньше энергии. В оптической же области отличие излучения красного карлика от излучения Солнца еще разительнее, так как основная доля энергии, испускаемой красным карликом, приходится на инфракрасную часть спектра.

Звезда-карлик класса М, получившая обозначение UV из созвездия Кита *), оказалась первой из тех звезд, на которых были замечены слабые взрывы, по силе соответствующие большим солнечным вспышкам. Это одна из самых близких к нам звезд — ее расстояние от Солнца составляет 8,6 светового года. Красные карлики, на которых наблюдаются вспышки, стали называть звездами типа UV Кита.

Характерной особенностью вспышек у звезд типа UV Кита является чрезвычайно быстрое возрастание излучения звезды в начале вспышки, не встречающееся ни у какого иного типа звезд. Оно может увеличиться в десять раз за несколько секунд. Различие вспышек по силе значительно. При больших вспышках излучение звезды увеличивается более чем в сто раз, при самых слабых — в несколько раз, причем это занимает не более, чем одну-две минуты. Затем происходит спад излучения, более медленный, и через 10—20 минут излучение звезды оказывается таким же, как и до вспышки.

В нормальном состоянии, между вспышками, оптическое излучение звезды типа UV Кита имеет мощность около

*) Обозначение одной или двумя буквами латинского алфавита применяется для звезд, меняющих свой блеск—переменных звезд.

10^{29} *эрг/сек*. За время сильной вспышки ею излучается дополнительно более 10^{33} *эрг* в этой же области спектра, а при слабой вспышке — энергия порядка 10^{31} *эрг*. Таким образом, вспышки звезд типа UV Кита по излучаемой в оптическом диапазоне энергии подобны самым большим хромосферным вспышкам на Солнце. Вспышки, при которых наблюдаемое излучение звезды возрастает в десять или более раз, происходят в среднем один раз за несколько суток, а очень слабые вспышки (приводящие к усилению излучения в 1,5 — 2 раза) — десятки раз в сутки.

Сходство вспышек звезд типа UV Кита с хромосферными вспышками не ограничивается быстротой возрастания излучаемой энергии (возможно, что хромосферная вспышка вначале протекает несколько медленнее). Спектральные наблюдения показали, что во время вспышки звезды UV Кита линии водорода сильно расширяются, и энергия, излучаемая звездой в соответствующих длинах волн, возрастает. Аналогичное явление наблюдается, как мы знаем, и при солнечных вспышках. Но наряду с указанными сходными чертами в спектрах вспышек обоих видов в них имеется и существенное различие. Как правило, излучение хромосферных вспышек заметно увеличивается только в частотах линий, тогда как преобладающая доля энергии излучения при вспышках звезды UV Кита относится к непрерывному спектру, главным образом в синем и голубом цветах. Впрочем, возможно, что это различие, хотя бы частично, объясняется гораздо большей яркостью солнечной фотосферы в оптическом диапазоне, на фоне которой непрерывное излучение хромосферной вспышки трудно заметить.

Недавно при помощи больших радиотелескопов удалось зарегистрировать излучение радиоволн при вспышках у некоторых звезд типа UV Кита. Эти всплески радиоизлучения обычно происходят одновременно с возрастанием оптического излучения, но иногда опережают оптическую вспышку на 1—2 минуты. Радиовсплеск продолжается 10—15 минут, причем за это время в радиодиапазоне излучается энергия, в 100—1000 раз меньшая, чем в оптическом. Доля радиоизлучения в общей энергии вспышки оказывается более высокой, чем у солнечных вспышек, где энергия радиовсплесков составляет лишь около одной стотысячной части всей излученной энергии.

О том, каковы причины вспышек звезд типа UV Кита и какая энергия превращается в излучение, до сих пор ничего нельзя сказать с уверенностью. Однако быстрота протекания вспышки и, в особенности, большая скорость падения блеска дали основание считать, что взрывы происходят в самых внешних слоях атмосфер звезд, где плотность вещества мала. Действительно, взрыв под поверхностью звезды вызвал бы повышение температуры фотосферы. Последующее охлаждение фотосферы может происходить лишь в результате излучения ею энергии в межзвездное пространство. Так как фотосфера непрозрачна для излучения, то процесс ее остывания должен занять продолжительное время. Прозрачная же для излучения в широком интервале длин волн атмосфера звезды может быть нагрета почти мгновенно и затем очень быстро потерять полученную энергию, поскольку излучение выходит из нее беспрепятственно. Следовательно, и в отношении своей локализации вспышки звезд типа UV Кита сходны с солнечными.

Радиоизлучение хромосферных вспышек связывают, как мы уже говорили, с прохождением через самые внешние слои Солнца потоков быстрых частиц из области взрыва. Вероятно, аналогичным процессом вызваны и всплески радиоизлучения звезд типа UV Кита. Такие радиовсплески служат пока единственным свидетельством выбрасывания этими звездами при вспышках частиц со скоростью, сравнимой со скоростью света. Мы регистрируем лишь ту долю энергии частиц, которая переходит в оптическое и радиоизлучение. Более значительная часть энергии взрыва, если судить по солнечным вспышкам, должна уходить с потоками быстрых частиц, в частности, космических лучей, рентгеновского излучения и γ-квантов, которые пока трудно наблюдать. Поэтому величина 10^{33} *эрг*, которую мы указали выше для энергии, излучаемой в оптическом диапазоне при большой вспышке звезды типа UV Кита, вряд ли характеризует всю энергию взрыва. Весьма вероятно, что общее количество энергии, освобождаемой при таком взрыве, гораздо больше — порядка 10^{34}—10^{35} *эрг*.

Даже если предположить наличие сильных локальных магнитных полей во внешних слоях звезд типа UV Кита, трудно представить, что энергия, содержащаяся в их атмосфере, могла достигать значения 10^{33}—10^{35} *эрг*. В связи с этим возникла гипотеза о том, что вещество, несущее

в скрытом виде энергию, каким-то путем выносится из недр звезды в ее атмосферу. Там энергия внезапно освобождается, причем основная ее часть переходит в кинетическую энергию — энергию быстрых частиц и фотонов. К сожалению, в рамках наших теперешних концепций об источниках звездной энергии трудно указать конкретные виды переносимой из недр звезды энергии и процессы, сопровождающие ее переход в другие виды энергии. Но трудность объяснения тех или иных явлений природы всегда является стимулом для развития исследований. С открытием новых явлений совершенствуются и соответствующие физические теории. Несомненно, так будет и с объяснением природы звездных вспышек.

Вспышки, характеризуемые излучением огромной энергии в оптической области спектра (в миллионы раз большей, чем излучаемая при вспышках звезд типа UV Кита), происходят у так называемых звезд типа Т Тельца и ряда других. На описании этих взрывов мы здесь останавливаться не станем, так как имеющиеся отрывочные данные наблюдений не дают цельной картины явления. Стоит, однако, заметить, что по быстроте подъема и спада излучения вспышки звезд типа Т Тельца совершенно не похожи на солнечные. Они продолжаются несколько часов, а иногда и суток. Какова бы ни была природа вспышек звезд Т Тельца, значительная доля энергии при этих взрывах освобождается не в атмосфере звезды, а глубже, и вызывает нагрев поверхности звезды. Еще раз подчеркнем, что как у звезд типа Т Тельца, так и у других звезд со светимостью, превосходящей светимость красных карликов, возможны и слабые взрывы, но вызываемое ими дополнительное излучение будет оставаться незамеченным на фоне общего излучения звезды.

Из сильных звездных взрывов наиболее хорошо изучены вспышки новых звезд. Когда в некотором месте неба замечается достаточно яркая звезда, которой раньше не было видно, ее называют новой звездой. Конечно, она оказывается «новой» лишь для наблюдателя — обнаружение новой звезды на небе связано не с ее рождением, а является результатом возрастания излучения какой-то звезды в десятки и даже сотни тысяч раз. Грандиозные космические взрывы, приводящие к появлению новых звезд, случаются сравнительно часто — каждый год обнаруживается несколько таких звезд только в соседних с Солнцем областях

Галактики. Если же вспышка новой звезды происходит, скажем, на расстоянии десятков тысяч световых лет от Солнца, то она, скорее всего, останется незамеченной. Поэтому следует считать, что в Галактике вспыхивает гораздо больше звезд, чем мы наблюдаем, вероятно, свыше ста за год.

Так как новые звезды открывают случайно — заранее неизвестно, какая из звезд вспыхнет,— то самый первый этап взрыва, наиболее интересный для выяснения природы взрыва, не удается наблюдать. Поэтому все гипотезы о характере взрывов, вызывающих вспышки новых звезд, основаны на результатах наблюдений последствий этих взрывов.

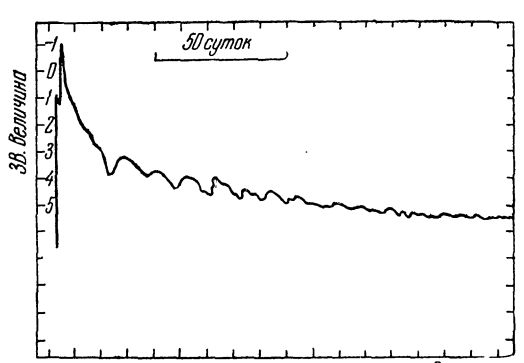

Рис. 30. Кривая блеска новой звезды, вспыхнувшей в созвездии Орла в 1918 г. Видимый блеск ее в момент максимума был лишь немного меньше, чем у Сириуса — самой яркой звезды неба.

Известные новые звезды, вспыхивавшие за период научных наблюдений, как мы установим ниже, находятся от нас в среднем на расстоянии в несколько тысяч световых лет. Поэтому оптические наблюдения пока являются единственным источником информации о них. Ни радиоизлучение новых звезд, ни другие виды их излучения до сих пор не наблюдали, но это связано, по-видимому, не с отсутствием таких излучений, а с несовершенством современных наблюдательных средств.

Изменение излучения звезды со временем характеризуют так называемой кривой блеска. Для примера, кривая

блеска одной из новых звезд приводится на рис. 30. Излучение звезды (или, как говорят, ее блеск) на этом рисунке указано в очень широко употребляемых в астрономии условных единицах — звездных величинах. В основу определения звездной величины кладется следующее условие: возрастание блеска звезды в 100 раз соответствует уменьшению на 5 ее звездной величины. Значит, изменение блеска на одну звездную величину есть его изменение в $\sqrt[5]{100} = 2{,}512$ раза. Такая система единиц сложилась еще в древности и общепринята среди наблюдателей звезд, поскольку сравнивать блеск двух звезд в звездных величинах гораздо легче, чем если бы он выражался в энергетических единицах. Для нас же удобство такой системы состоит в возможности более компактного изображения **кривых блеска.**

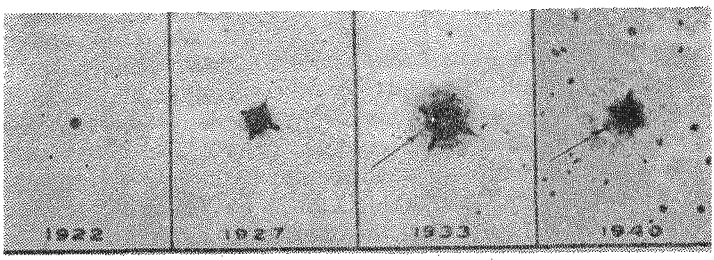

Рис. 31. Снимки Новой Орла 1918 г. в разные годы, по которым видно увеличение размеров оболочки. На снимках 1933 и 1940 гг. заметно образование, являющееся сгустком газа на конце оси оболочки (указано стрелкой).

Как мы видим из представленной кривой блеска, излучение новой звезды сначала очень быстро растет, а затем, достигнув максимума, спадает, но гораздо медленнее и не гладко, а скачкообразно.

Через несколько лет после вспышки на месте новой звезды часто видна светлая туманность в форме довольно правильного круга или эллипса, напоминающая планетарную туманность. Ее спектр состоит из эмиссионных линий и, значит, эта туманность образована разреженным светящимся газом. Видимый радиус туманности, т. е. угол, под которым он виден, увеличивается со временем. Определив скорость возрастания этого угла, можно, обращаясь

в прошлое, не только определить момент, когда туманность возникла, но и точку, из которой началось расширение. После того как это сделано, всегда оказывается, что туманность возникла в момент вспышки новой, а в точке, из которой происходит ее расширение, видна звезда. Отсюда нетрудно сделать вывод о том, что при вспышке какой-то звезды как новой, от нее отделяются внешние слои, образующие расширяющуюся оболочку. Когда оболочка достаточно расширится для того, чтобы ее радиус стал заметным, мы и видим ее как туманность.

Туманность, образованная при вспышке новой звезды, представляется кругом лишь в проекции на небо. На самом деле она имеет сферическую форму. Газ, составляющий переднюю часть расширяющейся туманности, должен двигаться в нашу сторону, а находящийся на противоположной стороне сферы — удаляться от нас. Поэтому согласно принципу Доплера линии в спектре излучения, идущего от передней полусферы, сдвинутся в сторону коротких волн, а принадлежащие удаляющемуся газу — в сторону длинных волн. По величине смещения линий определяется скорость расширения туманности. Оказывается, что туманности, возникающие при вспышках новых, расширяются с огромными скоростями — от нескольких сотен до 1500—2000 *км/сек*. При такой скорости за 10 лет ($3{,}2 \cdot 10^8$ *сек*) радиус туманности увеличивается на 10^{16}—10^{17} *см*.

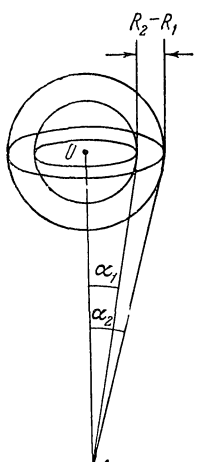

Рис. 32. Схема, иллюстрирующая метод определения расстояний до новой звезды по наблюдаемому расширению туманности, образованной при вспышке. В проекции на небесную сферу туманность представляется кольцеобразной.

Как величина радиуса туманности, так и его изменение со временем в угловой мере могут быть получены непосредственно, путем сравнения двух фотографий туманности, снятых одна через несколько лет после другой. Если, скажем, угол, под которым виден радиус туманности, изменился на величину $\alpha_2 - \alpha_1$, то действительное увеличение радиуса за это же время $R_2 - R_1$ связано с $\alpha_2 - \alpha_1$ соотношением $R_2 - R_1 = r(\alpha_2 - \alpha_1)$, где r — расстояние

от наблюдателя до новой звезды *) (см. рис. 32). Так как величина $R_2 - R_1$ находится независимо от $\alpha_2 - \alpha_1$ по скорости расширения туманности (которая в свою очередь получается по сдвигу линий в ее спектре), то из приведенного соотношения определяется и расстояние до звезды r. Для величины $\alpha_2 - \alpha_1$ самых ярких из новых звезд было получено значение порядка $10''$ за 10 лет. Поскольку $R_2 - R_1 \approx 10^{17}$ *см*, то расстояние до этих звезд оказывается порядка тысячи световых лет.

Очень существенна для суждения о силе взрыва, происшедшего в звезде, и выяснения его характера оценка массы выброшенного из звезды в пространство вещества, т. е., в данном случае, массы расширяющейся туманности. Для такой оценки можно воспользоваться известной величиной радиуса туманности, по которому определяется и ее объем. В то же время по эмиссионным линиям в спектре туманности, как мы говорили в § 2, можно найти не только относительное содержание различных элементов в ней, но и число атомов каждого элемента в 1 $см^3$. Умножив полученное таким путем число атомов в 1 $см^3$ на массу атома водорода (являющегося преобладающим элементом) и на объем туманности, вычисляют массы туманностей. Они оказались порядка 10^{29}—10^{30} *г*, что приблизительно в сто раз превышает массу Земли.

Ниже мы скажем подробнее о том, какие звезды вспыхивают как новые, а здесь отметим лишь, что это карлики, имеющие радиус на порядок меньше солнечного и массу в несколько раз меньшую, чем Солнце. Если массу оболочки распределить по всей поверхности такой звезды, то на 1 $см^2$ этой поверхности придется $10^{29} : (4\pi \cdot 10^{10})^2 \approx$ $\approx 10^8$ *г* вещества. Масса атмосферы звезды, приходящаяся на 1 $см^2$, как мы говорили ранее, порядка нескольких граммов. Следовательно, вещество, выброшенное взрывом, составляло фотосферу и более глубокие слои звезды. Давление газа на том уровне, где произошел взрыв, было равно весу сброшенных при взрыве слоев газа в расчете на 1 $см^2$ поверхности. Вес этот составляет $\frac{GM_*}{R_*^2} \frac{m}{4\pi R_*^2}$,

*) Угол $\alpha_2 - \alpha_1$ здесь входит в радианной мере, т. е. $\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)''}{206\,265}$, где $(\alpha_2 - \alpha_1)''$ — величина этого угла в секундах дуги.

где m — масса оболочки. С указанными выше значениями M_*, R_* и m получаем, что давление на уровне взрыва должно быть порядка 10^{13}—10^{14} *г/см · сек*^{2}, т. е. в миллионы раз больше, чем в атмосфере звезды. Соответственно, там должна быть очень высокая температура — миллионы градусов — и большая плотность газа. Конечно, слои, лежавшие над уровнем взрыва, были совершенно непрозрачны для излучения с любой длиной волны.

Судя по приблизительно сферической форме туманности, образованной при вспышке новой звезды, можно полагать, что взрывом охватывается весь слой звезды, лежащий на некотором уровне. Сбрасываемая оболочка поэтому имеет, как и поверхность звезды, сферическую форму, хотя, по-видимому, сила взрыва может быть не совсем одинаковой в разных направлениях, что и вызывает наблюдаемую иногда «однобокость» туманности.

В свете того, что нам уже стало известно о характере взрыва в новой звезде, нетрудно понять наблюдаемые при вспышке изменения излучения звезды. В результате взрыва, на некотором уровне в звезде, глубоко под ее поверхностью, освобождается много энергии. Часть энергии расходуется на нагревание газа в слое, охваченном взрывом, и давление газа в слое возрастает настолько, что вес внешних слоев звезды не в состоянии его уравновесить. Поэтому наружные слои звезды начинают расширяться и излучающая поверхность увеличивается, а это проявляется в быстром возрастании наблюдаемого блеска звезды.

Линии поглощения в спектре новой звезды при увеличении ее блеска оказываются смещенными относительно нормального положения — длина волны у них меньше. Причина сдвига линий становится очевидной, если учесть, что в это время происходит расширение внешних слоев звезды, причем мы можем видеть движение только той части поверхности, которая обращена к нам. В спектре излучения, идущего от движущегося в нашу сторону источника, линии и должны быть, согласно принципу Доплера, смещены в сторону коротких волн. Применение формулы (5) показывает, что скорость движения поверхности новой звезды — порядка 1000 *км/сек*, что в общем согласуется со скоростью расширения туманности, наблюдаемой впоследствии около этой звезды.

Расширяющиеся внешние слои звезды представляют собой ее оболочку. По мере увеличения радиуса оболочки,

на единицу площади ее поверхности приходится все меньше вещества. Через несколько суток после взрыва (т. е. через 10^5—$5 \cdot 10^5$ *сек*) у большинства звезд радиус оболочки превосходит 10^{13} *см* и, значит, он в тысячи раз больше, чем радиус звезды. Количество же вещества, приходящееся на 1 $см^2$ ее поверхности, к этому времени уменьшится в миллионы раз по сравнению с тем, что было в самом начале расширения, когда ее радиус был близок к радиусу звезды *). Следовательно, если вначале приходилось около 10^8 *г* вещества на 1 $см^2$ оболочки, то через несколько суток количество его будет порядка 10 *г*, т. е. столько же, сколько содержится в атмосфере обычной звезды (в расчете на ту же площадь). Оболочка к этому времени становится прозрачной для оптического излучения в непрерывном спектре, как и атмосфера звезды. Теперь уже можно видеть, что происходит внутри оболочки.

Дальнейшее возрастание поверхности оболочки новой звезды при ее расширении уже не приводит к увеличению блеска. Ранее оболочка излучала во всех длинах волн непрерывного спектра, но теперь, подобно атмосфере звезды, она поглощает излучение только в спектральных линиях и, соответственно, излучает главным образом в этих длинах волн. Наблюдаемый же блеск определяется в основном количеством энергии, излучаемой в непрерывном спектре, т. е. излучением фотосферы, а оболочка уже не является фотосферой. Следовательно, момент, когда блеск звезды наибольший, характеризуется тем, что в это время оболочка становится прозрачной для видимого непрерывного излучения.

Воспользуемся же возможностью «заглянуть» внутрь оболочки новой звезды и посмотрим, что происходит под ней через несколько суток после гигантского взрыва. Конечно, в это время радиус оболочки еще так мал, что никакой туманности на ее месте заметить нельзя и загляды-вание внутрь состоит лишь в изучении спектра излучения, выходящего из-под оболочки. Поскольку на него накладывается и излучение оболочки, то в целом наблюдаемый спектр новой звезды оказывается очень сложным. Он характеризуется как присутствием непрерывного излучения, так

*) Количество вещества на 1 $см^2$ с расширением оболочки должно изменяться обратно пропорционально квадрату ее радиуса. В этом легко убедиться при помощи рассуждений, аналогичных проводившимся в связи с формулой (3).

и наличием эмиссионных линий и линий поглощения. Непрерывное излучение особенно сильно в синей и фиолетовой областях спектра, что указывает на высокую температуру излучающего газа.

Поскольку расширившаяся оболочка звезды продолжает излучать энергию в длинах волн линий, то не удивительно, что в спектре новой звезды содержатся эмиссионные линии. После того как оболочка стала прозрачной, можно видеть не только приближающуюся к нам часть оболочки, но и противоположную ее полусферу, которая также излучает в линиях. Поэтому эмиссионная линия образуется всей оболочкой и является симметричной относительно нормального (несмещенного) для этой линии положения, характеризуемого длиной волны λ_0. Полная ширина линии определяется скоростью расширения оболочки v. Линия составлена излучением, идущим от различных частей оболочки, которые движутся по отношению к наблюдателю с разными скоростями. Так как наибольшая из скоростей приближения равна v, а максимальная скорость удаления составляет $-v$, то, следовательно, полная ширина линии $2\Delta\lambda_0 = 2\lambda_0 \frac{v}{c}$.

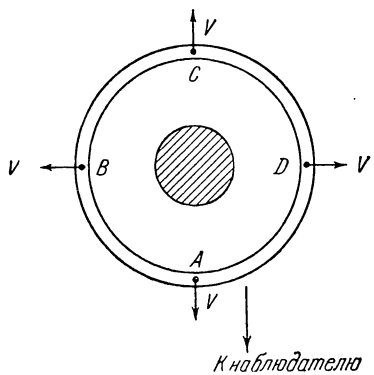

Рис. 33. Схема расширяющейся оболочки звезды. Часть оболочки, находящаяся между звездой и наблюдателем, создает линии поглощения в спектре, смещенные вследствие эффекта Доплера. Эмиссионные линии создаются всей оболочкой.

Если внутри оболочки расположен источник непрерывного излучения, то при поглощении из этого излучения передней частью движущейся оболочки какой-то доли энергии в длинах волн линий должны возникать линии поглощения, смещенные на величину $\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c}$. Такие линии поглощения и наблюдаются. Благодаря непрерывному излучению не происходит резкого спада блеска звезды после максимума, какого можно было ожидать вследствие уменьшения непрозрачности оболочки.

Помимо линий, принадлежащих оболочке звезды и смещенных поэтому на величину $\Delta\lambda_0$, в спектре новой звезды после максимума ее блеска есть много линий, еще сильнее сдвинутых от нормального положения. По величине сдвига этих линий находят, что они возникают при поглощении фотонов, испускаемых источником непрерывного излучения, в потоках газа, движущихся в сторону наблюдателя в 1,5—2 раза быстрее, чем оболочка. Подобные же потоки движутся и в других направлениях. Таким образом, исследование линий в спектрах новых звезд показало, что после взрыва новая звезда остается в течение недель и даже месяцев очень активной. Из нее выбрасываются массы газа, летящие со скоростями 2—3 тысячи километров в секунду. Этот газ не только поглощает, но и испускает излучение в длинах волн линий, а из тех более плотных слоев газа, которые расположены ближе к звезде, выходит также и непрерывное излучение. Путем детального исследования линейчатых спектров новых звезд нашли, что в различных направлениях вещество выбрасывается неодинаково.

Хотя выбрасывание, или, как говорят, истечение газа из новой звезды постепенно ослабевает, но время от времени мощность истечения внезапно усиливается. В результате происходит возрастание излучения в непрерывном спектре, выражающееся в увеличении блеска звезды. Это явление называют вторичной вспышкой. Вторичные вспышки представляют собой взрывы, но более слабые, чем первый взрыв. Таким образом, за главным взрывом в звезде, который приводит к отрыву от нее наружных слоев, следует целая серия более слабых взрывов.

Так как скорость движения газа, выбрасываемого звездой после отрыва от нее оболочки, существенно превосходит скорость оболочки, то газовые потоки настигают оболочку и «подгоняют» ее. О возрастании скорости оболочки, вызванном этим процессом, мы узнаем по увеличению сдвига образованных ею линий поглощения. По-видимому, особенно мощные потоки газа извергаются звездой еще до того, как блеск новой звезды достигает максимума. Вклиниваясь в оболочку, эти потоки разрывают ее на отдельные части. Поэтому-то туманность, которая, как мы знаем, получается из расширяющейся оболочки, обычно не является вполне однородной, а состоит из множества сгустков или облаков.

Неоднородность структуры оболочки у новой звезды и отклонение формы оболочки от сферической вначале бывают не очень заметными. В дальнейшем, вследствие расширения туманности, плотность газа в ней уменьшается, его излучательная способность падает, и наименее плотные части туманности становятся незаметными. В это время туманность часто представляется состоящей из отдельных светящихся сгустков, расположенных к тому же не вполне симметрично относительно звезды, образовавшей туманность.

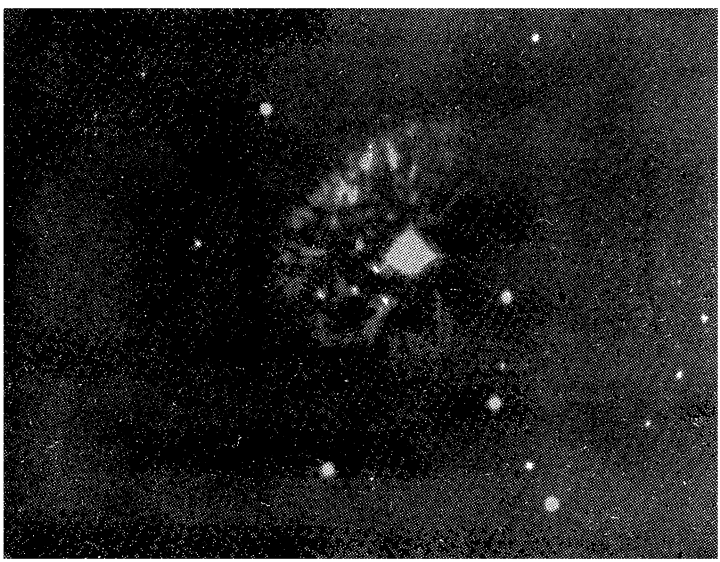

Рис. 34. Оболочка Новой Персея 1901 г. На этом снимке, полученном через пятьдесят лет после вспышки, хорошо видна неоднородность оболочки.

Особенно хорошо изучена структура такой туманности для одной из самых близких к нам новых звезд, вспыхнувшей в 1918 г. в созвездии Орла. При анализе снимков спектра туманности обнаружилось, что вещество в ней концентрировалось в отдельных кольцеобразных зонах, имеющих общую ось. На концах оси располагались два особенно крупных сгустка газа. Один из этих сгустков

в сороковых годах, когда он достаточно удалился от звезды, стал видимым на фотоснимках (см. рис. 31).

Вспышки протекают у различных новых звезд неодинаково. Отличаются скорости движения оболочек, массы оболочек и детали изменений блеска и спектра. Однако срыв оболочки при взрыве и последующее мощное истечение вещества характерны для всех новых звезд. При оценке энергии, освобождаемой взрывом в новой звезде, которой мы сейчас займемся, будем иметь в виду некоторую «среднюю» новую звезду.

Начнем с кинетической энергии оболочки. Массу, выброшенную новой, оценивают по массе туманности, окружающей звезду. Туманность же бывает видимой через несколько месяцев, а чаще — через несколько лет после взрыва. К этому времени выбрасывание вещества в основном заканчивается. Таким образом, величина массы, приводившаяся нами ранее (10^{29}—10^{30} *г*), включает в себя как массу первоначально сорванных слоев звезды, так и массу выброшенного позже вещества. При скорости расширения туманности порядка $V \approx 1000$ *км/сек* $= 10^8$ *см/сек* для кинетической энергии ее $E_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2}$ находим значение 10^{45}—10^{46} *эрг*.

Поверхностные слои звезды испытывают притяжение со стороны тех ее областей, которые расположены глубже. На преодоление этого притяжения при отрыве оболочки должна быть затрачена энергия. Обозначим величину ее через $E_{\text{отр}}$. Применяя для оценки $E_{\text{отр}}$ тот же прием, что и для оценки потенциальной энергии звезды (см. § 4), нетрудно найти, что $E_{\text{отр}} = \frac{GM_* m}{R_*}$, где M_* и R_* — масса и радиус новой звезды, а m — масса оболочки. При указывавшихся нами выше значениях M_*, R_* и m получаем для $E_{\text{отр}}$ значение порядка 10^{45} *эрг*.

На преодоление притяжения звезды и сообщение оболочке большой скорости расходуется лишь часть энергии, освободившейся при взрыве в новой звезде. Другая часть ее выходит из звезды в форме излучения. Энергию излучения новой звезды, вернее, ту ее долю, которая приходится на видимую часть спектра, определяют по кривой блеска.

Кривая блеска дает значение звездной величины звезды в любой момент. Так как расстояние до звезды известно, то можно найти звездную величину, которая была бы

у Солнца на том же расстоянии. Из этих данных получено, что в момент наивысшего блеска новые звезды на 12—15 звездных величин ярче Солнца. Следовательно, мощность их излучения в 10^5—10^6 раз больше, чем у Солнца, т. е. новая звезда в это время излучает 10^{39}—10^{40} *эрг/сек*. Для общего количества энергии, излученной звездой в первые несколько месяцев после взрыва, находят, учитывая изменение ее блеска, величину порядка 10^{46} *эрг*.

При вспышке новая звезда, помимо излучения в оптическом диапазоне, может испускать электромагнитное излучение других длин волн, а также космические лучи. Сейчас нет данных для оценки энергии невидимых излучений новой звезды. Возможно, что там они играют относительно меньшую роль, чем в солнечных вспышках, так как взрыв в новой звезде происходит глубоко и энергия этих излучений в значительной части может успеть превратиться в тепловую энергию. Во всяком случае, произведенные оценки показывают, что общее количество освобождаемой при взрыве новой звезды энергии может превысить 10^{46} *эрг*. По количеству энергии вспышка новой звезды оказывается эквивалентной 10^{12}—10^{13} больших солнечных вспышек.

На вспышки новых звезд похожи, по своему характеру, изменения блеска у так называемых повторных новых. Эти звезды вспыхивают каждые 30 — 40 лет. За несколько суток блеск звезды возрастает в 10^3 — 10^4 раз и затем падает настолько быстро, что через несколько месяцев после вспышки он почти такой же, как и до нее. При вспышке в спектре звезды возникают широкие эмиссионные линии. Такие линии присущи, как мы знаем, только излучению разреженного газа, причем значительная ширина их должна обусловливаться большой скоростью движения газа.

Можно предположить, что у повторных новых звезд при вспышке образуется оболочка, но на фотографиях этих звезд, снятых через несколько месяцев или лет после взрыва, туманностей не обнаруживается. Вероятно, оболочка повторной новой звезды содержит сравнительно мало газа — в 100—1000 раз меньше, чем оболочка новой звезды. К тому времени, когда радиус оболочки увеличивается настолько, что ее можно было бы заметить, плотность газа и его излучательная способность сильно снижаются и свечение туманности недостаточно для образования изображения

на фотопластинке. Кинетическая энергия такой оболочки должна быть в тысячи раз меньше, чем у оболочки новой звезды. Что же касается количества энергии, излучаемой при вспышке повторной новой, то его оценка для оптического диапазона по кривой блеска приводит к значению порядка 10^{42}—10^{43} *эрг*.

Через несколько лет после вспышки повторной новой звезды не заметно разницы ни в ее блеске, ни в спектре по сравнению с тем, что наблюдалось до вспышки. Считают поэтому, что состояние звезды в результате вспышки сколько-нибудь существенно не меняется, а раз так, то причины, вызвавшие вспышку, должны через некоторое время привести к ее повторению.

Повторными вспышками характеризуются также звезды, называемые новоподобными, или, по своему прототипу, звездами типа U Близнецов. Большие взрывы на этих звездах происходят по нескольку раз в год. При каждом взрыве мощность излучения звезды за несколько часов (а иногда за сутки или двое) увеличивается в 20—50 раз. Звезда обладает повышенным блеском несколько суток, после чего быстро возвращается к первоначальному состоянию.

В спектрах таких звезд, полученных в промежутках между вспышками, видны очень широкие и сильные эмиссионные линии, образованные излучением атомов водорода. Следовательно, вокруг звезды обычно есть оболочка. Однако движение в этой оболочке, по-видимому, не связано с ее расширением. Вспышка не влияет заметным образом на спектр оболочки — он сохраняется почти неизменным до следующей вспышки. Нет оснований думать, что взрыв на звезде типа U Близнецов связан со значительным выбросом вещества из нее. Может быть, эти взрывы затрагивают лишь самые внешние слои звезды. Общая энергия, излучаемая в оптическом диапазоне в результате взрыва такой звезды, порядка 10^{39}—10^{40} *эрг*.

До недавнего времени основным доводом в пользу гипотезы об одинаковой природе вспышек новых звезд, повторных новых звезд и звезд типа U Близнецов было внешнее сходство изменений их блеска при вспышках (при совершенно различном масштабе явления). Но использовав для наблюдений звезд, вспыхивавших десятки лет назад как новые, самые большие инструменты (в частности, пятиметровый телескоп), обнаружили, что эти звезды

двойные. Аналогичное обстоятельство было установлено для повторных новых и звезд типа U Близнецов.

Сама по себе двойственность этих звезд не привлекла бы особого внимания — ведь очень большой процент всех звезд Галактики входит в двойные системы. Однако почти все двойные звезды, в которых происходили вспышки, обладают особенностями: во-первых, они оказываются очень тесными системами; расстояние между компонентами в них всего в несколько раз больше их радиуса, поэтому период обращения звезд вокруг общего центра тяжести системы чрезвычайно мал — всего несколько часов; во-вторых, компоненты системы — звезды-карлики, причем одна из них обычно имеет очень малый радиус и напоминает белого карлика. Массы этих звезд порядка нескольких десятых солнечной массы. Принадлежность всех звезд рассматриваемых типов к двойным особого вида вряд ли случайна. По-видимому, и процессы, вызывающие вспышки этих звезд, имеют много общего.

Еще до открытия двойственности звезд типа U Близнецов и повторных новых звезд была отмечена интересная закономерность, связанная со вспышками тех и других. Сначала нашли, что те звезды типа U Близнецов, у которых средний промежуток между вспышками (цикл) длиннее, испытывают и более сильные вспышки *). То же самое, как оказалось, имеет место и для повторных новых звезд. Изменение блеска при вспышке тем сильнее, чем длительнее цикл. Интересно, что на основе этой зависимости в 1934 г. было высказано предположение о вспышке повторной новой T Северной Короны через 80—100 лет после предыдущей вспышки 1866 г. и, действительно, в 1946 г. эта звезда вспыхнула.

Если допустить, что новые звезды вспыхивают в течение своей жизни не один раз и что для них указанная зависимость также справедлива, то при наблюдаемом у этих звезд изменении блеска во время вспышки им нужно приписать длину цикла порядка нескольких тысяч лет.

В заключение этого параграфа остановимся на некоторых гипотезах, которые были предложены для объяснения вспышек. В основе любой теории взрывов должно лежать то или иное предположение об источниках энергии взрыва.

*) Эта зависимость статистическая, т. е. она сказывается не для отдельной вспышки, а лишь когда рассматривается большое число вспышек.

В некоторых из ранних гипотез о природе новых звезд предполагалось, что энергия излучается при столкновениях звезд за счет энергии их движения. Эта точка зрения в свете данных новых наблюдений представляется совершенно несостоятельной, хотя бы потому, что вспыхивают как новые лишь звезды определенного вида, а столкновения, даже если бы они были достаточно частыми, должны случаться у звезд любых типов. По этой же причине неверны и другие гипотезы, объясняющие вспышку новой звезды случайными внешними воздействиями.

Одно время была распространена гипотеза, рассматривавшая вспышку как результат внезапного уменьшения радиуса звезды и перехода вследствие этого части потенциальной энергии газа в тепловую энергию и излучение. Но предположение о существенном изменении структуры звезды при вспышке, по крайней мере для повторных новых звезд, противоречит наблюдениям. Кроме того, процесс выхода энергии, освободившейся таким путем в недрах звезды, должен проходить совершенно иначе, чем наблюдаемая вспышка новой звезды.

Теперь считается установленным, что, во-первых, вспышка новой звезды (и, тем более, повторной новой), обусловлена внутренними процессами в звезде и, во-вторых, что при вспышке не происходит существенного изменения структуры звезды.

Согласно современным воззрениям, энергия, расходуемая при вспышках новых звезд, обеспечивается ядерными реакциями, но относительно того, в какой области звезды протекают эти реакции, нет единого мнения. Одни исследователи считают, что взрыв происходит сравнительно неглубоко, в периферических слоях звезды, а согласно другой точке зрения энергия взрыва освобождается в центральных областях звезды. В последнем случае предполагается, что энергия переносится из недр звезды наружу ударной волной, под действием которой могут быть сорваны внешние слои звезды, образующие расширяющуюся оболочку. Однако эта теория не объясняет многие факты, известные из наблюдений вспышек новых звезд, в частности, мощное истечение вещества из звезды после отрыва оболочки и вторичные вспышки. Должно быть, ближе к истине те, кто считает, что при вспышках новых звезд, повторных новых и звезд типа U Близнецов взрывами охватываются лишь внешние области звезд.

Сейчас нет теории вспышек новых звезд, которая согласуется хотя бы с основными из известных данных наблюдений. По-видимому, в будущей теории вспышек должна учитываться двойственность этих звезд, так как присутствие вблизи новой звезды другой звезды должно сказываться на внутреннем строении и процессах освобождения энергии в новой звезде. Кроме того, может иметь значение присутствие на поверхности новой звезды сильных магнитных полей, о существовании которых говорит характер выбрасывания вещества из новой звезды после взрыва. Возникновению полей может способствовать быстрое вращательное движение звезды, входящей в состав тесной пары.

§ 7. СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

В хрониках и летописях разных народов наряду с описанием исторических событий зарегистрированы и необыкновенные небесные явления. Одним из них, упоминаемым в ряде хроник, было появление в 1054 г. необычайно яркой звезды, которую видели в течение целого месяца даже в дневное время. Отмечено, что по своему блеску эта звезда в десятки раз превосходила самое яркое после Солнца и Луны светило — Венеру. На том месте неба, где согласно летописям находилась звезда, сейчас наблюдается туманность, названная из-за ее своеобразного строения Крабовидной. При сравнении фотографий туманности, снятых с интервалом в несколько десятилетий, не только обнаружили, что она расширяется, но и установили, что расширение продолжается около 900 лет. Таким образом, есть все основания считать, что возникновение туманности связано со вспышкой необычно яркой новой звезды.

Сравнив скорость возрастания угла, под которым виден радиус Крабовидной туманности, со значением скорости расширения, определенной по сдвигу спектральных линий, нашли, так же как и для туманностей, окружающих новые звезды (см. § 6), расстояние до нее. Оно составляет около 5000 световых лет, т. е. больше, чем расстояние до многих из новых звезд последнего времени. Вместе с тем, блеск звезды при вспышке, давшей рождение туманности, в сотни раз превосходил блеск самых ярких из новых звезд. Следовательно, Крабовидная туманность возникла при гораздо более сильном взрыве, чем вспышки новой

звезды. Звезды, в которых случаются столь сильные взрывы, называют сверхновыми.

Вспышки сверхновых представляют собой настолько грандиозные космические катастрофы, что их наблюдают

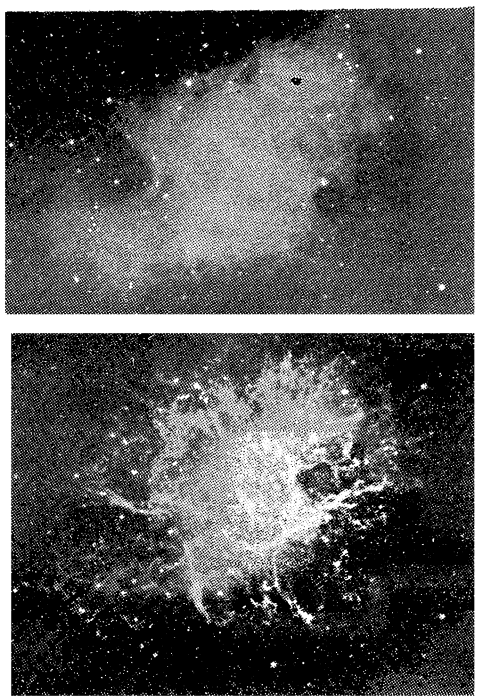

Рис. 35. Крабовидная туманность. Вверху: снимок в лучах непрерывного спектра, внизу: снимок в лучах линии $H\alpha$.

даже в том случае, когда звезда расположена в далекой звездной системе. Например, в галактике, называемой туманностью Андромеды, удаленной от нас на миллионы световых лет, в 1885 г. вспыхнула звезда, в несколько тысяч раз более яркая, чем замечавшиеся в этой туманности обычные новые звезды. Случающееся иногда внезапное увеличение яркости какой-либо из далеких галактик означает, что там появилась именно сверхновая, поскольку блеск вспыхнувшей звезды сравним с общим блеском миллиардов звезд этой системы.

Вспышки сверхновых звезд в Галактике случаются редко. Из всех звездных вспышек, так или иначе отмеченных за последние две тысячи лет, можно с уверенностью считать вспышками сверхновых менее десятка. Самые недавние из них наблюдались в 1572 г. астрономом Тихо Браге и в 1604 г. его учеником Кеплером. Если в Галактике после этого и вспыхивали сверхновые, то в столь удаленных от Солнца ее областях, что эти вспышки остались незамеченными (в частности, из-за сильного поглощения света в межзвездном пространстве).

Те данные об изменениях блеска и спектра сверхновой звезды во время вспышки, которыми располагает современная астрономия, получены почти исключительно путем наблюдений звезд, вспыхивавших вне нашей звездной системы. В Галактике же изучают туманности, возникшие при вспышках сверхновых сотни и тысячи лет назад. По этим туманностям воспроизводится механическая картина явления и, в частности, оценивается количество вещества, выброшенного звездой в результате взрыва.

Сверхновая звезда в другой галактике может наблюдаться только на первых этапах вспышки, когда блеск звезды достаточно велик и заметно сказывается на общей светимости этой галактики. Систематические поиски сверхновых в других галактиках производятся уже свыше тридцати лет путем периодического фотографирования больших групп галактик. Если при сравнении фотографий одной и той же области неба обнаруживают, что яркость какой-либо из галактик увеличилась (это замечают по более сильному почернению негатива в соответствующем месте), то начинают следить за изменением яркости этой галактики и таким путем получают кривую блеска сверхновой звезды. Понятно, что при этом способе наблюдений трудно захватить не только кратковременный период увеличения блеска звезды, но и момент ее максимального блеска.

Сверхновая в другой галактике обладает достаточно большим блеском для того, чтобы быть различимой в течение нескольких месяцев. За это время и получают ее кривую блеска, а также фотографии спектра звезды. До 1965 г. обнаружено свыше сотни вспышек сверхновых, но лишь часть из них была охвачена наблюдениями более или менее полно. Заметим, кстати, что, сопоставив данные о числе замеченных вспышек с общим числом галактик, подвергавшихся исследованию, можно оценить частоту вспышек.

Оказывается, что вообще в галактике вспышка сверхновой происходит в среднем один раз за 400—600 лет, а в гигантских спиральных звездных системах, подобных нашей Галактике, сверхновые звезды появляются в несколько раз чаще.

Как же меняется блеск сверхновой звезды при вспышке? В этом отношении сверхновые напоминают новые звезды (при бóльшем масштабе явления). Очень быстрое возрастание блеска (за несколько дней он достигает максимального значения) сменяется сравнительно медленным спадом. По характеру уменьшения блеска после максимума отчетливо выделяются два вида сверхновых звезд, сильно различающиеся, как мы вскоре увидим, и в других отношениях.

У сверхновых, относимых к I типу, блеск уменьшается без каких-либо колебаний, монотонно, и падение блеска занимает довольно большое время. За год после вспышки блеск звезды ослабевает в несколько сотен раз. У всех звезд этого типа кривые блеска почти в точности совпадают, тогда как новые звезды очень сильно отличаются друг от друга по деталям кривой блеска. Сверхновые II типа характеризуются большим разнообразием кривых блеска и быстрым падением блеска спустя приблизительно сто дней после максимума.

Как мы знаем, по кривой блеска новой звезды при известном расстоянии до нее оценивается энергия излучения новой за время вспышки. Таким же путем определяют и количество энергии, излучаемой в оптическом диапазоне при вспышке сверхновой. Заметим, что и для некоторых из сверхновых звезд, вспыхивавших в нашей Галактике, известны оценки блеска в максимуме из исторических источников, а для двух из них (1572 г. и 1604 г.), наблюдавшихся опытными астрономами, имеются и более точные данные о блеске и его изменениях.

Расстояния до этих сверхновых недавно были определены по образованным при вспышках туманностям. Что же касается сверхновых звезд, вспыхнувших в других галактиках, то расстояния до них находятся особыми методами, о которых рассказывается в следующем параграфе.

В максимуме блеска сверхновая звезда излучает в сотни миллионов раз больше энергии, чем Солнце. Сверхновые I типа оказываются несколько более яркими, чем относящиеся ко II типу, и излучают в этот период около 10^{42} *эрг/сек*, тогда как мощность излучения сверхновой

II типа — 10^{40}—10^{41} *эрг/сек*. За все время после взрыва, пока звезда остается доступной наблюдениям, сверхновая I типа испускает в форме оптического излучения энергию порядка 10^{48} *эрг*, а звезда II типа — около 10^{47} *эрг*. Разумеется, излучение не должно ограничиваться оптической областью. Возможно, что общее количество энергии излучения в 10—100 раз больше указанных значений и составляет 10^{49}—10^{50} *эрг*.

По спектрам новых звезд удалось получить довольно полное представление о том, как протекает вспышка в период максимального блеска и в последующее время. В случае вспышек сверхновых звезд спектры не дают возможности воспроизвести всю картину вспышки. Несколько лучше дело обстоит со сверхновыми II типа, с которых мы и начнем.

Спектры сверхновых II типа, снятые после максимума блеска, в общем похожи на спектры новых звезд в соответствующий период. Там, так же как и в спектрах новых, наиболее заметной особенностью оказываются эмиссионные линии или, лучше сказать, полосы, поскольку они очень широки. Если считать, что излучение в этих полосах выходит из расширяющейся оболочки звезды, а ширина полос обусловлена, как и у новых звезд, эффектом Доплера, то для скорости оболочки получается очень большая величина. Ширина полосы $2\Delta\lambda_0$ связана со скоростью v движения оболочки соотношением $\frac{2\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{2v}{c}$ (см. § 6), где λ_0 — длина волны соответствующей линии при отсутствии доплеровского смещения. Из наблюдений находят, что $\frac{2\Delta\lambda_0}{\lambda_0} \approx 0{,}04$, и поэтому $v \approx 6000$ *км/сек*. Столь большие скорости расширения оболочки у новых звезд не встречаются.

Вследствие своей очень большой ширины полосы, приписываемые атомам различных элементов, перекрываются, и спектр сверхновой оказывается весьма непохожим на спектры других звезд. Поэтому остаются сомнения в правильности отождествлений полос, т. е. в определении принадлежности их тому или иному элементу, а значит, и в оценках скорости расширения оболочки по этим полосам. Однако за неимением других данных приходится при оценках энергии взрыва и других исследованиях использовать значения скорости, находимые по ширине полос.

Если для спектров сверхновых II типа еще можно предложить вероятное объяснение, то природа спектров сверхновых I типа до сих пор остается загадочной. В них не удается выделить полос или линий, которые встречаются в других звездных спектрах и могут быть отнесены к тем или иным элементам. Единственным исключением являются две линии в красной части спектра, длины волн которых совпадают с хорошо известными линиями атома кислорода. Они становятся заметными через несколько месяцев после максимума блеска, и ширина их соответствует скорости движения порядка 1000 *км/сек*. В остальном же спектр сверхновой I типа состоит из ряда промежутков, в которых излучение интенсивно, чередующихся с более темными интервалами. Ширина этих промежутков и их положение меняются со временем. Обращает на себя внимание сходство всех сверхновых I типа, не только по виду спектра и происходящим в нем изменениям, но также и по срокам этих изменений.

Как мы видим, из спектров сверхновых звезд пока не удается извлечь достаточно обширной информации о природе вспышек. Поэтому большую ценность для изучения сверхновых представляют наблюдения туманностей, образовавшихся при вспышках. Взрыв, приводящий к вспышке сверхновой звезды, должен сопровождаться настолько мощным выбрасыванием вещества, что образующаяся вокруг звезды оболочка содержит гораздо больше газа, чем оболочка новой звезды, и остается видной сотни и тысячи лет. В том, что это имеет место, убеждает хотя бы существование Крабовидной туманности в созвездии Тельца на месте вспышки Сверхновой 1054 г. Теперь известно уже около десяти светлых туманностей, происхождение которых уверенно приписывается вспышкам сверхновых. Из них, помимо наиболее близкой к Солнцу Крабовидной туманности, особенно интересны также волокнистые туманности в созвездии Кассиопеи и в созвездии Лебедя.

У туманности, возникшей при вспышке сверхновой в другой галактике, яркость должна быть гораздо меньше, чем у этой галактики, а размер туманности ничтожен по сравнению с размером галактики. Поэтому такие туманности наблюдать не удается и приходится ограничиваться только изучением остатков сверхновых звезд в нашей звездной системе.

В пятидесятых годах было обнаружено, что Крабовидная туманность является мощным источником радиоизлучения. Как установили в дальнейшем, и все другие туманности, образовавшиеся при вспышках сверхновых звезд, излучают много энергии в радиодиапазоне. Оптическое же излучение этих туманностей часто гораздо слабее, чем радиоизлучение.

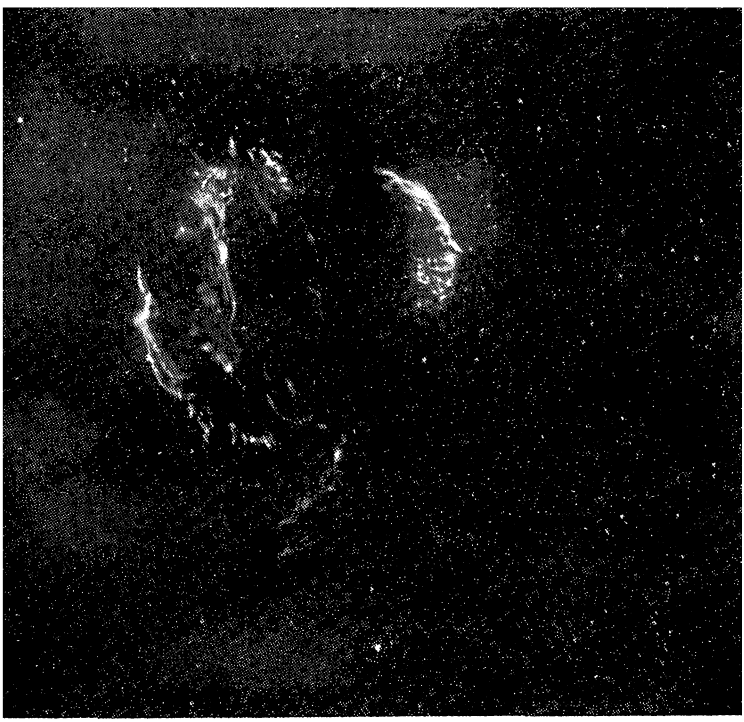

Рис. 36. Волокнистая туманность в созвездии Лебедя (называемая «Петлей»).

Исследование радиоизлучения остатков оболочек сверхновых звезд оказалось важнейшим средством для раскрытия физических свойств этих объектов, а значит, и для изучения взрывов сверхновых. Для того чтобы понять природу радиоизлучения Крабовидной и других родственных ей туманностей, нам придется довольно подробно

рассмотреть различные механизмы электромагнитного излучения.

Мы уже говорили выше, в § 2, что электромагнитное излучение возникает при изменении скорости движения электрических зарядов. В плазме тепловые скорости отдельных частиц все время меняются в результате столкновений их друг с другом. Образующееся при этом излучение называется тепловым. О другом механизме электромагнитного излучения, плазменных колебаниях, упоминалось, как о возможной причине всплесков солнечного радиоизлучения. Но наблюдаемое распределение радиоизлучения остатков оболочек сверхновых по длинам волн не согласуется с тем, что дают эти механизмы. Кроме того, в обоих случаях создается и оптическое излучение, причем в условиях, присущих рассматриваемым туманностям, оно должно быть гораздо сильнее радиоизлучения. Поэтому приходится искать другие пути, чтобы объяснить наблюдаемое радиоизлучение Крабовидной и других подобных ей туманностей. Среди различных механизмов радиоизлучения видное место занимает так называемый гиромагнитный или магнитнотормозной, который мы и рассмотрим сначала.

Как хорошо известно, электрон, движущийся в магнитном поле поперек магнитных силовых линий, испытывает действие силы, называемой лоренцовской, которая искривляет его траекторию. Если направление скорости движения v перпендикулярно к силовым линиям, то величина лоренцовской силы F определяется формулой

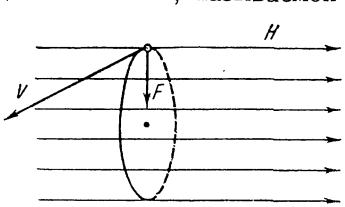

Рис. 37. Направление силы F, действующей на электрон, движущийся в магнитном поле. Направление скорости электрона и напряженности поля H указано стрелками.

$$F = \frac{e}{c} vH, \qquad (20)$$

где H означает величину напряженности поля и e — заряд электрона. Сила F направлена перпендикулярно к скорости электрона и силовым линиям поля (рис. 37) *).

*) При ином направлении скорости формула вместо v содержит ее проекцию на направление, перпендикулярное к силовым линиям. Тогда, помимо описываемого ниже кругового движения, электрон движется и вдоль линий, т. е. описывает спираль.

В том случае, когда на пути электрона магнитное поле не меняется, он под действием силы F описывает окружность. Радиус этой окружности R можно определить, приняв во внимание, что сила F должна уравновешиваться центробежной силой, равной $\frac{m_e v^2}{R}$ (m_e — масса электрона). Используя формулу (20), находим, что $R = \frac{m_e v c}{eH}$.

Таким образом, движение электрона в однородном магнитном поле повторяется через определенный промежуток времени, требующийся для того, чтобы описать полную окружность. Это время (период) равно $\frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m_e c}{eH}$. Для частоты же периодического движения получается значение

$$\nu_H = \frac{eH}{2\pi m_e c}. \qquad (21)$$

С такой же частотой происходят вызванные движением электрона изменения электромагнитного поля, т. е. электромагнитные колебания. Следовательно, излучение, испускаемое электроном, движущимся в магнитном поле, имеет частоту $\nu_{мт}$. Наряду с ним испускается излучение и с частотами, кратными $\nu_{мт}$, потому что движение электрона является периодическим не только с частотой $\nu_{мт}$, но и с этими частотами. Частоты $n\nu_{мт}$, кратные основной частоте, называют обертонами, причем говорят, что порядок обертона тем выше, чем больше n. Очевидно, что период обертона n-го порядка в n раз меньше основного периода обращения электрона. Преобладающая часть энергии при v, много меньшем c, излучается в основной частоте $\nu_{мт}$, а не в обертонах. Заметим, что вообще формула для основной частоты (21) в том случае, когда скорость движения электрона не мала по сравнению со скоростью света, должна быть уточнена.

Оценим частоту магнитнотормозного излучения в слабом магнитном поле, например, при $H = 10^{-3}$ эрстед. Подставив в формулу (21) это значение H, а также $e = 4{,}8 \times 10^{-10}$ эл.-ст. ед., $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г*, находим $\nu_{мт} = 2{,}8 \times 10^3$ *сек*$^{-1}$ и, соответственно, очень большую длину волны $\lambda_0 \approx 10^7$ *см*. Следовательно, магнитнотормозное излучение в области сантиметровых и дециметровых волн может наблюдаться только при наличии достаточно сильных

полей с $H = 10^2—10^3$ эрстед. Трудно допустить, чтобы в огромном объеме туманности магнитное поле могло быть настолько сильным. Поэтому магнитнотормозной механизм в его классической форме неприменим для объяснения генерации радиоизлучения в оболочках сверхновых звезд.

Характер магнитнотормозного излучения оказывается совершенно иным, если электрон движется в магнитном поле со скоростью, очень близкой к скорости света. Энергия такого электрона, называемого релятивистским, во много раз больше энергии, соответствующей его массе покоя m_e. Релятивистские электроны в пространстве, наряду с другими частицами больших энергий, составляют, как мы знаем, космические лучи, возникающие, в частности, при космических взрывах. Ускорения частиц до скоростей, очень мало отличающихся от c, достигаются и в специальных устройствах. Было замечено, что когда скорость электронов, описывающих в сильном магнитном поле такого ускорителя (синхротрона) окружности, достигает значений, близких к c, эти электроны испускают свет. Поэтому-то электромагнитное излучение релятивистских электронов при движении их в магнитном поле и назвали синхротронным. Природа синхротронного излучения та же, что и магнитнотормозного, но эффекты, связанные с теорией относительности, существеннейшим образом влияют на его свойства.

Обычное магнитнотормозное излучение распространяется одинаково во всех направлениях, перпендикулярных к направлению силовых линий. Синхротронное же излучение испускается узким пучком вдоль того направления, в котором в данный момент движется электрон. Мы остановимся только на качественном объяснении причин этого явления.

Посмотрим, как излучает релятивистский электрон при движении на участке окружности между точками *1—2—3*, длина которого Δs. В точке *2* его скорость направлена к наблюдателю, а точки *1* и *3* расположены симметрично относительно *2* и так близко к ней, что всю дугу с большой точностью можно считать прямой (рис. 38). Пусть электрон проходит этот участок за время $\Delta t'$. Излучение электрона за это время успеет распространиться влево от точки *2* на расстояние $\frac{1}{2}(c\,\Delta t' - \Delta s)$, а вправо, в сторону наблюдателя, на расстояние $\frac{1}{2}(c\,\Delta t' + \Delta s)$. Так как скорость электрона очень близка к c, то величина Δs мало

отличается от $c\,\Delta t'$. Поэтому область пространства, охваченная изменением электромагнитного поля, т. е. занятая излучением, справа от электрона гораздо больше, чем слева от него, и, следовательно, энергия излучения сосредоточена главным образом справа. Но это и означает, что движущийся электрон излучает энергию преимущественно в направлении своего движения. Заметим, что в направлении, перпендикулярном к плоскости движения,

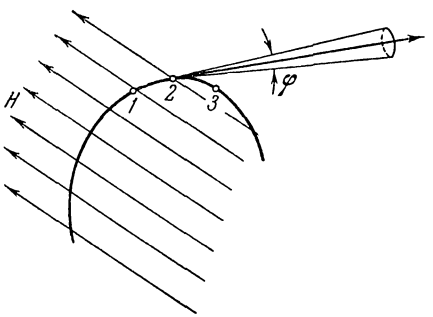

Рис. 38. Излучение релятивистского электрона в магнитном поле. Плоскость движения электрона перпендикулярна к магнитным силовым линиям.

энергия электроном не испускается, так как ускорения в этом направлении нет.

Теория движения релятивистского электрона в магнитном поле показывает, что электрон, обладающий скоростью v, излучает энергию в пределах очень узкого конуса, угол раствора которого φ равен

$$\varphi \approx \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \qquad (22)$$

а ось совпадает с направлением скорости электрона в данный момент.

Синхротронное излучение оказалось одной из важнейших особенностей многих объектов, испытавших космический взрыв. Поэтому для лучшего понимания его природы целесообразно дать здесь вывод формулы, характеризующей зависимость частоты этого излучения от энергии электрона.

Частота ν_0 обращения релятивистского электрона в магнитном поле определяется формулой, аналогичной (21),

но в которой учтена зависимость массы электрона от его скорости. Эта зависимость устанавливается формулой (15). Следовательно, для ν_0 имеем

$$\nu_0 = \frac{eH}{2\pi m_e c}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (23)$$

Так как $1-\frac{v^2}{c^2}$ намного меньше единицы, то частота обращения релятивистского электрона мала по сравнению с ее значением для нерелятивистских электронов.

Релятивистский электрон излучает не в частоте ν_0. Его излучение можно представить как последовательность очень кратковременных вспышек. Электрон делает полный оборот за время $\frac{1}{\nu_0}$, а излучает в данном направлении в $\frac{\varphi}{2\pi}$ раз меньшее время, которое мы обозначим $\overline{\Delta t}$. Учитывая формулы (22) и (23), находим $\overline{\Delta t} = \frac{m_e c}{eH}$. Если бы наблюдатель двигался с той же скоростью, что и излучающий электрон, т. е. покоился бы относительно источника излучения, то наблюдаемая продолжительность вспышки также равнялась бы $\overline{\Delta t}$. Но наблюдатель, навстречу которому летит электрон со скоростью v, видит вспышку в течение меньшего времени $\Delta t = \overline{\Delta t}\left(1-\frac{v}{c}\right)$. Это явление того же характера, что и рассмотренный выше эффект Доплера. При v, очень близком к c, имеем

$$\Delta t = \frac{m_e c}{eH}\left(1-\frac{v}{c}\right) = \frac{m_e c}{eH}\frac{1-\frac{v^2}{c^2}}{1+\frac{v}{c}} \approx \frac{1}{2}\frac{m_e c}{eH}\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right). \qquad (24)$$

Поскольку продолжительность вспышки во много раз меньше периода обращения электрона, излучение при вспышке соответствует высокому обертону частоты ν_0. Частота этого обертона ν_c порядка $\frac{1}{\Delta t}$, т. е.

$$\nu_c = \frac{2eH}{m_e c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (25)$$

Релятивистский электрон излучает энергию и в бесконечном числе других обертонов, т. е. испускает излучение

в широкой полосе частот, по существу, в непрерывном спектре. Однако максимум энергии излучения соответствует, как показывает точный расчет, частоте $\bar{\nu} \approx 0{,}5\nu_c$, а затем в обе стороны от максимума интенсивность излучения быстро спадает.

Энергия релятивистского электрона определяется выражением

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{26}$$

которое получается на основе формулы (17), устанавливающей зависимость массы тела от его скорости при учете эквивалентности массы и энергии (см. § 4).

При помощи формул (25) и (26) величину $\bar{\nu}$ можно представить в виде

$$\bar{\nu} \approx \frac{eH}{m_e c} \left(\frac{E}{m_e c^2}\right)^2. \tag{27}$$

Поскольку у релятивистского электрона величина E во много раз превосходит $m_e c^2$, то он способен излучать фотоны гораздо большей энергии, чем нерелятивистский. Пусть, например, $H = 10^{-3}$ эрстед, а скорость электронов v отличается от c на 0,01% (их энергия E при этом превосходит $m_e c$ в 10^4 раз). Максимум излучения таких электронов соответствует частоте $\bar{\nu} \approx 1{,}8 \cdot 10^{12}$ *сек*$^{-1}$. Длина волны этого излучения около 10^{-2} *см* и относится к инфракрасной области спектра, тогда как нерелятивистский электрон в таком же поле испускает очень длинноволновое радиоизлучение.

Как показывает формула (27), частота $\bar{\nu}$, вблизи которой и излучает главным образом релятивистский электрон, зависит от энергии электрона. В реальном источнике синхротронного излучения существует то или иное распределение электронов по энергиям, называемое энергетическим спектром электронов. Поэтому синхротронное излучение такого источника занимает широкую область частот в непрерывном спектре, а распределение энергии в нем зависит от характера энергетического спектра электронов.

Релятивистский электрон излучает в одной плоскости, перпендикулярной к силовым линиям магнитного поля.

Вектор напряженности электрического поля в распространяющейся от электрона электромагнитной волне лежит в этой же плоскости. Поэтому синхротронное излучение всегда является линейно поляризованным, причем плоскость поляризации перпендикулярна к магнитному полю. Поляризация синхротронного излучения позволяет обнаруживать его в составе излучения небесных тел, поскольку, как мы знаем, их обычное тепловое излучение не поляризовано. Если непрерывное излучение какого-либо объекта оказывается в значительной степени линейно поляризованным, то не только можно утверждать, что часть этого излучения имеет магнитнотормозную природу, но и определить направление магнитного поля в источнике излучения.

В настоящее время единственным механизмом, способным объяснить радиоизлучение Крабовидной туманности и других остатков оболочек сверхновых звезд, является синхротронное излучение. Очень веским доводом в пользу этого взгляда было истолкование оптического излучения Крабовидной туманности. Теоретическое предположение о том, что и оно создается синхротронным механизмом, было убедительно подтверждено, когда нашли, что оптическое излучение туманности значительно поляризовано. А после того как установили, что определенное по его поляризации направление магнитных силовых линий совпадает с полученным по поляризации радиоизлучения, вывод о синхротронной природе излучения Крабовидной туманности стал несомненным. Поскольку частота оптического излучения в десятки тысяч раз больше частоты радиоизлучения, то, как следует из формулы (27), энергия электронов, ответственных за образование оптических фотонов, должна в сотни раз превышать энергию тех электронов, которые создают радиоспектр. Следовательно, довольно сильное оптическое излучение Крабовидной туманности указывает на присутствие в ней релятивистских электронов очень высокой энергии. В этом отношении она отличается от ряда других туманностей — остатков оболочек сверхновых, у которых оптическое излучение синхротронного происхождения отсутствует или оказывается очень слабым. Там, по-видимому, электронов столь высокой энергии почти нет.

По наблюдениям спектра радиоизлучения и оптического излучения оценивают содержание в туманности электро-

нов различных энергий. Для Крабовидной туманности нашли, что число электронов, обладающих энергией E, в ней пропорционально $\frac{1}{E^{1,6}}$ для электронов сравнительно малой энергии (дающих радиоизлучение) и пропорционально $\frac{1}{E^4}$ для электронов, дающих оптический спектр. По этим данным, учитывая также значение напряженности магнитного поля в туманности $H \approx 10^{-4}$ эрстед, полученное по мощности радиоизлучения, определили общую энергию релятивистских электронов в ней. Оказалось, что Крабовидная туманность содержит около 10^{47} релятивистских электронов с общей энергией порядка 10^{48} *эрг*. Количество магнитной энергии в Крабовидной туманности легко находится по ее известному объему и напряженности поля. Оно составляет 10^{47}—10^{48} *эрг*.

Как видно по фотографиям, Крабовидная туманность обладает характерной волокнистой структурой. Аналогичный вид имеют и другие туманности, возникшие при вспышках сверхновых. Синхротронное излучение создается в среде, занимающей пространство между волокнами. Концентрация свободных электронов в этой среде, определенная по влиянию их на распространение радиоизлучения (так называемому фарадеевскому вращению плоскости его поляризации), составляет у Крабовидной туманности примерно 1 электрон в 1 $см^3$. При занимаемом туманностью объеме порядка $5 \cdot 10^{55}$ $см^3$ всего в этих областях ее оказывается приблизительно 10^{56} электронов. Кроме того, там должно быть и соответствующее количество атомных ядер, главным образом протонов. Следовательно, общая масса газа в пространстве между волокнами порядка 10^{32} *г*, т. е. 0,1 $M_\odot$. Стоит заметить, что из каждых 10^9 электронов в этой области туманности в среднем лишь один является релятивистским.

Излучение волокон характеризуется эмиссионным спектром, свидетельствующим о довольно высокой их температуре, равной примерно 20 000° К. Волокна занимают малую часть объема туманности, но благодаря сравнительно большой концентрации газа в них — порядка 10^3 атомов в 1 $см^3$, их общая масса также около 0,1 $M_\odot$. Причины, вызывающие свечение газа в волокнах, не вполне ясны. Возможно, что это свечение возбуждается синхротронным излучением в ультрафиолетовой области спектра, созда-

ваемым релятивистскими электронами очень большой энергии.

В последнее время при внеатмосферных наблюдениях обнаружили, что Крабовидная туманность является мощным источником излучения в рентгеновской области спектра. Возможно, что оно также синхротронного происхождения. Частота наблюдавшегося рентгеновского излучения на три-четыре порядка выше, чем частота оптического. Поэтому энергия электронов, создающих рентгеновское излучение, должна быть согласно формуле (27) в десятки раз больше, чем у электронов, создающих оптическое излучение.

Изучение остатков оболочек сверхновых звезд привело, как мы видим, к очень важным выводам. Оказывается, что в результате взрыва сверхновой звезды вблизи нее образуется большое количество релятивистских частиц и магнитное поле. Общая энергия частиц и поля даже через сотни лет после взрыва оказывается по порядку величины такой же, как и вся энергия, испускаемая в процессе вспышки в оптическом диапазоне. За счет освободившейся при взрыве энергии не только создается излучение и магнитное поле, но, как и в случае новых звезд, сообщается большая скорость образовавшейся оболочке. Сейчас мы и обратимся к оценке механической энергии взрыва.

Оболочка сверхновой звезды расширяется в межзвездном газе. Встречающиеся с оболочкой частицы межзвездной среды ею захватываются и поэтому масса оболочки при ее расширении растет. Так как скорости движения межзвездной среды весьма малы по сравнению со скоростью оболочки, то можно считать, что добавление газа не изменяет ее первоначального количества движения. Поскольку на оболочку внешние силы не действуют, количество движения ее должно быть постоянным, а значит, скорость будет уменьшаться при увеличении массы.

Пусть m_0 — масса оболочки и v_0 — ее скорость в начале расширения. Когда оболочка удаляется на расстояние r от звезды, она захватывает при этом весь газ, находящийся в сфере, объемом $\frac{4}{3}\pi r^3$. Следовательно, масса оболочки к этому времени увеличивается на величину $\frac{4}{3}\pi r^3\rho$, где ρ — плотность межзвездного газа. Скорость оболочки v на расстоянии r от звезды определится из

следующего равенства, выражающего закон сохранения количества ее движения:

$$\left(m_0 + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho\right) v = m_0 v_0. \qquad (28)$$

Очевидно, что скорость v будет заметно меньшей, чем v_0, лишь после того, как количество захваченного оболочкой газа станет того же порядка, что и первоначальная масса оболочки. Применим формулу (28) к оболочке звезды, вспыхнувшей около 300 лет назад в созвездии Кассиопеи. Эта оболочка расширяется в настоящее время со скоростью, близкой к 7000 *км/сек*, т. е., по-видимому, сколько-нибудь заметно не замедлилась. Вместе с тем, масса захваченного ею газа велика. При радиусе оболочки $r \approx 7 \cdot 10^{18}$ *см* и средней плотности межзвездной среды $\rho \approx 10^{-24}$ *г* она порядка массы Солнца. Таким образом, первоначальная масса оболочки должна была в несколько раз превосходить массу Солнца.

Реальность таких больших масс оболочек подтверждается примером туманности в Лебеде (так называемая «Петля»). Современная скорость ее расширения около 100 *км/сек*, а радиус — порядка 10^{20} *см*. Масса туманности, определенная по ее объему и плотности (которая, как мы знаем, находится по линейчатому спектру), равна нескольким сотням масс Солнца. Это соответствует массе межзвездного газа, заключенного в сфере указанного радиуса. Так как скорость v_0 оболочки после взрыва составляла, как и у других сверхновых II типа, около 6000 *км/сек*, то для массы ее m_0, согласно формуле (28), получаем значение в несколько масс Солнца. Взрыв произошел, по-видимому, около 50 000 лет назад.

Как рассмотренные примеры, так и ряд других показывает, что сверхновые звезды II типа, со вспышками которых связано возникновение этих туманностей, способны сбрасывать оболочки с массой порядка 10 $M_\odot$. Следовательно, и сами эти звезды должны быть очень массивными. Кинетическая энергия такой оболочки порядка 10^{52} *эрг*, что в тысячи раз превышает оптическое излучение звезды за время вспышки. О том, насколько огромна эта величина, можно судить хотя бы по такому факту: Солнцу, при теперешней мощности его излучения, для того чтобы испустить соответствующее количество энергии, потребовались бы десятки миллиардов лет.

Кинетическая энергия туманности, образованной при вспышке сверхновой I типа, гораздо меньше приведенного значения, так как масса туманности на порядок меньше, чем у оболочки сверхновой II типа, а скорость ее всего около 1000 *км/сек*. Эта энергия порядка 10^{49} *эрг*, что близко к значению, полученному при оценке общего излучения звезды за время вспышки.

Каковы же источники огромной энергии, освобождающейся при вспышке сверхновой? Очевидно, что ни тепловая, ни лучистая энергия звезды, даже если бы они могли мгновенно превратиться в механическую энергию, не в состоянии обеспечить наблюдаемые скорости движения оболочек большой массы. Общая энергия звезды $M_* c^2$ для звезд с массой покоя $M_* = 10 - 30\, M_\odot$ достигает значений 10^{55}—10^{56} *эрг*. При ядерных реакциях синтеза тяжелых элементов (до железа) из водорода может освобождаться, как мы увидим несколько позже, энергия, эквивалентная приблизительно 1% массы покоя. Поэтому превращение всего 10% водорода, содержащегося в звезде с массой 30 $M_\odot$, в тяжелые элементы, может, вообще говоря, обеспечить наблюдаемое при вспышке сверхновой количество энергии. Однако, как мы знаем, ядерные реакции в обычных условиях протекают очень медленно и мгновенное превращение водорода в железо невозможно.

Другой возможный путь освобождения энергии, содержащейся в звезде, состоит в уменьшении ее радиуса. При изменении радиуса от значения R_* до R_*' потенциальная энергия звезды уменьшается от величины порядка $-G\frac{M_*^2}{R_*}$ до $-G\frac{M_*^2}{R_*'}$. Согласно теореме вириала (см. § 4) половина освободившейся энергии, т. е. (опять по порядку величины) $\frac{1}{2}\left(G\frac{M_*^2}{R_*'} - G\frac{M_*^2}{R_*}\right)$, превращается в тепловую энергию. Если радиус звезды уменьшится достаточно быстро, то освобождение этой энергии должно носить характер взрыва. При попытках объяснить явление вспышки сверхновой часто предполагают поэтому, что она вызывается быстрым сжатием звезды.

В соответствии с одной из гипотез о природе вспышек сверхновых II типа, получившей довольно широкое рас-

пространение, сжатие происходит вследствие постепенного исчерпания источников энергии, обеспечивающих излучение звезды. В § 4 подробно рассказывалось о том, что излучение Солнца поддерживается за счет превращения водорода в гелий при реакциях протон-протонного цикла. В центральных областях Солнца, где плотность порядка 100 $г/см^3$ и температура около 15 миллионов градусов, эти реакции протекают сравнительно медленно — превращение заметной доли водорода в гелий занимает более десяти миллиардов лет.

Скорость термоядерных реакций очень быстро увеличивается с возрастанием температуры плазмы. В центральных частях массивной звезды, у которой, например, масса $M_* = 10M_\odot$, температура значительно выше, чем в центре Солнца — около 20 миллионов градусов. Поэтому водород там превращается в гелий («сгорает») гораздо быстрее, причем не только в ходе протон-протонного цикла, но и при реакциях так называемого углеродного цикла.

Когда водород в центральных областях массивной звезды в основном выгорит, то при существующих там в это время температурах, близких к 20 миллионам градусов, другие ядерные реакции между тяжелыми ядрами не происходят. Дело в том, что силы отталкивания, действующие между тяжелыми ядрами, больше, чем между протонами, потому что заряды ядер больше. Следовательно, для преодоления потенциального барьера требуется бóльшая энергия частиц, т. е. для протекания реакции нужна более высокая температура.

Поскольку после выгорания основной доли водорода в звезде не оказывается достаточно мощного источника энергии, то вследствие излучения она охлаждается и давление газа в ней падает. Равновесие в звезде при этом нарушается и тяготение наружных слоев звезды к центру, не компенсируемое газовым давлением, приводит к сжатию звезды.

В результате такого сжатия и сопровождающего его преобразования потенциальной энергии в тепловую, температура и плотность в ядре звезды, которое в это время состоит главным образом из гелия, увеличиваются. При возрастании температуры приблизительно до 100 миллионов градусов, а плотности — до 10^5 $г/см^3$, начинается превращение ядер He^4 (α-частиц) в ядра более тяжелых элементов. Сначала из двух α-частиц образуется ядро

атома бериллия:

$$He^4 + He^4 \rightleftarrows Be^{8*}), \qquad (IV)$$

которое после присоединения к нему еще одной α-частицы, превращается в ядро атома углерода:

$$Be^8 + He^4 \rightarrow C^{12}. \qquad (V)$$

Аналогично, путем последовательного присоединения α-частиц, возникают и ядра атомов кислорода, неона и магния:

$$C^{12} + He^4 \rightarrow O^{16}, \qquad (VI)$$

$$O^{16} + He^4 \rightarrow Ne^{20}, \qquad (VII)$$

$$Ne^{20} + He^4 \rightarrow Mg^{24}. \qquad (VIII)$$

Все реакции (IV—VIII) являются экзотермическими, т. е. сопровождаются выделением энергии.

Расчет показывает, что к тому времени, когда образуется Mg^{24}, гелий в ядре звезды исчерпывается. Так как «ядерного топлива» не хватает, в недрах звезды давление уменьшается и ядро снова сжимается. Сжатие приводит к сильному увеличению температуры. При температурах порядка трех миллиардов (!) градусов уже вступают в реакцию друг с другом образовавшиеся ранее ядра атомов и возникают еще более тяжелые ядра, преимущественно железа Fe^{56}. Ядра атомов с бóльшим атомным весом также образуются, но они неустойчивы и быстро распадаются. Поэтому сердцевину звезды можно считать состоящей из железа.

Масса ядра атома железа равна 55,86 (в шкале атомных весов), тогда как общая масса пятидесяти шести протонов, затраченных на образование этого ядра, составляет 56,46. Следовательно, при всех реакциях, начиная с образования дейтерия, должна выделиться энергия (включая энергию, уносимую нейтрино), соответствующая $\frac{56,46 - 55,86}{56,46} = 0,01$ общей массы покоя имевшегося вначале водорода. Это максимально возможное количество энергии, освобождающееся путем ядерных реакций.

После окончания экзотермических ядерных реакций центральные области звезды снова сжимаются. Когда

*) Это ядро неустойчиво и очень быстро распадается на две α-частицы. Однако некоторая очень малая часть ядер за короткое время своего существования успевает соединиться с α-частицами (реакция V).

температура там вследствие сжатия достигнет 8 миллиардов градусов, происходит ядерная реакция особого вида, связанная с поглощением тепла (эндотермическая). Эта реакция заключается в распаде ядер Fe^{56} на α-частицы и нейтроны. Она происходит очень быстро, ядро звезды резко охлаждается. Так как давление в звезде падает, она неудержимо спадает к центру. Спадание звезды вызывает резкий подъем температуры к ней. Поэтому в прилегающей к ядру звезды области, там, где «ядерное топливо» не выгорело, начинаются бурные термоядерные реакции, т. е. происходит взрыв. Сбрасывается оболочка звезды и в итоге наблюдается сверхновая II типа. Таким образом, хотя сжатие звезды согласно рассмотренной точке зрения и играет очень важную роль в подготовке условий для вспышки, сама вспышка представляет собой термоядерный взрыв.

Расчеты по этой схеме взрыва производились для значения массы звезды $30\,M_\odot$ и массы оболочки, равной $10\,M_\odot$. Если учесть, что термоядерными реакциями при взрыве охватывается значительная область звезды, то выделение в них энергии, соответствующей 1% массы покоя, дает по порядку величины наблюдаемую энергию вспышки сверхновой II типа.

Мы подробно остановились только на одной из гипотез о природе вспышек сверхновых II типа. Проверка ее и других гипотез затруднительна, поэтому сейчас, по-видимому, преждевременно говорить о том, что нам известен механизм вспышек этих звезд. Что же касается сверхновых I типа, у которых масса до вспышки порядка массы Солнца, то для них тоже разрабатывалась теория, основанная на предположении о термоядерном взрыве с участием тяжелых ядер, но эта теория еще менее надежна.

Результаты исследования вспышек сверхновых звезд помогли добиться успехов в проблеме происхождения космических лучей, являющейся одной из самых увлекательных областей современной физики. Хотя единого мнения относительно механизма ускорения частиц до скоростей, близких к скорости света, нет, оказалось возможным установить важную роль вспышек сверхновых звезд, как источника космических лучей.

Электронами большой энергии не ограничивается, по всей вероятности, множество релятивистских частиц, возникающих в результате вспышки сверхновой звезды. Мы не в состоянии пока заметить в космических источниках

релятивистские протоны и более тяжелые ядра атомов, потому что они излучают очень мало энергии в слабых магнитных полях, которые существуют в туманностях. Однако есть основания предполагать, что энергия всех релятивистских частиц в оболочках сверхновых звезд в десятки раз превосходит энергию электронов. Общую энергию космических лучей в туманности обычно считают по порядку величины равной магнитной энергии. Если бы энергия поля была существенно меньше, чем энергия космических лучей, то эти частицы, двигаясь прямолинейно, ускользали бы из туманности. Ведь они удерживаются там лишь потому, что магнитное поле искривляет их путь.

Общая энергия релятивистских частиц, находящихся сейчас в Крабовидной туманности, оценивается в $5 \cdot 10^{48}$ *эрг*, а в некоторых других туманностях — остатках оболочек сверхновых, она на порядок больше. Эта энергия постепенно растрачивается на излучение. Кроме того, туманность расширяется, объем ее увеличивается и соответственно уменьшается плотность энергии магнитного поля, а значит, и напряженность поля. Действие этих двух факторов должно приводить к постепенному уменьшению потока излучения от релятивистских частиц.

Особенно быстро теряют свою энергию электроны, создающие рентгеновское и оптическое излучение туманности. В Крабовидной туманности они существуют и теперь, а это означает, что образование релятивистских электронов продолжается и долгое время после взрыва. За 900 лет, прошедших после взрыва, возникшие в момент взрыва «оптические» и, тем более, «рентгеновские» электроны должны были потерять энергию и не могли бы излучать в этих диапазонах. Сейчас мы не можем сказать, где возникают после взрыва релятивистские электроны — в звезде или в туманности, так как механизм их образования неизвестен.

Сравним количество космических лучей в межзвездном пространстве с тем, что дают вспышки сверхновых звезд в Галактике. По количеству релятивистских частиц, влетающих в атмосферу Земли (эти наблюдения проводились при помощи космических ракет), нашли, что их энергия, приходящаяся на 1 $см^3$ пространства, порядка 10^{-12} *эрг*. В пространстве частицы теряют свою энергию за 10^{16} *сек*, сталкиваясь с атомами межзвездной среды. Всего в Галактике при ее объеме 10^{68}—10^{69} $см^3$ содержится 10^{56}—

10^{57} *эрг* энергии в форме космических лучей. За одну секунду теряется, следовательно, 10^{40}—10^{41} *эрг*.

Если принять, что одна сверхновая вспыхивает раз в 300 лет и при этом образуются космические лучи с общей энергией порядка 10^{50} *эрг*, то за одну секунду к общей энергии лучей в Галактике в среднем добавляется 10^{40} *эрг*, т. е. величина, близкая к потере энергии при столкновениях. Следовательно, сверхновые звезды способны непрерывно пополнять значительную часть убыли энергии космических лучей. Являются ли они основным источником космических лучей — сказать трудно, так как мы еще мало знаем об уходе этих лучей из Галактики в межгалактическое пространство. Но, во всяком случае, многие из тех частиц, которые влетают в земную атмосферу и расщепляют в ней ядра атомов, когда-то вышли из недр сверхновой звезды и странствовали среди межзвездных магнитных полей до тех пор, пока не встретились с Землей.

§ 8. ВЗРЫВЫ В ЯДРАХ ГАЛАКТИК

Прослеживая различные звездные взрывы в порядке увеличения их силы, мы закончили вспышками сверхновых звезд. Долгое время считали, что эти вспышки являются самыми грандиозными из космических катастроф. Но за последние несколько лет обнаружены следы несравненно более мощных космических взрывов, освобождающих, как мы увидим, энергию, эквивалентную миллионам солнечных масс. Понятно, что такие взрывы не могут случаться в отдельных звездах. Они происходят в центральных областях (ядрах) галактик — звездных систем, массы которых измеряются миллиардами масс Солнца. В этом параграфе мы расскажем о взрывах в ядрах галактик, но предварительно познакомимся несколько подробнее, чем мы делали до сих пор, с миром галактик.

Многие из галактик похожи на нашу Галактику наличием спиральных ветвей. Они называются спиральными. Наблюдаются также звездные системы сравнительно правильной эллиптической формы и без заметных спиральных ветвей. Эти галактики получили название эллиптических. Существуют звездные системы, не обладающие какой-либо специфической формой и представляющиеся просто туманными объектами. Они называются неправильными галактиками. Таковы две ближайшие к Галактике системы —

Малое и Большое Магеллановы Облака. Указанные классы или типы галактик — основные. Различают и промежуточные подклассы.

В галактиках, расположенных достаточно близко к нам, можно различить отдельные яркие звезды, а также шаровые скопления и яркие газовые туманности. Для подобных объектов, входящих в Галактику, известна зависимость между их видимым блеском (звездной величиной) и расстоянием до Солнца. Следовательно, по наблюдаемой звездной величине того или иного объекта в другой галактике можно найти и расстояние до нее. Таким путем было установлено, что каждому подклассу галактик соответствует определенное среднее значение интегрального блеска *) галактики, принадлежащей к этому подклассу.

Вместе с тем, видимый блеск галактики зависит и от ее расстояния до нас: он изменяется, как известно, обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому, зная к какому типу относится галактика, по ее блеску можно сравнительно надежно получить расстояние до этой галактики, даже если в ней не удается различить отдельных звезд. Тип же галактики определяется ее внешним видом.

После того как в двадцатых годах текущего столетия при помощи $2^1/_2$-метрового телескопа были получены спектры слабых и, следовательно, очень далеких галактик, обнаружилась замечательная закономерность. Линии в спектрах удаленных галактик оказываются смещенными в сторону длинных волн (к красному концу), причем это смещение пропорционально расстоянию галактики от нас. Этот закон выражается формулой

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{H}{c} r, \tag{29}$$

где $\Delta\lambda$ — величина смещения линии, λ — несмещенная длина волны, r — расстояние до галактики и H — так называемая постоянная Хаббла. Для величины H из современных наблюдений получено значение, близкое к 30 *км/сек* на 1 миллион световых лет. Это означает, что, например, в спектре галактики, удаленной от нас на 300 миллионов световых лет, линия с длиной волны λ смещена на величину $\Delta\lambda = \frac{3\cdot 10^6}{3\cdot 10^5}\cdot 3\cdot 10^2\ \lambda = 3\cdot 10^{-2}\lambda$.

*) Интегральным блеском галактики называют наблюдаемый суммарный блеск всех входящих в нее звезд и туманностей.

«Красное смещение» линий в спектрах далеких галактик обусловлено эффектом Доплера и является результатом своеобразного движения галактик. Характер этого движения таков, что все галактики кажутся движущимися от нас. Но это ни в коей мере не означает преимущественного положения Галактики в Метагалактике. Просто все

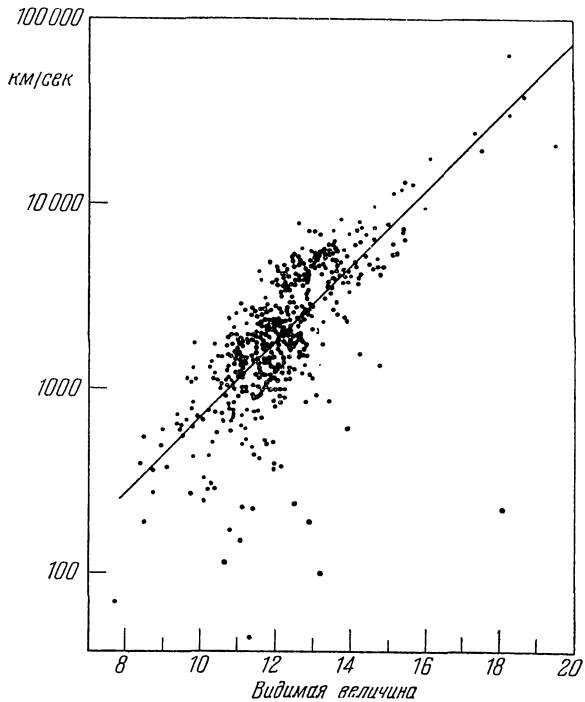

Рис. 39. Связь между видимой звездной величиной галактики и смещением линий в ее спектре. (Чем больше видимая звездная величина галактики, тем дальше от нас она находится.)

галактики взаимно удаляются друг от друга и наблюдатель, находящийся в какой-либо далекой звездной системе, должен видеть, как все другие галактики, в том числе и наша Галактика, удаляются от него *). Природа этого

*) Иллюстрацией такого положения будет, например, движение точек поверхности раздувающегося резинового шарика. Ни одна из них не имеет преимущественного положения, но все точки удаляются от любой данной точки.

«разбегания галактик» окончательно не выяснена, а обсуждением различных теорий этого явления мы здесь заниматься не можем. Мы говорим о «красном смещении» только как об эффекте, на основе которого находят расстояния до самых удаленных объектов в Метагалактике.

По своим размерам в среднем наибольшими из галактик являются спиральные. Они же содержат и больше звезд, чем галактики других типов. Среди спиральных галактик выделяются самые крупные, такие, как наша Галактика, называемые гигантскими. Самые маленькие из галактик, карликовые, насчитывают всего десятки миллионов звезд. Они, как правило, принадлежат к типу эллиптических.

Массы галактик находят тем же путем, что и массу нашей Галактики — по скорости вращения (см. § 3). Для Галактики было получено значение около $2 \cdot 10^{11}\ M_{\odot}$. Оно характерно для гигантских галактик. В большинстве же случаев массы галактик составляют 10^{9}—$10^{10}\ M_{\odot}$.

Очень яркая центральная область галактики, имеющая поперечник порядка нескольких десятков световых лет, называется ядром галактики. Ядра на снимках различаются только у самых близких к нам галактик, например, у туманности Андромеды (ее обозначают М 31, так как под этим номером она содержится в каталоге, составленном астрономом Мессье). Но даже у этих галактик структуру ядра установить пока не удалось. Ранее предполагалось, что ядра спиральных галактик представляют собой просто сгущения звезд, но результаты наблюдений, о которых мы скажем ниже, указывают на более сложное их строение.

При изучении структуры ядер галактик, казалось бы, наиболее естественно прежде всего обратиться к ядру нашей Галактики. Но оно настолько закрыто поглощающими свет газово-пылевыми облаками, что даже прилегающие к ядру области мы не можем видеть. Окрестности ядра Галактики исследованы при помощи радиоастрономических методов. Некоторые результаты этого исследования будут также изложены далее.

Большинство звезд спиральной галактики содержится в центральной области (диске). В спиральных же рукавах сосредотачиваются гигантские горячие звезды классов О и В и, соответственно, там же расположены светящиеся под действием этих звезд области межзвездного газа. В областях, более близких к центру, относительно много

холодных гигантов. Пространство между ветвями не пусто, но звезд и газа в нем гораздо меньше, чем в ветвях.

Об излучении галактик в оптическом диапазоне здесь много говорить не приходится, так как оно обусловлено тепловым свечением звезд и межзвездной среды, о котором подробно рассказывалось выше. Но, помимо оптического диапазона, галактики испускают энергию и в радиочастотах. В частности, наша Галактика также является источником радиоизлучения. При этом лишь ее излучение на сантиметровых и дециметровых волнах исходит главным образом от нагретого газа, а более длинноволновое — преимущественно синхротронное. Оно испускается релятивистскими электронами при их движении в межзвездных магнитных полях.

Для наблюдателя, находящегося вне Галактики, она представилась бы относительно слабым источником радиоизлучения: в радиодиапазоне она излучает в сотни тысяч раз слабее, чем в оптическом. Однако существуют звездные системы, поток радиоизлучения от которых в тысячи и десятки тысяч раз интенсивнее, чем от нашей Галактики и подобных ей звездных систем — нормальных галактик. Такие сильно излучающие в радиодиапазоне объекты называют радиогалактиками.

В ряде случаев радиогалактики удалось отождествить с системами, наблюдаемыми и оптическими средствами. Но бывает, что источник радиоизлучения не заметен в видимом свете. Тогда можно говорить просто о дискретном источнике радиоизлучения. Часто в тех случаях, когда виден оптический объект, соответствующий радиогалактике, его угловые размеры оказываются гораздо меньшими, чем размер радиоисточника. Это означает, что основная масса галактики, из которой выходит и оптическое, и радиоизлучение, окружена очень протяженной областью, не дающей оптического излучения. Подобные области существуют и у некоторых нормальных галактик, но их радиоизлучение оказывается слабым.

Если принять, что излучение радиогалактик является тепловым, то при наблюдаемой радиояркости их для температуры излучающего газа получится величина в миллиарды градусов. При столь высоких температурах оптическое излучение должно в огромное число раз превосходить радиоизлучение. Но мощность излучения радиогалактики в радиодиапазоне сравнима с мощностью ее

оптического излучения. Следовательно, излучение радиогалактик в основном нетепловое. Имеется много данных, указывающих на то, что оно, как и длинноволновое радиоизлучение Галактики, обусловлено синхротронным механизмом. Одним из важнейших доводов в поддержку этой точки зрения является наблюдаемая в ряде случаев поляризация излучения радиогалактик не только в радиочастотах, но и в оптической области.

Информация, полученная из наблюдений радиогалактик, оказалась чрезвычайно важной для изучения взрывов в ядрах галактик. В первую очередь скажем о радиогалактике в созвездии Лебедя, называемой «Лебедь А».

Рис. 40. Схематическая структура источника радиоизлучения Лебедь А. В центре изображен оптически наблюдаемый объект — галактика с двойным ядром. Заштрихованы области радиоизлучения.

В 1954 г. было получено оптическое изображение этого, одного из самых мощных, внегалактического источника радиоизлучения. По величине «красного смещения» линий в спектре при помощи соотношения (29) нашли, что расстояние источника Лебедь А от нас порядка 500 миллионов световых лет. По наблюдаемому потоку излучения от этой радиогалактики при известном расстоянии до нее сделана оценка общего количества излучаемой в радиодиапазоне энергии. Она дала величину порядка 10^{45} *эрг/сек*, что гораздо больше, чем все излучение Галактики в оптическом и радиодиапазонах. Видимое изображение радиогалактики Лебедь А сравнительно слабое и энергия излучения в этой области спектра даже меньше приведенной величины.

Наиболее любопытной особенностью радиогалактики Лебедь А, сразу же привлекшей к себе внимание, является ее двойственность. Между двумя протяженными источниками радиоизлучения, центры которых удалены друг от друга приблизительно на 500 тысяч световых лет, находится оптически яркая область в десять раз меньшего

размера. Эта область в свою очередь состоит из двух частей. Таким образом, радиоисточник Лебедь А можно представить как галактику с двойным ядром. В противоположные стороны от ядра движутся два гигантских сгустка плазмы со скоростью тысячи километров в секунду.

В галактике Лебедь А содержатся огромные газовые облака, движущиеся хаотически с большими скоростями. Такой вывод был сделан на основе наблюдений оптического спектра этой галактики, в котором присутствует множество эмиссионных линий, характерных для газовых туманностей. По ширине линий и нашли, что они возникают в газе, охваченном беспорядочными движениями, скорости которых доходят до 500 *км/сек*.

В первое время после открытия двойственности источника Лебедь А эту особенность пытались объяснить предположением, что мы наблюдаем две сталкивающиеся гигантские галактики. Эта точка зрения теперь оставлена по ряду причин, в частности потому, что придерживаясь ее, трудно понять, как возникает огромное количество излучаемой энергии. При столкновении галактик лишь очень малая часть общего запаса кинетической энергии может переходить в радиоизлучение. Кроме того, столкновения гигантских галактик такого вида, какой предполагался в случае Лебедь А (сталкиваются ядра, имеющие очень малые размеры), исключительно маловероятны. Если бы они происходили, то тогда гораздо более многочисленными должны были бы быть нецентральные столкновения карликовых галактик, которые, однако, не наблюдаются.

Существует и совершенно иной взгляд на природу как источника Лебедь А, так и других радиогалактик. Предполагается, что в ядре Галактики Лебедь А некоторое время назад произошел взрыв, при котором оно разделилось на две части. Одновременно в противоположных направлениях были выброшены две массы, которые и наблюдаются сейчас как центры радиоизлучения.

Возраст радиогалактики Лебедь А, т. е. время, прошедшее после взрыва в ее ядре, оценивается различными путями. Оно не менее 10^3 лет, а вероятнее всего, гораздо больше — 10^6—10^7 лет. Мощность излучения этой радиогалактики сейчас порядка 10^{45} *эрг/сек* или более, и нет оснований предполагать, что оно после взрыва было меньше. Поэтому энергия, освободившаяся в результате взрыва и следовавших за ним процессов, составила по меньшей

мере 10^{56}—10^{58} *эрг*. Поскольку мы наблюдаем только излучение в отдельных областях спектра, и, кроме того, ранее излучение могло быть более сильным, то можно предположить, что энергия взрыва доходила до 10^{59}—10^{60} *эрг*.

Структура некоторых других мощных внегалактических источников радиоизлучения, например, Центавр А, Печь А, очень похожа на ту, которая наблюдается у источника Лебедь А. Это двойные радиогалактики, у которых центры

Рис. 41. Галактика М 87 (источник радиоизлучения Дева А). Справа заметен выброс из ядра этой галактики.

радиоизлучения расположены симметрично относительно оптически наблюдаемой галактики, на значительном расстоянии от нее. Во всех этих случаях взрыв в ядре приводил к выбросу вещества в двух противоположных направлениях с приблизительно одинаковой мощностью.

С явлениями, которые вызываются взрывными процессами, охватывающими значительную по объему часть звездной системы, мы встречаемся и в таких галактиках, где двойственности не замечается. Очень интересной в этом отношении оказалась гигантская эллиптическая галактика М 87, удаленная от нас на 50 миллионов световых лет. Эта система, наблюдающаяся на небе в созвездии Девы, и по положению, и по форме совпадает с сильным источником радиоизлучения Дева А.

На фотографии туманности М 87 (рис. 41) хорошо видно светящееся образование — струя, или выброс, исходящий из центральной части галактики. Эта струя содержит несколько сгустков, оптическое излучение которых оказалось сильно поляризованным. Длина струи составляет несколько тысяч световых лет. Цвет ее излучения голубой, а спектр этого излучения не содержит линий. Расстояние основных сгустков в струе от центра галактики не менее нескольких десятков тысяч световых лет.

Связь струи с ядром галактики М 87 достаточно отчетлива и не оставляет сомнения в том, что струя возникла в результате взрывного процесса в ядре. Выбрасывание газа из ядра галактики М 87 продолжается, как показывает характер ее спектра, и в настоящее время. В спектре близкой к ядру галактики области присутствуют эмиссионные линии, смещенные в сторону коротких волн. По-видимому, это смещение вызвано движением светящихся газовых масс. Для скорости движения получается величина порядка тысячи километров в секунду.

Радиоизлучение исходит как из ядра галактики, так и из окружающей его протяженной области размером порядка ста тысяч световых лет. Кроме того, сильное радиоизлучение, особенно заметное на коротких (дециметровых) волнах, присуще и струе. По сильной поляризации оптического и радиоизлучения струи заключают, что оно обусловлено синхротронным механизмом. Как и в Крабовидной туманности, оптическое излучение является продолжением радиоспектра в сторону коротких волн.

Оценка напряженности магнитного поля в струе приводит к значениям порядка 10^{-4} эрстед. В таких полях электроны большой энергии, создающие оптическое излучение струи, должны потерять большую часть своей энергии («высветиться») приблизительно за тысячу лет. Но струя существует по меньшей мере десятки тысяч лет, если принять, что скорость выбрасывания была близкой к скорости света. Наиболее же вероятно, что взрыв в ядре произошел миллионы лет назад. Следовательно, релятивистские электроны, дающие оптическое излучение струи, не были выброшены из ядра, а получили свою большую энергию уже в ней. Как мы видим, при взрыве в ядре галактики М 87 из него было выброшено некоторое образование, до сих пор являющееся источником релятивистских частиц.

Мощность излучения струи порядка 10^{43} *эрг/сек*. За миллионы лет, прошедшие после взрыва, она должна была испустить всего 10^{56}—10^{57} *эрг* энергии в виде излучения. Здесь мы опять имеем то же значение для минимального количества энергии, освобождаемой в результате взрыва в ядре галактики, какое получено выше для энергии взрыва в источнике Лебедь А и других. Количество энергии, освобождаемой при таких взрывах, в десятки миллионов раз больше, чем энергия вспышки сверхновой.

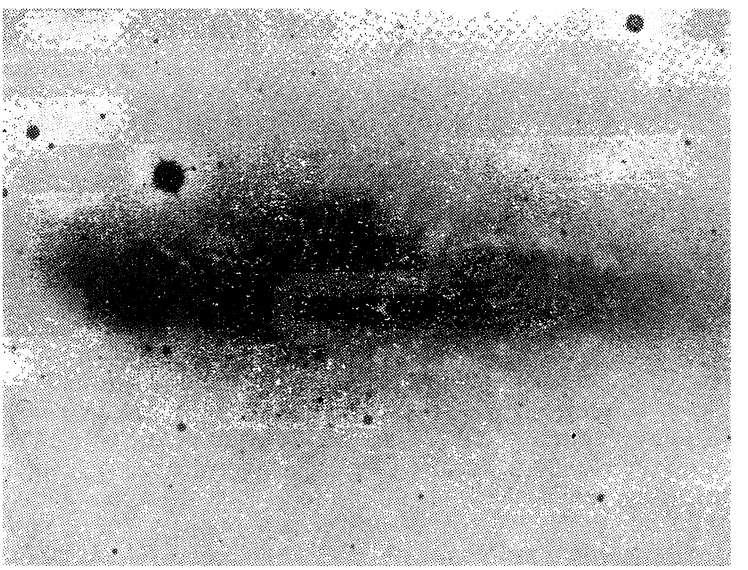

Рис. 42. Галактика М 82. (Фотография в непрерывном спектре.)

Наблюдения близкой к нам неправильной галактики М 82 дали очень интересную картину движений газа, вызванных сравнительно недавним взрывом в ее ядре. В этой галактике, несмотря на ее неправильную форму, можно выделить два преимущественных направления — одно по наибольшей вытянутости и другое ему перпендикулярное (рис. 42). Будем называть их большой и малой осями. Вдоль малой оси М 82 видна система волокон. Они излучают главным образом в частотах спектральных линий,

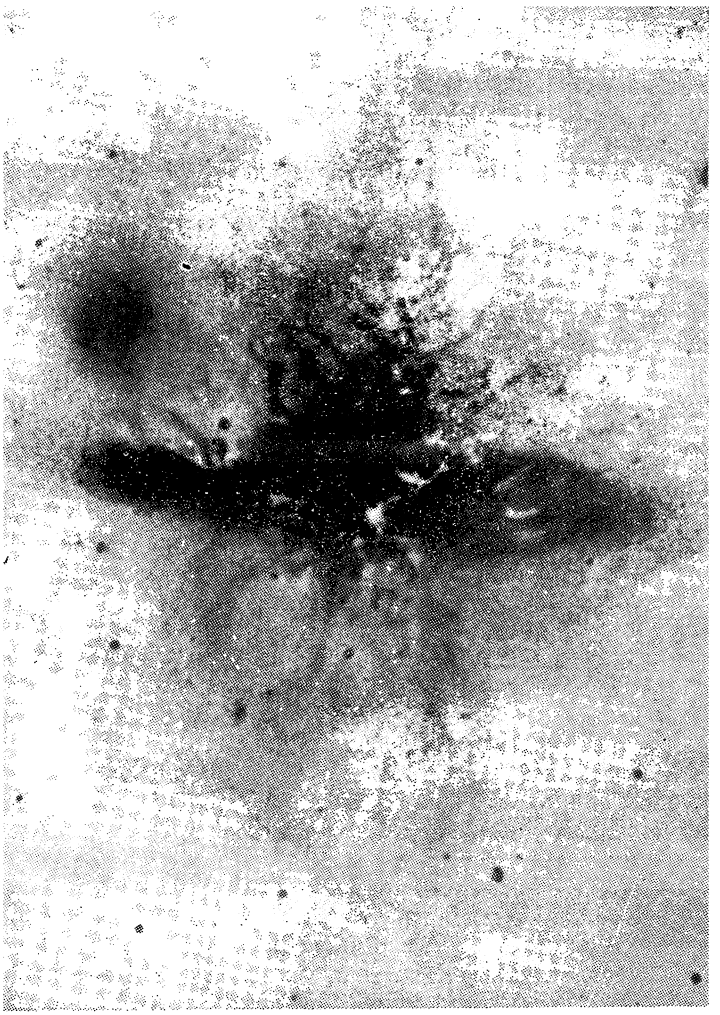

Рис. 43. Галактика М 82. (Фотография в лучах линии Hα.) Хорошо заметна волокнистая структура в центральной части.

а не в сплошном спектре, причем особенно много энергии выходит в длине волны водородной линии H_α. Фотография туманности, снятая с оптическим фильтром, пропускающим лишь излучение в линии H_α и в небольшом соседнем участке шкалы длин волн, хорошо демонстрирует систему волокон. Сравнивая рис. 42 и 43, мы видим также различие между областями, преимущественно излучающими в линейчатом спектре, и областями непрерывного излучения. Волокна распространяются на 10—12 тысяч световых лет от центра галактики.

По смещению линий в спектрах волокон удалось установить, что составляющее их вещество движется от центра галактики со скоростью около 1000 *км/сек*. Для того чтобы пройти с такой скоростью расстояние в 10 тысяч световых лет, требуется три миллиона лет. Следовательно, взрыв в ядре галактики, который вызвал такое движение газа, произошел несколько миллионов лет назад.

По своей волокнистой структуре центральные области М 82 напоминают Крабовидную туманность. Это сходство усиливается также и тем, что излучение волокон М 82 сильно поляризовано. Наконец, как и в случае Крабовидной туманности, область М 82, занятая волокнами, является источником радиоизлучения (правда, не очень мощным).

В свете этих фактов естественным представляется вывод о синхротронной природе излучения волокон М 82 в частотах непрерывного спектра. Своеобразная форма волокон, образующих дуги (см. рис. 43), обусловлена, по-видимому, действием магнитных полей на плазму — она движется вдоль силовых линий поля. После того как по наблюдениям поляризации определили направление силовых линий магнитного поля, оказалось, что направление силовых линий в общем совпадает с направлением волокон.

Свечение волокон галактики М 82 в спектральных линиях можно объяснить так же, как и в случае Крабовидной туманности. Там имеются, по-видимому, релятивистские электроны настолько большой энергии, что они излучают фотоны, соответствующие ультрафиолетовой области спектра. Эти фотоны способны возбуждать атомы газа и создавать, тем самым, его излучение в частотах спектральных линий. Обнаружение рентгеновского излучения галактики М 82 позволяет предположить существование в ней электронов еще большей энергии.

Хотя по структуре, созданной взрывом в ядре, центральные области галактики М 82 внешне сходны с туманностями, возникшими при вспышках сверхновых, эти явления совершенно различны по своему масштабу. Энергия E_0 излучения галактики в частоте линии, доходящая до земного наблюдателя, составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-11}$ *эрг/см²·сек*. Так как расстояние r до этой галактики около 25 миллионов световых лет, всего ею излучается за одну секунду в линии H_α энергия $4\pi r^2 E_0 \approx 10^{41}$ *эрг/сек*. Подчеркнем, что излучение М 82 настолько интенсивно спустя миллионы лет после взрыва, тогда как Крабовидная туманность через 900 лет после своего образования излучает в той же линии около 10^{34} *эрг/сек*.

Найдем кинетическую энергию газа, движущегося от ядра М 82. Масса этого газа вычисляется по величине занимаемого им объема и плотности. Объем, определенный путем измерения фотоснимков галактики, оказался порядка 10^{63} *см³*. Концентрация атомов водорода в излучающем газе оценивалась по наблюдаемому потоку излучения в линии H_α и составляет около 10 атомов в 1 *см³*. Следовательно, общее число атомов в указанном объеме приблизительно 10^{64}, а вся масса газа, если он состоит преимущественно из водорода, около $2 \cdot 10^{40}$ *г*. Выше мы указывали, что скорость движения волокон близка к 10^8 *см/сек* и, значит, кинетическая энергия их порядка 10^{56} *эрг*.

Общее количество энергии, освободившейся при взрыве в ядре галактики М 82, помимо только что вычисленной кинетической энергии, должно включать также энергию космических лучей и магнитного поля, которая в настоящее время оценивается в 10^{55}—10^{56} *эрг*. Кроме того, излучение галактики за время, прошедшее после взрыва, должно составлять не менее 10^{55} *эрг*, а возможно, и 10^{56} *эрг*. Таким образом, для энергии взрыва в ядре галактики М 82 получается величина порядка 10^{56}—10^{57} *эрг*, что практически совпадает с энергией взрывов в ядрах других галактик.

Взрыв в ядре галактики вызывает, как мы видим, бурные движения газа вблизи ядра. В связи с изучением таких взрывов большой интерес представляют «сейфертовские» галактики (названные по имени исследовавшего их ученого), у которых ядра оказываются областями необычной активности. Характерной особенностью такого ядра является его очень большая яркость по сравнению с остальной частью галактики. Кроме того, в спектрах

ядер сейфертовских галактик содержатся эмиссионные линии, принадлежащие главным образом ионизованным атомам различных элементов. Линии очень широки и сложной структуры. Они состоят из отдельных «пичков». Исходя из такой структуры, принимают, что линии образованы в гигантских комплексах хаотически движущихся газовых облаков. Так как направления движения излучающих масс газа неодинаковы, то различны и их скорости вдоль луча зрения. Поэтому-то из ряда эмиссионных линий, по-разному смещенных эффектом Доплера, должна получиться широкая эмиссионная линия с «пичками». По измерениям ширины линий нашли, что скорости движения газовых масс составляют от 500 до 3000 *км/сек*.

Одной из наиболее известных сейфертовских галактик (всего их обнаружено около десяти) является спиральная галактика NGC 1068 (NGC — обозначение каталога туманностей, 1068 — номер в этом каталоге). Расстояние до этой галактика около 40 миллионов световых лет. Ядро такой галактики нельзя различить на репродукции фотоснимка — оно видно лишь на оригинальном негативе, как яркая звезда в ее центре; размер ядра порядка 100 световых лет или менее. В центре снимка видна яркая область — это светящиеся газы, окружающие ядро. Они также дают спектр, состоящий из эмиссионных линий. Но в то время как линии в спектре самого ядра, которые были описаны выше, широки, окружающий ядро газ дает гораздо более узкие линии. Следовательно, быстро движущиеся массы газа сосредоточены в самом ядре галактики.

Свойства газа в ядрах сейфертовских галактик — химический состав, плотность и температура — неоднократно определялись по линейчатому спектру его излучения. В результате, например, для NGC 1068 было установлено, что газ состоит в основном из водорода, концентрация которого в среднем порядка 10^3 атомов в 1 $см^3$, температура газа около 20 000°. Газовые комплексы (облака), по-видимому, распределены по ядру галактики крайне неравномерно и их общий объем равен 10^{60}—10^{61} $см^3$. Масса газа в ядре в среднем около миллиона $M_\odot$ (у других галактик этого вида может достигать даже 10^7 $M_\odot$), а кинетическая энергия его порядка 10^{55}—10^{56} *эрг*. Выше мы получили такое же значение для энергии взрыва в ядре галактики М 82. Возможно, что бурные движения в ядрах сейфер-

товских галактик также созданы каким-то взрывным процессом. Во всяком случае, другие объяснения подобной активности ядер, например, термоядерными реакциями, встречаются с серьезными трудностями.

Газовые облака при своем беспорядочном движении все время сталкиваются друг с другом. Вследствие огромных скоростей движения эти столкновения приводят к разогреву газа — некоторая часть кинетической энергии облаков переходит в тепло. Наблюдаемый линейчатый спектр ядра сейфертовской галактики и представляет собой спектр излучения разогретого газа. В частотах линий ядром излучается около 10^{42}—10^{43} *эрг/сек*. Если бы вся кинетическая энергия облаков переходила в излучение, то и в этом случае ее хватило бы на 10^{13} *сек*, т. е. на несколько сотен тысяч лет. Но практически далеко не вся кинетическая энергия может превратиться в наблюдаемое излучение, поэтому кинетическая энергия не в состоянии поддерживать свечение ядра даже в течение такого срока. С другой стороны, мы знаем, что взрыв в ядре любой из сейфертовских галактик не мог произойти ранее, чем несколько миллионов лет назад. Ведь газу, летящему из области взрыва со скоростью порядка 1000 *км/сек*, требуются миллионы лет, чтобы пройти расстояние, равное радиусу области свечения — 10^{21}—10^{22} *см*. Поэтому приходится считать, что либо существуют какие-то пути поддержания движения газа («подкачка» в него энергии), либо кинетическая энергия газа раньше была большей, чем сейчас. Но тогда энергия взрыва должна существенно превышать указанное значение 10^{55}—10^{56} *эрг*.

В сейфертовских галактиках содержится вблизи центра не только газ, но и звезды. Они-то и создают в наблюдаемом спектре линии поглощения, характерные для звезд. Линии возникают в спектрах отдельных звезд, а в суммарном спектре они наблюдаются потому, что все звезды данного класса имеют недостаток излучения в частотах линий. Наблюдаемое излучение ядра сейфертовской галактики в непрерывном спектре создается звездами и оно в 5—10 раз сильнее общего излучения в эмиссионных линиях. Однако поскольку излучение в эмиссионных линиях распределяется на небольшое число сравнительно узких участков спектра, в каждом из этих участков поток излучения достаточно велик для того, чтобы линия была хорошо заметной на фоне непрерывного спектра.

Ядра некоторых из сейфертовских галактик, в частности, упомянутой выше галактики NGC 1068, испускают довольно сильное радиоизлучение синхротронного происхождения. По-видимому, активность этих ядер проявляется не только в бурных движениях газа, но и в образовании релятивистских частиц. Общая энергия релятивистских частиц в ядре NGC 1068 того же порядка, что и кинетическая энергия газа, или немного меньше.

Подведем теперь итог сказанному в этом параграфе. Оказывается, существуют различные виды звездных систем — галактик, характерных особенной активностью своих ядер. Эта активность выражается либо в сильном радиоизлучении, идущем из области ядра, либо в выбрасывании газа из ядра, либо, наконец, в хаотическом движении газовых масс вблизи ядра. Во всех случаях эти особенности можно приписать взрыву в ядре галактики, произошедшему сотни тысяч или миллионы лет назад. Взрыв вызвал освобождение огромной энергии— не менее 10^{56}—10^{57} *эрг*, в различных ее формах.

Разумеется, случаи, когда наблюдается значительная активность в ядрах галактик, не ограничиваются рассмотренными выше примерами. Нет также сомнений в том, что с расширением исследований внегалактических объектов должны обнаруживаться все новые свидетельства активности ядер галактик. При оценке возможности наблюдений взрывов в ядрах галактик нужно иметь в виду, что взрывной процесс в них не может повторяться часто, а действие каждого взрыва продолжается малое по сравнению с возрастом галактики время. В остальное время активность ядер может быть низкой и обнаруживаться поэтому только у самых близких галактик.

Заметны признаки активности в ядре и нашей звездной системы — Галактики. Ранее нами отмечалась недоступность центральных областей Галактики для изучения оптическими средствами. Некоторые сведения о строении ядра Галактики удалось получить радиометодами благодаря тому, что радиоизлучение сравнительно мало задерживается межзвездной средой. В центре Галактики находятся два очень сильных источника радиоизлучения, каждый из которых имеет поперечник порядка десяти световых лет. Спектр этого излучения указывает на его синхротронную природу. Таким образом, по характеру излучения ядро нашей Галактики сходно с ядрами других галактик.

Из центральных областей Галактики происходит истечение газа со скоростью около 100 *км/сек*. За один год ядро выбрасывает массу газа порядка солнечной. Исходя из этого, можно предположить, что концентрация газа в ядре Галактики по сравнению с остальной ее частью очень велика: ведь при своих малых размерах ядро должно содержать массу в миллионы масс Солнца.

Рассмотрение возможной природы ядер и их роли в эволюции галактик мы отложим до десятого параграфа. Здесь же стоит коротко рассмотреть вопрос о том, в состоянии ли известные источники энергии обеспечить ее освобождение в количестве 10^{56}—10^{57} *эрг* за короткое время.

От предположения, объясняющего освобождение энергии в радиогалактиках и других галактиках с взрывающимися ядрами столкновениями между ними, безусловно, нужно отказаться, так как активность очень часто проявляется в ядрах одиночных галактик. Причину взрывов нужно искать в самой природе ядер галактик.

Не решает проблемы и гипотеза о превращении потенциальной энергии в другие ее виды при сжатии звездной системы, поскольку в случае галактик из-за их огромных размеров такое превращение не может иметь катастрофического характера. Кроме того, теперь достаточно хорошо известно, что взрывы локализованы именно в очень малых объемах, занимаемых ядрами галактик.

Большие трудности возникают и при объяснении взрывов в ядрах галактик термоядерными реакциями. Принимая этот механизм освобождения энергии, нужно считать, что в малом объеме ядра содержится большое число звезд, быстро превращающихся в сверхновые — в среднем должно вспыхивать по одной звезде в год. Причины столь частых вспышек непонятны, не говоря о том, что наблюдения не указывают на большую концентрацию звезд в ядрах галактик. Кроме того, подобный механизм ничего не дает для понимания природы односторонних выбросов из ядра, таких, например, как у галактики М 87.

Таким образом, открытие взрывов в ядрах галактик поставило науку перед необходимостью совершенно нового подхода к проблеме преобразования энергии и вещества. До изложения существующих взглядов на эту проблему мы займемся еще одним типом объектов — сверхзвездами. По масштабу освобождения энергии они в сотни и тысячи

раз превосходят даже взрывы в ядрах галактик. Поэтому, хотя и неизвестно, имеем ли мы при изучении сверхзвезд дело со взрывными процессами, их исследование представляется весьма существенным для понимания природы космических взрывов.

§ 9. СВЕРХЗВЕЗДЫ

Открытие и исследование сверхзвезд стало возможным благодаря непрерывному совершенствованию с конца сороковых годов техники радиоастрономических наблюдений. При помощи больших телескопов удалось довольно точно определить положение многих источников радиоизлучения на небе. Большинство источников, находящихся вне нашей Галактики, представляет собой радиогалактики; с некоторыми из них мы уже познакомились. Радиогалактики (даже те, которые пока не отождествлены с оптическими объектами) являются протяженными образованиями с вполне измеримыми диаметрами.

В 1963 г. было обнаружено пять интенсивных дискретных источников радиоизлучения, которые нельзя было отнести к радиогалактикам, так как их угловые размеры оказались очень малыми по сравнению с размерами галактик. Поскольку в этом отношении они напоминают звезды, их назвали «квазизвездными» (подобными звездам) радиоисточниками — сокращенно «квазарами». В нашей литературе употребляют также название сверхзвезды. В настоящее время (1966 г.) уже известно около полусотни сверхзвезд. Их обозначают теми номерами, под которыми они вошли в каталог дискретных радиоисточников, например, 3С 273 — это источник с номером 273 в Третьем кембриджском каталоге.

При помощи пятиметрового телескопа удалось не только надежно отождествить некоторые сверхзвезды с источниками оптического излучения, но и получить их оптический спектр. Сверхзвезды представляются слабыми звездочками, окруженными еле заметными на фотопластинках туманностями. В спектрах сверхзвезд присутствуют широкие эмиссионные линии. Эти линии принадлежат атомам водорода, кислорода, магния и других обычно содержащихся в туманностях элементов, но все они очень сильно смещены в сторону длинных волн. Отношение смещения линии $\Delta\lambda_0$

к длине волны ее λ_0 оказывается одним и тем же для всех линий спектра данной сверхзвезды. Для сверхзвезды 3С 273 это отношение равно 0,16, а для 3С 48 его величина 0,37, у других же сверхзвезд еще больше. Вследствие такого смещения линий спектры сверхзвезд имеют необычный вид. Например, линия водорода H_β, которая должна находиться в зеленой области спектра, в спектре источника 3С 48 оказывается в красной области и т. п.

Допустимы две точки зрения относительно расположения сверхзвезд в пространстве и, соответственно, причины «красного смещения» линий в их спектрах. Сверхзвезды могут находиться вне Галактики на огромных расстояниях от нее. В этом случае смещение линий в их спектрах имеет, по-видимому, ту же природу, что и «красное смещение» в спектрах далеких галактик. Если же сверхзвезды находятся в Галактике, то нельзя приписывать смещение линий в их спектрах действию эффекта Доплера, так как при скоростях сверхзвезд порядка ста тысяч километров в секунду мы бы заметили их движение среди других звезд. Наблюдения же не показывают перемещения этих объектов относительно звезд Галактики. Приняв, что сверхзвезды принадлежат нашей Галактике, мы должны приписать смещение их спектральных линий какому-то другому фактору, а не эффекту Доплера. Рассмотрим еще одну из причин, вызывающих «красное смещение» линий — действие тяготения, и выясним, в какой мере она способна объяснить характер спектров сверхзвезд.

Для того чтобы фотон мог улететь с поверхности звезды, он должен преодолеть ее тяготение, т. е. совершить работу против силы тяжести. Если энергия фотона равна $h\nu_0$, то, согласно формуле (18), она эквивалентна массе $\frac{h\nu_0}{c^2}$. Сила F, действующая на поверхности звезды радиуса R_* на такую массу, равна

$$F = G\frac{M_*}{R_*^2}\frac{h\nu_0}{c^2},$$

где через M_* обозначена масса звезды. Поскольку при удалении фотона от поверхности звезды действующая на него сила не остается постоянной, точное вычисление работы требует применения методов высшей математики. Но путем рассуждений, аналогичных проводившимся в § 4 при оценке потенциальной энергии звезды, нетрудно

понять результат такого вычисления *). Оказывается, работа по удалению фотона с поверхности звезды

$$A = \frac{GM_*}{R_*}\frac{h\nu_0}{c^2}.$$

Так как фотон, улетая, совершает работу, то его энергия должна уменьшаться на величину A. Долетев до наблюдателя, фотон имеет энергию $h\nu$, которая связана с его первоначальной энергией $h\nu_0$ следующим образом: $h\nu = h\nu_0 - \frac{GM_*}{R_*}\frac{h\nu_0}{c^2}$. Следовательно, уменьшение частоты фотона $\Delta\nu_0 = \nu - \nu_0$ определяется формулой

$$\frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} = -\frac{GM_*}{R_*c^2}. \qquad (30)$$

Изменение длины волны излучения $\Delta\lambda_0 = \lambda - \lambda_0$ (с учетом, что $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$), находится из (30) и равно

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\frac{GM_*}{R_*c^2}}{1 - \frac{GM_*}{R_*c^2}}. \qquad (31)$$

Для фотонов, улетающих с поверхности обычной звезды, величина $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ очень мала. Например, в случае Солнца, у которого масса составляет $2\cdot10^{33}$ *г* и радиус равен $7\cdot10^{10}$ *см*, имеем $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = 2\cdot10^{-6}$. Такое изменение длин волн линий трудно заметить. Для того же, чтобы величина $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ была порядка 0,1, звезда с массой, равной солнечной, должна иметь радиус около 10 *км*. Блеск звезды пропорционален квадрату ее радиуса. Допустим, что звезда с радиусом 10 *км* и температурой порядка 10 000° (о которой можно судить по линиям в спектре сверхзвезды) имеет ту же звездную величину, что и наблюдаемая у сверхзвезды 3С 273. Такая звезда должна находиться гораздо ближе к Солнцу, чем все известные звезды, и вследствие движения Солнца смещаться по небу. Отсутствие же замет-

*) Мы считаем, что сила остается постоянной на пути, равном R_*, а затем вовсе не действует на фотон. Принимая большее значение силы, мы компенсируем то обстоятельство, что пренебрегли ее работой на расстоянии, большем R_*.

ного смещения сверхзвезд позволило утверждать, что расстояние до них не меньше 60 000 световых лет.

Вывод о больших расстояниях до сверхзвезд подтверждается и данными радионаблюдений. Идущее от них радиоизлучение (в длине волны $\lambda = 21$ *см*) испытывает такое же поглощение в межзвездной среде Галактики, как и излучение радиогалактик. Следовательно, излучение от сверхзвезд проходит сквозь всю Галактику, что может быть только в том случае, если они находятся на периферии Галактики или же вне ее. Чтобы совместить подобные расстояния с наблюдаемым блеском сверхзвезд и величиной «красного смещения», определяемой по формуле (31), нужно предположить, что радиус сверхзвезды порядка 10^{15} *см*, а масса ее $10^9 M_\odot$. Но теоретическое исследование приводит к выводу, что звезды с такими значениями радиуса и массы существовать не могут.

Из всех приведенных данных с несомненностью вытекает, что тяготение не в состоянии объяснить «красного смещения» линий в спектрах сверхзвезд *). Поэтому не остается ничего иного, как принять, что сверхзвезды расположены вне Галактики, а «красное смещение» у них, как и у далеких галактик, вызвано движением, скорость которого тем больше, чем дальше от нас находится сверхзвезда. Нам было необходимо достаточно подробно рассмотреть данные, приводящие к такому заключению, потому что оно является чрезвычайно существенным для понимания природы сверхзвезд. Вывод об исключительно большой светимости сверхзвезд (а он и вызвал повышенный интерес к ним со стороны ученых) базируется главным образом на истолковании «красного смещения» линий, как обусловленного эффектом Доплера.

Зависимость между величиной смещения линий $\Delta\lambda_0$ и скоростью движения v определяется формулой (5) только в тех случаях, когда v мало́ по сравнению со скоростью света (скажем, $v \leqslant 0{,}1c$). При бо́льших скоростях нужно

*) Следует иметь в виду, что для устойчивых сверхплотных звезд формула верна лишь до значений $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} \lesssim 0{,}3$ и $\Delta\lambda_0$ вообще не может стать больше $0{,}6\lambda_0$. Так как теперь известны сверхзвезды, у которых $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} > 1$, то, очевидно, их «красное смещение» не может быть вызвано тяготением стационарной звезды.

пользоваться тем выражением для эффекта Доплера, которое дает теория относительности:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{2\frac{v}{c}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}+1-\frac{v}{c}}. \qquad (32)$$

Очевидно, что когда $\frac{v}{c}$ мало́ по сравнению с единицей, формула (32) дает практически тот же результат, что и более простая формула (5). Если же $\frac{v}{c}$ достаточно близко к единице, то величина $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ может стать очень большой.

Принимая теперь не величину смещения линий, а скорость v пропорциональной расстоянию до сверхзвезд (с коэффициентом пропорциональности, равным постоянной Хаббла), находим, что сверхзвезда 3С 273, у которой $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = 0{,}16$, удалена от нас приблизительно на 1,8 миллиарда световых лет. Расстояния до других известных сверхзвезд еще больше. Таким образом, они относятся к самым далеким из наблюдаемых в Метагалактике объектов.

Несмотря на исключительную удаленность сверхзвезд от Земли, некоторые из них являются оптически не очень слабыми объектами. Так, сверхзвезда 3С 273 имеет видимый блеск 12,6 звездной величины. Такой же блеск имело бы Солнце, если его удалить от нас на 1300 световых лет. Поскольку эта сверхзвезда находится на расстоянии в $1{,}3\cdot10^6$ раз большем, то энергия, излучаемая ею в оптической части спектра, в $1{,}7\cdot10^{12}$ раз превосходит энергию излучения Солнца и составляет около 10^{46} *эрг/сек*. Излучение источника 3С 273 в инфракрасной области спектра, как следует из наблюдений, в десятки раз превосходит оптическое. Поэтому мощность всего излучения может превышать $3\cdot10^{47}$ *эрг/сек*. Из этой энергии на долю радиоизлучения приходится около 10^{44} *эрг/сек*. Тот же порядок величины получается для мощности излучения сверхзвезды 3С 48, находящейся в два с половиной раза дальше от Земли, чем 3С 273.

Сравнивая полученное значение мощности оптического излучения сверхзвезды с соответствующей величиной для Галактики (около 10^{44} *эрг/сек*), убеждаемся в том, что

в оптическом диапазоне сверхзвезды излучают энергии на два порядка больше. Наша звездная система относится к числу гигантских галактик. Обычная же галактика излучает около 10^{43} *эрг/сек*, т. е. в тысячу раз меньше, чем сверхзвезда. Следовательно, сверхзвезды, намного превосходя по своему излучению галактики, являются самыми мощными источниками излучения во Вселенной.

Можно было бы ожидать, что и размеры сверхзвезд соответственно велики, но, как оказалось, они гораздо меньше размеров галактик. Этот очень интересный вывод получен не только на основе непосредственных измерений угловых диаметров, составляющих, как показали радионаблюдения, не более 0,1 диаметра обычной галактики *). Данные о переменности блеска сверхзвезд заставляют считать, что их поперечники еще меньше и не превосходят нескольких световых лет. Переменность блеска сверхзвезд является и сама по себе очень любопытным фактом и мы расскажем о ней подробнее.

Уже более полувека производится периодическое фотографирование различных областей неба для решения тех или иных астрономических проблем. Исследовав несколько тысяч фотоснимков тех участков неба, где находятся самые яркие из сверхзвезд, нашли, что их блеск заметно меняется (приблизительно в полтора раза за 10—15 лет), причем изменения имеют характер колебаний. Есть данные, позволяющие подозревать существование колебаний блеска с периодами в несколько месяцев и, возможно, в несколько недель. Но если даже ограничиваться лишь уверенно полученным приблизительно десятилетним периодом колебаний, то и тогда можно утверждать, что поперечники сверхзвезд удивительно малы, если учесть их огромное излучение; они в десятки тысяч раз меньше поперечника Галактики.

Чтобы понять, как по наблюдениям переменности блеска сверхзвезд был сделан такой вывод, вспомним одно из важнейших положений теории относительности. Оно заключается в невозможности для любого воздействия распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Так как яркость всего источника изменяется за

---

*) Радиометоды пока не дали возможности определить диаметр более точно.

10 лет, то его размеры не превосходят 10 световых лет. Принимая бо́льшие размеры источника, мы должны были бы допустить, что все его части изменяют свое излучение согласованным образом, не имея контактов с другими частями. Такое предположение нелепо, поскольку никакая часть источника не может «знать», что происходит в другой части, удаленной от нее более чем на 10 световых лет.

Как мы видим, сверхзвезды сильно отличаются от всех типов звездных систем, которые нами рассматривались до сих пор, огромной концентрацией энергии. Излучая в сто раз больше энергии, чем вся Галактика, сверхзвезда имеет объем того же порядка, что и суммарный объем всех звезд Галактики и, таким образом, вполне оправдывает свое название.

Из присутствия эмиссионных линий в спектре сверхзвезды сделали вывод о существовании вблизи этих объектов обширных областей разреженного газа. Туманности вокруг наиболее близких сверхзвезд заметны, как мы уже упоминали, и на фотографиях. Эмиссионные линии представляются наложенными на очень сильный непрерывный спектр. Излучение в непрерывном спектре исходит из самой сверхзвезды и наблюдаемые колебания ее блеска вызваны именно изменениями интенсивности непрерывного спектра. Размеры туманностей во много раз превосходят поперечники сверхзвезд — они порядка ста световых лет. Поэтому объем их очень велик и, несмотря на разреженность содержащегося в них газа, энергия, излучаемая туманностью в спектральных линиях, всего в 10—100 раз меньше, чем излучение всех звезд Галактики.

Масса газа, составляющего туманность, порядка $10^6\ M_\odot$. Судя по большой ширине эмиссионных линий, газ движется с огромными скоростями, достигающими 2000—3000 *км/сек*. Но даже при таких скоростях газ не разлетается в пространство. По-видимому, он удерживается силой тяготения самой сверхзвезды, масса которой должна быть поэтому не менее $10^8\ M_\odot$.

Возможно, что туманности вокруг сверхзвезд имеют сложную структуру и состоят из отдельных более плотных струй или волокон, как Крабовидная туманность. На сходство этих объектов с остатками вспышек сверхновых звезд (конечно, при огромном различии масштабов явлений) указывает и характер радиоизлучения сверхзвезд. По наблюденным свойствам излучения их в радиочастотах

и, в частности, по его поляризации сделали вывод о том, что оно создается синхротронным механизмом. Следовательно, в туманностях, окружающих сверхзвезды, имеется достаточно много релятивистских электронов, движущихся в магнитных полях. Синхротронным механизмом создается, вероятно, и некоторая доля оптического излучения сверхзвезды в непрерывном спектре, так как наблюдаемое излучение частично поляризовано.

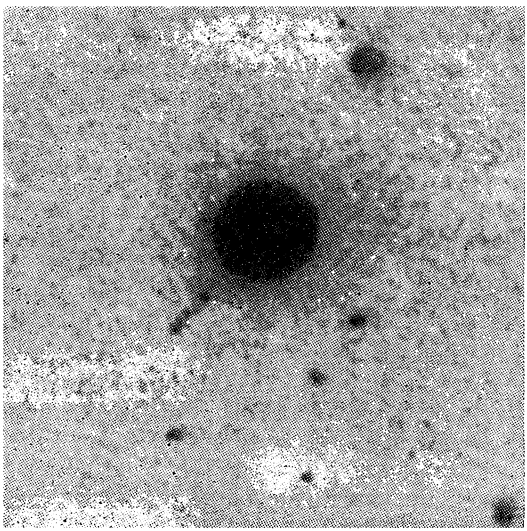

Рис. 44. Фотография сверхзвезды 3С 273. Слева внизу заметен выброс. Большой размер «звезды» объясняется фотографическими эффектами и не соответствует ее истинной величине.

По своим размерам излучающая в радиочастотах область значительно превосходит область оптического излучения. Например, у сверхзвезды 3С 273 она простирается более чем на тысячу световых лет. Оценив по свойствам радиоизлучения 3С 273 напряженность магнитного поля в туманности H, нашли, что $H \gtrsim 2 \cdot 10^{-3}$ эрстед. Следовательно, общее количество магнитной энергии $E_{\text{магн}}$ в туманности, равное произведению $\frac{H^2}{8\pi}$ на объем

источника радиоизлучения, порядка 10^{57} *эрг* или больше. Близкое к этому значение должна иметь энергия релятивистских частиц, содержащихся в туманности.

Судя по структуре некоторых сверхзвезд, возраст их измеряется сотнями тысяч лет. Так, сверхзвезда 3С 273 является двойным радиоисточником. Один более слабый источник (B) по положению совпадает с основным звездообразным источником оптического излучения. Другой радиоисточник (A), слабо излучающий в оптической области, находится на видимом расстоянии 160 000 световых лет от B *). Он сильно вытянут вдоль направления AB и представляется струей или выбросом из B. Если имело место отделение A от B, то оно случилось не ранее, чем $2 \cdot 10^5$ лет назад, а по всей вероятности, гораздо раньше, так как вряд ли скорость движения A была близка к скорости света.

На фотографиях туманности, окружающей сверхзвезду 3С 48, заметны образования, подобные жгутам с длиной не меньшей 200 000 световых лет. По-видимому, эти жгуты были выброшены из сверхзвезды и, следовательно, она находится в состоянии активности по крайней мере уже несколько сотен тысяч лет.

В силу сказанного, есть основания считать, что излучение сверхзвезд продолжалось с той же мощностью, что и теперь, а может быть, и более высокой, не менее 10^{13} *сек*. За это время сверхзвезда излучает 10^{60}—10^{61} *эрг*. Конечно, наличная энергия магнитного поля и релятивистских частиц не в состоянии обеспечить столь длительного свечения, даже если бы вся она могла превратиться в излучение. Поэтому здесь встает та же проблема, с которой мы уже встретились, рассматривая взрывы в ядрах галактик, но в еще более острой форме: проблема источников столь огромного количества энергии излучения.

В связи с обнаружением необычных свойств сверхзвезд появилось множество гипотез для объяснения природы этих объектов. Однако причины свечения сверхзвезд до сих пор остаются загадочными. Тем не менее, имеет смысл коротко сказать о некоторых из предложенных гипотез, поскольку их неудача, в конечном счете,

---

*) Истинная величина расстояния AB может и превосходить указанное значение, так как нами наблюдается только проекция AB на небесную сферу.

поможет лучше представлять возможные пути для создания в будущем правильной теории сверхзвезд.

Согласно одной из таких гипотез свечение сверхзвезды обусловлено большим числом вспышек сверхновых звезд в каком-то объекте, где концентрация звезд велика и расстояние между ними достаточно мало́. Если вспышка одной звезды в состоянии вызвать вспышки в соседних звездах, то возникает своеобразная «цепная реакция». Но вопрос о том, возможна ли такая «цепная реакция» вообще, остается открытым. Кроме того, наблюдаемую структуру сверхзвезд, в частности 3С 273, трудно согласовать с этой гипотезой. Приведенные соображения, а также и ряд других заставляют отказаться от объяснения свечения сверхзвезд указанным путем. Вообще термоядерные реакции являются сравнительно малоэффективным способом освобождения энергии — в ходе этих реакций может выделиться энергия, соответствующая только 1% всей массы покоя. Не спасает положения и мысль о том, что термоядерные реакции происходят в теле с массой 10^8 — 10^9 $M_\odot$, так как тогда наблюдались бы совершенно иные явления, чем те, которые мы видим у сверхзвезд. По-видимому, следует исключить термоядерные реакции как основной источник свечения сверхзвезд.

Гораздо более эффективным средством получения больших количеств энергии является использование потенциальной энергии тяготения. Если масса тела равна M, то при этом процессе, вообще говоря, может освободиться до $0{,}8\ Mc^2$ энергии. Поскольку массы сверхзвезд должны превышать $10^8 M_\odot = 2 \cdot 10^{41}$ *г*, то выделение энергии, соответствующее значительной доле этой массы (скажем, одной десятой), дает величину 10^{62} *эрг*, что достаточно для объяснения свечения сверхзвезд. Поэтому в последние годы усиленно разрабатывалась гипотеза об освобождении энергии в сверхзвезде в результате спадания («коллапса») тела гигантской массы в 10^8—10^9 $M_\odot$ к его центру. Рассмотрим некоторые особенности процесса коллапса.

Тело с достаточно большой массой (превосходящей $10^6 M_\odot$) не может находиться в устойчивом состоянии, так как давление внутри него не в силах противостоять тяготению. Поэтому если такое тело как-то образовалось, оно должно спадаться к своему центру — коллапсировать. При уменьшении радиуса тела освобождается энергия. Допустив, для простоты, что вначале радиус тела был

очень велик по сравнению с конечным его значением R, получим, согласно (12), что количество энергии, освобождаемой при сжатии тела массы M, приблизительно равно $\frac{GM^2}{R}$. Используя это выражение, нетрудно найти, до какой величины должен уменьшиться радиус, чтобы при сжатии тела с массой $10^8\ M_\odot$ освободилась энергия в количестве 10^{62} *эрг*. Это значение R составляет $3 \cdot 10^{13}$ *см*.

При вычислении энергии мы пользовались законом всемирного тяготения, по которому сила тяготения тела обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. В соответствии с общей теорией относительности, закон Ньютона перестает быть верным на малых расстояниях от тела. Он нуждается в поправках, когда расстояние r невелико по сравнению с величиной $R_k = \frac{2GM}{c^2}$, называемой гравитационным радиусом. При $M = 10^8\ M_\odot$ величина $R_k \approx 1{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*, что близко к полученному выше значению R. Поэтому при оценке конечного радиуса по освободившейся при сжатии энергии нам нужно было бы учесть поправки к закону Ньютона. Но это не очень сильно изменяет величину R, которая остается близкой к R_k. Следовательно, чтобы в теле с массой $10^8\ M_\odot$ за счет сжатия освободилось количество энергии 10^{62} *эрг*, оно должно уменьшить свой радиус до значения порядка R_k.

С приближением радиуса коллапсирующего тела к величине R_k сильно меняются свойства излучения тела. В частности, видоизменяется формула (30), определяющая величину гравитационного «красного смещения» фотонов. Вместо (30) теория относительности дает соотношение:

$$\frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} = -\frac{-2\frac{GM}{Rc^2}}{\sqrt{1-\frac{2GM}{Rc^2}}+1} = -\frac{\frac{R_k}{R}}{\sqrt{1-\frac{R_k}{R}}+1}, \qquad (33)$$

которое, как легко видеть, при R, намного большем, чем R_k, превращается в формулу (30). При $R = R_k$ из соотношения (33) получается, что $\Delta\nu_0 = -\nu_0$, смещение частоты равно самой частоте. Поэтому до удаленного наблюдателя излучение любой частоты ν_0 с поверхности тела не может дойти — вся энергия излучения расходуется на преодоление тяготения. Следовательно, коллапсирующее тело при достижении им размеров, определяемых

гравитационным радиусом, перестает быть видимым. Если возможно и дальнейшее сжатие тела, то освобождающаяся при этом энергия не сможет покинуть его. Такое состояние называют гравитационным самозамыканием.

Поверхность коллапсирующего тела движется ускоренно, по закону свободного падения в поле тяжести. С приближением величины радиуса к R_k скорость поверхности приближается к световой. Для наблюдателя, помещенного на поверхность тела, время достижения уровня R_k зависит от плотности тела. При плотности, например, соответствующей средней солнечной, оно составляет менее часа. Наблюдателю же, расположенному далеко от поверхности тела, по мере сокращения радиуса ее скорость будет казаться уменьшающейся и достижение поверхностью радиуса R_k займет, с точки зрения такого наблюдателя, бесконечное время.

Разница в ходе времени вблизи поверхности коллапсирующего тела и вдали от нее является еще одним интересным эффектом теории относительности. Она, по существу, и вызывает гравитационное «красное смещение». Действительно, если на поверхности тела испускается излучение с частотой ν_0, то время одного колебания $\Delta t_0 = \frac{1}{\nu_0}$. Это же излучение для далекого наблюдателя имеет частоту ν, а соответствующий интервал времени $\Delta t = \frac{1}{\nu}$. Так как $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}$, то $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$. Следовательно, время, протекшее между последовательными событиями на поверхности коллапсирующего тела, будет меньше для наблюдателя, движущегося с поверхностью, чем для далекого наблюдателя. С приближением R к R_k разница в ходе времени увеличивается.

Хотя на основе гипотезы о коллапсе массивного тела в принципе можно объяснить явление сверхзвезд и энергетически и по масштабу времени, эта гипотеза встречается со значительными трудностями. Прежде всего отметим, что существует ряд обстоятельств, препятствующих образованию тел столь большой массы. Кроме того, при коллапсе должно возникать множество трудно исследуемых эффектов, влияние которых на весь процесс остается неясным. Например, возрастание скорости вращения при

сжатии должно приводить к разделению сжимающегося тела на части. Оказывается также, что коллапс сферического тела не сможет дать необходимого выхода энергии вследствие гравитационного самозамыкания. Таким образом, пока не приходится говорить о законченной теории сверхзвезд, основывающейся на гипотезе об их коллапсе.

В заключение этого параграфа заметим, что в 1965 г. был обнаружен новый класс объектов — так называемые квазизвездные галактики. Эти объекты по своему излучению в оптическом диапазоне подобны сверхзвездам, но отличаются от последних отсутствием заметного радиоизлучения. Дальнейшее исследование квазизвездных галактик позволит, вероятно, глубже подойти и к пониманию природы сверхзвезд.

§ 10. РОЛЬ ВЗРЫВОВ В РАЗВИТИИ ЗВЕЗД И ГАЛАКТИК

Быстрое совершенствование методов астрофизических наблюдений позволило получить обширнейшую информацию о небесных телах. Она заключается, как мы знаем, в характеристиках излучения небесных тел и оказывается как бы зашифрованной. Расшифровывая эту информацию на основе соответствующих физических теорий, по характеристикам излучения воспроизводят картину процессов, происходящих в звездах и туманностях. Создание и уточнение научной картины строения небесных тел является очень сложным делом, поскольку речь идет о процессах, в большей части недоступных для непосредственного наблюдения, например, происходящих в недрах звезд.

Еще труднее изучать пути развития звезд и звездных систем. Эти объекты существуют и эволюционируют в течение миллиардов лет, а наблюдаем мы их всего несколько десятилетий. Поэтому по мере накопления данных наблюдений время от времени наступает период, когда имеющиеся гипотезы о происхождении и развитии звезд не в состоянии систематизировать и объяснить с единой точки зрения важнейшие факты. Тогда приходится взглянуть на всю проблему по-новому.

Всего несколько лет назад большинство астрономов считало, что звезды и туманности возникли из рассеянного, диффузного вещества путем его уплотнения (кон-

денсации). В настоящее время многие из данных наблюдений не укладываются в рамки этой гипотезы. Особенно большие трудности в ней возникли после обнаружения взрывов в ядрах галактик.

Взрывы в ядрах галактик являются лишь звеном в рассмотренной нами в этой книге последовательности космических взрывов. Суммируем данные о силе различных взрывов в таблице.

Таблица 2

Название объекта	Солнце	Вспыхивающие звезды	Новоподобные звезды	Повторные новые
Энергия взрыва (*эрг*) .	10^{30}—10^{34}	10^{32}—10^{35}	10^{39}—10^{41}	10^{42}—10^{43}
Шкала времени (*сек*) . .	10^{3}	10^{3}—$3\cdot10^{3}$	10^{4}—10^{5}	10^{7}—10^{8}

Название объекта	Новые	Сверхновые	Ядра галактик	Сверхзвезды
Энергия взрыва (*эрг*) .	10^{44}—10^{45}	10^{49}—10^{52}	10^{55}—10^{59}	10^{59}—10^{61}
Шкала времени (*сек*) . .	10^{8}—10^{9}	10^{11}—10^{12}	10^{13}—10^{14}	?

Под шкалой времени в табл. 2 понимается порядок величины промежутка времени, в течение которого в данном объекте отчетливо различаются последствия взрыва. Что же касается времени, занимаемого самим взрывом, то оно, по-видимому, во всех случаях мало. Даже при столь сильных взрывах, какие происходят в новых звездах, время взрыва не более 10^4 *сек*.

Как мы видим по табл. 2, диапазон силы космических взрывов очень широк. Энергии самых слабых и самых сильных из известных взрывов различаются более чем в 10^{30} раз. Очень интересно, что при таком различии в масштабе взрывов имеется значительное сходство в отношении сопровождающих взрыв процессов. Для космических взрывов характерно образование частиц большой энергии, в частности, релятивистских электронов. Кроме того, все взрывы оказываются связанными с магнитными полями; именно в магнитных полях релятивистские частицы

излучают энергию, как в радиодиапазоне, так и в оптическом. Это излучение наблюдается и при слабых и при сильных взрывах.

При каждом космическом взрыве не только образуются релятивистские частицы, но и выбрасывается газ со скоростями от нескольких сотен до нескольких тысяч километров в секунду. Степень концентрации освобождающейся в области взрыва энергии обычно очень велика, и взрыв оказывает сильное воздействие на окружающую среду.

Взрывы представляются очень распространенным во Вселенной явлением и служат, по-видимому, крайним выражением наблюдаемой тенденции к рассеянию (диссипации), характерной для звезд и звездных систем. Рассеивается в пространстве вещество — при выбрасывании его из звезд, рассеивается энергия — при излучении звезд. Противоположным диссипации процессом является конденсация вещества и энергии, когда вещество из большего объема концентрируется в значительно меньшей области пространства. В масштабах звезд или туманностей процесс конденсации диффузного вещества до сих пор не наблюдался. Из этого не следует, конечно, что такой процесс не происходит или невозможен. Однако наблюдаем мы в природе именно диссипацию.

Быстрого освобождения энергии, т. е. взрыва при конденсации вещества, ожидать трудно, так как процессом конденсации захватывается большой объем — ведь массивные тела должны тогда возникать из очень разреженного газа. Скорость же распространения любого возмущения в этом объеме не может превосходить скорости света.

Какое же место занимают космические взрывы в схеме, предполагающей образование звезд и галактик из диффузного вещества? Согласно этой схеме звезды возникают путем уплотнения в некоторой области межзвездной среды и вначале представляют собой огромные газовые шары. Предполагаемый процесс образования таких шаров из облаков межзвездного газа слишком сложен и мы здесь его описывать не будем. Ход этого процесса должен зависеть от условий, существующих в среде,— ее движения, присутствия магнитного поля и т. п.

Исходная температура газа, из которого образуется звезда, принимается невысокой, поэтому вначале во вновь образовавшейся звезде температура низка. Соответственно

мало и давление газа в ней. Так как газ не может противостоять силам тяготения, звезда должна сжиматься, а температура в недрах звезды при этом повышаться — за счет перехода потенциальной энергии в тепловую. Но пока температура не станет достаточно высокой для протекания в звезде термоядерных реакций, свечение сжимающегося газового шара обусловлено лишь преобразованием потенциальной энергии в тепловую.

Превращение холодного газового шара в звезду никогда не наблюдалось, и эта стадия развития звезд является чисто гипотетической. Производились лишь расчеты для шаров различной массы, показывающие, как должно меняться свечение шара при уменьшении его радиуса. Время сжатия оказывается сильно зависящим от массы шара. Для звезд с массой, существенно превосходящей солнечную, длительность стадии сжатия оценивается в сотни тысяч лет, при массе, равной солнечной,— в миллионы лет, а у газового шара, по массе соответствующего красному карлику, стадия сжатия должна продолжаться миллиарды лет.

Когда температура в недрах звезды достаточно возрастет, там станут происходить ядерные реакции и она перестанет сжиматься. Начинается следующий этап эволюции звезды, на котором ее свечение поддерживается за счет освобождения внутриядерной энергии. Водород в звезде в ходе термоядерных реакций постепенно превращается в гелий, причем предполагают, что это превращение ограничивается лишь центральными областями звезды. Процесс выгорания водорода был описан выше. В § 7 рассказывалось также о реакциях, которые могут идти после выгорания водорода. За выгоранием водорода следует сжатие звезды, вызывающее дальнейшее повышение температуры в ее недрах. Оно прекращается после того, как начинается выгорание гелия и реакции между другими тяжелыми ядрами.

Расчеты, сделанные в соответствии с этой схемой звездной эволюции, показали, что процесс выгорания водорода мог закончиться лишь у достаточно массивных звезд (с массой, превышающей 1,5—2 $M_\odot$). Что же касается звезд-карликов, то в них «водородное топливо» расходуется очень медленно и они могут излучать энергию за счет преобразования водорода в гелий в течение большего времени, чем предполагаемый возраст Галактики. Эволюция

таких звезд должна проходить поэтому без существенного изменения их структуры и свечения. Это и видно на примере Солнца. Как можно судить по данным геологии и палеонтологии, свечение Солнца за последние несколько миллиардов лет не менялось значительно.

Эволюция звезды, связанная с постепенным выгоранием «ядерного топлива», происходит, согласно расчетам, без существенной потери массы звездой. Лишь на последнем этапе эволюции гигантской звезды какая-то доля вещества может отделиться от нее и улететь в пространство. Но нет оснований приписывать этому процессу взрывной характер. Скорее, потеря массы должна происходить путем истечения газа из звезды.

Заметим, что указанная далеко не полная схема эволюции разработана лишь для одиночных звезд. Взаимодействия между звездами, входящими в двойную систему, могут эффективно действовать на состояние вещества в них (вызывая в нем сильные движения) и изменять тем самым ход эволюции.

Как мы видели из описания звездных взрывов, они свойственны звездам небольшой светимости и массы (если не касаться сверхновых II типа). Во всяком случае, для этих звезд рассмотренная схема эволюции не приводит к необходимости звездных взрывов. Поэтому, оставаясь на той точке зрения, что звезды возникают из диффузного вещества, взрывы в звездах нужно считать чем-то побочным, не связанным с основными эволюционными процессами. Возможно, определенную роль в космических взрывах играет двойственность звезд. Но можно сказать с уверенностью, что взрывы случаются и на одиночных звездах.

Хотя взрывные процессы и не кажутся связанными с эволюцией звезды, возникшей из газового облака, в отдельных случаях они могут оказывать влияние на эволюцию. В результате сильных взрывов звезда теряет массу. Так, сбрасывание звездой оболочки с массой, превышающей солнечную (что, по-видимому происходит при вспышках сверхновых II типа), должно сопровождаться полной перестройкой звезды.

Распространено мнение об образовании не только звезд, но также галактик и даже скоплений галактик из диффузной среды. Мы уже отмечали, что сейчас межгалактический газ является крайне разреженным и, по-видимому, основная доля вещества Метагалактики сосредоточена в звездах.

В период предполагаемого формирования галактик плотность межгалактической среды могла быть гораздо большей, чем сейчас.

В подтверждение гипотезы о возникновении звезд и галактик из диффузного вещества приводятся два важных довода. Прежде всего, скопления газа и пыли встречаются в тех областях пространства, где имеются звезды, которые можно считать молодыми. Отсюда делается вывод, что такие звезды еще не покинули область своего рождения. С другой стороны, многие из одиночных звезд, двойные системы и более сложные звездные системы, в частности, галактики, обладают большим моментом вращения *). Как доказывается в механике, момент вращения любой системы не может меняться без участия внешних сил. Это один из законов сохранения, столь же фундаментальный, как и закон сохранения энергии. В большой массе хаотически движущегося газа отдельные части — облака — всегда обладают значительным общим моментом вращения. Поэтому, считая звезды и галактики возникшими путем конденсации рассеянного вещества, можно естественно объяснить наблюдаемые моменты вращения звезд и звездных систем.

Гипотеза о возникновении различных небесных тел путем уплотнения вещества, бывшего первоначально в очень разреженном состоянии, имеет большую историю. Еще в XVIII в. философ Кант и математик Лаплас предполагали, что солнечная система образовалась путем конденсации газа, содержавшегося в некоторой первичной туманности. В последующее время к подобным идеям в той или иной форме неоднократно возвращались. В начале XX в. Джинс выдвинул гипотезу о возникновении звезд путем сгущения вещества в спиральных галактиках. При этом предполагалось, что центральные части галактик состоят из газа, а в спиральных рукавах газ конденсируется в звезды. После того как было обнаружено (в сороковых годах), что и центральные области галактик состоят преимущественно из звезд, а не из газа, теорию происхождения звезд пришлось существенно видоизменить.

Предполагаемый современной теорией путь развития Галактики сводится в основных чертах к следующему.

*) Напомним, что моментом вращения называется произведение скорости вращательного движения тела на его массу и на расстояние до оси вращения, а для системы, состоящей из многих тел, сумма таких произведений, взятых для каждого из тел.

Наша Галактика 10—15 миллиардов лет назад представляла собой газовое облако, в котором происходили хаотические движения. По химическому составу оно было почти исключительно водородным. При разработке схемы эволюции облака используется ряд предположений о том, как газ теряет кинетическую энергию, и о процессе формирования из газа звезд и звездных скоплений в различных областях Галактики.

Горячие (молодые) звезды большой светимости располагаются вблизи плоскости Галактики — в ее спиральных ветвях, где имеется также много газа и пыли. Звезды, образуясь из газа с малым содержанием тяжелых ядер, в процессе своей эволюции должны перерабатывать водород в гелий и другие более тяжелые элементы. Поэтому вещество звезд обогащается тяжелыми элементами. Из всех звезд происходит истечение вещества — с той или иной степенью интенсивности. В результате выбрасывания звездами газа в пространство обогащается тяжелыми элементами и межзвездная среда. Поэтому звезды, образующиеся из межзвездной среды позже, должны иметь большее содержание тяжелых элементов, чем звезды, возникшие ранее.

Указанным путем объясняют особенности звезд разного возраста. Возраст звезд удается достаточно хорошо определить в том случае, когда они входят в состав звездных скоплений. Рассеянные скопления представляют собой образования, существующие сравнительно недолго — 1—2 миллиарда лет. Они постепенно «рассасываются» среди других звезд, главным образом под действием тяготения масс, не входящих в скопления. Поэтому сам факт существования рассеянного скопления указывает на то, что входящие в него звезды значительно моложе Галактики. Эти звезды должны были образоваться совместно: случайная группировка сотен звезд, обладающих общим движением и другими сходными чертами, совершенно исключается. Шаровые же звездные скопления компактны, разрушаются гораздо медленнее, чем рассеянные, и являются, по-видимому, гораздо более старыми образованиями. Согласие наблюдаемых особенностей тех и других скоплений с теоретическими выводами свидетельствует о возможности объяснения наблюдений на основе описанной выше схемы «ядерной эволюции» звезд. Но это совершенно не связано с вопросом о том, как возникла сама Галактика.

Начальная стадия образования галактик из диффузной среды в еще меньшей степени доступна для теоретического изучения, чем образование звезд. Здесь мы не будем говорить о различных обсуждавшихся механизмах этого процесса, поскольку он не относится к теме книги. Но заметим, что ни один из предложенных механизмов не предусматривает возможности столь сильных взрывов, которые наблюдаются в ядрах галактик.

Мы уже упоминали о господствующей на современном этапе развития звезд и звездных систем тенденции к рассеянию вещества и энергии. Всюду наблюдается переход от конденсированных форм существования материи к менее плотным. Помимо взрывов, являющихся крайней формой диссипативных процессов, непрерывно происходит уход вещества и энергии из звезд более спокойными путями. На основе анализа различных наблюдаемых процессов диссипации возникла гипотеза о происхождении звезд и галактик, противоположная той, которая только что рассматривалась. Согласно этой гипотезе и звезды и галактики образуются при переходе материи из некоторого сверхплотного состояния в наблюдаемые формы вещества и энергии.

Весьма основательные доводы в пользу такой концепции получены при исследовании звездных систем, содержащихся в Галактике, и систем галактик в Метагалактике. Начнем с первых из этих объектов — звездных скоплений Галактики. Мы уже отмечали, что скопления не могут образовываться путем группировки звезд, родившихся в разных местах. Звезды, входящие в скопления, а также в двойные и более сложные системы, возникли совместно.

Около двадцати лет назад были обнаружены особые скопления звезд, названные звездными ассоциациями. Как удалось установить, возраст звездных ассоциаций измеряется несколькими миллионами лет, что очень мало по сравнению с возрастом Галактики. Тем самым было показано, что звездообразование в Галактике продолжается и теперь.

Другим видом очень молодых звездных систем являются так называемые кратные звезды типа Трапеции. В обыкновенных кратных системах две из любых трех звезд системы находятся близко друг от друга, третья удалена от них на расстояние в десятки раз большее. В системах же типа Трапеции расстояния от любой звезды до остальных одного

порядка. Таких систем сравнительно мало и все они состоят из горячих звезд большой светимости, так же как и звездные ассоциации.

Из теоретического исследования движений в системах типа Трапеции следует, что подобные образования должны распадаться за 1—2 миллиона лет. Дело в том, что звезда может удерживаться в системе лишь силами тяготения

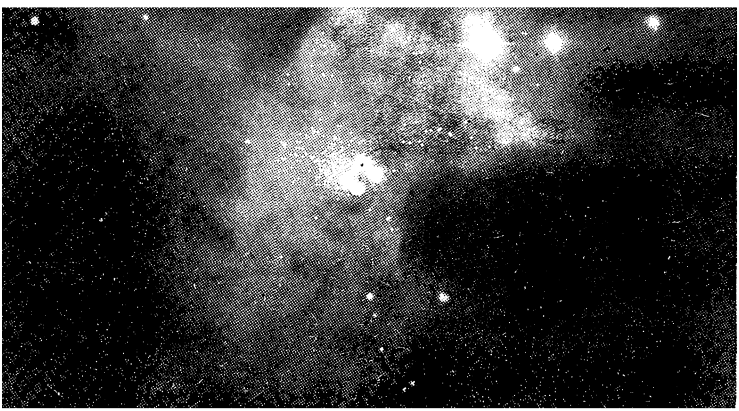

Рис. 45. Звездная система «Трапеция» в центральной части светлой туманности Ориона.

со стороны других звезд и если она приобретает кинетическую энергию, достаточную для преодоления этих сил, то уходит из системы. При движении звезд в системе типа Трапеции происходят очень тесные сближения их за время нескольких оборотов звезд вокруг центра тяжести системы. При таком сближении одна из звезд может настолько увеличить скорость, что ее кинетическая энергия превысит необходимую для ухода из системы *). Для наблюдаемых систем типа Трапеции, при учете масс и движений входящих в них звезд, путем расчетов нашли время, требующееся для достаточно близких встреч звезд — оно оказалось порядка миллиона лет. Следовательно, само существование

*) В обычных кратных системах движения звезд происходят приблизительно по законам Кеплера, сближений звезд не происходит, поэтому такие системы устойчивы, по крайней мере в течение миллиардов лет.

системы типа Трапеции показывает, что входящие в нее звезды возникли недавно и совместно. При случайных сближениях одиночных звезд образование подобных систем практически невозможно. По-видимому, все звезды системы входили в состав какого-то массивного плотного тела и образовались при его делении.

С системами мы встречаемся и в мире галактик. Существуют двойные галактики, системы из нескольких галактик и скопления, включающие в себя тысячи галактик. Кратные галактики встречаются сравнительно часто и среди них также выделяются системы типа Трапеции и обыкновенные системы. Из тех же соображений, которые указывались для звезд, входящих в кратную систему типа Трапеции, следует, что галактики, составляющие подобную систему, возникли совместно из более массивного образования. Скорости движений галактик в кратной системе обычно таковы, что на один оборот галактика затрачивает около миллиарда лет, что не очень мало по сравнению с возрастом галактик. Поэтому в значительной части систем галактик еще не произошли достаточно тесные сближения галактик и многие системы просто не успели разрушиться.

Распад некоторых кратных систем галактик типа Трапеции происходит прямо «на глазах». Хороший пример этого дает так называемый «Квинтет Стефана» — система из пяти галактик. Скорость одной из галактик этой системы отличается более чем на 1000 *км/сек* от скоростей других членов квинтета, у которых разница в скоростях не превосходит 100 *км/сек*. Для того чтобы удержать галактику, движущуюся с относительной скоростью 1000 *км/сек*, в системе, массы остальных галактик должны быть гораздо бóльшими, чем встречающиеся у галактик данного типа. Следовательно, мы наблюдаем уход одной из галактик из «квинтета Стефана». Можно было бы привести и другие примеры распадающихся систем галактик.

В двойных галактиках, а также и в более сложных системах, в ряде случаев наблюдаются светящиеся образования — «перемычки», идущие от одной галактики к другой. Это еще одно убедительное подтверждение тесной связи галактик, входящих в одну систему, обусловленной общностью их происхождения.

Итак, ряд данных указывает на совместное образование не только звезд, но и гигантских звездных систем из каких-то массивных тел. С этой точки зрения становится понят-

ным и характер таких «двойных галактик», как Лебедь А, Центавр А и другие. По-видимому, мы наблюдаем в этих случаях галактики, образовавшиеся из одного тела так недавно, что они еще не успели полностью разделиться.

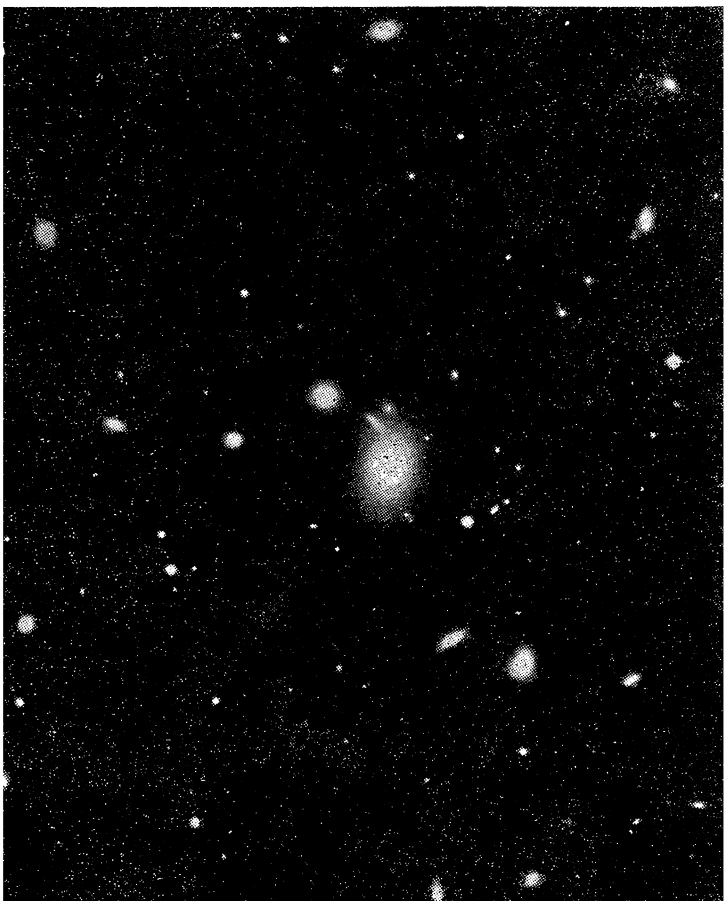

Рис. 46. Скопление галактик в созвездии «Волосы Вероники».

Поскольку обе галактики удаляются друг от друга с огромной скоростью и, следовательно, обладают очень большой кинетической энергией, процесс образования этих галактик

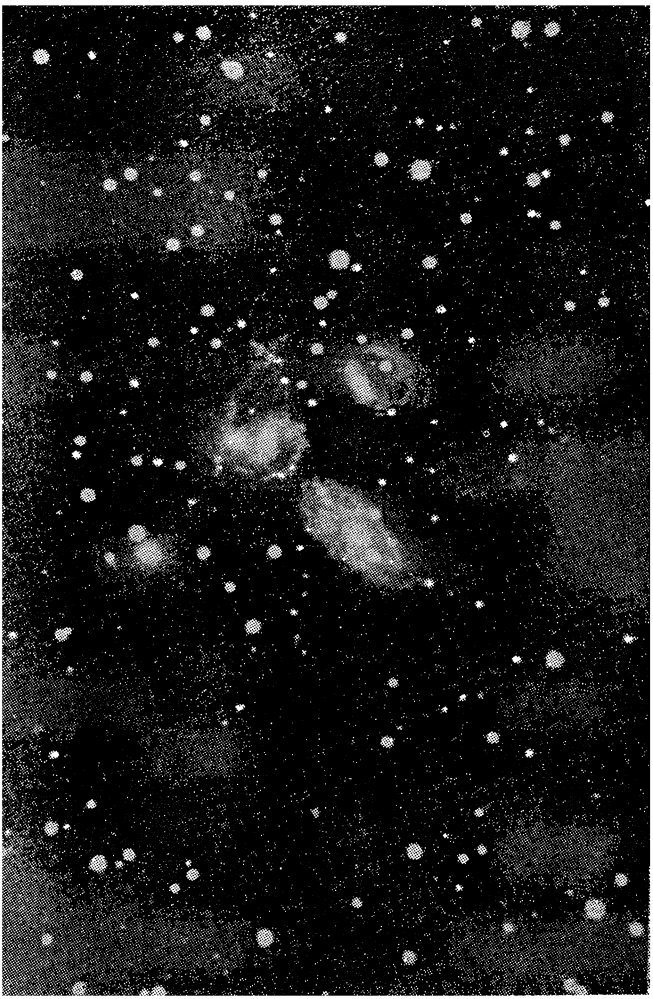

Рис. 47. Система галактик типа Трапеции, называемая «квинтет Стефана».

имел, вероятно, характер взрыва. Последствия такого взрыва сказываются в интенсивном радиоизлучении галактик, обусловленном присутствием в них релятивистских частиц.

Таким образом, наблюдения галактик дают все новые подтверждения предположений об образовании галактик из других плотных и массивных тел. В процессе развития образовавшихся галактик происходит и рождение звезд. Как мы уже знаем, взрывы в ядрах галактик в ряде случаев приводят к одностороннему выбрасыванию струй вещества. Можно полагать, что спиральные рукава галактики образуются в результате взрывов в ее ядре. При этом из ядра выбрасываются «спутники», представляющие собой небольшие галактики.

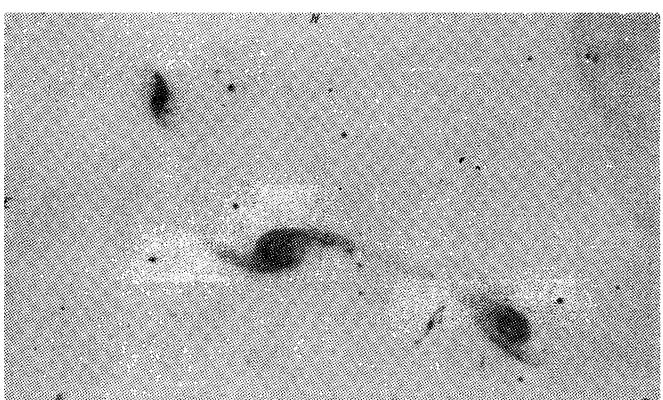

Рис. 48. Две галактики, соединенные перемычкой (негатив).

Спутники есть и у нашей Галактики — это две неправильные галактики, называемые Магеллановыми Облаками. Имеются основания считать, что Магеллановы Облака соединены с Галактикой протяженными образованиями — перемычками. В галактике М 51 на конце спиральной ветви заметна карликовая галактика — спутник. Аналогичное явление наблюдается и у других систем, в частности, у туманности Андромеды. Как явление того же типа, можно рассматривать и перемычки между двойными галактиками. Часто эти перемычки оказываются продолжением спиральных рукавов. Поэтому допустимо вообще считать, что

спиральные рукава галактик развились из перемычек между двумя системами, образовавшимися из одного тела. Тогда возникновение этих рукавов должно быть связано со взрывными процессами в ядрах галактик.

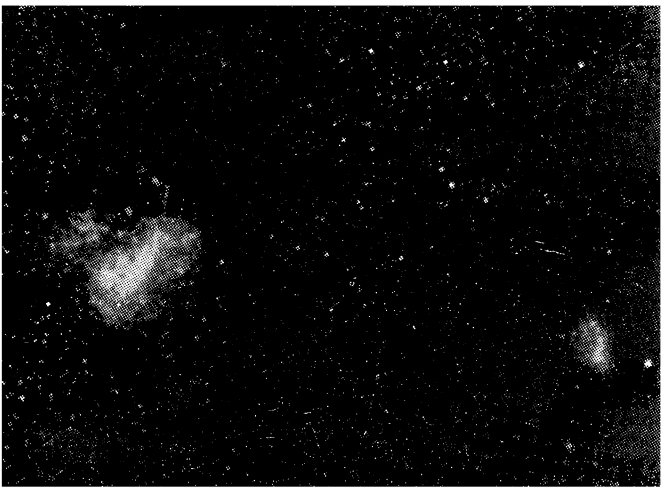

Рис. 49. Магеллановы Облака — спутники Галактики: слева Большое Магелланово Облако, справа Малое Магелланово Облако.

Естественно, что сделанный вывод ни в коей мере нельзя считать окончательным. По мере накопления наблюдательных данных о галактиках может оказаться, что существует другой, более эффективный способ образования спиральной структуры. Однако наличие хотя бы в некоторых случаях струй и выбросов, похожих на рукава, установлено достаточно надежно.

Гипотеза о происхождении галактик путем деления каких-то плотных тел как будто бы противоречит данным о наличии у галактик больших моментов вращения — ведь такое тело в силу своего малого размера не может обладать большим моментом вращения. Но с законом сохранения момента вращения совместимо предположение о возникновении из плотного тела двух образований, вращающихся в противоположные стороны. Тогда их вращательные моменты будут величинами разных знаков, и хотя у каждой из систем момент вращения велик, в сумме

для обоих образований он может быть малым. Наблюдения таких двойных систем галактик, которые, по-видимому, возникли совместно, показывают, что в большинстве случаев направления ветвей (спиральных рукавов) у компонент пары противоположны. А это может говорить и о противоположности направлений вращения обеих галактик.

Согласно рассматриваемой гипотезе звезды возникают в выброшенных из ядра спиральных рукавах, которые содержат очень плотные и массивные тела. При делении этих тел могут образоваться не только звезды, но и вещество в рассеянном (диффузном) состоянии — газ и пыль. Поэтому существование горячих (молодых) звезд в тех же областях Галактики, где имеется много пыли и газа, отнюдь не является веским доводом против рассматриваемой точки зрения и указанием на происхождение звезд из диффузного вещества. С тем же успехом можно считать, что присутствие молодых звезд и газа в одной и той же области свидетельствует об их совместном образовании.

Ни природа дозвездных тел, ни процесс образования из них звезд и диффузного вещества пока не выяснены. Однако, как показывает существование звездных ассоциаций, процесс звездообразования в Галактике продолжается и теперь, хотя формирование ее спиральных рукавов относится, по-видимому, к далекому прошлому. Поэтому следует допустить, что из «протозвезд» — объектов, выброшенных ядром Галактики, звезды могут образовываться не сразу, а спустя более или менее значительное время после выброса. Сейчас трудно сказать что либо конкретное о формах существования протозвезд. Вероятно, они являются очень плотными и несветящимися телами.

Переход от протозвезд к другой форме существования вещества — звездной, может иметь характер взрыва. На это указывает в ряде случаев значительная скорость звезд, входящих в звездные ассоциации, которая не может быть приобретена путем столкновений их друг с другом. Пока таких взрывов, о которых можно было бы сказать, что они сопровождают рождение звезд, не наблюдали. Но, скорее всего, это связано с редкостью подобных взрывов. Из сравнения числа звездных ассоциаций в Галактике при учете времени их жизни (от возникновения до рассеяния) с общим числом звезд Галактики получается, что одна ассоциация должна появляться за время порядка тысячи лет. Но такая оценка предполагает постоянство скорости звездообразо-

вания и возникновение всех звезд через ассоциации. Более точные подсчеты показали, что в окрестностях Солнца (скажем, на расстоянии 10 000 световых лет от него) рождение одной звездной ассоциации должно происходить один раз за 100 000 лет. Наблюдения же их продолжаются всего десятки лет.

Такие космические взрывы, как, например, большие вспышки звезд типа UV Кита, а также T Тельца и некоторых других, не связаны, по-видимому, непосредственно с образованием звезд. Но, судя по характеру вспышек, их можно считать продолжением процессов, сопровождавших рождение звезд. В рамках излагаемой системы взглядов на звездообразование высказывалось предположение о том, что вспышки вызываются попаданием в поверхностные слои звезды остатков дозвездного вещества, сохранившегося внутри звезды.

В рассмотренных здесь соображениях о путях образования звезд и звездных систем есть, конечно, очень много неопределенного. Сейчас нам ничего не известно о структуре дозвездного вещества. Потребуется, возможно, углубление и обобщение некоторых основных законов физики, чтобы можно было ответить на возникающие в связи с проблемой рождения небесных тел вопросы. Может быть, наконец, что и вся эта концепция в свете новых наблюдений будет отвергнута. Однако в настоящее время она кажется более цельной, чем гипотеза о рождении звезд и галактик путем конденсации диффузного вещества. Если считать, что небесные тела образуются при конденсации, то космические взрывы разных масштабов оказываются процессами, не связанными с основной линией эволюции. В предположении же об эволюции вещества от более плотных форм к менее плотным космические взрывы сопровождают резкие переходы материи из одной формы в другую и являются важным этапом развития небесных тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой книге затронут широкий круг космических явлений, происходящих очень далеко от Земли. Вероятно, при чтении ее у многих возник вопрос о практической ценности подобных исследований и возможном применении их результатов. Что касается солнечных вспышек, то об их влиянии на различные земные процессы мы уже говорили. В частности, была подчеркнута необходимость в будущем прогнозирования вспышек для обеспечения безопасности космических полетов. Взрывы на других звездах и, тем более, взрывы в ядрах галактик Землю непосредственно не затрагивают. Однако исследуя такие взрывы, мы имеем дело с процессами исключительно высокой энергии, невоспроизводимыми на Земле. Поэтому трудно переоценить роль для науки этих «космических лабораторий», где природой ставятся эксперименты гигантских масштабов.

Общеизвестно, что фундаментом технических достижений является глубокое познание физических законов. Изучая новые, подчас совершенно неожиданные, типы космических явлений, мы получаем возможность уточнения физических законов. Здесь уместно напомнить, что, например, действие мощнейшего из известных нам источника энергии, термоядерных реакций, было сначала изучено для Солнца и звезд и лишь позже подобная реакция была осуществлена в земных условиях.

Сейчас трудно предположить, что в недалеком будущем удастся широко использовать те процессы освобождения энергии, о которых мы надеемся узнать, изучая космические взрывы, хотя некоторые эффекты взрывов, вероятно, и можно будет моделировать и найти им применение. Всякое расширение наших знаний о мире, в котором

мы живем, так или иначе сказывается в человеческой практике, но не всегда можно предвидеть пути использования этих знаний.

Читатель вправе поставить и другой вопрос — где получены и кому принадлежат изложенные в книге результаты исследований? Однако отсутствие в тексте ссылок на конкретных авторов (за исключением тех случаев, когда фамилия стала нарицательной) не случайно. Изучением описанных явлений, составляющим значительную область астрофизики, занималось и занимается множество научных учреждений, и тот или иной вклад в него внесли сотни, если не тысячи, ученых. Понятно, что в рамках данной книги невозможно было дать оценку роли отдельных ученых, да это и не входило в ее задачу. Мы сообщали лишь установленные факты, необходимые для понимания общей картины явлений взрывов. Но все же мы здесь упомянем о крупнейших научных коллективах нашей страны и зарубежных, внесших наиболее заметный вклад в проблему космических взрывов. Ученые, которые при этом упоминаются, являются, как правило, организаторами или руководителями этих коллективов.

Начнем с хромосферных вспышек. В СССР наиболее обширные исследования в этой области производятся Крымской астрофизической обсерваторией (КрАО), руководимой А. Б. Северным. В той же обсерватории, а также в Бюраканской астрофизической обсерватории активно изучаются вспыхивающие звезды различных типов.

Новые звезды привлекают внимание ученых уже многие десятки лет. Особенно важные и интересные наблюдения их производились в США на обсерваториях Маунт Вилсон и Маунт Паломар при помощи крупнейших оптических телескопов (2,5 *м* и 5 *м* диаметром). С этими же инструментами наблюдались сверхновые звезды, взрывы в ядрах галактик и сверхзвезды, которые доступны лишь большим телескопам. Сейчас крупные инструменты вводятся и на других обсерваториях, но роль этих обсерваторий продолжает оставаться значительной. Теоретическими исследованиями вспышек новых звезд занимаются в Ленинградском университете под руководством В. В. Соболева, в КрАО и Москве Э. Р. Мустель и другие, а также в Астрофизическом институте во Франции (Э. Р. Шацман), в Англии, США и др. странах.

Туманности, образованные вспышками галактических сверхновых звезд, изучались как оптически, так и радиометодами, в СССР и за рубежом — в Австралии, США. В частности, в Ленинградском университете и Бюракане была подробно исследована поляризация излучения Крабовидной туманности и подтверждены предположения о синхротронной природе ее излучения. Проблемы синхротронного излучения в применении к сверхновым звездам еще до этого стали разрабатываться в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева и в Астрономическом институте им. П. К. Штернберга В. Л. Гинзбургом, И. С. Шкловским и другими.

Изучение взрывов в ядрах галактик и исследование сверхзвезд интенсивно проводится в Бюраканской обсерватории, возглавляемой В. А. Амбарцумяном, и в крупнейших обсерваториях США (Д. Гринстейн, А. Сэндидж, М. Шмидт). Изучение этих объектов в радиодиапазоне проводилось в Англии (Манчестерская группа), США, Австралии и других странах. В теоретическом плане сверхзвезды активно изучаются в СССР (АН СССР — группа, возглавляемая Я. Б. Зельдовичем), в Англии (Ф. Хойл с сотрудниками) и в США (Бэрбиджи).

В последнем параграфе мы говорили о существовании двух точек зрения на образование звезд. Гипотеза о конденсации звезд и галактик из диффузного вещества развивалась во многих странах; укажем для примера голландского ученого Д. Оорта и американского Л. Спитцера. Противоположная концепция образования звезд из сверхплотных тел принадлежит В. А. Амбарцумяну. Он синтезировал в ней результаты исследований нестационарных звезд, с одной стороны, и изучения звездных систем, в частности, открытых им звездных ассоциаций, — с другой.

Этими замечаниями исторического характера мы и закончим книгу. Добавим лишь небольшой список научно-популярной литературы, который может пригодиться тем, кто захочет подробнее разобраться в отдельных вопросах, по необходимости бегло затронутых в этой книге.

ЛИТЕРАТУРА

А. С. Компанеец, Ударные волны, Физматгиз, 1963.

Д. А. Франк-Каменецкий, Плазма — четвертое состояние вещества, Атомиздат, 1963.

Л. Гольдберг и Л. Аллер, Атомы, звезды и туманности, Гостехиздат, 1948 (в этой книге подробно и популярно рассказывается о ряде вопросов, изложенных в § 2).

Д. Г. Мензел, Наше Солнце, Физматгиз, 1963.

С. Б. Пикельнер, Физика межзвездной среды, Изд-во АН СССР, 1959.

С. А. Каплан, Физика звезд, Физматгиз, 1961.

С. А. Каплан, Элементарная радиоастрономия, Изд-во «Наука», 1966.

О. Струве, Б. Линдс, Э. Пилланс, Элементарная астрономия, Изд-во «Наука», 1964.

Дж. Гринстейн, Х. Чу, Дж. Нарликар, Сверхзвезды, Изд-во «Мир», 1965.

Т. А. Агекян, Звезды, галактики, Метагалактика, Изд-во «Наука», 1966.

Более подготовленному читателю могут оказаться полезными также следующие монографии, в которых содержится и обширная библиография:

М. Шварцшильд, Строение и эволюция звезд, Изд-во Иностр. лит., 1961.

В. Г. Горбацкий, И. Н. Минин, Нестационарные звезды, Физматгиз, 1963.

С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер, Межзвездная среда, Физматгиз, 1963.

И. С. Шкловский, Сверхновые звезды, Изд-во «Наука», 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
§ 1. Что такое взрыв? 5
§ 2. Методы изучения космических взрывов 15
§ 3. Состояние вещества во Вселенной 36
§ 4. Энергия космических тел . . . 63
§ 5. Взрывы на Солнце и их влияние на Землю 79
§ 6. Вспышки звезд 100
§ 7. Сверхновые звезды 119
§ 8. Взрывы в ядрах галактик . . . 141
§ 9. Сверхзвезды 158
§ 10. Роль взрывов в развитии звезд и галактик 170
Заключение 186

Горбацкий Виталий Герасимович

КОСМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

М., 1967 г., 192 стр. с илл.

Редактор *И. Е. Рахлин.*

Техн. редактор *С. Я. Шкляр.*
Корректор Е. Л. Белицкая.

Сдано в набор 21/I 1967 г. Подп. к печати 18/V 1967 г.
Бумага 84×108$^{1}/_{32}$. Физ. печ. л. 6. Условн. печ. л. 10,08
Уч.-изд. л. 10,56. Тираж 20 000 экз. Т-06928. Цена 35 коп.
Заказ № 93.

Издательство «Наука».
Главная редакция физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Чеховский полиграфкомбинат Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
г. Чехов, Московской области