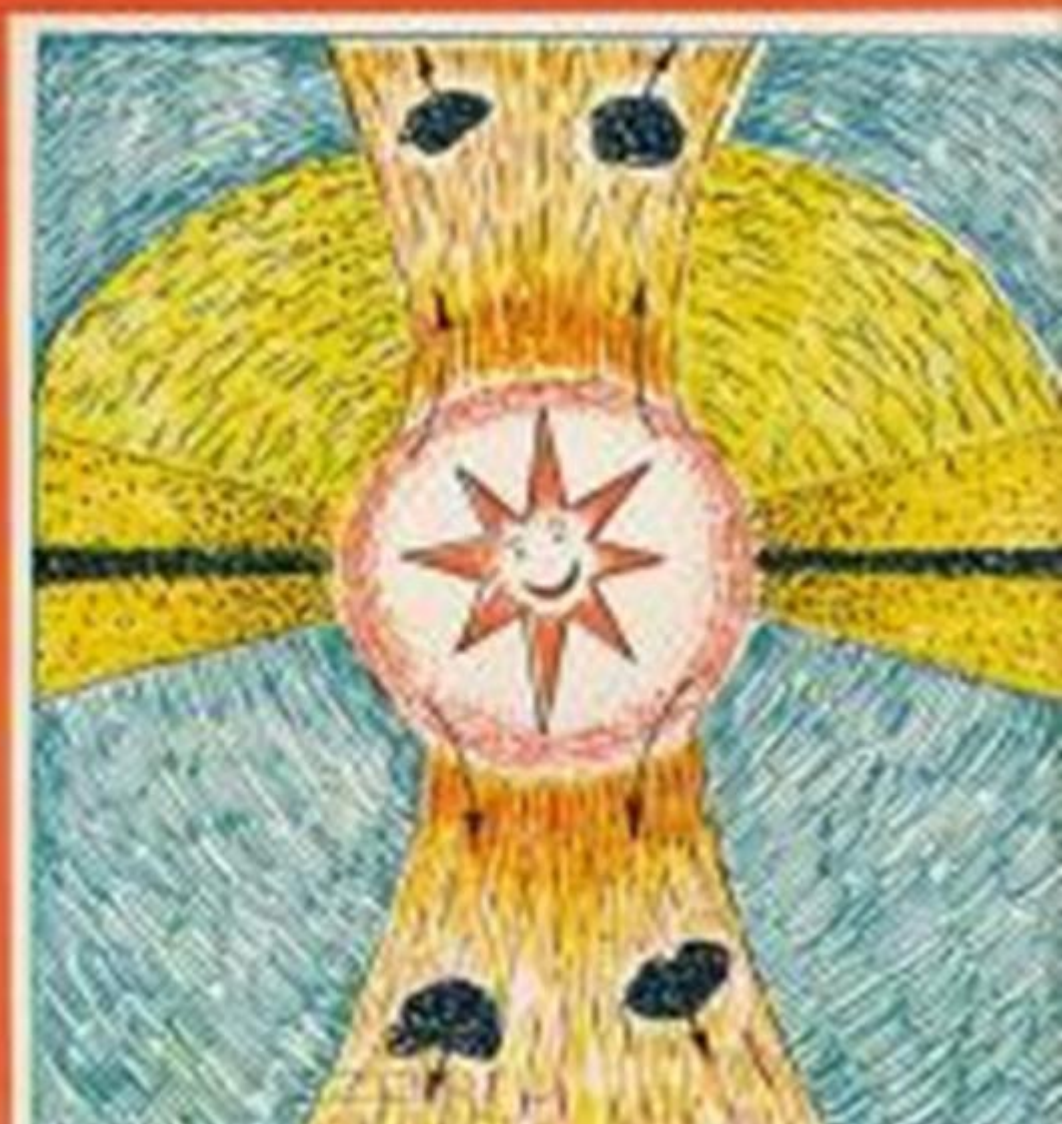


СПИТА

В. Г. СУРДИН
С. А. ЛАМЗИН

ПРОТОЗВЕЗДЫ

ГДЕ, КАК И ИЗ ЧЕГО
ФОРМИРУЮТСЯ ЗВЕЗДЫ



Владимир Георгиевич Сурдин Сергей Анатольевич Ламзин

Протозвёзды. Где, как и из чего формируются звёзды.

Главная редакция физико-математической литературы
Москва "Наука"
1992

Более современные и полные данные по этой теме можно найти в книге: В.Г.Сурдин "Рождение звезд", М.: УРСС, 2001.

Содержание :

<u>Предисловие</u>	<u>9. Круговорот вещества в Галактике</u>
<u>1. Введение</u>	<u>10. Молекулярные облака</u>
<u>2. Древние о звездах</u>	<u>11. Вблизи рождающейся звезды</u>
<u>3. Возрождение интереса к звездам</u>	<u>12. От облака к звезде</u>
<u>4. От Ньютона до Джинса</u>	<u>13. Что же такое протозвезды?</u>
<u>5. От Джинса до наших дней</u>	<u>14. Звезды типа Т Тельца</u>
<u>6. Какие звезды рождаются</u>	<u>15. Заключение</u>
<u>7. Где рождаются звезды</u>	<u>Список литературы</u>
<u>8. Пространство между звездами</u>	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Приглашая читателя углубиться в эту книгу, авторы хотели бы честно заявить о мотивах ее написания. Как профессиональные астрономы, занятые вопросами происхождения и эволюции звезд и звездных систем, мы испытываем постоянное давление информационного вала, ежедневно приносящего новые наблюдательные данные и результаты численных экспериментов, часто кратковременный интерес и нарушающих уже, казалось бы, готовую к завершению картину "рождения миров". Прекрасно понимая, что так будет всегда, мы решили подвести "промежуточную черту" и выяснить для самих себя, что же известно главного о рождении звезд и звездных систем; решили также поглубже заглянуть в старые книги, чтобы в ретроспективе более точно оценить оригинальность и глубину (если они в действительности имеются) современных идей; наконец, мы решили повнимательнее ознакомиться с работой своих коллег в соседних областях исследования и все, что нам покажется интересным, сохранить в виде своеобразного конспекта, не перегруженного деталями, но содержащего главные идеи и важнейшие результаты наблюдений. В этом смысле мы писали книгу для себя, отдаваясь воле собственных интересов и не пытаясь особенно "разжевывать" то, что нам самим было хорошо известно. Поэтому книга требует от читателя определенного кругозора и, уж во всяком случае, знания основных астрономических терминов.

С другой стороны, как бывшие кружковцы, никогда не терявшие связи с любителями астрономии и по мере сил стремившиеся популяризировать свою науку, мы чувствуем потребность рассказать о поразительно красивых находках в области космогонии широким

"Тот, кто решает толковать об эволюции звезд, должен быть оптимистом и обладать чувством юмора. Астрономы и являются неисправимыми оптимистами."

Цецилия Пэйн-Гапошкина [15]

массам любознательных читателей. Если у нас возникал вопрос о степени подготовки и уровне интересов потенциального читателя этой книжки, то мы представляли себе грамотного кружковца, студента-естественника, либо коллегу-астронома, занятого по роду службы "незвездными" делами, но желающего быть в курсе современной космогонии. По-видимому, подобный двуединый интерес (лучше разобраться самому, а узнав что-то любопытное, поделиться этим с товарищами) характерен для авторов большинства научно-популярных книг и в этом смысле мы не оригинальны.

Считается, что астрономию популяризировать легко. Действительно, это так при условии, что у читателя есть хороший телескоп или авторы популярных книг обеспечены хорошей полиграфической базой: захватывающую картину небесных явлений не заменит никакое, даже самое красочное их описание. К сожалению, в этом смысле мы можем полагаться лишь на богатое воображение читателей или на их возможности воспользоваться для иллюстрации нашего рассказа дополнительной, более красочной литературой. Эмоциональный эффект при знакомстве с космическими явлениями играет отнюдь не последнюю роль.

Работая над этой книжкой, мы пользовались добрыми советами многих советских и зарубежных астрономов за что всем им очень признательны. Особую благодарность мы хотим выразить нашим коллегам из Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (Москва, МГУ). И, наконец, сотрудничество с рецензентом рукописи д. ф.-м. н. Ю. Н. Ефремовым и редактором Т. Г. Борисовой позволили нам получить истинное удовольствие от работы над этой книгой.

ВВЕДЕНИЕ

Как-то раз один из авторов этой книжки решил написать статью для школьников о том, как рождаются звезды. Было это лет 15 назад. А нужно заметить, что в те годы наши астрономы избегали употреблять термин "протозвезды", поскольку в отечественной литературе он использовался в одной сомнительной гипотезе о происхождении звезд, с которой большинство ученых не хотело иметь ничего общего. Однако сам по себе, независимо от спорной гипотезы, термин этот был очень хорош и быстро привился во всем мире для обозначения наиболее ранних стадий формирования звезд.

Итак, редкое слово "протозвезды" было использовано в рукописи статьи, но после того, как в редакции научно-популярного журнала машинистка перепечатала эту рукопись, злосчастное слово почему-то разделилось на два и превратилось в "просто звезды". Разумеется, автора возмутила такая небрежность, но позже эта ошибка даже понравилась ему. (В конце концов это лучше, чем увидеть в наборе своей статьи вместо белых карликов - "белые кролики", а вместо черных дыр - "черные дуры". А ведь и такое было!)

Превращение "протозвезд" в "просто звезды" подтолкнуло автора к тому, чтобы попытаться очистить всю проблему рождения звезд от налета таинственности и экзотичности. В конце концов, протозвезды - это просто звезды в период их ранней молодости. По-видимому, условия, в которых они формируются, и процессы, с ними происходящие, могут быть такими же разнообразными, как и сами взрослые звезды и их наблюдаемые проявления. Лишь недавно, приступив к изучению протозвезд и мест их обитания, мы сейчас стремимся составить для себя универсальный сценарий их зарождения и развития, оправдывая при этом лишь одну теоретическую схему и отбрасывая все конкурирующие.

Однако опыт показывает, что накопление наблюдательного материала в любой области астрономии, идет ли речь о планетах, звездах или галактиках, демонстрирует бесконечное разнообразие возможностей Природы и требует для своего объяснения всяческих комбинаций предложенных теоретиками "сценариев". Как любят говорить физики: "В природе происходит все, что не запрещено фундаментальными законами". А точку зрения астрономов наш друг Владимир Липунов выразил так: "Природа многообразнее наблюдательных данных" [51]. В результате все время приходится быть начеку, ожидая от многообразной природы какого-нибудь подвоха. Не успеешь сказать себе (или, что еще смешнее, объявить во всеуслышание): "Ну вот, теперь-то мы понимаем, как это

происходит!", как сейчас же обнаруживается новый наблюдательный факт, от которого содрогается, а то и вовсе рушится с трудом возведенное здание теории.

Поэтому мы обращаемся к читателю с неожиданной просьбой: пожалуйста, поменьше читайте научно-популярных книг по астрономии, ибо предмет, которому они посвящены, у вас над головой, а методы его исследования чаще всего так просты, что при известном желании доступны вам вполне. Мы просим вас, отложите эту книгу, возьмите в руки бинокль, хотя бы театральный, и идите на улицу или на балкон. Если сейчас зима, то обратившись лицом на юг, к созвездию Ориона, вы увидите под его "поясом" туманное пятнышко - знаменитую Большую туманность Ориона (если же еще не стемнело, то посмотрите пока без бинокля на рис. 7.1).

Свечение газа в этой туманности возбуждается четырьмя находящимися в ней очень горячими и очень молодыми звездами Трапеции Ориона. Однако светящаяся туманность - это только ничтожная часть гигантского холодного газового облака, занимающего почти все созвездие Ориона. Как жаль, что у вас нет радиотелескопа, чтобы полюбоваться этим облаком. В его недрах рождаются звезды. Многие из белых и голубых звезд, которые вы видите в созвездии Ориона и в соседних с ним созвездиях, сформировались в этом облаке и лишь недавно покинули его. А другие звезды (протозвезды) еще только формируются и не видны пока за толщей межзвездной пыли, заполняющей облако. Как жаль, что у вас нет инфракрасного телескопа, чтобы заглянуть в глубину облака. Ну, ничего, у нас его тоже нет. Поэтому мы вместе можем посмотреть на фото 1.1 и полюбоваться полученным западноевропейскими астрономами инфракрасным изображением группы протозвезд и сверхмолодых звезд, окруженных межзвездным газом и пылью. Вот они - рождающиеся звезды - перед нами. Стоит лишь захотеть и Книга звездного неба расскажет нам обо всем. На небе не бывает опечаток!

Посмотрите летом на созвездие Лебедя, а осенью - на созвездие Тельца: к какой бы области Млечного Пути ни обратился ваш взгляд, всюду вы увидите молодые звезды и места их недавнего рождения - светлые и темные туманности. Лишь почувствовав реальность звездного мира, его близость к нам, его "пульс", вновь вернитесь к этой книге. Быть может, теперь ее предмет покажется вам более живым и привлекательным. Вспомните, насколько интереснее листать семейные альбомы своих старых друзей, чем случайных знакомых. Узнав поближе звезды, посмотрев на их живой свет, возможно, вы с большим вниманием отнесетесь и к их "семейной хронике" - кто из них, где и при каких обстоятельствах родился.

И последнее.

С давних пор каждое поколение астрономов непременно стремится выразить свой взгляд на происхождение небесных светил. Обычно в науке сосуществует несколько точек зрения относительно рождения звезд и планет, а если принять в расчет мифологию, литературу и широкие слои любителей астрономии, то гипотез о появлении и путях развития космических тел наберется невероятно много. К настоящему времени их предложено уже столько, что в будущем, вероятно, не возникнет принципиально новых идей по этим вопросам, но на основе новой наблюдательной и экспериментальной информации будет производиться "отбраковка" слабых и уточнение наиболее перспективных из них. Впрочем, авторы будут рады, если этот прогноз окажется ошибочным.

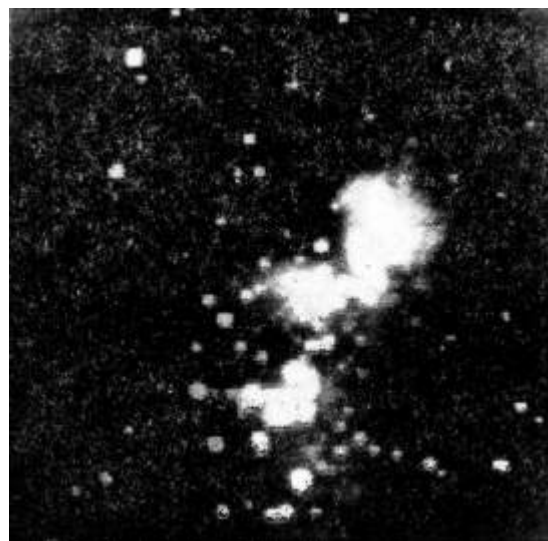


Рис. 1.1. Инфракрасное изображение скопления молодых звезд и протозвезд в холодном облаке рядом с Туманностью Ориона

Не имея физических приборов, таких как телескоп и спектроскоп, что могли узнать люди прошлого о природе и происхождении звезд? Давайте заглянем в старые книги: кроме наивных рассуждений и откровенных заблуждений мы обнаружим в них удивительно тонкие сопоставления и прозорливые догадки. Наиболее древние взгляды на природу звезд нам, вероятно, встретятся в сказках, мифах и легендах. Несмотря на кажущееся отсутствие эволюции звездного неба, на неизменное сияние одних и тех же светил, древний человек настойчиво пытался осознать пути происхождения окружающего мира. Вероятно, на основе повседневного опыта, демонстрирующего периодическое зарождение и гибель всего сущего, у многих народов появилась идея о дозвездной эволюции Вселенной. Современный ученый сказал бы, что это была сильная и очень нетривиальная идея. Большинство народов представляло себе начало мира довольно единообразно. В одной халдейской легенде говорится:

Сказка бушменов

"В то время, когда в вышине не было того, что называется небом, а внизу того, что зовут землей, существовал только Апсу (океан), отец их, и Тиа-мат (хаос), праматерь. Не различались ни день, ни ночь... Царила тьма, покрытая тьмой. Безбрежный мир состоял из бесформенной воды." (129 гимн из 10-й книги Риг-Веды, Индия; цит. по [1])

По сути, мысль о дозвездной эволюции мира есть не что иное, как идея о происхождении звезд.

Любопытно и то, что первичным веществом многие народы считали именно воду (H_2O), на 2/3 состоящую из атомов водорода. Пожалуй, среди всех знакомых древним народам веществ именно вода ближе всего по составу к дозвездному и звездному веществу. Однако известно это стало только в первой трети XX века, когда Ц. Пэйн (позже - Пэйн-Гапошкина, США), М. Саха (Индия) и А. Эддингтон (Англия) доказали, что и поверхность, и внутренние области Солнца и звезд состоят в основном из водорода. Итак, древние считали, что состояние материи всюду было однообразным, беспорядочным, одним словом - хаос. Каким же образом, под действием каких сил (сознательных или бессознательных) из первобытного хаоса возник космический порядок? В японских сказаниях о сотворении мира читаем:

"В древние времена, когда небо еще не было отделено от земли, существовал только изначальный эфир, смесь, похожая на яйцо. Ее прозрачная часть, благодаря своей легкости, вознеслась кверху и сделалась небом; все тяжелое, темное опустилось в воду и образовало землю" (цит. по [1]).

Как видим, древние космогонисты прекрасно обходились без руководящей и направляющей божественной силы, используя в качестве движущего начала гравитацию, которая разделила мир на составляющие части и привела их в движение. Эти взгляды очень близки к современным, хотя даже в наше время далеко не просто оказалось понять, каким образом простое физическое взаимодействие, которое в конечном счете ведет к нарастанию энтропии (т. е. к хаосу!), могло создать из беспорядка мир с очень сложной структурой. Только благодаря усилиям новой науки - синергетики - стало ясно, что "энтропия - это не просто безостановочное соскальзывание системы к состоянию, лишенному какой бы то ни было организации. При определенных условиях энтропия становится прародительницей порядка" [2].

Впрочем, не будем более детально заниматься интерпретацией мифов, а обратимся сразу к воззрениям древнегреческих философов, наиболее ярко отразивших научные взгляды древнего мира. Анаксагор (V век до н. э.) считал, что "Солнце - раскаленная металлическая глыба или камень... во много раз больше Пелопоннеса" [3]. В этом высказывании, по крайней мере, два качества Солнца - большой размер и высокая температура - подмечены верно. Величайший авторитет древности - Аристотель (IV век до н. э.) в трактате "О небе" продемонстрировал силу своих логических построений по вопросу о форме и движении

звезд:

"Что касается формы звезд, то наиболее логичным будет считать, что каждой из них присуща форма шарообразная. В самом деле, поскольку доказано, что им от природы не свойственно двигаться самостоятельно (ибо они прикреплены к небесным сферам), а природа ничего не делает бессмысленно или бесцельно, то ясно, что неспособным к движению (существам) она и форму дала такую, которая хуже всего приспособлена для движения. Но менее всего приспособлен к движению шар, поскольку у него нет никакого приспособления для движения, откуда ясно, что тела звезд шарообразны.

Кроме того, что верно для одной, то верно для всех, а Луна, как доказывает визуальное наблюдение, шарообразна: иначе, прибывая и убывая, она не была бы по большей части серповидной или выпуклой с обеих сторон и лишь однажды - имеющей форму полукруга. То же самое доказывает и астрономия: не будь Луна шарообразной, затмения Солнца не были бы серповидными. Следовательно, раз она шарообразна, то ясно, что и остальные таковы.

...Тепло и свет звезды испускают потому, что воздух подвергается трению от их движения. Движение раскаляет даже дерево, камни и железо; с еще большим основанием (оно должно раскалить вещество) более близкое к огню, каковым является воздух. Что касается верхних (тел - звезд), то из них каждое движется внутри сферы, и поэтому сами они не раскаляются, а вот воздух, находящийся под сферой круговращающегося тела, вследствие его движения должен нагреваться, и особенно от той сферы, к которой прикреплено Солнце. Вот почему при его приближении, восхождении и стоянии у нас над головой усиливается жар." [4]

Из этой длинной цитаты можно заключить, что, с одной стороны, Аристотель еще не видел явного различия между физической природой Луны и Солнца, но, с другой стороны, считал звезды подобными нашему дневному светилу, что в то время было далеко не так очевидно. Вопросы о происхождении звезд он, по-видимому, перед собой не ставил.

Но время шло, и эволюционные идеи прокладывали себе дорогу. Цицерон (I век до н. э.) сформулировал вопрос о происхождении звезд во вполне естественной для того времени форме: "...что могло возбудить в боге... желание украсить вселенную звездами и светилами?" Прямого ответа на этот вопрос Цицерон не дает, однако не упускает случая в довольно насмешливой тоне порассуждать о роли бога в эволюции Вселенной: итак, для чего же бог создал звезды? "Если для того, чтобы ему самому стало уютнее жить, то до этого он, видимо, в течение бесконечного времени жил в потемках, точно в лачуге какой-то. А после, надо полагать, бог стал радоваться той перемене, какая наступила на небе и на земле, украшенных так, как мы их сейчас видим? Но какая это могла быть радость для бога? А если была, то ведь не может быть, чтобы он был лишен ее столь долгое время." Далее Цицерон вообще не рассматривает манипуляции бога при формировании звезд, но сам высказывает определенную гипотезу на этот счет:

"Они... рождаются из подвижнейшей и чистейшей части эфира, без малейшей примеси другого элемента, так что они сплошь огненные и прозрачные... А то, что все они огненные, это подтверждают свидетельства двух наших чувств: осязания и зрения. Солнечный свет ярче любого другого огня, ведь он освещает мир на огромное расстояние в длину и ширину. И он дает нам не только ощущение тепла, но часто даже обжигает, что не могло бы произойти, не будь он огненным... И так как эфир - стихия тончайшая, в постоянном движении и полон силы, то и то, что в нем рождается, должно быть живым и необходимо должно отличаться и острейшей чувствительностью и величайшей подвижностью. А так как в эфире рождаются звезды, то следует думать, что и им присущи способность чувствовать и мыслить. Из чего следует, что звезды должны быть причислены к богам" [5].

Неправда ли, неожиданный поворот мысли; впрочем, хорошо известно, что древние часто отождествляли верховное божество с Солнцем, а само Солнце (и в этом мы видим существенный прогресс) некоторые из них определенно считали звездой. Например, у Цицерона читаем: "Прежде всего скажем о Солнце, которое занимает главенствующее положение среди звезд." Между прочим, еще Платон (IV век до н. э.) считал, что бог имеет шарообразную форму и непрерывно вращается с гигантской скоростью. Объединенные мысли Платона и Цицерона можно считать первым косвенным представлением о форме и вращении звезд.

Эпоха христианства на полтора тысячелетия приостановила процесс рождения новых космогонических идей. Разумеется, наука в этот период не стояла на месте, но развитие ее носило скорее количественный, чем качественный характер. В интересующей нас области длительное время заметного прогресса не наблюдалось. Скорее наоборот: плюрализм и фантазия греков уступили место довольно скучным каноническим утверждениям Священного писания. Впрочем, как любая новая идеология в период своего утверждения, христианство первых веков нашей эры допускало некоторую свободу мысли и критического анализа. Например, один из первых христианских богословов из Александрии - Ориген (185-254) отстаивал идею множественности населенных миров и задавался вопросами, характерными для греческих мыслителей:

"Если Вселенная имеет начало, то чем проявлялась деятельность Бога до сотворения Вселенной? Грешно и вместе с тем безумно было бы думать, что божественная сущность пребывала в покое и бездеятельности и было время, когда... всемогущество ее ничем не проявлялось. Полагаю, что еретик унелегко ответить на это. Что касается меня, то скажу, что Бог приступил к своей деятельности не в то время, когда был создан наш видимый мир, и подобно тому, как после окончания последнего возникает другой мир, точно так же до начала Вселенной существовала другая Вселенная... Итак, следует полагать, что не только существуют одновременно многие миры, но и до начала нашей Вселенной существовали многие вселенные, а по окончании ее будут другие миры." (цит по [6])

Считая возможными неоднократную гибель и возрождение Вселенной, Ориген, естественно, допускал гибель и повторное формирование звезд. Однако в канонизированном библейском тексте эволюция светил представлена крайне упрощенно:

"И сказал Бог: да будут светила на тверди небесной для освещения земли и для отделения дня от ночи, и для знамений, и времен, и дней, и годов; и да будут они светильниками на тверди небесной, чтобы светить на землю. И стало так. И создал Бог два светила великие: светило большее, для управления днем, и светило меньшее, для управления ночью, и звезды; и поставил их Бог на тверди небесной, чтобы светить на землю, и управлять днем и ночью, и отделять свет от тьмы. И увидел Бог, что это хорошо" (Бытие, гл. 1).

В средние века центр научной мысли переместился на восток. В Индии и арабских странах развивались астрономические наблюдения и даже высказывались сомнения относительно неподвижности Земли и, вообще, справедливости астрономической картины мира Аристотеля - Птолемея. Однако каких-либо оригинальных суждений о природе звезд, насколько нам известно, на Востоке не появилось.

Впрочем, если проследить развитие идеи всемирного тяготения - ключевой идеи в вопросах звездной эволюции, - то мы все же придем на средневековый Восток. Как известно, задолго до Ньютона в ясной форме идею о силе тяготения высказывал гениальный ученый и художник Леонардо да Винчи (1452-1519). В Европу эта идея могла проникнуть вместе с трудами среднеазиатского астронома Бируни (973-1048- гг.), который, критикуя Птолемея и рассуждая о возможности движения Земли, опирался на физическую идею о существовании тяготения между планетами. В свою очередь, эту идею Бируни заимствовал из сочинений индийских ученых" первым из которых ее высказал математик, астроном и философ VII века Брахмагупта ;[6].

В средние века наука перестала быть игрой ума; от нее ждали практических результатов.

Ученые того времени интересовались философским камнем, эликсиром жизни. ...До звезд ли им было. Официально осуждая алхимиков и астрологов (читай - химиков и астрономов), власти - светские и церковные - ждали от них практических результатов. Вот свидетельство знаменитого ученого тех лет Альберта фон Бельштедского (Альберта Великого, 1193-1280):

"Если ты имел несчастье войти в общество вельмож, они не перестанут терзать тебя вопросом: „Ну, мастер, как идет дело? Когда получим мы порядочные результаты?". И в нетерпении дожидаться конца опытов, они будут ругать тебя мошенником, негодяем и постараются сделать тебе всевозможные неприятности. И, если опыт у тебя не выйдет, они обратят на тебя всю силу своего бешенства. Если же ты будешь иметь успех, они задержат тебя в вечном плену, чтобы ты вечно работал для их пользы" (цит. по [11]).

И это были не пустые слова: современник Альберта Великого знаменитый Роджер Бэкон (1214-1292) был обвинен церковью в ереси и магии и посажен в тюрьму, где провел более 20 лет. Однако в темнице ему были выданы книги известных алхимиков и созданы условия для поиска философского камня. Что же еще оставалось Бэкону, как ни писать трактаты по алхимии. Так представители власти "направляли" работу ученых; в такой обстановке трудно было ожидать повышенного интереса к звездам.

ВОЗРОЖДЕНИЕ ИНТЕРЕСА К ЗВЕЗДАМ

Наступили времена великих географических открытий, и светская власть ощутила потребность в астрономии: стало поощряться строительство обсерваторий в публикация астрономических таблиц, необходимых для навигации. Но даже занятые практической деятельностью, разве могли ученые игнорировать фундаментальные вопросы мироздания: на рубеже XVI и XVII столетий появляются великие мыслители - Коперник, Бруно, Галилей, Кеплер,... Свои новые взгляды на устройство мироздания они отстаивали в борьбе не только с церковной цензурой, но и с косностью ученых мужей, представителей светской науки.

Галилей писал: "Сдается мне, что [у некоторых существует - авторы] твердое убеждение в том, будто при философствовании необычайно важно опираться на мнение какого-нибудь знаменитого автора... В действительности же... все обстоит не так. Философия написана в величественной книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики." [7]

Творцы новой науки призывают покончить с цитированием древних классиков и обратить глаза и мысли к природе, не принимая ничего на веру. "...Сильное удивление, начало философии, предшествует жажде познания, благодаря которой интеллект, чье бытие есть понимание, укрепляет себя исследованием истины",- писал выдающийся немецкий мыслитель Николай Кузанский (1401-1464) в трактате "Об ученом незнании" [9]. Еще лучше отточена эта мысль в "Опытах" Мишеля Монтеня (1533-1592): "В начале всяческой философии лежит удивление, ее развитием является исследование, ее концом - незнание." [10]

С удивлением мыслители эпохи Возрождения обнаруживают, что в картине мироздания, созданной корифеями древности, отсутствует логика. Николай Кузанский первым порывает с аристотелево-птолемеевым представлением о Вселенной и логически приходит к идее о Вселенной без центра и края, о равноправии Солнца и всех прочих звезд. В конце XVI века идеи Н. Кузанского воспринял и развил Джордано Бруно (1548-1600). Однако широкого распространения они не получили в силу своей умозрительности. Необходим был эксперимент, прямое наблюдение, способное потрясти сознание масс. Произошло это через

10 лет после казни Бруно, когда был построен первый телескоп.

Истинное удивление и интерес к звездам пробудился у исследователей природы вместе с рождением телескопа. Современники Галилея по достоинству оценили созданный им новый инструмент: "Низкий поклон твоему, Галилей, телескопу, что звезды приблизил", - писал Иоганн Фабер, соратник Галилея по Академии деи Линчеи. Хотя традиционно считается, что основные астрономические открытия Галилея связаны с Солнечной системой (спутники Юпитера, фазы Венеры, пятна на Солнце, горы на Луне и т. д.), не будем забывать, что и в мире звезд Галилей открыл несколько принципиально новых явлений. Об одном из них нам напоминает И. Фабер: "Новые звезды с небес к нам сквозь линзы спустились, равно и те, что Путь Млечный несметной толпой устилают". О втором открытии пишет, обращаясь к Галилею, другой его соратник по Академии - Франческо Стеллутти: он замечает, что хотя великие астрономы древности совершили немало удивительных открытий, "но и они не думали, что светлые пятнышки в небе превратятся в многие тысячи звезд" [7]. Именно открытие звездных скоплений, как мы увидим дальше, дало ключ к пониманию звездной эволюции.

Мысли самого Галилея о природе звезд нетрудно обнаружить в его "Диалогах". Вот Сагредо обращается к Симпличио: "...вы считаете звезды не чем иным, как только более плотными частями небес, а если это так, то плотность звезд должна почти бесконечно превосходить плотность остального небесного пространства; это очевидно из того, что небо в высшей степени прозрачно, а звезды в высшей степени непрозрачны и что там наверху нет никакого иного свойства, кроме большей или меньшей плотности, которое могло бы быть причиной большей или меньшей прозрачности." П самом деле, трудно что-либо возразить в ответ на такое утверждение, даже принимая во внимание самые современные сведения о формировании звезд из крайне разреженной межзвездной среды.

Однако мы еще больше удивимся, прочитав в "Диалогах" следующее: "Если существуют такие противоположности [плотности - авторы] среди небесных тел, то они также необходимо должны быть возникающими и уничтожаемыми." [8] Остается лишь догадываться, из каких соображений исходил Галилей, говоря о разрушении и воспроизведении звезд. Возможно, ему были памятли вспышки звезд, обнаруженные Тихо Браге в 1572 г., а также самим Галилеем, Кеплером и Д. Фабрициусом в 1604 г.

До появления телескопа Галилея не было полной ясности в вопросе о различии планет и звезд: с давних пор оно представлялось чисто кинематическим (планеты - "блуждающие звезды") и существовала изрядная путаница по этому вопросу. "Я полагаю, - писал Джордано Бруно, - что Земля есть звезда и что ей подобны Луна, планеты и другие звезды..." (цит. по [16]). Но наблюдения Галилея показали, что у планет есть диск, тогда как звезды и в телескоп кажутся точками. Правда, Галилею иногда казалось, что "шарики неподвижных звезд, особенно более крупных, легко различимы", что в телескоп он видит "едва заметный диск Сириуса", "диаметр которого не достигает и одной десятой диаметра Юпитера" (т. е. $\leq 3'' - 4''$). Судя по всему, источником заблуждения Галилея было атмосферное размытие изображений звезд и несовершенство оптики. Впрочем, он не акцентировал внимание на факте наблюдения звездных дисков, отмечая значительно более важный факт, а именно то, что звезды являются самосветящимися телами, тогда как планеты - нет: "Луна и все другие планеты внутри темны и сверкают, только когда их освещает Солнце" [7].

С одной стороны, изобретение телескопа усилило интерес публики к небесным светилам, а также к работам Коперника и Бруно, но с другой - заставило церковную цензуру более серьезно взяться за дело. Последней каплей, переполнившей чашу ее терпения, явился труд Галилея о солнечных пятнах (1613 г.): в 1616 г. "святая конгрегация" объявляет, что учение Коперника противоречит Библии. Работать стало небезопасно. Хорошо известна судьба Галилея. А вот как приходилось лавировать Декарту (1596-1650), пожелавшему в 1644 г. публично высказаться об эволюции Вселенной:

"Не существует никакого сомнения в том, что мир с самого начала создан вполне законченным; так, Солнце, Земля, Луна и звезды произошли именно такими, какие они теперь, ... Именно так учит христианская религия... Тем не менее, чтобы правильнее понять природу..., было бы гораздо полезнее подумать о том, как они могли постепенно развиваться из семени, вместо того, чтобы

считать их с самого начала произошедшими от руки Творца. Если бы мы могли найти простые и легко воспринимаемые принципы, с помощью которых доказали бы, что звезды, Земля и все живущее в мире происходит из семени, то мы поняли бы их гораздо лучше, чем при простом описании того, каковы они, хотя мы и знаем, что они произошли выше приведенным способом. Я верю в возможность найти такие принципы и потому опишу их здесь вкратце" (цит. по [1]).

Эволюционные идеи Декарта произвели большое впечатление на современников; ведь у его великих предшественников - Галилея и Кеплера - были совсем иные взгляды на жизнь звезд. В 1610 г., комментируя открытие Галилеем звездной природы Млечного Пути, Кеплер писал:

"Поэтому в будущем они [ученые] воздержатся от того, чтобы вместе с Браге рассматривать кометы и новые звезды как порождение Млечного Пути, если только они не желают говорить нелепости о гибели совершенных и вечных небесных тел." Знал бы Кеплер, как недалеко прошел он от истины! Однако в вопросе о сущности звезд Кеплер не заблуждался: он утверждал, что "неподвижные звезды испускают свет изнутри, а плотные планеты, наоборот, очерчены снаружи. Иначе говоря, если воспользоваться словами Бруно, неподвижные звезды - это Солнца, а планеты - Луны или Земли" [12]. При этом Кеплер скептически относился к учению Дж. Бруно о бесконечности Вселенной и бесчисленности в ней звезд, выдвигая в качестве контраргумента рассуждение о темноте ночного неба, но существу совпадающее с фотометрическим парадоксом Г. Ольберса, сформулированным лишь в 1826 г. Несмотря на то, что сам Кеплер считал Солнце уникальной звездой, а нашу планетную систему - единственной, он понимал, что окончательное решение этого вопроса находится в руках наблюдательной астрономии: "Вопрос о спутниках неподвижных звезд останется нерешенным до тех пор, пока кто-нибудь, владеющий искусством производить необычайно точные наблюдения, не откроет их" [12].

Первые годы телескопических наблюдений принесли открытие не только новых звезд, но и разреженного межзвездного вещества. В 1612 г. Н. Пейреск (1580- 1637) впервые упоминает в печати о "большой туманности Ориона"; в том же году С. Мариус (1570-1624) первым в Европе наблюдает и описывает большую туманность Андромеды (в течение последующих трех веков эта и другие спиральные галактики считались сравнительно близкими газовыми образованиями). Тогда же, в первой половине XVII века, в основном трудами учеников Галилея - Эванджелисты Торричелли (1608- 1647) и Джованни Альфонсо Борелли (1608-1679) были заложены основы гидравлики и пневматики. Вероятно, все это и подтолкнуло Рене Декарта к формулировке новой космогонической идеи, в которой главную роль играет вихревое, кругообразное движение эфира, захватывающее и сжимающее вещество будущих звезд и планет. Декарт, как, впрочем, и Кеплер, считал, что мир сплошь заполнен тончайшей материей - эфиром, который практически несжимаем и потому способен двигаться лишь по замкнутым траекториям. Это вихревое движение эфира играло в космогонии Декарта ту же роль, какую в большинстве других теорий позже стала играть сила всемирного тяготения.

Хотя в вопросах механики Декарт изрядно заблуждался, его теория формирования звезд и планет в результате вихревого движения космической среды многие годы привлекала внимание ученых и находила последователей. "Линию Декарта" в звездной и планетной космогонии можно проследить до наших дней: начиная от шведского энциклопедиста Э. Сведенборга (1688-1772) и до современных астрофизиков - К. Ф. фон Вейцеккера, Г. Гамова, Л. М. Озерного, А. Д. Чернина, Я. Оорта, Э. Харрисона, Х. Сато и др.

Итак, важнейшей заслугой Декарта была ясная эволюционная идея. Например, в письме к Томасу Морю он писал: "Наши мысли не могут охватить того, что мир имеет границы, поэтому мы говорим: он безграничен. Но из его безграничности в пространстве не следует бесконечность во времени". В письме к М. Мерсенну Декарт замечает: "Я не сомневаюсь, что и звезды всегда несколько изменяют свое взаимное расположение, хотя их и считают неподвижными". Декарт высказывал вполне конкретные идеи об эволюции звезд. Так, он считал, что с увеличением числа и размера пятен Солнце или звезда может постепенно потускнеть и, наоборот, - с уничтожением пятен они становятся ярче (напомним, что в 1639 г. была открыта циклическая переменность звезды Мира Кита). "Если пятна покрывают всю поверхность звезды, - утверждал Декарт, - то у нее может образоваться твердая кора и звезда

превратится в планету". Отголоски этих идей встречаются затем в различных космогонических теориях в течение нескольких столетий, а некоторые идеи Декарта, например, об изменении яркости больших участков звездной поверхности (то есть о пятнах), здравствуют и поныне.

ОТ НЬЮТОНА ДО ДЖИНСА

Новый период звездной космогонии начинается с приходом в науку Великого Ньютона (1642-1727). "При изучении наук примеры не менее поучительны, нежели правила."

Идеи Ньютона оказались настолько важны, что часто с его имени вообще начинают изложение научной космогонии (см., например, [13]). Следует заметить, что идея Ньютона о гравитационной конденсации разреженного вещества в звезды не была совершенно оригинальной. Напротив, она была достаточно естественной для того времени и легко воспринималась. Например, Ф. Тиссеран и А. Андуайе отмечали, что еще "Тихо Браге рассматривал новую звезду 1572 года, как происшедшую из эфирного вещества Млечного Пути. Вообще, между астрономами было очень распространено мнение, что светила образовались через последовательное сгущение весьма разреженной материи, рассеянной в пространстве. Это мнение высказывалось еще Анаксименом Ионийской школы (VI век до н. э.)" [14].

И. Ньютон

Однако во второй половине XVII века гипотеза о конденсации звезд из разреженного вещества воспринималась совсем по-иному: из умозрительной идеи она начала превращаться в научную теорию. Во-первых, трудами прилежных наблюдателей неба, усовершенствовавших телескоп, к концу XVII века было обнаружено немало светлых туманностей, т. е. как раз то самое "разреженное вещество". А, во-вторых, Ньютон создал теорию гравитации, способную объяснить причину конденсации космического вещества в звезды. И вот через 5 лет после того, как Исаак Ньютон опубликовал свой закон тяготения, его друг, преподобный Ричард Бентли, стоявший тогда во главе Тринити - колледжа в Кембридже, в письме к Ньютону спрашивает о том, не может ли быть только что открытая сила тяготения причиной образования звезд. Ньютон письмом от 10 декабря 1692 г. отвечает ему следующее:

"Мне кажется, что если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно в небесных глубинах" и если бы каждая частица имела врожденное тяготение ко всем остальным, и если бы наконец, пространство, в котором была бы рассеяна эта материя, было бы конечным, вещество снаружи этого пространства благодаря указанному тяготению влеклось бы ко всему веществу внутри и вследствие этого упало бы в середину всего пространства и образовало бы там одну огромную сферическую массу. Однако, если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не могло бы объединиться в одну массу, но часть его сгущалась бы тут, а другая там, образуя бесконечное число огромных масс, разбросанных на огромных расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Именно так могли образоваться и Солнце и неподвижные звезды, если предположить, что вещество было светящимся по своей природе" [34].

Эти слова великого физика, по сути, верны и сегодня; в них впервые прозвучала мысль о том, что сила гравитации способна разделить разреженное вещество на части и сформировать из них звезды. Ньютон верно предугадал характер поведения непрерывной среды под действием силы тяжести. И хотя точную математическую формулировку и решение этой проблемы получил уже в XX веке другой английский физик - Джеймс Джинс (1877 - 1946), идея Ньютона о гравитационной неустойчивости и фрагментации (т. е. распаде

на части) разреженного космического вещества быстро завоевала популярность. К ней обращались многие ученые в попытке воссоздать картину рождения звезд и планет.

Не могли пройти мимо эволюционных идей Ньютона и представители духовенства. Молодой Джордж Беркли (1685--1753), будущий епископ Беркли, стоявший у истоков объективного идеализма, записал в 1707 г. в своем философском дневнике: "Моя доктрина прекрасно соответствует [идее] творения: я считаю, что ни материя, ни звезды, ни Солнце и т. д. не существовали прежде" [17].

Любопытно, что в XVIII веке теоретическая космогония явно опережала наблюдательную. Опираясь на закон всемирного тяготения и на имеющиеся немногочисленные астрономические факты, физики и философы (часто представленные в одном лице) пытались уже в первой половине XVIII века построить непротиворечивые космогонические модели. Особенно впечатляющими были работы Томаса Райта (1711-1786) "Теория Вселенной" (1750 г.), Иммануила Канта (1724-1804) "Общая естественная история и теория неба" (1755 г.) и Иоганна Ламберта (1728-1777) "Космологические письма об устройстве Вселенной" (1761 г.). В этих работах высказывались правильные догадки о форме и движении Млечного Пути, а также о звездной природе других туманностей эллиптической формы. В них даже предсказывалось существование физически двойных звезд и систем, состоящих из галактик (Ламберт). Наибольший интерес к эволюции звезд проявил Кант. Помните, что его удивляло звездное небо над головой и моральный закон в человеке. Выделяя среди всех произведений природы самое удивительное, великий мыслитель назвал звездное небо, не просто космос, окружающий мир, а конкретно - звездное небо, т. е. звезды.

Разрабатывая свою концепцию формирования звезд и планет, Кант, вероятно, был знаком с работой Жан-Жака Дорту де Мэрана "Физический и исторический трактат о северном сиянии" (1733 г.), в котором впервые были выдвинуты обоснованные предположения о природе туманностей. Исследуя северное сияние, Мэран обратил внимание на солнечную корону, наблюдаемую во время затмений, и предположил, что потоки солнечного вещества, вторгаясь в атмосферу Земли, становятся причиной ее свечения. А далее он предположил, что у некоторых звезд эти потоки могут быть значительно сильнее, чем у Солнца. "Вещество, выбрасываемое такими звездами, могло бы выглядеть как туманные пятна в небесах", - заключил Мэран [18]. В свою очередь Кант разработал концепцию превращения разреженных туманностей в звезды и планеты. Так в середине XVIII века окончательно сформировалась идея об обмене веществом между звездами и межзвездной средой.

Однако широкое признание эта идея получила не сразу, даже несмотря на авторитет Канта-философа. Отчасти виной тому была "скромность" самого Канта, опубликовавшего "Теорию неба" анонимно и не позаботившегося о распространении книги; но в большей степени, вероятно, читателей настораживал умозрительный характер космогонических построений, не имевших под собой ни серьезной математической, ни наблюдательной базы (очень живо этот период в истории астрономии описал Ч. Уитни [18]). Не будем забывать, что это были годы, когда астрономы достигли высочайшей точности наблюдений, позволившей обнаружить тонкие эффекты в движении Земли, планет и звезд; когда Л. Эйлер построил рафинированную теорию движения Луны, а вычисления А. Клеро позволили точно предсказать появление кометы Галлея. На фоне этих успехов астрономии космогонические гипотезы нуждались хотя бы в качественной проверке путем наблюдений. Такая возможность появилась только во второй половине XVIII века.

Если список Э. Галлея в 1714 г. содержал лишь шесть "туманностей" (т. е. неточечных, нечетких объектов), то в списке Н. Лакайля, проводившего наблюдения на мысе Доброй Надежды, к 1755 г. было зафиксировано уже 42 туманности южного неба. Правда, сам Лакайль, по-видимому, считал их неразрешенными звездными скоплениями. Особенно обострился интерес к объектам незвездной природы после 1759 г., когда произошло триумфальное появление предвычисленной кометы Галлея. Ловцы комет с помощью светосильных инструментов стали отыскивать на небе расплывчатые пятнышки новых комет и, чтобы не путать их с далекими неподвижными туманностями, заносили последние в специальные списки. Так появился первый каталог туманностей и звездных скоплений, составленный в 1783 г. Шарлем Мессье и Пьером Мешеном. Среди 103-х объектов этого знаменитого каталога многие имеют прямое отношение к процессу звездообразования - это газовые туманности и скопления молодых звезд.

Грандиозным вкладом в наблюдательную космогонию явилась работа Вильяма Гершеля (1738-1822), который создал крупнейшие для своего времени телескопы и обнаружил с их помощью много новых астрономических объектов. О его поразительно целеустремленной и плодотворной жизни написано немало статей и книг, которые мы не собираемся пересказывать (см., например, [19, 20]). Отметим только, что если Мессье за 30 лет поисков обнаружил сотню туманностей, то Гершель за такой же период (1783-1818) открыл более 2,5 тыс. новых туманностей, новую планету (Уран), спутники, кометы, около тысячи двойных и кратных звезд и т. д.

Гершель не удовлетворился обнаружением новых объектов: он стремился свести все наблюдаемые формы туманностей в единую последовательность и дать ей эволюционное толкование. Теоретической основой для него служила теория гравитации Ньютона: "Почему бы нам не счесть причиной всякого сгущения, аккумуляции, сжатия и концентрации вещества туманности всемирное тяготение вещества?" [18]. Гершель полагал, что разреженное, диффузное вещество заполняет пространство Галактики в большом избытке. При этом все неразрешимые для его телескопов туманности он считал диффузными, т. е. в большинстве случаев он не разделял истинные газопылевые туманности и далекие звездные системы - галактики. Вещество диффузных туманностей Гершель считал самосветящимся и большую его яркость в некоторых местах туманности объяснял большей концентрацией там вещества. Гершелю казалось, что в разных туманностях он наблюдает последовательные стадии сгущения разреженного вещества в звезды и, более того, что ему удалось заметить эволюционные изменения отдельных туманностей (например, в Орионе), которые за многолетний период наблюдений якобы претерпевают заметное изменение формы.

Результатами наблюдений Гершеля живо интересовался его не менее знаменитый современник, математик и астроном Пьер-Симон Лаплас (1749-1827). И хотя ученых разделял Ла-Манш, их взгляды на происхождение небесных светил оказались очень близки. Вот как выразил их Лаплас в своем капитальном "Изложении системы мира"

"Гершель, наблюдая туманности в свои мощные телескопы, заключил о прогрессе их сгущения не по одной из них, - потому что заметить прогресс сгущения можно только по прошествии веков, - а по совокупности всех, подобно тому, как о росте деревьев в обширном лесу судят не по наблюдению" одного дерева, а рассматривая все вместе и замечая присутствие особой различного возраста и размеров. Он сперва наблюдал туманное вещество в виде различных скоплений, рассеянных по небу и занимающих на нем большие пространства. Затем в некоторых из них он заметил слабое сгущение около одного или нескольких ядер со слабым блеском. В других туманностях эти ядра блестят значительно сильнее окружающей туманности. Атмосферы ядер начинают отделяться вследствие позднейшего сгущения, и происходят сложные туманности, состоящие из нескольких блестящих ядер" близких друг к другу и окруженных каждое своею атмосферою; иногда туманное вещество, сгущаясь равномерно, производит планетарные туманности (т. е. туманности круглой или слегка эллиптической формы, делающей их похожими на планеты нашей системы). Наконец, еще высшая степень сгущения превращает эти туманности в звезды. Туманности, расставленные на основании этой философской точки зрения, с большой вероятностью указывают на будущее их превращение в звезды и на предшествующее туманное состояние существующих звезд. Таким образом, от рассмотрения процесса сгущения туманностей мы приходим к картине Солнца, окруженного некогда обширною атмосферою, - картине, к которой я, с другой стороны, пришел, восходя от рассмотрения планетных движений. Такое замечательное совпадение при следовании различными путями придает большую вероятность указанному первоначальному состоянию Солнца" (цит. по [14]).

Судя по всему, Лаплас узнал о космогонических идеях Канта лишь в последние годы своей жизни. Тем поразительнее совпадение их взглядов. Сравните приведенные выше слова Лапласа с высказыванием Канта: "Я полагаю, что в начале вся материя, находящаяся теперь в Солнце, планетах и кометах, была распространена в том пространстве, где эти тела теперь

вращаются" [1]. А ведь нельзя сказать, что в те годы не существовало конкурирующих взглядов на эволюцию Солнечной системы: взять хотя бы катастрофическую гипотезу Ж. Бюффона (1745 г.), согласно которой вещество планет было выбито с поверхности Солнца налетевшей на него кометой. Эта, на первый взгляд, странная точка зрения, модифицируясь, просуществовала до наших дней и время от времени серьезно конкурировала с гипотезой конденсации.

Разумеется, Лаплас и Гершель ощущали куда большую уверенность в своих взглядах, чем Кант: ведь их рассуждения покоились на прочном фундаменте наблюдений! Но природа в данном случае преподнесла ученым хороший урок. Лишь столетие спустя выяснилось, что великолепные наблюдения Гершеля и прекрасная теория Канта и Лапласа не имели друг к другу почти никакого отношения. Среди объектов, расставленных Гершелем в единую эволюционную последовательность были... далекие галактики, расширяющиеся планетарные и эмиссионные туманности, звездные скопления - одним словом, самые разнородные, генетически не связанные между собой объекты, среди которых, по-видимому, не было ни одного, сжимающегося под действием гравитации в звезду. Сегодня бы мы сказали, что при сопоставлении теории Канта - Лапласа с наблюдениями, факты оказались "притянуты за уши". Да и откуда было знать ученым тех лет, что для обнаружения и исследования истинных предшественников звезд нужны не оптические, а радио и инфракрасные телескопы, которые появятся лишь через два столетия.

Впрочем, по иронии судьбы внимательный Гершель все же отметил существование в межзвездном пространстве плотных газопылевых облаков, но прошел мимо этого факта, дав ему совершенно неверное объяснение. Вот как рассказывала об этом сестра великого астронома Каролина в письме сыну В. Гершеля Джону Гершелю, также известному астроному: "Однажды вечером" когда ваш отец рассматривал небо в созвездии Скорпиона, он после долгого мучительного внимания вдруг воскликнул: "Здесь, вероятно, дыра в небе!" После долгого рассматривания этого места он утомленный, наконец? оставил его". Решив, что обнаружены отверстия в небесах, Гершель интерпретировал это как признак гравитационного окучивания звезд и распада Галактики на отдельные части. Вслед за ним астрономы придерживались этой мысли до начала XX века. Так оказались замеченными, но не разгаданными истинные области зарождения звезд - холодные и плотные, темные и совершенно непрозрачные для света межзвездные облака (рис. 4.1).

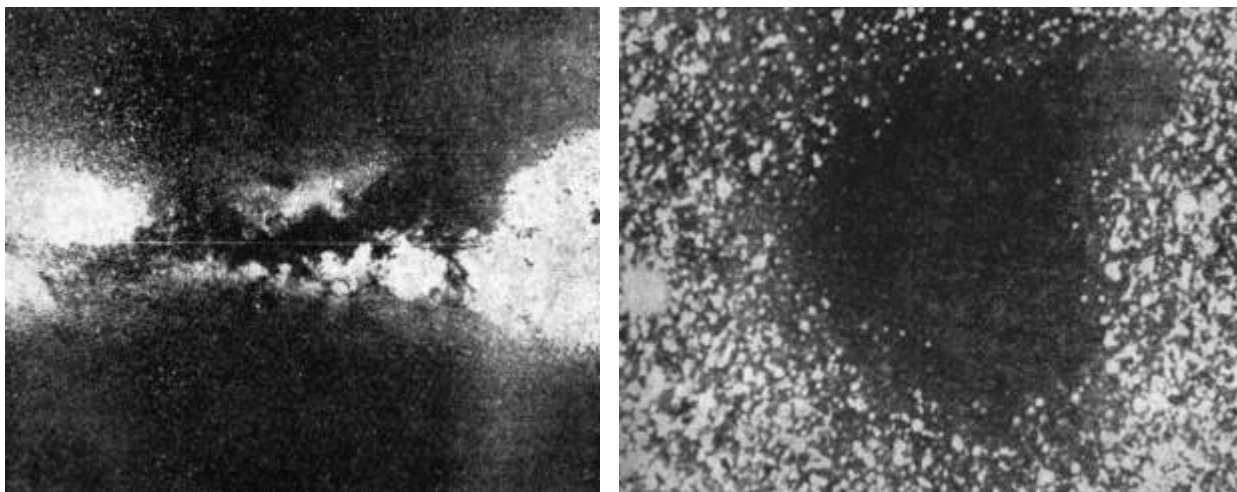


Рис. 4.1. Участок Млечного Пути с темными облаками (левый снимок): увеличенное изображение одной из "дыр в небесах", известной сейчас как объект Барнарда №68; это темное облако, поглощение света в котором достигает 25^m (правый снимок).

Этот исторический курьез не сильно дискредитировал теорию формирования звезд путем гравитационной конденсации, но послужил астрономам хорошим уроком; с тех пор они уже не торопились объявлять свои теоретические разработки окончательно подтвержденными наблюдениями, а скромно именовали их моделями, понимая всю ограниченность наших простых схем на фоне немыслимого многообразия природы. Характерны в этом смысле слова Джона Гершеля (1792-1871), написанные им через 4 года после смерти отца: "Поле предположений так широко и аналогии, на которые мы должны полагаться, так ненадежны,

что в настоящее время нам, пожалуй, следует отказаться от гипотез и обратиться (быть может, на века) к наблюдениям" [18]. А чуть позже французский позитивист Огюст Конт (1798- 1857) вообще объявил принципиально непознаваемыми химический состав и физические характеристики звезд. Но астрофизика уже стучалась в двери...

В 1839 г. Л. Дагер (1787-1851) изобрел фотографию, которая к 1858 году стала систематически использоваться для астрономических наблюдений. В 1859 г. трудами Р. В. Бунзена (1811-1899) и Г. Р. Кирхгофа (1824-1887) родился спектральный анализ, дававший возможность оценить качественный химический состав светящегося или частично поглощающего свет вещества (количественный спектральный анализ появился только в 20-х годах нашего века в результате развития квантовой физики). Использовать призму для анализа звездного света впервые попытался еще В. Гершель. В 1863 г. Анджело Секки (1818-1878) на основе визуальных наблюдений цвета и спектра звезд предложил для них первую спектральную классификацию, просуществовавшую до начала XX века.

Во второй половине XIX в. в физике звезд стал намечаться перелом. Джеймс Клерк Максвелл (1831- 1879) в лекции, прочитанной в 1870 г. перед членами Британской ассоциации развития науки, напомнил, что "если бы нас спросили несколько лет тому назад, в какой из областей физики было меньше всего произведено открытий, то мы указали бы, с одной стороны, на безнадежно далекие неподвижные звезды, а с другой стороны, на непостижимо тонкое строение материальных тел. Действительно, если считать Конта в известной мере представителем научных взглядов его времени, то нужно признать, что исследование явлений, совершающихся за пределами нашей солнечной системы, беспредельно трудно, если не совсем безнадежно". "Но теперь, - отмечает Максвелл, - успехи ряда блестящих спектроскопических открытий... сделали химию небесных тел объектом человеческого исследования" [22].

Несмотря на большие трудности визуального наблюдения звездных спектров, ибо они крайне слабы, основоположник астрофизики - А. Секки изучил спектры 4000 звезд и разделил их на 5 классов. К первому классу он отнес белые звезды типа Веги и Сириуса с небольшим числом темных линий водорода. Во второй класс попали желтые солнцеподобные звезды, в спектре которых хорошо заметны линии металлов. К третьему классу были отнесены оранжевые и слегка красноватые звезды типа Бетельгейзе с большим количеством темных линий. А в четвертый класс оказались объединены красные звезды с широкими темными полосами в спектре. Секки справедливо полагал, что вдоль этой последовательности уменьшается температура атмосферы звезд вследствие их постепенного остывания и угасания. Он считал возможным даже существование темных звезд, покрытых твердой корой, а появление на небе новых звезд связывал с периодическим разрушением такой коры и выбрасыванием из-под нее раскаленных газов. На эту мысль натолкнул его эмиссионный спектр новых звезд, а также некоторых переменных. Звезды всех типов с яркими линиями водорода в спектре Секки объединил в особый пятый класс, считая его, вероятно, заключительным в эволюционной последовательности [23]. Любопытно, что такая примитивная эволюционная схема в целом оказалась ближе к нашим нынешним представлениям, чем эволюционные сценарии первой половины XX века, когда считалось, что сначала звезда, сжимаясь, из красного гиганта превращается в нормальную горячую звезду, а затем эволюционирует в результате потери массы в сторону красных карликов.

С помощью спектроскопа Секки смог не только предложить типизацию звезд, но и окончательно установил различие между отдаленными скоплениями звезд - галактиками, с одной стороны, и истинными газовыми туманностями, заполняющими нашу звездную систему, - с другой. К тому же Секки всерьез заинтересовался черными пустотами в Млечном Пути, которые Гершель считал "окошками". Секки настаивал на том, что это гигантские облака темных газов, проецирующиеся на светлый фон далеких звезд. Теперь-то мы знаем, насколько прав был "отец астрофизики" и как близко он подошел к обнаружению предшественников звезд; но и через 50 лет после этого, уже в начале XX века астрономы склонны были разделять взгляды Гершеля и находили гипотезу Секки маловероятной.

Во второй половине XIX века интерес ученых к звездам определялся не столько проблемой их происхождения, сколько поиском источников их излучения, как этого требовал сформулированный в те годы закон сохранения энергии. Совершенно очевидно было, что химические источники энергии для этого не годятся: например, горение угля могло бы

поддерживать излучение Солнца всего около 6000 лет. Вероятно, вспомнив идею Ньютона о возможном падении на Солнце комет, один из авторов закона сохранения энергии Ю. Майер (1814-1878) предположил, что поверхность Солнца постоянно разогревается в результате падения на нее метеорного вещества. В 1853 г. Г. Гельмгольц (1821-1894) указал, что источником солнечной энергии может быть его непрерывное сжатие под действием собственной гравитации. Однако У. Томсон (лорд Кельвин, 1824-1907) подсчитал, что согласно взглядам Майера и Гельмгольца Солнце могло бы стабильно светить в прошлом лишь несколько десятков миллионов лет.

Действительно, при падении вещества на Солнце или при собственном сжатии светила выделяется энергия порядка гравитационной энергии связи $|U|=GM_{\odot}^2/R_{\odot}$, где $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г - масса Солнца, $R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$ см - радиус Солнца, G - постоянная тяготения. Зная мощность излучения Солнца, его светимость ($L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с), легко оценить время высвечивания гравитационной энергии: $t=GM_{\odot}^2/(R_{\odot}L_{\odot})= 3 \cdot 10^7$ лет. Но такая короткая шкала времени (шкала Кельвина - Гельмгольца) явно не соответствовала геологическому возрасту Земли. Поэтому вопрос об источниках энергии звезд на время отодвинул все прочие проблемы их эволюции.

Не подозревая о внутриядерных источниках энергии, астрофизики второй половины XIX века довольно подробно разработали сценарий эволюции Солнца с учетом лишь гравитации и превращения химической энергии. Так, А. Риттер (1826-1908), рассматривая эволюцию звезды при выделении гравитационной энергии, в 1883 г. предположил, что звезды-гиганты находятся на стадии гравитационного сжатия, а красные карлики - это остывающие звезды [24]. Поскольку средняя плотность Солнца (1,4 г/см³) близка к плотности жидких и твердых тел, считалось, что внутренние области Солнца находятся не в газообразном, а в сконденсированном состоянии, и его сжатие в основном закончилось. В этом случае продолжительность свечения Солнца зависит от запаса его внутренних источников энергии. Каков этот запас?

Тепловая (кинетическая) энергия атомов Солнца составляет $3 \cdot 10^{48}$ эрг, запас химической энергии (диссоциация, ионизация и возбуждение молекул и атомов) тоже около $3 \cdot 10^{48}$ эрг, а запас лучистой энергии составляет $3 \cdot 10^{47}$ эрг. За счет этих запасов Солнце могло бы излучать 50 млн лет - срок также явно недостаточный для эволюции Солнечной системы. Отчаявшись объяснить длительное излучение Солнца и звезд, некоторые ученые предлагали для поддержания энергии звезд совершенно нелепые происшествия, например, их взаимные соударения (Л. Круль, 1848-1908), а иные исследователи даже переставали доверять физике: "Нельзя утверждать, - писал Ч. Юнг (1834-1908), - что не может быть таких средств, о которых мы не имеем никаких представлений, и с помощью которых энергия, по-видимому, потерянная в пространстве, может быть возвращена, по крайней мере, отчасти" [25].

Однако не торопитесь снисходительно улыбаться. Кто знает, где проходит граница между пустой фантазией и научной интуицией? Попробуйте на минуту представить себя естествоиспытателем середины XIX века, размышляющим над природой энергии звезд и читающим только что опубликованную книгу аббата Секки "Солнце": "Химики говорят нам, что атомные веса простых тел суть кратные атомных весов водорода;... Многие философы заключали, что каждое из тел, какие мы считаем простыми, может быть рассматриваемо как химическое соединение известного числа атомов водорода. Если эта гипотеза верна, то возможно, что при температуре, какую имеет солнечный шар, диссоциация распространяется одинаково и на эти первичные элементы,... Там был бы источник теплоты, ибо всякая диссоциация предполагает значительное количество скрытой теплоты, которая должна проявиться в момент соединения. Мы не хотим, однако, придавать этим гипотезам большее значение, чем они в действительности имеют его в глазах ученых, которые далеки от того, чтобы считать их неоспоримыми; мы с удовольствием только указываем на них, чтобы дать пример богатства и неисчерпаемого обилия тех средств, какие природа может иметь в своем распоряжении" (цит. по [26]). Вероятно, ученый XIX века лишь удивился бы: "Превращение элементов? Какой абсурд!". Но ведь сегодня нам, знакомым с термоядерными реакциями, подобные идеи уже кажутся тривиальными.

Начиная с 70-х годов прошлого века, когда в работах Дж. Лэна и А. Риттера были заложены

основы теории внутреннего строения звезд, эта теория стала развиваться самостоятельно и почти независимо от проблемы происхождения и формирования звезд. С историей развития наших взглядов на строение и эволюцию звезд можно познакомиться по книгам [15, 24, 27, 28]. Мы же, оставаясь в рамках обозначенной темы, продолжим знакомство только с развитием взглядов на происхождение звезд.

Итак, к концу XIX в. единственным надежным источником энергии звезд считалось гравитационное сжатие. Как мы теперь знаем, выделение гравитационной энергии и химические процессы (диссоциация молекул и ионизация атомов) играют определяющую роль лишь в период формирования звезды и в редкие моменты ее внутренней перестройки. Основным же источником энергии в период длительной нормальной эволюции звезды являются термоядерные реакции. Впрочем, у звезд очень малой массы и у планет-гигантов условия для термоядерных реакций никогда не возникают и их излучение может поддерживаться гравитационным сжатием миллиарды лет.

Изучая в конце XIX в. сжатие звезд, астрономы столкнулись с еще одной важной проблемой - с проблемой вращения звезд и образования двойных звездных систем. Дело в том, что гравитационное сжатие при сохранении момента вращения ведет к увеличению угловой скорости звезды. Математический анализ показал, что в результате этого звезда сначала принимает форму сжатого эллипсоида, напоминающего чуть сплюснутую булочку, а затем по мере увеличения угловой скорости превращается в плоскую круглую "ватрушку" и, в конце концов, стремится стать диском (рис. 4.2). Эту последовательность фигур равновесия называют сфероидами К. Маклорена (1698-1746). Однако равновесие, как известно, не всегда бывает устойчивым. При определенной скорости вращения сфероид может потерять осевую симметрию и превратиться в вытянутый эллипсоид К. Якоби (1804- 1851), по форме напоминающий пирожок. По мере увеличения удельного момента вращения фигуры равновесия в этой последовательности сначала принимают форму сигары, а затем - длинной тонкой спицы. Однако, как показал А. Пуанкаре (1854-1912), и эта последовательность в определенный момент становится неустойчивой, и фигуры равновесия могут принять форму груши, переходящей в гантель и, в конце концов, в "песочные часы". Следующим шагом является разрыв этой фигуры на две части, т. е. формирование двойной звезды. Эти исследования вызвали большой интерес, поскольку, в принципе, давали ключ к объяснению происхождения двойных звезд и двойных планет типа Земля - Луна [29].

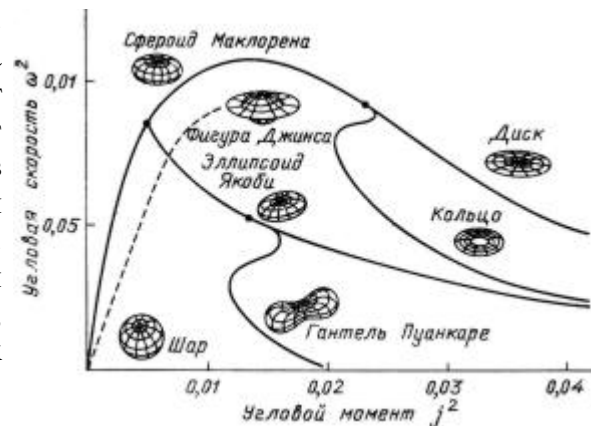


Рис. 4.2. Последовательность фигур равновесия самогравитирующих тел из несжимаемого (сплошные линии) и сжимаемого (пунктир) вещества. Отмечены точки бифуркации, в которых появляются новые последовательности фигур. По осям: квадрат безразмерного углового момента $j^2 = J^2 / (4\pi GM^{10/3} \rho^{-1/3})$ и квадрат безразмерной угловой скорости $\omega^2 = \Omega^2 / (4\pi G)$, где Ω , J и M - угловая скорость, угловой момент и масса тела.

Описанные выше формы вращающихся тел могут принимать сравнительно однородные звезды и планеты (ибо все расчеты проводились для жидких несжимаемых тел). Если же плотность звезды существенно возрастает к ее центру, то, как показал в 1919 г. Дж. Джинс, сжимаясь в форме сфероида Маклорена, звезда достигает такого состояния, когда гравитационное ускорение на ее экваторе уравновешивается центробежным. Поскольку при дальнейшем сжатии центробежная сила начинает превышать силу тяготения, на экваторе начинается непрерывное истечение вещества [30]. Эти исследования оказались полезными для теории формирования звезд, однако ее развитие не было подкреплено необходимыми наблюдениями.

Правда, в конце XIX - начале XX вв., когда на крупных телескопах стали использовать спектроскопию и фотографию, были получены, как тогда казалось, новые факты для теории звездообразования. С одной стороны фотографии многих туманностей (туманных пятен) выявили их спиральную или концентрическую структуру. Это прямо связывалось с предсказанием теории Канта - Лапласа о развитии протосолнечной туманности. Но, с другой стороны, спектры спиральных туманностей (галактик!) совсем не были похожи на спектр горячего разреженного газа, из которого должны были бы состоять эти туманности. Вместо отдельных ярких линий на темном фоне, которые указывают на присутствие разреженной

плазмы, наблюдался непрерывный спектр с темными линиями поглощения - типичный автограф солнцеподобных звезд. И хотя астрономы правильно заключили, что перед ними "звездные кучи", авторитет спектроскопа в те годы еще уступал авторитету прямого изображения объекта: ведь в очертаниях спиральных галактик так ясно угадывалась протопланетная туманность Канта - Лапласа! Очень хотелось верить, что идеи великих теоретиков прошлого получили наблюдательное подтверждение. Дадим слово одному из лучших популяризаторов астрономии тех лет Герману Клейну (1844-1914): "В созвездии Андромеды находится туманное пятно... Спектроскоп показал, что эта туманность обладает непрерывным спектром, подобно неподвижным звездам. Но спектр газообразных туманностей всегда состоит из нескольких светлых линий. Отсюда следует, что туманность в Андромеде в действительности представляет собой звездную кучу. Эта последняя кажется нам в виде туманности лишь благодаря своему громадному расстоянию от нас" [31]. До сих пор все абсолютно верно, более того,- прозорливо. Пройдет немало лет, возникнет еще немало заблуждений,. прежде чем истинность этих слов станет очевидной. Но читаем дальше:

"Особенно важны те показания фотографии, которые вскрывают перед нами строение туманности. Тут ясно и отчетливо видно, что громадная туманность имеет спиральную форму. Правильнее будет сказать, что туманность состоит из колец... В отдельных местах этих колец заметны громадные клубки туманного вещества. Получается такое впечатление, словно на кольцах образуются спутники. ...Скажем прямо, фотография туманности Андромеды... рисует перед нами эту туманность как раз в том виде, какой, согласно лапласовой гипотезе, должно было иметь туманное вещество, давшее начало планетам Солнечной системы. ...Отныне капто-лапласово учение перестает уже быть шаткой гипотезой: оно становится научно обоснованным фактом. И с гордостью человек может утверждать отныне, что ему удалось разгадать процесс образования миров. После всего сказанного выше нельзя уже сомневаться, что из туманных пятен с течением времени образуются неподвижные звезды с планетными системами" [31]. Стоит ли говорить, что этот пафос был несколько преждевременным: ни тогда, ни даже сейчас астрономы прямо не наблюдали процесс рождения звезд с планетными системами.

Чем же было стимулировано высказывание Клейна? Возможно, причиной этого был любопытный исторический казус, о котором нам любезно сообщил Н. Н. Самусь. Произошло это в конце прошлого века в обсерватории Дерптского университета (ныне г. Тарту, Эстония) в ночь с 20 на 21 августа 1885 г. Закончив беседу о гипотезе возникновения мира Канта и Лапласа, группа ученых гостей обсерватории вместе с известным астрономом Э. Хартвигом отправилась наблюдать в телескоп Большую туманность Андромеды (M31), которую в то время принято было считать вращающейся газовой туманностью - предтечей звезды с планетной системой.

Каково же было удивление ученых, когда в центре Туманности Андромеды они увидели яркую оранжевую точку, которой за несколько дней до этого не было. Раздался изумленный возглас: "В этой туманности уже есть центральное солнце!". Однако день ото дня новая звезда слабела и вскоре исчезла совсем. Удивительный объект получил у астрономов обозначение S And (подобным образом в те годы обозначали переменные звезды). И лишь позже выяснилось, что в действительности ученые наблюдали взрыв сверхновой в соседней галактике. Однако, благодаря таким открытиям, эволюционные идеи завоевывали естествознание и требовали изучения процесса формирования звезд и их последующей жизни. Наступал XX век...

ОТ ДЖИНСА ДО НАШИХ ДНЕЙ

Джеймс Хопвуд Джинс (рис. 5.1), только что "...разумно надеяться, что в не слишком блестяще закончивший Кембриджский университет, отдаленном будущем мы сможем понять такую простую вещь, как звезда." [24] в течение нескольких лет выполняет серию выдающихся работ по разным разделам теоретической физики: он публикует монографию по кинетической теории газов, исследования по молекулярной физике и теории излучения [33]. В начале 1900-х годов под влиянием профессора астрономии и физики Кембриджского университета Джорджа Говарда Дарвина (сына знаменитого биолога Чарлза Дарвина) Джеймс Джинс выполняет серию работ по теоретической астрофизике. Среди них была и фундаментальная работа "Устойчивость сферической туманности", опубликованная в 1902 г. в "Сообщениях Лондонского королевского общества". Джеймсу в ту пору было 25 лет. Эта работа о поведении газовых уплотнений под действием силы самогравитации стала фундаментом современной теории гравитационной неустойчивости, объясняющей происхождение практически всех структурных элементов Вселенной - от галактик и их скоплений, до звезд, планет и их спутников. Характерные размер и масса гравитационно-неустойчивых газовых уплотнений называются с тех пор *джинсовскими* и отмечаются индексом J (от James Jeans), например, M_J - джинсовская масса, R_J - джинсовский радиус.

А. Эддингтон, 1926 г.

"...чем больше мы познаем действительное состояние такого сложного физического образования, каким является звезда, тем более запутанным оно нам представляется." [32]

М. Шварцшильд, 1960 г.

Вообще, Дж. Дарвин мог гордиться тем, что привлек внимание молодого Джинса к астрономии: его подопечный сделал очень многое для развития космогонии и звездной динамики. Но мог ли



Рис. 5.1. Джеймс Хопвуд Джинс - создатель теории гравитационной неустойчивости. Этот портрет находится в галерее Лондонского королевского общества, членом, а затем и секретарем которого долгие годы был выдающийся ученый

предполагать Дж. Дарвин, занимавший в 1899-1900 гг. пост президента Королевского астрономического общества, что через четверть века на эту почетную должность вступит Дж. Джинс и в память о своем наставнике учредит ежегодные Дарвиновские лекции. Впрочем, связь между Дарвиным и Джинсом оказалась еще более глубокой. Дарвин прославился изучением приливов и фигур вращающихся жидких тел [29]. Джинс продолжил исследования космогонической роли приливных явлений и даже разработал приливную теорию происхождения Солнечной системы, очень модную в первой половине XX века. В этой теории рождение планетной системы рассматривается как редчайший факт, вызванный близким пролетом рядом с Солнцем другой звезды, вырвавшей из оболочки Солнца сгусток протопланетного вещества [34]. И хотя в отношении Солнечной системы эту гипотезу вспоминают сейчас лишь как исторический факт, сам механизм приливного взаимодействия несомненно играет большую роль в мире галактик, звездных скоплений и, возможно, протозвезд [35].

Вернемся, однако, к теории гравитационной неустойчивости. После того, как в начале XX века Дж. Джинс заложил ее фундамент, астрономам понадобилось еще 70 лет для обнаружения именно того компонента

межзвездной среды, который непосредственно связан с формированием звезд и при описании которого теория Джинса правильно предсказывает массы и размер новорожденных звезд. Давайте кратко познакомимся с этой теорией.

Ньютон, развивая идею гравитационной конденсации первичного вещества, предполагал это вещество совершенно инертным, холодным, не сопротивляющимся гравитации. Поэтому он считал, что любая неоднородность плотности должна прогрессивно сжиматься и уплотняться силой тяжести. К концу XIX века физики уже ясно понимали, что всякое вещество, в том числе и разреженный газ, обладает упругостью: именно это свойство газа позволяет распространяться в нем звуковым волнам. Поэтому Джинс заключил, что процесс гравитационного сжатия может начаться лишь в том случае, если сила тяжести победит силу газового давления.

Обычно, чтобы описать распространение звука в газе, физики записывают уравнение колебаний, в которое входят инерционные характеристики газа (плотность, масса молекул) и силовые (давление). Джинс впервые добавил в это уравнение новый член, учитывающий гравитационное взаимодействие частиц газа. Оказалось, что при этом уравнение получило новые решения; при высокой частоте колебаний, т. е. при малой длине волны, его решением по-прежнему оставались бегущие или стоячие звуковые волны, но чем больше становится длина волны, тем сильнее чувствуется влияние гравитации, и, наконец, при определенной критической длине волны λ_J распространение звуковых волн прекращается. Все уплотнения в газе, характерный размер которых превышает λ_J , должны неудержимо сжиматься под действием собственной силы тяжести - газовое давление не может противостоять этому. Объяснить это явление можно довольно просто. Рассмотрим, какие процессы происходят при небольшом случайном сжатии облака газа с характерным размером λ и плотностью ρ . С одной стороны, сила гравитации стремится продолжить это сжатие. Если бы газовое давление вообще отсутствовало, то все вещество упало бы к центру облака за *время свободного падения* (free fall time):

$$t_{\text{ff}} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Это выражение легко можно получить из Третьего закона Кеплера: время полуоборота по очень вытянутой эллиптической орбите, т. е. время свободного падения, равно $\pi(\lambda^3/GM)^{1/2}$, а масса облака $M = 4\pi\lambda^3\rho/3$.

С другой стороны, в случае отсутствия гравитации силы газового давления заставили бы облако расширяться за *динамическое* (dynamic), *время*: $t_{\text{dyn}} = \lambda/V_s$, где V_s - скорость звука, которая зависит только от температуры и химического состава газа. Если возмущения плотности в газе слабы (т. е. $\rho \approx \rho_0$ и $T \approx T_0$), то отношение $t_{\text{dyn}} / t_{\text{ff}} \sim \lambda$. Значит, в возмущениях плотности маленького размера ($t_{\text{dyn}} \ll t_{\text{ff}}$) газовое давление всегда будет успевать перераспределить вещество таким образом, чтобы воспрепятствовать дальнейшему сжатию. И напротив, возмущения плотности большого размера ($t_{\text{dyn}} \gg t_{\text{ff}}$), случайно возникнув, уже не смогут вновь расширяться: у них для этого просто не хватит времени, так как гравитация работает быстрее, чем сила газового давления.

Каковы же критические значения λ_J и M_J ? Грубо их можно оценить, приравняв друг другу t_{ff} и t_{dyn} , а более точно - из условия равновесия газа под действием давления и силы тяжести. Звуковая волна - это циклический процесс сжатия и разрежения газа: полпериода длится сжатие, полпериода - разрежение. Значит, характерный размер области уплотнения $\lambda/2$, а ее масса $M = \rho(\lambda/2)^3$. Известно, что давление идеального газа $P = RT\rho/\mu$, где $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/К·кг - универсальная газовая постоянная, а T и μ - температура и молекулярный вес газа. Очевидно, выталкивающая сила, действующая на единичный объем газа, в первом приближении равна $P/(\lambda/4)$, а сила тяготения, стремящаяся погрузить элемент объема газа внутрь возмущения плотности, может быть записана так: $GM\rho/(\lambda/4)^2$. Длина волны и масса возмущения становятся критическими, когда эти силы равны: $4P/\lambda_J = GM_J\rho/(\lambda_J/4)^2$. Отсюда:

$$\lambda_J = \left(\frac{2RT}{G\mu\rho} \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

$$M_J = \left(\frac{RT}{2G\mu} \right)^{3/2} \rho^{-1/2} \quad (5.3)$$

Последняя формула является важнейшей в теории гравитационной неустойчивости Джинса. Из

нее следует, что если в покоящейся разреженной среде в силу каких-то причин возникают возмущения плотности различного масштаба, то те из них, масса которых $M > M_J$, должны неудержимо сжиматься и уплотняться. Обычно в газе возмущения плотности малых масштабов преобладают над крупномасштабными, поэтому наиболее вероятно, что гравитационной неустойчивости подвергнутся возмущения с массой $M \approx M_J$.

Спустя 240 лет после письма Ньютона к Бентли Джинс написал в своей книге "Звезды в их развитии" (в русском переводе - "Движение миров" [36]): "Предположим, что в начале времен все пространство было заполнено газом... Тогда можно доказать, что газ не оставался бы равномерно распределенным в пространстве, а немедленно стал бы собираться в шары. Мы можем вычислить, сколько газа потребуется для образования каждого шара". К сожалению, Джинс немного преувеличивал свои возможности: он не мог достаточно убедительно проверить работоспособность своих формул, так как в то время почти ничего не было известно о физических свойствах и составе межзвездного газа, из которого формируются звезды. Однако теперь мы можем это сделать.

Химический состав звезд и межзвездного газа отличается большой стабильностью: на 1000 атомов водорода приходится около 100 атомов гелия и 2-3 атома более тяжелых элементов. В плотных холодных облаках, в которых формируются звезды, водород находится в форме молекул H_2 , молекулярный вес которых $\mu(H_2) = 2$. С учетом всех других химических элементов средний молекулярный вес газа в облаках составляет $\mu = 2.3$. Используя это значение, удобно нормировать формулу (5.3) на характерные параметры межзвездного газа:

$$M_J = 1M_{\odot} \left(\frac{T}{60K} \right)^{3/2} \left(\frac{10^{-18} \text{ г/см}^3}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

Как мы увидим далее, типичными местами формирования звезд являются мелкомасштабные конденсации в молекулярных облаках, где температура $T = (5 - 20) \text{ К}$ и плотность $\rho = (10^{-20} - 10^{-18}) \text{ г/см}^3$. Подставив эти значения в формулу Джинса, мы определим, что $M_J = (0.02 - 2) M_{\odot}$. Действительно, массы большинства звезд заключены именно в этом диапазоне - убедительный аргумент в пользу теории гравитационной неустойчивости. Еще одним тестом для этой теории может служить размер облака - предка звезды. Для Солнечной системы этот размер из наблюдений оценивается в 10^4 а. е. : именно в этом объеме сосредоточена основная масса ядер комет (так называемое, внутреннее облако Оорта). А что предсказывает на этот счет теория Джинса?

Радиусом газового фрагмента в момент наступления его гравитационной неустойчивости естественно считать величину $R_J = \lambda_J/4$, значение которой

$$R_J = 0.4 \left(\frac{RT}{G\mu\rho} \right)^{1/2} = 0.02 \text{ пк} \left(\frac{T}{30K} \frac{10^{-18} \text{ г/см}^3}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

В последние годы, говоря о плотности межзвездной среды, астрономы все чаще используют не массовую плотность ρ , а концентрацию молекул водорода $n(H_2)$. Поэтому формулы (5.4) и (5.5) можно переписать в более удобной форме, используя очевидное соотношение

$$R_J = 0.06 \text{ пк} \left(\frac{T}{10K} \frac{10^4 \text{ см}^{-3}}{n(H_2)} \right)^{1/2} \quad (5.6)$$

$$M_J = 0.4M_{\odot} \left(\frac{T}{10K} \right)^{3/2} \left(\frac{10^4 \text{ см}^{-3}}{n(H_2)} \right)^{1/2} \quad (5.7)$$

Для типичных параметров газа в областях звездообразования - $T = 20 \text{ К}$ и $n(\text{H}_2) = 10^4 \text{ см}^{-3}$, - приводящих к значению $M_J = 1.4 M_{\odot}$, теория предсказывает критический радиус облака $R_J = 0.08 \text{ пк} \approx 10^4 \text{ а. е.}$ Такое хорошее совпадение значения R_J и наблюдаемого размера Солнечной системы также является впечатляющим свидетельством в пользу теории Джинса.

Разумеется, простые формулы Джинса не учитывают многих физических процессов, происходящих в межзвездной среде. Эти формулы верны для идеального покоящегося однородного газа, который в природе никогда не встретишь. Межзвездное вещество находится в постоянном движении со скоростью, часто превосходящей скорость звука; оно испытывает сильное влияние магнитного поля, притяжение к звездам Галактики и лучевое давление со стороны наиболее ярких из них. Поэтому многие физики после Джинса брались за уточнение и развитие теории гравитационной неустойчивости. Отметим среди них Е.М. Лифшица, С. Чандрасекара, Я.Б. Зельдовича, Дж. Силка. Сейчас эта теория развита вполне детально: она учитывает расширение и вращение газовой среды, ее взаимодействие с магнитным полем и с другими источниками гравитации. Тем, кто захочет познакомиться с ее математическим аппаратом и основными приложениями, советуем воспользоваться книгами [37-40].

Важно, однако, что учет дополнительных физических факторов принципиально не изменил выводы теории: значения джинсовской массы и джинсовского радиуса, определенные формулами (5.6) и (5.7), до сих пор используются в большинстве работ при оценке результатов гравитационной неустойчивости. Отчасти это связано с тем, что из наблюдений редко удается получить иные характеристики протозвездной среды, кроме ее плотности и температуры.

Сам Джинс был чрезвычайно воодушевлен результатом своих исследований и прежде всего их наглядностью и простотой. Он писал: "...для нас ясно, почему все звезды имеют очень сходный вес; это потому, что все они образованы одинаковым процессом. Они, пожалуй, похожи на фабричные изделия, сделанные одною и тою же машиной" [36]. Зная сегодня, что звезды различаются по массе в тысячи раз, а условия в межзвездной среде - еще сильнее, мы вправе назвать оптимизм Джинса преждевременным. Однако он и сам понимал, что пройден лишь первый рубеж, и, предвидя грядущие трудности, с которыми столкнется теория формирования звезд и галактик, заключил: "При современном состоянии ваших знаний любая попытка диктовать окончательные решения по основным проблемам космогонии была бы ничем иным, как чистым догматизмом".

КАКИЕ ЗВЕЗДЫ РОЖДАЮТСЯ

Чтобы понять, как рождаются звезды, нужно знать, каковы они: из чего состоят их поверхность и недра, и в каком состоянии находится это вещество. В 1879-84 гг. И. Стефан и Л. Больцман получили формулу для мощности излучения нагретой поверхности, причем одним из важнейших аргументов в ее пользу стало измерение потока солнечного излучения. В 1896 г. В. Вин вывел "закон смещения" максимума в спектре абсолютно черного тела. Этого было вполне достаточно для грубого измерения температуры звезд. Таким образом, еще в XIX веке астрофизики научились измерять температуру звезд по их непрерывному спектру. А вот определить химический состав звезд по их спектрам удалось далеко не сразу.

Поскольку в спектре Солнца доминируют линии тяжёлых элементов, то существовало мнение, что именно из них и состоит поверхность звезды. Лишь после 1921 г., когда Мегнад Саха (1893-1956) из Калькутты разработал теорию ионизации газов и получил знаменитую "формулу Саха", стало ясно, что основными компонентами солнечной атмосферы являются

"В некотором смысле астроном-наблюдатель знает даже слишком много факторов, чтобы полностью удовлетвориться какой бы то ни было гипотезой: всегда находится несколько исключительных звезд, которые ей противоречат."

Отто Струве (1950)

водород и гелий. Но и после этого оставались справедливые сомнения в том, что по спектру звезды можно определить состав ее недр. Достаточно естественным казалось предположение, что легкие элементы поднялись на поверхность звезды, а тяжелые опустились в ее недра.

Узнать же о химическом составе звездных недр можно, в принципе, двумя способами: строя теоретические модели звезд и сравнивая их с наблюдениями, а также изучая выходящий из ядра звезды поток нейтрино - единственного прямого источника информации о процессах внутри звезды. Последняя возможность до сих пор остается в перспективе, зато метод теоретического моделирования применяется уже около 100 лет.

Создавая теоретическую модель звезды, мы имеем возможность сравнивать с наблюдениями только несколько ее глобальных параметров: массу, радиус, светимость.

Этих "выходных" параметров оказывается явно недостаточно, чтобы разрешить систему уравнений, описывающую звезду, относительно множества неизвестных "входных" параметров, важнейшим из которых является химически состав. В течение первой половины XX в. среди астрофизиков-теоретиков не прекращались споры относительно химического состава звезд. Так, в дискуссии между Дж. Джинсом и А. Эддингтоном одним из пунктов расхождения было следующее: являются ли звезды жидким) железными телами или газообразными гелиево-водородными?

В 30-е годы подход Эддингтона восторжествовал с тех пор звезды считаются газовыми шарами, состоящими в основном из водорода. К тому же, трудами Г. Бете и К. Вейцеккера была разработана теория ядерного горения в недрах звезд, в которой основным горючим является водород. При этом оказалось, что некоторые химические элементы группы кислорода (C, N, O) служат катализаторами ядерных реакций и от их содержания даже в мизерных долях существенно зависит выход энергии в термоядерных реакциях. А содержание элементов группы железа оказалось важным для расчета светимости звезды, ибо именно их присутствием регулируется степень прозрачности внешних слоев звезды.

Поскольку до начала 50-х годов не было возможности производить сложные эволюционные расчеты на ЭВМ (так как не было еще самих ЭВМ), теоретики ограничивались построением равновесных моделей звезд с однородным химическим составом, полагая, что в процессе эволюции вещество звезды постоянно перемешивается и его химический состав выравнивается. Согласно теории Эддингтона, светимость звезды (L) в основном зависит от ее массы (M) и среднего молекулярного веса (μ): $L \propto M^{5.5} \mu^{7.5}$. Поэтому соответствующим подбором химического состава, т. е. значения μ , можно было довольно легко привести модель в соответствие с наблюдениями. Например, если из двух звезд одинаковой массы одна является нормальной звездой главной последовательности, а другая уже стала красным гигантом, то объяснить большое различие их светимостей можно, предположив, что нормальная звезда состоит почти из чистого водорода, а у гиганта его лишь 30 %, а в некоторых случаях, возможно, даже 3 %.

Можно представить себе, какие трудности ожидали астрономов, желавших в те годы разгадать процесс образования звезд с чрезвычайно различным химическим составом из одной и той же хорошо перемешанной межзвездной среды. Однако в середине 50-х астрономы получили возможность использовать для моделирования звезд ЭВМ. Первые же эволюционные расчеты показали, что в процессе термоядерных реакций меняется химический состав ядра звезды, после чего ее структура резко перестраивается и совершенно не соответствует однородным моделям конца 40-х годов.

После этого довольно быстро были поняты основные закономерности расположения звезд на диаграмме "температура поверхности - светимость" (диаграмма Герцшпрунга-Рессела). Недавно сформировавшиеся, но уже пришедшие в стационарное состояние звезды располагаются вдоль "главной последовательности" в соответствии со своей массой. Табл. 6.1 дает исчерпывающее представление о параметрах этих звезд.

Спектральный класс	Температура, К	Светимость, L_{\odot}	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}
O7	38000	140000	27	8.5
B0	32000	16000	16	5.7

B3	17000	2500	8.3	4.8
B5	15000	750	5.4	3.7
B8	12500	130	3.5	2.7
A0	9500	63	2.6	2.3
A2	9000	40	2.2	2.0
A5	8700	24	1.9	1.8
A7	8100	11	1.8	1.7
F0	7400	9	1.6	1.5
F2	7100	6.3	1.5	1.3
F5	6400	4	1.35	1.2
F8	6100	2.5	1.2	1.1
G0	5900	1.45	1.08	1.05
G2	5800	1.10	1.0	1.00
G5	5600	0.70	0.95	0.91
G8	5300	0.44	0.85	0.87
K0	5100	0.36	0.83	0.83
K2	4830	0.28	0.78	0.79
K5	4370	0.18	0.68	0.74
K8	3900	0.12	0.58	0.67
M0	3670	0.075	0.47	0.63
M2	3400	0.03	0.33	0.36
M3	3300	0.014	0.26	0.29
M4	3200	0.005	0.2	0.21

Таблица 6.1. Спектр, температура поверхности, светимость, масса и радиус звезд главной последовательности.

После истощения в ядре запасов водорода звезда перемещается в сторону ветви гигантов, испытывая при этом серьезные изменения внутренней структуры. Звезда становится многослойной, ее ядро уплотняется, а оболочка расширяется, на разном расстоянии от ее центра появляется несколько слоев, в которых идут различные термоядерные реакции. На поздней стадии эволюции звезда теряя заметную долю массы в виде взрыва (сверхновая) или спокойно сброшенной оболочки (планетарная туманность), а ее ядро, сжимаясь, образует белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру.

В 1950 г. О. Струве [27] заключил: "Мы установили, что атмосферы громадного большинства звезд всех видов - карликов, гигантов, сверхгигантов и даже белых карликов - имеют приблизительно одинаковый химический состав. Этот состав, в свою очередь, подобен составу межзвездного газа, ярких диффузных туманностей и планетарных туманностей. Существуют, однако, некоторые звезды с аномальными спектрами. Среди них много объектов, которые причисляются к населению II (сферической составляющей) Галактики". Тот факт, что эти последние объекты содержат меньше тяжелых элементов, чем "громадное большинство" остальных звезд, был понят в рамках теории звездного нуклеосинтеза: чем позже сформировалась звезда, тем больше входит в ее состав тяжелых элементов - остатков внутризвездных ядерных реакций. Это стало одним из аргументов в пользу многоэтапного звездообразования в Галактике.

Впрочем, еще в 40-х годах появились аргументы пользу современного звездообразования. Прежде всего было подсчитано, что массивные звезды класса O, светимость которых почти в миллион раз превосходит солнечную, исчерпывают свой ядерный источник энергии менее чем за 10^7 лет; а это означает, что они формируются нашу эпоху. Правда, Вейцеккер предположил, что OВ-звезды - это старые звезды, захватившие межзвездное вещество при пролете сквозь плотное облако и таким образом "омолодившиеся". Эта идея могла объяснить

пространственную связь ОВ-звезд с облаками газа. Однако частое присутствие ОВ-звезд в рассеянных скоплениях и в очень короткоживущих кратных системах типа Трапеции Ориона она объяснить не могла.

Анализ динамики ОВ-ассоциаций и Т-ассоциаций позволил В. А. Амбарцумяну заключить, что эти группировки звезд не могут существовать более 10^7 лет. А поскольку в эти молодые группировки входят как быстроэволюционирующие ОВ-звезды, так и долгоживущие G- и M-звезды, то очевидным стало их одновременное появление в едином процессе звездообразования. Итак, какие же звезды и в каком количестве рождаются сейчас в Галактике?

Из наблюдений установлено с полной определенностью существование звезд в интервале масс от $80-90 M_{\odot}$ до $0,1-0,05 M_{\odot}$. Речь идет о звездах, входящих в двойные системы: их массы определяются очень надежно по характеру орбитального движения. Наиболее массивная среди двойных - это знаменитая "горячая звезда Пласкетта", известная астрономам с 1922 г. Ее суммарная масса близка к $150 M_{\odot}$, а масса главного компонента составляет $80-90 M_{\odot}$. Это значение близко к теоретическому пределу массы звезд. Дело в том, что с ростом массы звезды быстро возрастает ее температура и давление излучения на внешние слои. Когда это давление становится сравнимым с газовым давлением и силой тяжести, очень массивная звезда делается неустойчивой по отношению к радиальным колебаниям.

При быстрых изменениях радиуса такой звезды сила тяжести и противодействующая ей сила лучевого давления изменяются на одинаковую величину, а значит у такой звезды не существует определенного положения равновесия. Очень сильная зависимость интенсивности термоядерных реакций от температуры превращает массивную звезду в своеобразную "тепловую машину": случайно выйдя из равновесия, звезда начинает пульсировать все сильнее и сильнее, пока не сбросит наружные слои или не разрушится вовсе.

В 1959 г. теоретический предел массы (предел Леду - Шварцшильда - Харма) оценивался примерно в $60 M_{\odot}$. К 1970 г. учет некоторых физических процессов, происходящих в пульсирующей звезде (рассеяние энергии колебаний в ударных волнах и т. п.), привел к тому, что теоретический порог поднялся до $100 M_{\odot}$ и стал хорошо согласовываться с имеющимися тогда наблюдениями. Но со временем среди одиночных звезд были обнаружены очень любопытные объекты, массы которых могут быть весьма велики.

Например, хорошо изученная переменная звезда Р Лебеда (R Cyg), светимость которой в миллион раз больше солнечной. Под действием давления излучения с поверхности подобных звезд-сверхгигантов постоянно "дует" звездный ветер. Таким образом, Р Лебеда теряет в год около $10^{-4} M_{\odot}$. Но если бы ее масса была меньше $80-100 M_{\odot}$, звезда вообще разрушилась бы. Однако есть звезды еще более яркие и более горячие. У наиболее массивных звезд температура поверхности достигает $50\ 000$ К. Для них специально пришлось ввести в спектральную классификацию тип О3. Любопытно, что из десяти звезд этого типа, известных к началу 1983 г., шесть были обнаружены в одной сравнительно близкой к нам туманности NGC 3372 в созвездии Киля. Этот "заповедник" массивных звезд находится в спиральном рукаве Галактики на расстоянии $2,8$ кпк от Солнца и является областью интенсивного звездообразования. У ярчайшей среди этих звезд светимость достигает $5 \cdot 10^6 L_{\odot}$, а ее масса, по-видимому, близка к $200 M_{\odot}$. Это уже серьезный вызов теории: звезда с такой массой должна быть чрезвычайно неустойчивой.

Как видно из табл. 6.1, светимость звезд стремительно увеличивается с ростом их массы: для звезд типа Солнца эта зависимость примерно такова

$$L = L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4 \quad (6.1)$$

А поскольку запас топлива в звезде, очевидно, пропорционален ее массе, то время жизни звезды $t_{\text{жиз}} \sim M / L$. Для солнцеподобных звезд полное время эволюции составляет

$$t_{\text{эв}} = 10^{10} \text{ лет} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right)^3 \quad (6.2)$$

Но у звезд в десятки раз более массивных, чем Солнце, рост светимости происходит не так круто: когда лучевое давление приближается к силе тяжести, светимость может возрастать лишь пропорционально массе звезды, иначе она будет разрушена лучевым давлением. Поэтому время эволюции очень массивных звезд не зависит от их массы и ограничено величиной $3 \cdot 10^6$ лет. Впрочем, их эволюция определяется не только излучением света.

Один из сверхгигантов в той же туманности NGC 3372 - переменная звезда "Эта Киля" (η Car) обладает столь интенсивным звездным ветром ($10^{-3} - 10^{-1} M_{\odot}/\text{год}$), что вряд ли она просуществует в нынешнем качестве более 10 тыс лет. Улетающее с поверхности звезды вещество сформировало вокруг нее столь плотную газо-пылевую оболочку, что оптическое излучение в ней почти полностью поглощается и перерабатывается в инфракрасное (ИК). Поэтому звезда η Car является вторым по яркости (после Солнца) ИК источником на нашем небе.

Астрономам известны и другие объекты, у которых можно заподозрить очень большую массу. Среди них удивительный объект R 136a в эмиссионной туманности "Тарантул" (или 30 Doradus), принадлежащей соседней галактике - Большому Магелланову Облаку. Светимость этого объекта в 100 млн раз превышает солнечную. Чтобы обеспечить такую мощность излучения, необходимо не менее тридцати звезд класса O3. Поскольку объект находится в соседней галактике, то довольно трудно сказать с полной определенностью, одиночный ли это объект или компактное скопление звезд-сверхгигантов. Правда, специальная техника фотографирования - спектр-интерферометрия показала, что в действительности R 136a - это группа объектов, среди которых выделяется ярчайший - R 136a1. Его светимость не менее 50 млн солнечных, а размер не более 0,02", что соответствует 1000 а. е. в Большом Магеллановом Облаке. В такой объем невозможно "загнать" нормальное звездное скопление. Остается одно: либо это одиночная звезда с массой около $2000 M_{\odot}$, либо кратная звездная система из 4 - 8 объектов с массами 200 - 400 M_{\odot} у каждого.

На необычную природу объекта указывает и его звездный ветер: скорость газа в нем составляет 3500 км/с, тогда как у O-звезд она не превышает 1000 км/с. Это еще один аргумент в пользу того, что перед нами "сверхзвезда". А пока продолжается изучение этого удивительного объекта, теоретики пытаются найти оправдание его существованию.

Впрочем, даже если в "космическом зоопарке" присутствует несколько суперзвезд, то не они играют в нем главную роль. Ведь такие звезды рождаются очень редко. Подсчет звезд различной массы показывает, что чем меньше масса, тем чаще соответствующие звезды формируются в нашей и других галактиках. Если расположить недавно родившиеся звезды в соответствии с их массой, то мы получим начальную функцию масс (иногда говорят "спектр масс"). При этом полученные из наблюдений данные обычно аппроксимируют степенной функцией:

$$dN / dM \sim M^{-\alpha} \quad (6.3)$$

где dN - количество звезд в интервале масс от M до $M + dM$. Показатель степени α обычно заключен в интервале от 2 до 3. В окрестности Солнца для звезд умеренной массы $\alpha = 2,35$. Это, так называемая, солпитеровская функция масс, по имени американского астрофизика, впервые определившего ее.

Очевидно, что зависимость (6.3) не может неограниченно продолжаться в область малых масс: слишком уж стремительно нарастает количество звезд-карликов. Где же граница возможностей природы при изготовлении маломассивных звезд? Достоверно установлено, что существуют красные карлики с массой около $0,06 M_{\odot}$. Температура их поверхности около 2000 К, поэтому такие звезды правильнее было бы называть не красными, а инфракрасными карликами, поскольку максимум в спектре их излучения лежит за пределом красной границы человеческого зрения.

Самые легкие звезды с точно измеренной массой находятся в двойных системах. В системе Ross 614 компоненты имеют массы 0,11 и 0,07 M_{\odot} . В системе Wolf 424 массы компонентов составляют 0,059 и 0,051 M_{\odot} . А у звезды LHS 1047 менее массивный компаньон весит всего 0,055 M_{\odot} .

Впрочем, для таких объектов, вероятно, придется подбирать новое название. Ибо называть их звездами было бы не совсем справедливо. Расчеты показывают, что в телах с массой 0,08 M_{\odot} (предел Кумара) температура так низка, что термоядерные реакции практически не происходят. Можем ли мы называть звездами тела, лишённые ядерного источника энергии? Время от времени появляются сообщения об обнаружении "коричневых карликов" с массами 0,04 - 0,02 M_{\odot} , но пока они надежного подтверждения не получили. Есть косвенные указания на существование еще меньших тел: волнообразное движение некоторых звезд свидетельствует о присутствии рядом с ними маломассивных спутников, заполняющих интервал масс между звездами и планетами (10^{-1} - 10^{-3} M_{\odot}). Наиболее надежным результатом в этой области можно считать недавно законченное изучение колебаний в движении звезды BD 68 946°. Без сомнения у нее обнаружен темный спутник с массой 0,009 M_{\odot} . Однако данных в этой области еще мало и о распространенности таких объектов судить пока невозможно.

Таким образом, сейчас можно утверждать достаточно обоснованно, что в основном природа изготавливает звезды с массами от 100 до 0,05 M_{\odot} , причем маломассивных звезд существенно больше, чем тяжеловесных, как по количеству, так и по общей доле заключенного в них вещества.

ГДЕ РОЖДАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ

Астрономы умеют довольно точно определять места, где происходит или недавно происходило рождение звезд. Области звездообразования выдает, как правило, присутствие массивных горячих и ярких звезд. Их век недолог и потому наличие этих звезд есть явное указание на то, что родились они где-то здесь неподалеку за последние несколько миллионов лет. Косвенными индикаторами звездообразования являются ИК излучение пыли, нагретой горячими звездами, а также линии излучения водорода и других элементов, ионизованных этими звездами и образующих вокруг них области HII.

Известным примером такой области является Туманность Ориона, находящаяся от нас на расстоянии около 0,5 кпк (рис. 7.1). Сама Туманность - лишь часть огромного газо-пылевого облака, находящегося позади нее. Сформировавшиеся у ближнего края облака звезды разогрели часть газа и заставили его светиться, создав эмиссионную туманность. Остальная масса холодного газа в оптическом диапазоне не видна.

"И сон привиделся ему простой и радостный,
как солнечный шар."

*М. Булгаков,
роман "Белая Гвардия"*

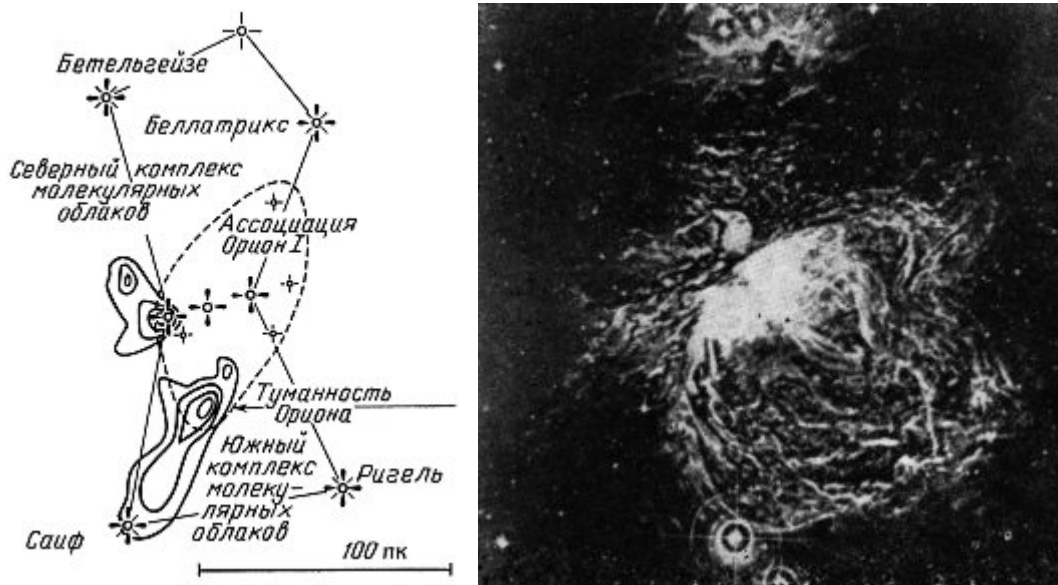


Рис. 7.1. В направлении созвездия Орион находится крупный очаг звёздообразования, связанный с массивными молекулярными облаками. На обращенной к нам поверхности южного облака расположена Туманность Ориона (фото справа). Это небольшая часть облака, разогретая излучением молодых звёзд.

Как показывают наблюдения в нашей и соседних галактиках, эмиссионные туманности, т. е. облака ионизованного водорода, отмечающие места недавнего звездообразования, распределены по диску галактики не хаотически. Как правило, они сгруппированы в комплексы размером в 200-500 пк. Данные о наиболее крупных комплексах приведены в табл. 7.1.

Объект	Диаметр, пк	Масса Н II, M_{\odot}	Расстояние от Солнца, кпк
<i>Галактические</i>			
W 49 A	150	$3 \cdot 10^4$	12
η Car	200	$4 \cdot 10^4$	2,7
NGC 3603	250	$8 \cdot 10^4$	7,2
W 51	200x100	$4 \cdot 10^4$	6
W 3; 4; 5	300x200	$2 \cdot 10^4$	2,2
Cyg X	800x600	$5 \cdot 10^4$	1,5
RCW 102; 104; 106	200	$6 \cdot 10^4$	3,5
G 298-0,3	300	$2 \cdot 10^5$	10
<i>Внегалактические</i>			
30 Dor (БМО)	500	$6 \cdot 10^5$	50
NGC 604 (M 33)	370	$7 \cdot 10^5$	800
M 31 A	250	$5 \cdot 10^4$	680
M 81 A	450	$4 \cdot 10^5$	3500

Таблица 7.1. Гигантские комплексы Н II.

В нашей Галактике область наиболее интенсивного звездообразования представляет кольцо с внутренним радиусом 3,5 кпк и внешним 6,5 кпк от центра Галактики. Солнце находится еще дальше от центра Галактики, на расстоянии 8 - 10 кпк, поэтому мы наблюдаем "звездное кольцо" снаружи и, к тому же, с ребра. В тех диапазонах электромагнитного излучения, которые не очень чувствительны к межзвездному поглощению, кольцо отчетливо выделяется на фоне Млечного

Пути (рис. 7.2). Основные индикаторы молодого звездного населения (остатки массивных сверхновых; ИК излучение пыли, нагретой яркими звездами; гамма-излучение молодых пульсаров) и индикаторы плотного межзвездного газа, готового к звездообразованию (излучение молекул CO; гамма-излучение, рождающееся в плотных облаках) неравномерно распределены вдоль Млечного Пути, а в основном ограничены сектором $\pm 60^\circ$ от направления на центр Галактики.

Изучив это распределение детальнее, мы обнаруживаем, что и внутри "галактического кольца" индикаторы звездообразования распределены не равномерно, а сконцентрированы вдоль нескольких дуг, скорее всего представляющих собою части спиральных рукавов, доступные нашим телескопам. К сожалению, находясь в плоскости Галактики, очень трудно восстановить картину распределения объектов в ее диске: чтобы это сделать, необходимо точно знать расстояние до них. До некоторых объектов расстояние удастся измерить: прежде всего это звезды высокой светимости и скопления молодых звезд, а также газовые облака, имеющие тонкие линии излучения в радиоспектре. Но во многих случаях, например, до источников ИК и гамма-излучения расстояние определить невозможно. Поэтому о строении диска нашей Галактики судят, опираясь на наблюдения других спиральных галактик, особенно близких - Туманности Андромеды (M31), Туманности Треугольника (M33), спиралей в созвездии Б. Медведицы (M81 и M101) и др. Во всех случаях выявляется пространственная связь между молодыми звездами и межзвездным газом, особенно с наиболее холодной и плотной его компонентой - молекулярными облаками.

В нашей звездной системе эта связь подтверждается в основном одинаковым распределением по галактической долготе различных индикаторов звездообразования и плотных газовых облаков, наилучшим образом проявляющих себя в излучении молекулы CO (см. рис. 7.2).

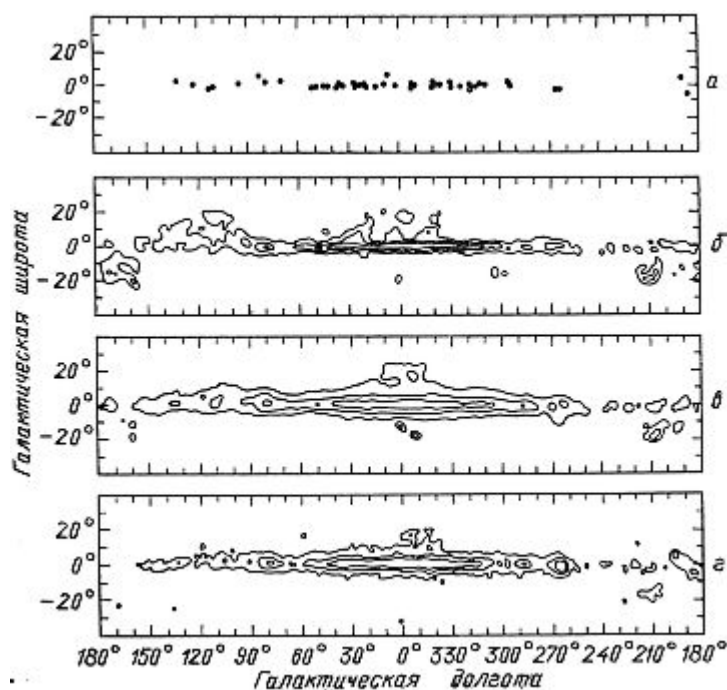


Рис. 7.2. Распределение различных индикаторов звездообразования вдоль Млечного Пути: яркие остатки сверхновых (а), излучение молекул CO (б), инфракрасное излучение пыли (в), гамма-излучение, возникающее в основном при взаимодействии космических лучей с плотным межзвездным газом (г).

В соседних галактиках эти объекты также связаны между собой причем не только пространственно, но и количественно: например, светимость в линии CO у туманности Андромеды в 5 раз меньше, чем у нашей Галактики, а подсчет ярких звезд и областей H II показывает, что и интенсивность звездообразования там в несколько раз меньше чем в Галактике.

К сожалению, Туманность Андромеды повернута к нам почти ребром, и это сильно затрудняет изучение ее пространственной структуры. Значительно интереснее в этом смысле изучать дисковые галактики, повернутые к нам плашмя. Одной из таких систем является

сравнительно близкая спираль NGC 6946. Она демонстрирует, что распределение по диску плотных облаков межзвездного газа хорошо коррелирует с распределением областей H II. К тому же ясно видно, что и плотный газ и молодые звезды концентрируются в спиральных рукавах галактики.

Изучая далекие галактики мы не имеем возможности различать их структуру, но иногда это бывает даже удобно. Сравнивая интегральные, т. е. полные потоки излучения от галактики в различных диапазонах спектра, можно сопоставлять между собой ее глобальные свойства. Например, ИК поток пропорционален количеству в галактике теплой пыли, ультрафиолетовый (УФ) поток - числу молодых массивных звезд, поток в линиях излучения молекулы CO - массе холодного плотного газа. Сопоставляя светимость галактик в этих диапазонах, можно понять, как зависит частота рождения звезд от количества межзвездного газа, от типа галактики и прочие любопытные вещи.

В нашей собственной Галактике мы не можем сделать полного обзора всего звездного "хозяйства" - мешает пыль. Но если положиться на данные инфракрасной астрономии, для которой пыль не помеха, а как правило, главный объект наблюдения, то окажется, что 75 % образующихся сейчас в Галактике звезд рождается в ее спиральных рукавах, 15 % - в межрукавном пространстве и 10 % - в районе центра Галактики в области диаметром около 1 кпк. Как видим, три звезды из четырех рождаются в спиральных рукавах, которые занимают сравнительно небольшой объем в галактическом диске (~20%) и совершенно незначительный в Галактике в целом (<1%). Там же, в рукавах расположены наиболее массивные облака молекулярного газа. Их причастность к процессу звездообразования несомненна: группы молодых звезд часто наблюдаются на краю этих облаков либо, по косвенным признакам, в их недрах.

Разумеется, звездообразование не ограничивается "галактическим кольцом": молодые звезды обнаруживаются и в окрестности Солнца и еще значительно дальше от центра Галактики. Правда, условия для звездообразования там не очень подходящие: прежде всего это относится к процессу образования из разреженного межзвездного газа плотных холодных облаков. Но уж если облако сформировалось, то внутри него звезды рождаются так же, как и в других областях Галактики. Как показали радионаблюдения в линиях излучения молекул CO, H₂O и OH, внешние проявления формирующихся и молодых звезд на расстоянии 20 кпк от центра Галактики такие же, как и вблизи ее центра. Обнаруживаются звезды и в пространстве между галактиками, но вот сформировались они там или были выброшены из галактик - пока неясно.

Еще одна важная особенность процесса звездообразования - это коллективное рождение звезд. При этом типы звездных коллективов могут быть чрезвычайно разнообразными: от двойной звезды до группы звездных скоплений. А в промежутке между этими крайними типами нам встретятся звездные группы и потоки, ассоциации и иерархические конгломераты. Происхождение и жизнь звездных систем - не менее захватывающая тема, чем рождение и жизнь самих звезд. Но мы ограничимся пока знакомством с наиболее типичными из молодых звездных коллективов - звездными скоплениями и ассоциациями.

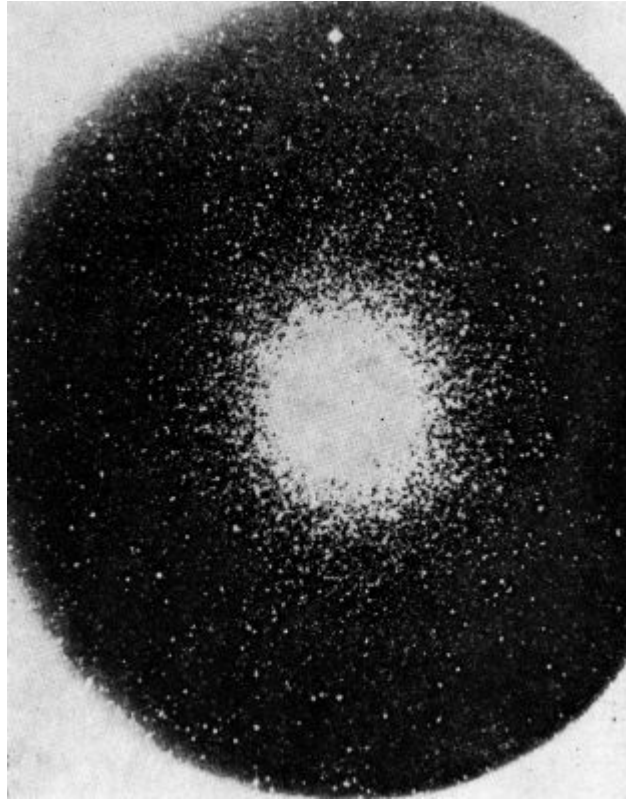


Рис. 7.3. Шаровое звездное скопление.

Первые звездные скопления были обнаружены давно, ведь некоторые из них видны даже невооруженным глазом: например, известные скопления Плеяды и Гиады в созвездии Тельца. Сейчас в Галактике зафиксировано более 1,5 тыс звездных скоплений. Из них 150 скоплений относятся к типу *шаровых* (рис. 7.3) - это очень массивные и старые звездные системы. Всего их в Галактике, вероятно, около 200, и все они родились либо незадолго до, либо непосредственно после формирования самой Галактики, то есть около 15 млрд лет назад.

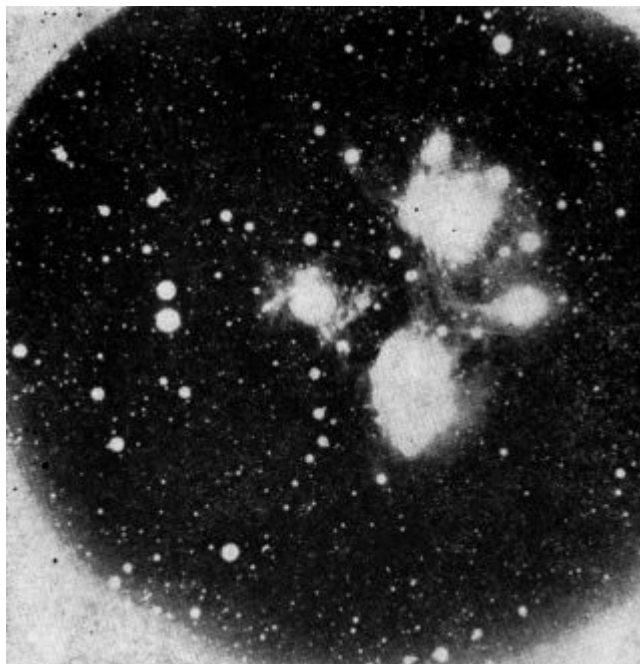


Рис. 7.4. Рассеянное звездное скопление.

А остальные многочисленные и чрезвычайно разнообразные по своим характеристикам звездные скопления значительно моложе и называются *рассеянными* (рис. 7.4). Иногда их называют также галактическими, или открытыми скоплениями (open cluster). Каждое из этих названий отражает одну из характерных черт данных скоплений: они действительно концентрируются вдоль галактической плоскости, и звезды в них расположены не очень

плотно, так что скопление выглядит как бы открытым для других звезд и посторонних влияний. В действительности так оно и есть: звезды довольно легко покидают эти скопления, а влияние посторонних гравитационных полей еще больше ускоряет их разрушение. Обычно рассеянные скопления в десятки и даже сотни раз моложе шаровых. Но еще более молоды звездные ассоциации.

В 20-е годы нашего века астрономы выделили на небе несколько группировок горячих звезд, члены каждой из которых имели близкие по величине и направлению скорости, хотя порою отстояли друг от друга на несколько угловых градусов. Эти горячие звезды спектральных классов O и B не показывали видимой концентрации на небе; размер каждой группировки был больше, чем у обычных звездных скоплений, но генетическая связь между членами каждой группировки была несомненной. Эти разреженные звездные коллективы, содержащие от нескольких десятков до нескольких сотен голубых звезд и имеющие размеры от 15 до 300 пк, были названы OB-ассоциациями (см. рис. 7.5 и 7.6). Учитывая, что горячие массивные звезды живут недолго, был сделан вывод о происходящем в Галактике в настоящее время групповом звездообразовании (см. [41, 42]).

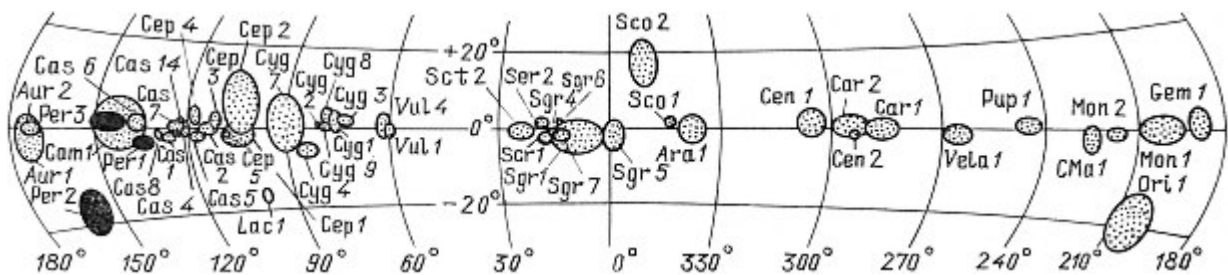


Рис. 7.5. Распределение OB-ассоциаций вдоль Млечного Пути. Нанесена сетка галактических координат. Отсутствие ассоциаций между долготами 30° и 60° связано с тем, что в этом направлении мы видим промежуток между спиральными рукавами.

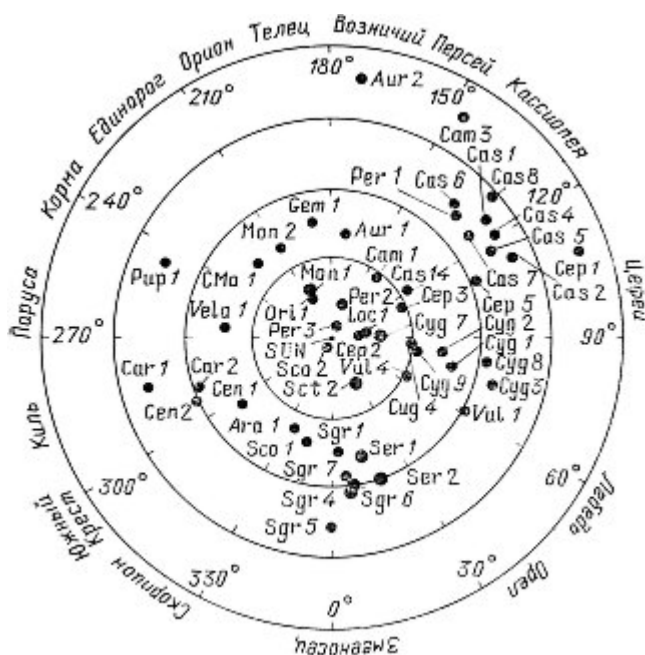


Рис. 7.6. Распределение OB-ассоциаций в проекции на плоскость Галактики. Солнце в центре. Расстояние между окружностями 1 кпк, вдоль внешней окружности указана галактическая долгота и созвездие, в котором располагается данная часть Млечного Пути.

Тогда же обнаружили группировки неправильных переменных звезд, относящихся к типу T Тельца; позже они были названы T-ассоциациями. В отличие от OB-звезд переменные типа T Тельца являются маломассивными звездами, но также очень молодыми, еще не достигшими главной последовательности, т. е. находящимися на стадии гравитационного сжатия. Все OB-ассоциации, как правило, содержат и звезды типа T Тельца, но встречаются T-ассоциации без ярких массивных звезд.

Эту закономерность можно объяснить в рамках теории гравитационной неустойчивости. Вспомним формулу (5.3) для критической массы облака: чем больше плотность газа, тем меньше эта масса, а с другой стороны, тем быстрее, в соответствии с формулой (5.1), происходит сжатие облака в звезду. Значит, при наличии уплотнений различного типа первыми должны рождаться маломассивные звезды типа Т Тельца, и только позже появляются массивные ОВ-звезды. Наши рассуждения подтверждаются наблюдениями: в некоторых Т-ассоциациях, лишенных ОВ-звезд, открыты компактные области ионизованного водорода, а также источники ИК излучения, связанные с рождающимися массивными звездами. К тому же, как показывают наблюдения ОВ-ассоциаций, после своего рождения массивные звезды разогревают окружающий газ и делают его непригодным для формирования маломассивных звезд.

В центре звездных ассоциаций нередко находятся плотные звездные скопления. Сама же ассоциация представляет как бы корону скопления, звезды в которой слабо связаны силами тяготения как со скоплением, так и друг с другом. У некоторых ассоциаций обнаружены признаки расширения: их звезды разлетаются из значительно более компактной области, где они сформировались. Приведет ли это расширение к полному разлету ассоциации, зависит от массы находящегося внутри нее вещества, тормозящего разлетающиеся звезды силой притяжения. Скорости движения звезд в ассоциациях измерены довольно точно и составляют порядка 10 км/с. А вот полную массу вещества внутри ассоциации с учетом как звезд, так и газа в различных его формах (молекулы, атомы, ионы) измерить значительно сложнее. Поэтому вопрос о расширении ассоциаций так же сложен, как в космологии вопрос о расширении Вселенной: разбегание как галактик, так и звезд может остановить только гравитация, а вот достаточно ли для этого вещества между ними - могут ответить только дальнейшие наблюдения.

Впрочем, если Вселенная одна, и космологи со временем точно докажут, будет ли ее расширение продолжаться бесконечно или нет, то звездных ассоциаций много и для каждой из них решение будет своим. Одни ассоциации, вероятно, расширяются неудержимо, и их звезды быстро растворятся в галактическом поле (за время 10^7 - 10^8 лет). Другие - более плотные, испытают несколько периодов расширения и сжатия и, наконец, придут в некоторое стабильное состояние. Конечно, и они со временем распадутся под действием взаимных возмущений звезд и посторонних гравитационных возмущений, например, со стороны массивных газовых облаков. Но это потребует большего времени: $\sim 10^9$ лет.

Итак, мы познакомились с местами массового производства звезд, где они изготавливаются большими сериями, - со звездными скоплениями и ассоциациями. Однако в некоторых областях Галактики существует и уникальное производство звезд: возможно, звезды там рождаются поодиночке или небольшими группами. Поэтому давно уже астрономы озадачены вопросом: какой источник звездообразования является главным - кустарный или индустриальный, индивидуальный или массовый? Точно на него ответить удастся не скоро: полный учет всех новорожденных звезд - задача непростая. Пока телескопам доступны лишь самые массивные и яркие звезды, да и то расположенные не далее 3 - 5 кпк от Солнца (не забывайте, речь идет о молодых звездах, лежащих в плоскости галактического диска, где очень много пыли). Появление на свет маломассивных звезд, которых большинство, удастся зафиксировать только в непосредственной близости от Солнца: не далее 1 кпк. Что уж тут говорить обо всей Галактике.

И все-таки некоторые оценки сделать можно. Если Галактика более или менее симметрична, и по ту сторону от ее центра все так же, как на нашей половине, то из имеющихся данных можно оценить частоту рождения звездных скоплений и ассоциаций: происходит это приблизительно один раз в 3000 лет, причем скопления и ассоциации рождаются одинаково часто, что косвенно доказывает их генетическую связь. И те, и другие со временем разрушаются и отдают свои звезды в общее галактическое поле (данные о некоторых ассоциациях приведены в табл. 7.2 и 7.3). Массы рассеянных скоплений заключены в диапазоне от 100 до $10^4 M_{\odot}$ и в среднем составляют 300-500 M_{\odot} . Ассоциации более массивны, так как нередко включают в свой состав одно или несколько скоплений. Их массы доходят до $10^5 M_{\odot}$, а в среднем, по-видимому, близки к $10^4 M_{\odot}$. Разделив характерную массу системы на частоту формирования таких систем, определим их вклад в частоту

рождения звезд в Галактике: рассеянные скопления дают $\sim(0,1 - 0,2) M_{\odot}/\text{год}$, а ассоциации $\sim 3 M_{\odot}/\text{год}$.

Название	Координаты центра		Расстояние, кпк	Диаметр		Число звезд, О/В	Скопления / Звезды, (NGC)
	α (2000,0)	δ		углово й, ($^{\circ}$)	линейный , пк		
Cas OB4	0 ^h 28,4 ^m	+62°42'	2,88	-	-	5/12	103
Cas OB14	0 ^h 28,8 ^m	+63°22'	1,11	-	-	0/3	/ χ Cas
Cas OB8	1 ^h 46,2 ^m	+61°19'	2,88	-	-	1/10	581,663; 654?
Per OB1	2 ^h 14,5 ^m	+57°19'	2,29	6	240	9/56	h, χ, Per
Cas OB6	2 ^h 43,2 ^m	+61°23'	2,19	8	306	17/8	IC 1805
Cam OB1	3 ^h 31,6 ^m	+58°38'	1,00	-	-	3/9	1444? 1502?
Per OB3	3 ^h 27,8 ^m	+49°54'	0,17	-	-	-	/ α, Δ Per
Per OB2	3 ^h 42,2 ^m	+33°26'	0,40	8x5	56x35	1/3	/ ξ, σ, χ Per
Aur OB2	5 ^h 28,3 ^m	+34°54'	3,16	-	-	5/3	1893, IC 410
Aur OB1	5 ^h 21,7 ^m	+33°52'	1,32	6x5	140x120	5/5	1912,60; 1931?
Gem OB1	6 ^h 09,8 ^m	+21°35'	1,51	5	130	4/13	2175? / χ^2 Ori
Ori OB1	5 ^h 31,4 ^m	-2°41'	0,46	16	130	9/6	Трапеция / $\theta, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ Ori
Mon OB1	6 ^h 33,1 ^m	+8°50'	0,55	14x5	135x48	1/0	2264 /S Mon
Mon OB2	6 ^h 37,2 ^m	+4°50'	1,51	6x4	160x110	10/7	2244 /Звезда Пласскетта
CMa OB1	7 ^h 07,0 ^m	-10°28'	1,32	4	92	4/3	2335,53; 2343?
Pup OB1	7 ^h 54,8 ^m	-27°05'	2,51	4x3	180x130	7/0	2467?
Vel OB1	8 ^h 49,9 ^m	-45°00'	1,40	6x4	150x100	5/11	2659?
Car OB1	10 ^h 46,7 ^m	-59°05'	2,51	2x1	90x48	6/15	3293; IC 2581?
Car OB2	11 ^h 06,0 ^m	-59°51'	2,0	6x3	190x90	8/6	3572, Tr 18
Cen OB1	13 ^h 04,8 ^m	-62°04'	2,51	6	260	2/19	4755 / χ Cru
Sco - Cen	16 ^h	-25°	0,16	-	-	-	IC 2602? / α CMa, α Car, α Eri
Ara OB1	16 ^h 39,5 ^m	-46°46'	1,38	4,5x3	110x70	-	6169,93 / μ Nor
Sco OB1	16 ^h 53,5 ^m	-41°57'	1,91	1,5x1	53x37	18/10	6231 / ξ^1 Sco
Sco OB2	16 ^h 14,9 ^m	-25°55'	0,16	-	-	0/3	/ α, β^1, δ Sco
Sgr OB1	18 ^h 07,9 ^m	-21°28'	1,58	9,5x4	260x110	8/9	6514, 30-1 / μ Sgr
Sgr OB4	18 ^h 14,4 ^m	-19°03'	2,4	-	-	1/6	6603
Ser OB1	18 ^h 20,8 ^m	-14°35'	2,19	5x3	190x110	9/9	6611
Ser OB2	18 ^h 18,6 ^m	-11°58'	2,0	8	280	9/6	6604?
Vul OB1	19 ^h 44,0 ^m	+24°13'	2,0	-	-	5/7	6823
Cyg OB3	20 ^h 04,7 ^m	+35°50'	2,29	-	-	9/15	6871? /Cyg X - 1
Cyg OB1	20 ^h 17,8 ^m	+37°38'	1,82	7x4	220x130	12/28	6913, IC 4996

Cyg OB9	20 ^h 23,3 ^m	+39°56'	1,2	-	-	7/7	6910
Cyg OB2	20 ^h 32,4 ^m	+41°17'	1,82	0,5	16	13/2	
Cyg OB7	21 ^h 02,7 ^m	+49°43'	0,83	-	-	3/6	/α Cyg
Cep OB2	21 ^h 47,9 ^m	+61°04'	0,83	8	110	8/9	7160, IC 1396 /μ, ν, λ Cep
Cep OB1	22 ^h 24,6 ^m	+55°14'	3,47	3,5	210	7/26	7380? /β Cep
Cas OB5	23 ^h 58,7 ^m	+60°22'	2,51	2,5	110	5/10	7788, 7790? /ρ Cas

Таблица 7.2. OB-ассоциации.

Обозначение	α (2000,0) δ		l	b	N	D	г, пк	Характерный объект
Per T2	3 ^h 44 ^m	+32,1°	160,5°	-17,9°	16	0,4 _o	380	IC 348
Tau T1	4 ^h 18 ^m	+28,3°	168,8°	-15,7°	15	3°	200	RY Tau
Tau T2	4 ^h 32 ^m	+18,2°	178,9°	-20,0°	12	6°	170	T Tau
Tau T3	4 ^h 33 ^m	+25,2°	173,5°	-15,2°	49	5°	170	UZ Tau
Aur T1	4 ^h 58 ^m	+31,2°	172,4°	-7,2°	15	9°	170	RW Aur
Ori T1	5 ^h 32 ^m	+11,6°	193,2°	-11,9°	49	4°	400	CO Ori
Ori T2	5 ^h 35 ^m	-5,4°	209,0°	-19,5°	450	4°	400	T Ori
Ori T3	5 ^h 41 ^m	-1,7°	206,3°	-16,4°	102	4°	400	(σ, ξ Ori, IC 434, NGC 2024
Ori T4	5 ^h 44 ^m	+9,2°	196,9°	-9,5°	28	3°	400	FU Ori
Ori T8	5 ^h 45 ^m	+0,0°	205,2°	-14,7°	45	2°	400	NGC 2068, 2071
Mon T4	6 ^h 32 ^m	+10,3°	201,5°	+0,3°	16	1°	800	NGC 2169, 2245, 2247, IC 446
Mon T2	6 ^h 32 ^m	+4,9°	206,3°	-2,1°	16	0,5 _o	1660	NGC 2244
Mon T1	6 ^h 41 ^m	+9,7°	203,1°	+2,1°	198	3°	800	NGC 2264, S Mon
Cen T1	13 ^h 08 ^m	-63,1°	304,8°	-0,3°	15	1°	170	-
Seo T1	16 ^h 25 ^m	-23,4°	353,7°	+17,7°	33	9°	210	α Sco, ρ Oph
Sgr T2	18 ^h 04 ^m	-24,4°	6,0°	-1,2°	85	1°	1300	NGC 6530, M 8
Ser T1	18 ^h 19 ^m	-13,8°	17,0°	+0,8°	61	0,2 _o	2300	NGC 6611
Cyg T1	20 ^h 51 ^m	+44,4°	84,6°	+0,1°	21	1°	600	IC 5070
Cep T2	21 ^h 41 ^m	+57,5°	99,5°	+3,5°	125	3°	480	IC 1396
Cyg T3	21 ^h 53 ^m	+47,3°	94,4°	-5,5°	38	0,2 _o	1000	IC 5146

Таблица 7.3. Звездные ассоциации. Т-ассоциации.

С чем можно сравнить полученные значения? Оказывается, существует независимый метод оценки темпа звездообразования - это измерение ИК излучения теплой межзвездной пыли: ее нагревают молодые звезды, и чем чаще они формируются, тем сильнее тепловое излучение пыли. А оно практически беспрепятственно доходит до нас из любого уголка Галактики и дает возможность оценить частоту рождения в ней звезд, как входящих в крупные группировки, так и одиноких.

Опираясь на данные ИК астрономии, различные исследователи получают темп

звездообразования в Галактике от 1 до 20 M_{\odot} /год, но большинство из них сходится на значении 3-4 M_{\odot} /год. Таким образом, ассоциации являются если уж не важнейшими, то во всяком случае важными поставщиками звезд в галактическое поле. Но некоторая часть этих поставок, вероятно, приходится и на долю "мелкосерийного" или "индивидуального" производства звезд, рассеянного по небольшим плотным облачкам - глобулам, - с которыми мы еще познакомимся.

ПРОСТРАНСТВО МЕЖДУ ЗВЕЗДАМИ

Хотя основная доля видимого вещества Вселенной сконцентрирована в звездах, астрономы проявляют все больший интерес и уважение к межзвездному пространству, содержащему вещество в разнообразных и, возможно, неизвестных пока формах. Прежде чем вещество становится звездой, оно последовательно проходит все круги физико-химических превращений: от кварков и элементарных частиц к молекулам и вновь к атомам и частицам; от релятивистских энергий к абсолютному нулю температуры и вновь к состоянию плазмы; от безумных плотностей к глубочайшему вакууму и вновь к плотностям, недостижимым в физических лабораториях (рис. 8.1).

В современной Галактике пространство между звездами заполнено разреженным веществом, излучением и магнитным полем, взаимодействующими друг с другом на равных, поскольку в среднем равны плотности их энергии ($\sim 10^{-12}$ эрг/см³). Игра сил гравитации, газового и магнитного давления приводит к тому, что из разреженного вещества формируются гораздо более плотные звезды. Поэтому история проникновения в загадку рождения звезд есть, по существу, история изучения межзвездной материи. В отличие от звездной астрономии, имеющей "славные традиции", астрономия межзвездной среды пока еще только обозревает свои владения. За последние два десятилетия открыты самая горячая и объемная, а также самая холодная, плотная и массивная компоненты межзвездного вещества. Не исключено, что в ближайшие годы будут сделаны не менее фундаментальные открытия в области межзвездной среды, поскольку существует проблема невидимого вещества в галактическом гало. Но чтобы оценить сегодняшнее состояние дела, давайте немного заглянем в историю. Интуитивные представления о межзвездной среде можно встретить даже у античных философов ("Природа не терпит пустоты!"), однако наблюдениями они подтверждены не были. Даже у Г. Галилея, изучавшего небо в телескоп, рассуждения о межзвездной среде были довольно отвлеченными: "...мы отказываемся от твердых небесных сфер, в существование которых верили раньше, и предполагаем, что очень тонкая эфирная материя развеяна по обширным областям Вселенной, по которым блуждают твердые мировые тела, наделенные собственными мировыми движениями" [7, с. 173].

И. Кеплер соглашался с Галилеем, но рассуждал более конкретно: "К сильным сторонам твоего доказательства я отношу необычайную легкость небесной субстанции, следующей также и из моей "Оптики"... Это приводит к тому, что от наших глаз, когда они вооружены твоим инструментом, не ускользают даже самые мелкие частицы сферы звезд..., и что в одной единственной частице линзы между глазом и предметом втиснуто гораздо больше (и гораздо более плотной) материи, чем во всем нескончаемом пути сквозь эфир, причем материя в линзе вызывает легкое потемнение, а эфир его не вызывает. Поэтому и создается



Рис. 8.1. Эволюция плотности вещества Вселенной в соответствии с теорией адиабатических флуктуаций плотности. Первыми формируются наиболее крупные структуры - сверхскопления и скопления галактик. Затем внутри них рождаются галактики и т. д.

видимость, будто все необъятное пространство пусто" [12, с. 44]. Удивительно, но в том, что касается видимых звезд, Кеплер оказался совершенно прав: на пути их светового луча в линзе встречается в сотни раз больше атомов, чем в межзвездной среде.

Таким образом, астрономы XVII столетия верили в существование межзвездной субстанции, но считали ее чрезвычайно разреженной и практически невидимой, не подозревая о том, что сама эта субстанция делает для нас невидимой в некоторых направлениях существенную часть Галактики и всей внегалактической Вселенной. В XVIII веке с помощью светосильных телескопов кометоискателей трудами Э. Галлея, Н. Лакайля, Ш. Мессье и П. Мешена были открыты десятки светящихся туманностей. А великий В. Гершель подвел итог этому столетию, обнаружив с помощью своих гигантских инструментов 2,5 тыс. туманных объектов, многие из которых оказались облаками горячего газа. Как мы уже знаем, Гершель обнаружил и пустоты в распределении звезд, но решил, что это "отверстия в небесах", вызванные гравитационной неустойчивостью и скучиванием звезд в отдельные "облака".

В середине XIX в. Анджело Секки, доверяя своей интуиции, утверждал, что черные пустоты в Млечном Пути суть гигантские облака темных газов, проецирующиеся на светлый фон далеких звезд. Однако и в начале XX в. многие астрономы склонны были разделять взгляды Гершеля и находили "гипотезу Секки" маловероятной.

Но совершенствовалась техника наблюдения, накапливались новые данные. На рубеже веков американский астроном-самоучка Э. Барнард (1857-1923) начал систематическое фотографирование неба на Ликской обсерватории, положив тем самым начало широкому применению фотографии в астрономии. В 1913 г. Барнард публикует отдельные фотографии Млечного Пути, а в 1927 г. в свет вышел великолепный фотографический "Атлас Млечного Пути", при подготовке которого Барнард обнаружил и описал 349 светлых и темных туманностей. Отдельно он составил каталог 182 темных туманностей в Млечном Пути и выразил убеждение в том, что это облака поглощающей свет материи, а не промежутки между звездными облаками, как считал Гершель.

Действительно, многие темные пятна в Млечном Пути были окаймлены светлой туманностью, что безусловно указывало на их связь с межзвездным газом, но не доказывало ее. Прямая регистрация холодных фракций межзвездного газа стала возможной лишь десятки лет спустя. А в первой половине XX века оптическая спектроскопия позволила изучить горячий межзвездный газ и обнаружить отражающие звездный свет пылинки - крохотные твердые частицы межзвездной среды. Скопления пыли кажутся светлыми только в том случае, если рядом находится освещающая их звезда. Если же звезда находится за облаком пыли, то свет ее ослабевает иногда настолько, что ее невозможно заметить. Именно поглощение света пылью стало первым индикатором холодного межзвездного вещества.

Дж. Джинс писал в 1930 г.: "...непрозрачностью газа объясняются... темные пятна, которые встречаются на небе среди звездных полей. ...Темное пятно, которое на первый взгляд кажется дырой в звездной системе, картинно обозначается термином "угольный мешок". Однако эти темные пятна не могут быть в действительности пустотами, ибо нельзя представить себе существования столь большого числа пустых туннелей, идущих сквозь толщу звезд и притом направленных прямо к Земле. Поэтому мы должны видеть в них завесы затемняющей материи, которая ослабляет или даже совершенно гасит свет лежащих за ней звезд" [34, с. 48].

Именно ослабление света звезд помогло в эти годы Р. Трюмплеру надежно доказать существование пылевых облаков. Это был первый и, по-видимому, последний случай в истории звездной астрономии, когда межзвездное поглощение света сыграло конструктивную роль в научных исследованиях. С тех пор астрономы постоянно озабочены ослаблением света и изменением цвета звезд, вызванными влиянием космической пыли. Изучение этой пыли как физического объекта стало сейчас самостоятельной ветвью астрономии. До сих пор нет единого мнения о химическом составе, форме и размере пылинок, о местах их формирования. Ясно лишь, что в них сосредоточены относительно тяжелые химические элементы вплоть до железа, что размер пылинок $\sim(10^{-5}-10^{-6})$ см, и что в темных облаках наряду с пылью всегда присутствует значительно большее количество газа.

В начале 40-х годов Л. Спитцер и Ф. Уиппл первыми пытались доказать, что звезды и звездные скопления могут рождаться в наше время из пылевых облаков. Но особой поддержки среди астрономов эти взгляды в то время не получили. Нужны были

наблюдательные факты. В конце 40-х и в 50-е годы большой вклад в эту работу внесли советские ученые Г. А. Шайн, В. Ф. Газе, В. Г. Фесенков, Д. А. Рожковский, А. В. Курчаков и Дж. Ш. Хавтаси. Они создали атласы и каталоги диффузных, отражательных и темных туманностей Млечного Пути. Например, каталог грузинского астронома Дж. Ш. Хавтаси, составленный на основе фотографических атласов Барнарда и Роса - Кальверт, содержал описание 797 темных туманностей.

В конце 40-х годов связь молодых звезд с облаками горячего газа уже не вызывала сомнений: на это указывало их сходное распределение в пространстве. Однако ясно было и то, что разреженный горячий газ не может быть непосредственным предшественником звезд, а скорее всего возник вместе с ними или под их влиянием в процессе звездообразования. Наконец, в 1947 г. американские астрономы Б. Бок (1906-1983) и Э. Рейли обнаружили на фоне светлых туманностей NGC 2237 в созвездии Единорог и NGC 6611 в созвездии Щит небольшие черные круглые пятна, названные ими глобулами (рис. 8.2). Размеры этих плотных конденсаций от 0,05 до 0,25 пк, они содержат от 0,1 до 100 M_{\odot} газа и пыли и ослабляют проходящий сквозь них свет в десятки и сотни раз. Эти объекты сразу стали интерпретировать как предшественников звезд - протозвезды.

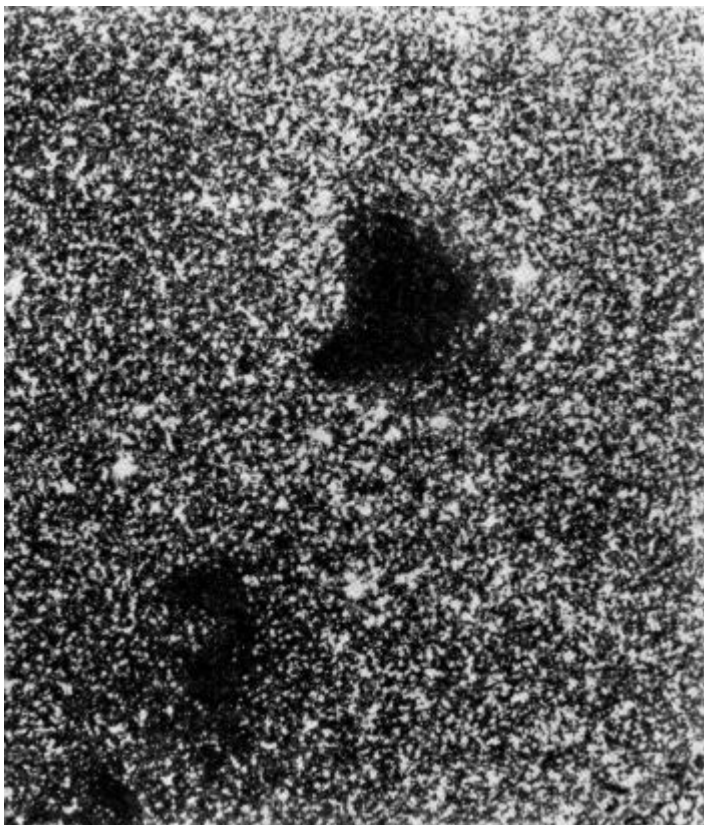


Рис. 8.2. Темные глобулы на фоне Млечного Пути в созвездии Змееносца.

Но в том же 1947 г. В. А. Амбарцумян указал на ассоциации как объекты современного звездообразования, и стало ясно, что звезды формируются большими группами. Значит, и производящее их вещество должно быть объединено в крупные фрагменты. Облачная структура межзвездной среды получила таким образом независимое обоснование. Наблюдатели обнаружили газовые облака в межзвездном пространстве довольно давно. Начиная с 1904 г. астрономы регистрировали в спектрах звезд узкие линии поглощения некоторых элементов и простейших молекул (Na, Ca, K, Ti, CN, CH), которые жили как бы своей, независимой от звезд жизнью, например, имели доплеровское смещение, отличное от смещения всех остальных линий в спектре. К середине 20-х годов, благодаря теоретическим работам А. Эддингтона, было окончательно доказано, что эти

линии образуются, когда свет звезды проходит сквозь полупрозрачные облака межзвездного газа. К началу 50-х годов изучение межзвездных линий поглощения позволило установить, что облака имеют размер порядка 10 пк, и что вблизи плоскости Галактики на луче зрения длиной в 1 кпк обычно встречается 9-10 таких облаков.

В 1951 г. радиоастрономы зафиксировали излучение нейтрального водорода на волне 21 см и сообщили о существовании водородных облаков с массами в сотни раз больше солнечной. Это открытие привлекло внимание специалистов по звездной динамике. Дело в том, что распределение пространственных скоростей звезд указывает на существование эффективного механизма перемешивания звездных траекторий; влияния взаимного притяжения звезд для этого явно недостаточно. Когда были обнаружены водородные облака, американские астрономы Л. Спитцер и М. Шварцшильд высказали гипотезу о существовании в Галактике нескольких тысяч газовых облаков с массами 10^5 - $10^6 M_{\odot}$, которые могли бы играть роль "ложки", перемешивающей своим притяжением орбиты звезд. Через четверть века их предсказание блестяще подтвердилось: облака именно такой массы и в указанном количестве действительно были обнаружены и получили название гигантских

молекулярных облаков [44]. Они, как мы увидим, не только влияют на движение звезд, но и являются их главными "родильными домами".

Межзвездные облака сейчас разделяют, по крайней мере, на три типа в соответствии с их температурой и плотностью: диффузные (10^2 - 10^3 К, 1 - 10^2 см⁻³), темные (10 - 10^2 К, 10^2 - 10^4 см⁻³) и молекулярные (5 - 50 К, 10^3 - 10^6 см⁻³) облака. В особую группу выделяют компактные газопылевые глобулы из-за их малой массы и резко очерченной формы. Гигантские молекулярные облака также выделяют в особую группу в связи с их фундаментальной ролью в процессе звездообразования и эволюции молодых звезд. Но вполне очевидно, что границы между различными типами облаков достаточно условны, а сами облака часто имеют иерархическую структуру и взаимно проникают друг в друга.

В поисках причины, удерживающей облака от расширения, Л. Спитцер еще 40 лет назад предложил двухкомпонентную модель межзвездной среды, в которой относительно холодные плотные облака удерживаются от расширения давлением окружающего их разреженного горячего газа. Эта идея подтвердилась и получила развитие. Радиоастрономы обнаружили не только излучение относительно холодного атомарного водорода в линии 21 см, но и непрерывное излучение разреженного ионизованного газа.

До 1970 г. астрофизиков вполне удовлетворяло представление о межзвездном веществе как о двухкомпонентной среде: в пространстве, заполненном горячим газом с температурой $T \sim 10^4$ К, плавают холодные облака ($T \sim 100$ К). На этом основном фоне происходили некоторые скоротечные и в целом незначительные явления: одни звезды теряли вещество в виде разреженного и очень горячего ($T \sim 10^6$ К) звездного ветра, другие теряли его в виде плотных и не очень горячих планетарных туманностей. Холодные облака частично испарялись при взаимных столкновениях или от близкого соседства с горячими звездами, частично же - остывали и сжимались, порождая новые поколения звезд. Но в целом состояние межзвездной среды характеризовалось стабильным балансом межоблачного газа и облаков размером (0,1 - 50) пк и массой ($0,1$ - 10^4) M_{\odot} .

Но в начале 70-х годов представление о межзвездной среде стало быстро меняться. В связи с развитием коротковолновой радиоастрономии в космическом пространстве были открыты достаточно сложные молекулы, содержащие до семи атомов; такие молекулы могли образоваться и жить лишь в очень плотных и холодных облаках. К середине 70-х годов появились первые массовые обзоры этих облаков, подтвердившие их огромную плотность и массу. Правда, наблюдения главного компонента этих облаков - молекулярного водорода (H_2) крайне затруднены, поскольку эта молекула не излучает в радиодиапазоне. Но излучение других молекул, в особенности молекулы CO, позволило довольно подробно изучить гигантские холодные облака.

В те же годы с помощью космических УФ телескопов был обнаружен чрезвычайно горячий, так называемый "корональный" межзвездный газ низкой плотности ($T \sim 10^6$ К, $n \sim 10^{-3}$ см⁻³), возникающий в результате взрывов сверхновых звезд. Оказалось, что этот газ заполняет не только большую долю галактического диска, но и простирается высоко в гало Галактики, образуя восходящие горячие потоки и возвращаясь к диску в виде охлажденных облаков. Структура межзвездной среды теперь представляется многокомпонентной, многофазной (табл. 8.1), а процессы в ней - значительно более сложными и интересными, чем 20 лет назад.

Фаза	Температура, Т, К	Плотность, n, см ⁻³	Доля объема диска Галактики, %
Горячая, III	$3 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	74
Теплая, II - III	8000	0,25	23
Прохладная, II	80	40	2
Холодная, H ₂	10	300	1

Таблица 8.1. Основные фазы межзвездного газа.

КРУГОВОРОТ ВЕЩЕСТВА В ГАЛАКТИКЕ

Два основных населения, две формы вещества известны нам сейчас в Галактике: звезды и межзвездная газопылевая среда. Они находятся в постоянном взаимодействии, постоянно обмениваются веществом и энергией. Большая часть современной астрофизики так или иначе посвящена изучению именно этих процессов. Однако в начале XX века о связи между звездами и межзвездным веществом было известно еще очень мало.

В 1916 г. Э. Барнард обнаружил расширяющуюся туманную оболочку, которая образовалась вокруг Новой звезды, вспыхнувшей в созвездии Персея в 1901 г. Это открытие стало одним из первых указаний на возможность обмена веществом между звездами и межзвездной средой. А поскольку примерно в те же годы Дж. Джинс разработал теорию гравитационной неустойчивости разреженной среды и образования из нее звезд, то появились предпосылки для обобщающих взглядов на круговорот космической материи.

В 1921 г. немецкий физик В. Нернст (1864-1941) в лекции "Вселенная в свете современных исследований", прочитанной им в Берлинской академии, поставил вопрос о том, возможно ли определенное квазистационарное состояние Галактики, при котором в процессе разрушения одних звезд высвобождается столько же вещества, сколько его тратится на формирование других, образующихся в это же время?

Разумеется, нынешние астрономы ответят на такой вопрос отрицательно, ибо хорошо известно, что из круговорота вещества в Галактике постоянно выпадают неразрушающиеся остатки звездной эволюции: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры(?), а также объекты субзвездной массы, например, планеты. Да и химическая эволюция Галактики вследствие термоядерных реакций идет в одном направлении - от простых элементов к сложным. Поэтому стационарное состояние Галактики в целом недостижимо.

Однако, если сформулировать тот же вопрос по отношению только к межзвездной среде, то не исключено, что она уже длительное время пребывает в квазистационарном состоянии. Действительно, существуют указания на то, что уменьшение массы газа в процессе звездообразования и изменение его химического состава в результате выброса тяжелых элементов проэволюционировавшими звездами почти в точности компенсируется аккрецией на Галактику чистого водородо-гелиевого межгалактического газа. Вероятно, именно поэтому в течение последних нескольких миллиардов лет звезды в Галактике образуются почти в постоянном темпе и с неизменным химическим составом. Давайте познакомимся с этими процессами подробнее. В том, что в межзвездной среде поддерживается относительный баланс вещества, нас убедит простой расчет. Вся совокупность наблюдательных данных указывает, что полная масса межзвездной среды в Галактике составляет около $8 \cdot 10^9 M_{\odot}$. В то же время, как мы знаем, ежегодно в звезды превращается около $4 M_{\odot}$ диффузного вещества. Расходуя межзвездную среду с такой скоростью, Галактика полностью лишилась бы ее за 2 млрд лет. Но возраст нашей звездной системы никак не меньше, чем 10 млрд лет. Значит, либо запасы межзвездной среды стремительно подходят к концу (а в это трудно поверить, поскольку вокруг нас много подобных галактик), либо имеются источники ее пополнения.

Такие источники действительно существуют. Расчеты эволюции одиночных звезд показывают, что звезды с начальной массой менее $9 M_{\odot}$ в конце эволюции превращаются в белые карлики с массой меньше чандрасекаровского предела ($1,4 M_{\odot}$). Точнее говоря, в белые карлики превращаются проэволюционировавшие ядра звезд, лишенные водорода и в значительной степени - гелия. У звезд с начальными массами 1, 5 и $9 M_{\odot}$ массы ядер составляют, соответственно, 0,6; 0,85 и $1,1 M_{\odot}$. Остальное вещество, т. е. богатые водородом оболочки звезд сбрасываются ими на стадии красного гиганта в виде мощного звездного ветра и некоторое время наблюдаются как планетарные туманности. Как видно из табл. 9.1, это один из важнейших источников поступления газа в межзвездную среду.

Масса выброшенного вещества от взрыва Новой невелика - десятитысячные доли массы Солнца, и несмотря на то, что в Галактике ежегодно вспыхивает более 100 Новых, все вместе они выбрасывают в пространство сравнительно небольшое количество газа. Немного газа

поставляют и Сверхновые, но это очень ценный газ: он обогащен продуктами ядерного синтеза - тяжелыми элементами, из которых формируются твердые пылинки, астероиды, планеты и живое вещество на них.

Источники вещества	Темп потери вещества, M_{\odot} в год	Количество в Галактике	Общая потеря массы, M_{\odot} в год
Звезды типа Вольфа - Райе	$3 \cdot 10^{-5}$	10^3	0,03
Вспыхивающие звезды	10^{-12}	10^{11}	0,1
Звезды типа Т Тельца	10^{-8}	10^6	0,01
Звезды типа У Близнецов	$2 \cdot 10^{-9}$	10^7	0,02
Звезды спектрального типа: О,В	$2 \cdot 10^{-6}$	10^5	0,2
М I	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^4$	0,08
М II	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^5$	0,16
М III	10^{-8}	10^6	0,01
Планетарные туманности	10^{-5}	$3 \cdot 10^4$	0,3
Новые (одна вспышка)	10^{-4}	100 в год	0,01
Сверхновые (одна вспышка)	0,5	1 в 30 лет	0,02
Аккреция из межгалактического пространства	-	-	0,2 - 1 (?)

Таблица 9.1. Источники межзвездного вещества.

Звезды главной последовательности, вообще говоря, неохотно расстаются со своим веществом. Пример тому Солнце, которое в виде солнечного ветра ежегодно теряет около $10^{-13} M_{\odot}$. Однако подобные Солнцу звезды-карлики "берут числом": их ежегодный вклад в межзвездную среду вполне заметен. Горячие массивные звезды спектральных классов О и В на главной последовательности теряют газ очень интенсивно, но их в Галактике сравнительно немного, поэтому их суммарный вклад довольно скромнен.

Приближаясь к концу эволюции, все звезды становятся активными поставщиками газа. Наиболее массивные из них превращаются в звезды типа Вольфа - Райе ($M \gtrsim 25 M_{\odot}$); их мощный звездный ветер развивает скорость более 2000 км/с. Звезды меньших масс интенсивно теряют вещество на стадии красного гиганта или сверхгиганта (спектральные классы МIII - MI), а также в период сброса оболочки в виде планетарной туманности.

Последняя строка в табл. 9.1 требует пояснения. Вопрос о том, является ли Галактика "закрытой" системой, т. е. сохраняется ли в ней вещество, или же происходит его обмен с окружающим межгалактическим пространством, с другими звездными системами, имеет большое, возможно, решающее значение для современного процесса звездообразования.

Заметим, что полностью закрытой системой Галактика в принципе быть не может: не говоря уже о потере излучения, она постоянно должна терять звезды. На этом настаивают законы статистической механики. Они указывают, что в любой системе взаимодействующих частиц в результате случайного обмена энергией между ними происходит процесс испарения: молекулы воды покидают стакан, а звезды время от времени покидают звездное скопление. Чем больше воды в стакане, тем дольше она испаряется. Чем крупнее звездное скопление, тем дольше оно живет. Небольшое рассеянное скопление "испаряется" за время $\sim 10^8$ лет, а крупные галактики, как предсказывают расчеты, будут удерживать свои звезды $\sim 10^{15}$ лет.

Средний темп "испарения" звезд из нашей Галактики, вероятно, не превышает 1 звезды за 1000 лет. Для баланса вещества это мизерная величина и о ней можно забыть. Иное дело - межзвездный газ. В крупных галактиках, подобных нашей, газа осталось немного: 2-5 % от

полной массы галактики, а иногда и того меньше. Поэтому даже небольшой отток или приток газа из межгалактического пространства могут существенно повлиять на его количество в галактике, на его химический состав и скорость звездообразования. Что же известно об обмене газом между Галактикой и окружающим пространством?

В 1963 г., наблюдая в линии 21 см, радиоастрономы обнаружили высоко над плоскостью Галактики облака нейтрального водорода, которые движутся довольно хаотично и с большими скоростями (~200 км/с). Их так и назвали - высокоскоростные облака. По небу они распределены не совсем однородно, а концентрируются вдоль нескольких дуг; на одной из них лежат богатые газом Магеллановы Облака. Вполне вероятно, что часть газа потеряна этими близкими галактиками в результате приливного взаимодействия с нашей звездной системой [35]. Возможно также, что часть облаков связана с остывающим корональным газом галактического гало: в таком случае это не постороннее вещество, а лишь одна из цепочек круговорота вещества в Галактике. Наконец не исключено, что облака связаны с потоком межгалактического вещества.

Как бы там ни было, большинство высокоскоростных облаков имеет отрицательные лучевые скорости, т. е. они приближаются к центральным областям Галактики. И хотя расстояния до них определяются с очень большой неоднозначностью, все же можно оценить, что поток газа, приносимый этими облаками к диску Галактики, составляет около $1 M_{\odot}$ в год. Если это посторонний газ, приходящий в нашу звездную систему извне, то за несколько миллиардов лет он может полностью обновить межзвездную среду Галактики. Важно, что межгалактический газ должен быть лишен тяжелых элементов, поскольку до сих пор не участвовал в процессе звездной эволюции. Поэтому, несмотря на непрерывный синтез тяжелых элементов в Галактике, приток чистого межгалактического газа, как мы уже говорили, может поддерживать неизменным химический состав межзвездного газа и образующихся из него молодых звезд.

Чтобы понять, почему это так важно, познакомимся немного подробнее с химической эволюцией Галактики. Еще в начале 60-х годов астрономы сформулировали ставшую теперь классической "проблему G-карликов". Суть ее в том, что если придерживаться простой модели химической эволюции вещества и считать, что все тяжелые элементы рождены звездами предыдущих поколений, то окажется, что по сравнению с этой моделью в Галактике удивительно мало старых малометаллических звезд. Спектральный класс G здесь выделен только потому, что время эволюции этих и более холодных звезд главной последовательности превышает возраст Галактики, и можно считать, что все они сохранились почти без изменения с момента своего рождения.



Рис. 9.1. Шотландский астроном М. Торнер намекает своим шуточным рисунком на то, что источник химических элементов молодых звезд не совсем ясен астрономам.

Так вот, в Галактике, по существу, отсутствует первое поколение звезд, которое родилось из чистого водородо-гелиевого газа и выбросило в межзвездное пространство первые порции тяжелых элементов (см. рис. 9.1). По аналогии с Населением I (звезды диска Галактики) и Населением II (звезды гало) эти первые, не содержащие тяжелых элементов звезды, сейчас условно называют Населением III. Но пока существует лишь "проблема Населения III", поскольку самих его представителей не найдено.

Сейчас в межзвездной среде и в атмосфере молодых звезд на 100 атомов водорода приходится около 9 атомов гелия и 0,13 атома всех прочих более сложных химических элементов (астрономы по традиции называют их тяжелыми). Приблизительно таков же и химический состав Солнца. У более старых звезд тяжелых элементов меньше. Их удельное количество называют металличностью звезды и выражают в виде десятичного логарифма по отношению к Солнцу. Например, запись $[Fe/H] = -1$ означает, что удельное содержание железа в атмосфере данной звезды в десять раз ниже, чем в атмосфере Солнца. В первом приближении содержание других тяжелых элементов обычно пропорционально содержанию железа; хотя при детальном исследовании обнаруживаются отклонения от простой пропорции, позволяющие судить об источнике

тяжелых элементов. Но сейчас мы этого касаться не будем.

Известно немало звезд, у которых содержание тяжелых элементов в 100-200 раз меньше солнечного, т. е. у них $[Fe/H] = -(2 - 2,3)$. Но менее металличные звезды почти не встречаются. Среди карликов рекордсменом является G 64-12, у которого $[Fe/H] = -3,5$. А абсолютный рекордсмен - гигант CD - 38°245 имеет $[Fe/H] = -4,5$. Однако звезд, вообще не содержащих тяжелых элементов, найти пока не удалось.

Чтобы приблизиться к разгадке проблемы G-карликов и понять, почему не найдено Население III, попробовали проследить изменение химического состава звезд Галактики со временем. Удобнее всего это делать не по отдельным звездам, возраст которых определяется с большим трудом, а по звездным скоплениям - шаровым и рассеянным, для которых распределение звезд на диаграмме Герцшпрунга - Рассела служит хорошим индикатором возраста (рис. 9.2). Глядя на полученную зависимость, астрономы пришли в недоумение: оказалось, что в первую половину жизни Галактики количество тяжелых элементов в межзвездном газе линейно увеличивалось со временем, но затем этот рост приостановился. Химический состав образующихся сейчас звезд почти такой же, как у Солнца, которому уже около 5 млрд лет.

Но, с другой стороны, в Галактике постоянно взрываются сверхновые звезды и выбрасывают в межзвездное пространство свежие порции тяжелых элементов. Почему же химический состав межзвездной среды почти не изменился за последние 5 млрд лет? В поисках ответа на этот вопрос астрономы задумались об источниках "чистого" газа, который мог бы "разбавлять" межзвездную среду и поддерживать ее химический состав на постоянном уровне. И это может быть не только аккреция межгалактического газа, но и, например, звездный ветер от очень старых звезд, почти лишенных (Население II) или совсем лишенных (Население III) тяжелых элементов. К тому же, как мы видели, приток газа в Галактику требуется и для поддержания сравнительно высокого темпа звездообразования при относительно невысоком количестве межзвездной среды. Возникает искушение считать приток газа в Галактику фактом и на его основе объяснить отмеченные парадоксы теории звездообразования.

Но не будем торопиться: не исключено, что высокоскоростные облака, падающие на плоскость Галактики, сформировались из ее собственного вещества. Подобно тому, как горячие области солнечной атмосферы, невидимые для глаза, поднимаются высоко над поверхностью светила, а затем, остывая, падают обратно в виде плотных и ярких протуберанцев, так и в Галактике "фонтаны" горячего ионизованного газа могут взмывать над ее плоскостью и, остывая, возвращаться к ней в виде облаков нейтрального водорода. Источниками горячего газа в данном случае являются те же Сверхновые. Вполне вероятно, что часть этого горячего газа вообще покидает Галактику. По аналогии со звездным ветром это явление называют галактическим ветром. Довольно детальные расчеты, сделанные в 1986 г. Д. Брейтшвердтом с сотрудниками и учитывающие взаимодействие газа с космическими лучами и магнитным полем, показали, что интенсивность галактического ветра должна составлять $0,3 M_{\odot}$ в год. Это значение близко к наблюдаемой скорости аккреции водородных облаков на галактическую плоскость. Поэтому точно сказать, каков реальный баланс вещества в системе Галактика - внегалактическая среда пока невозможно. Вообще говоря, существуют способы установить современные источники межзвездного газа по "отпечаткам пальцев", т. е. по содержанию в нем некоторых малостабильных элементов, скажем, дейтерия (D) и лития (Li). Эти элементы охотно вступают в термоядерные реакции в недрах даже самых холодных звезд. Поэтому газ, выброшенный звездами, должен быть

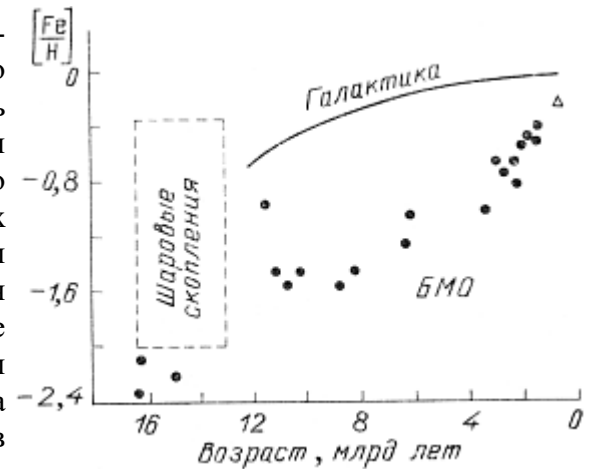


Рис. 9.2. Химическая эволюция Галактики и Большого Магелланова Облака. Величина $[Fe/H]$ - логарифм содержания железа по отношению к его содержанию у Солнца. Шаровые скопления Галактики распределены в широком диапазоне металличности и имеют довольно неопределенный возраст. Линией показано изменение среднего химического состава звезд Галактики, а точками - данные для индивидуальных звездных скоплений БМО. Треугольник - современное значение металличности БМО.

обеднен дейтерием и литием, а межгалактический или догалактический газ - нет.

В современной межзвездной среде относительное содержание дейтерия (D/H) составляет $5 \cdot 10^{-6}$. Но с чем его сравнивать? Как узнать содержание дейтерия в древней межзвездной среде? Исследование атмосфер старых звезд здесь уже не поможет: дейтерий мог там частично выгореть. Где же тот "сейф", в который давным-давно был сдан на хранение кусочек межзвездной среды? Скорее всего это кометы и атмосферы планет-гигантов. В самое ближайшее время будет проведен их прямой химический анализ и вопрос прояснится. Но и дистанционное "просвечивание" уже кое-что дало: в первичном веществе Солнечной системы (т. е. в межзвездной среде пятимиллиарднолетней давности) содержание дейтерия было $D/H = 2 \cdot 10^{-5}$. Если эти измерения безошибочны, то содержание дейтерия в межзвездной среде со временем падает. Значит, вещество испытывает переработку внутри звезд (это дополнительно подтверждается и низким отношением ${}^6\text{Li} / {}^7\text{Li}$). Следовательно, основным источником межзвездной среды являются звезды, а не межгалактическое пространство.

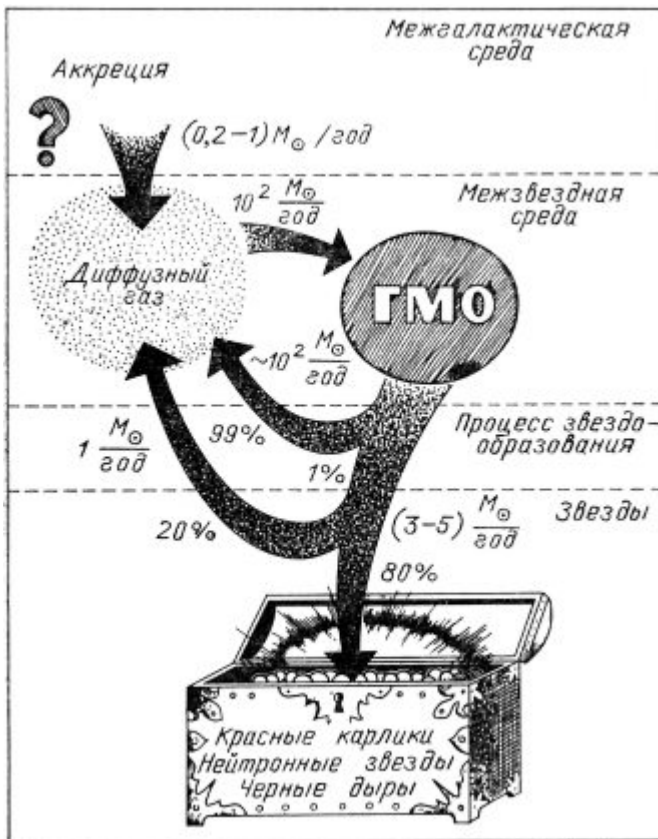


Рис. 9.3. Баланс межзвездной среды в Галактике.

светимость пыли составляет $1,5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$, то есть 30% от полной светимости звезд Галактики. Обладая большой способностью к излучению, пыль является главным охладителем межзвездной среды, а значит, самым непосредственным образом способствует звездообразованию.

По температуре пылинки можно разделить на три типа. Основная масса пыли является *холодной* ($T = 15 - 25 \text{ K}$); она заполняет весь диск Галактики, концентрируется в крупных молекулярных облаках и нагревается лишь рассеянным излучением всех звезд. Эта компонента вносит 37% в ИК светимость пыли. В очагах звездообразования находится *теплая* пыль ($T = 30 - 40 \text{ K}$), которая нагревается от соседства с горячими О- и, в меньшей степени, В-звездами. С этой пылью связана половина ИК излучения Галактики. Оно регистрируется с помощью орбитальных телескопов в диапазоне $\lambda < 100 \text{ мкм}$ и служит хорошим индикатором областей звездообразования.

И наконец, *горячая* пыль ($T = 250-500 \text{ K}$) в небольшом количестве обнаруживает себя в протяженных атмосферах звезд-гигантов спектрального класса М. Их еще называют ОН / IR-звездами, поскольку мелкие уплотнения в околзвездных оболочках проявляют себя как источники мазерного излучения молекулы ОН, а горячая пыль делает звезду мощным ИК источником (IR = Infra Red). В оболочки звезд-гигантов пыль попадает не случайно - она там

Действительно, если просуммировать все числа в правом столбце табл. 9.1 за исключением последнего, связанного с внегалактическим потоком, то окажется, что звезды выбрасывают в межзвездную среду около $1 M_{\odot}$ в год. Конечно, значение этой величины еще не раз будет уточняться астрономами в будущем, но, вероятно, порядок его сохранится. Близость этой величины к современному темпу звездообразования в Галактике ($3 - 4 M_{\odot}/\text{год}$), разумеется, не случайна. Не исключено, что они очень близки друг к другу, и частота рождения звезд в нашу эпоху в основном определяется тем, сколько вещества теряют звезды предыдущих поколений (рис. 9.3).

Заканчивая главу о круговороте вещества в Галактике, стоит немного рассказать о межзвездной пыли. Хотя микроскопические твердые частицы составляют $\sim 0,03\%$ от массы Галактики, их роль в эволюции ее вещества очень велика. Достаточно сказать, что ИК

рождается и лишь затем выбрасывается в межзвездную среду. Свой вклад в производство пыли вносят и некоторые другие объекты Галактики (табл. 9.2).

Источники пыли	Интенсивность поступления, $10^{-3} M_{\odot}/\text{год}$
Красные гиганты	3
Взрывы новых	0,4 - 4
Взрывы сверхновых	3
Протозвезды	< 0,3
Планетарные туманности	0,4
Звезды типа Вольфа - Райе	~ 0,01
Всего	$\sim 10^{-2} M_{\odot}/\text{год}$

Таблица 9.2. Основные источники пыли и интенсивность ее поступления в межзвездную среду Галактики.

О физической природе межзвездных пылинок существуют самые противоречивые предположения [45]. В 30-е годы считалось, что это железные частицы. Затем долгие годы господствовала идея нидерландского астронома ван де Хюлста о ледяных частицах, сформировавшихся из смеси молекул H_2O , H_2 , CH_4 , NH_3 непосредственно в межзвездном пространстве. Заметим, что в то время ни одна из этих молекул в межзвездной среде обнаружена не была, но сейчас большинство из них найдено.

В 50-е годы астрономы обратили внимание на атмосферы холодных звезд как источник пылевых частиц, и английские теоретики Ф. Хойл и Н. Викрамасинг предложили модель графитовых пылинок, образующихся в атмосферах углеродных звезд и под действием лучевого давления вылетающих в межзвездное пространство. А в начале 70-х годов данные ИК наблюдений стимулировали появление новых моделей пылинок, например, силикатной модели, в которой главным компонентом пылинки является карбид кремния. Предполагались и другие модели, часто весьма экзотические. Например, в конце 70-х годов Хойл и Викрамасинг разрабатывали биологическую модель пылинок, согласно которой это высушенные одноклеточные организмы - бактерии, не потерявшие своей жизнеспособности. Правда, эта теория, как и вообще идея панспермии - космического происхождения жизни, имеет мало сторонников.

Сейчас астрофизики пользуются несколькими моделями пылинок, которые понемногу модифицируются, чтобы объяснить новые наблюдательные данные. "Ледяная" модель оперирует с частицами двух сортов. Более крупные из них (0,1 - 0,2 мкм) своей формой напоминают карандаши; они имеют силикатное ядро и ледяную оболочку. Мелкие металлические вкрапления, засоряющие лед, придают пылинкам парамагнитные свойства и заставляют их ориентироваться в межзвездном магнитном поле. Такие пылинки способны объяснить поглощение и поляризацию света звезд в видимой и ИК областях спектра. Но чтобы объяснить поглощение в УФ диапазоне, приходится вводить в модель пылинки иного сорта - мелкие (< 0,01 мкм) сферические частицы из графита или силикатов. Таких частиц должно быть в тысячу раз больше, чем крупных.

Лабораторные опыты с силикатными частицами показали, что после многократного намерзания и испарения ледяной шубы под действием облучения на поверхности частиц остается нелетучей органический осадок ("желтое вещество"), который с некоторой натяжкой можно считать предбиологическим субстратом. Вероятно, все космические пылинки покрыты желтым веществом, а те, что находятся в холодных молекулярных облаках - еще и ледяной шубой.

В других моделях частицы пыли представляются в виде смеси окислов MgO , SiO , CaO , FeO или в виде крупных молекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Но мы эти модели описывать не будем, так как они менее популярны, чем первая, хотя и объясняют довольно точно некоторые наблюдаемые свойства космической пыли. С точки зрения процессов звездообразования, которым посвящена эта книга, нам достаточно знать, что пылинки хорошо экранируют УФ излучение звезд, не пропуская его внутрь плотных

облаков; что они эффективно излучают и не задерживают ИК кванты, способствуя этим охлаждению межзвездной среды; что они участвуют в химическом круговороте Галактики, а их поверхность является прекрасным катализатором для формирования молекул из атомов; и наконец, что при температуре в несколько тысяч Кельвинов пылинки испаряются.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА

Чем сложнее системы, тем реже они встречаются в природе и тем больший интерес к себе вызывают. "На густо покрытом звездами поле было расположено большое, почти круглое, темное пятно"

Наиболее сложную химическую организацию вещества и наиболее упорядоченные процессы излучения, связанные с мазерными радиоисточниками, мы наблюдаем в межзвездной среде. Большая часть ее вещества, превращаясь в звезды, деградирует и под действием высокой температуры вновь приобретает примитивный химический состав. Однако некоторая часть межзвездной среды, судя по всему, продолжает свое восхождение к вершинам эволюции, т. е. к живому веществу [46].

Ф. Хойл, роман "Черное облако"

В космосе обнаружено уже около сотни различных молекул, среди которых немало органических (табл. 10.1). Сам по себе это факт нетривиальный, поскольку при сверхнизких температурах и плотностях, наблюдающихся в межзвездной среде, химические реакции практически не идут. Лишь квантовая химия смогла принципиально разрешить этот парадокс. Оказалось, что даже при температуре 5-10 К химические реакции не прекращаются: они продолжаются внутри и на поверхности пылинок. Причем происходят они не обычным образом, а путем квантовомеханического подбарьерного перехода, для которого участникам реакции не требуется большой кинетической энергии. Как показали расчеты академика В. И. Гольданского, из наиболее распространенных легких элементов (Н, С, N, O) при сверхнизких температурах синтезируются прежде всего уксусная кислота и мочевина. Любопытно, что во многих схемах предбиологической эволюции рассматривается взаимодействие именно этих соединений.

Естественно, что наиболее распространенной в космосе молекулой должна быть молекула водорода H_2 , но обнаружить ее удалось далеко не сразу, а исследовать распределение в Галактике вообще пока не удалось. Дело в том, что молекула водорода симметрична, а значит, ни ее тепловые колебания, ни ее вращение не приводят к взаимному смещению разноименных электрических зарядов и, следовательно, не вызывают электромагнитного излучения. Ни в видимом, ни в радиодиапазоне у молекулы H_2 нет энергетических переходов. А электронные переходы с нижнего на более высокие уровни лежат в далеком УФ диапазоне, недоступном для регистрации с поверхности Земли. Поэтому молекулу H_2 удалось обнаружить только с помощью космических телескопов по поглощению звездного излучения в полосе Лаймана (991 - 1132 Å).

Химическая формула	Название молекулы	Спектральный диапазон	Год открытия
2-атомные молекулы			
CH	Метилидин	Опт	1937
CN	Циан	Опт	1940
CH ⁺	Метилидин (ион)	Опт	1941
OH	Гидроксил	Р 18 см	1963
CO	Моноокись углерода	Р 2,6 мм	1970
H ₂	Молекулярный водород	УФ	1970

CS	Сероуглерод	Р 2,0 мм	1971
SiO	Моноокись кремния	Р 2,3 мм	1971
SO	Моноокись серы	Р 3,0 мм	1973
NS	Сульфид азота	Р 2,6 мм	1975
SiS	Сульфид кремния	Р 2,8 мм	1975
C ₂	Двуатомный углерод	ИК	1977
NO	Окись азота	Р 2,0 мм	1978
HCl	Хлористый водород	ИК	1985
3-атомные молекулы			
H ₂ O	Водяной пар	Р 1,4 см	1968
HCO ⁺	Формил (ион, радикал)	Р 3,4 мм	1970
HCN	Цианистый водород	Р 3,4 мм	1970
HNC	Изоцианистый водород	Р 3,3 мм	1971
OCS	Карбонилсульфид	Р 2,7 мм	1971
H ₂ S	Сероводород	Р 1,8мм	1972
C ₂ H	Этинил (радикал)	Р 3,4 мм	1974
N ₂ H ⁺	Диазонил (протонизированный азот)	Р 3,2 мм	1974
HCO	Формил (радикал)	Р 3,5 мм	1975
SO ₂	Двуокись серы	Р 3,6 мм	1975
HNO	Нитроксил	Р 3,7 мм	1977
HCS ⁺	Тиоформил	Р 3 мм	1980
O ₃	Озон	Р 1,5 мм	1980
SiC ₂	Карбид кремния	Р 1-3 мм	1984
H ₂ D ⁺	Дейтерированный водород (ион)	Р 0,8 мм	1985
4-атомные молекулы			
NH ₃	Аммиак	Р 1,3 см	1968
H ₂ CO	Формальдегид	Р 6,2 см	1969
HNCO	Изоциановая кислота	Р 3,4 мм	1971
H ₂ CS	Тиоформальдегид	Р 9,5 см	1971
C ₂ H ₂	Ацетилен	ИК	1976
C ₃ N	Карбонитрил (цианоэтинил радикал)	Р 3,4 мм	1976
HNCS	Роданистоводородная кислота	Р 3 мм	1979
HOCO ⁺	Протонизированная двуокись углерода	Р 3 мм	1980
HCNH ⁺	Протонизированный цианистый водород	Р 2-3 мм	1984
C ₃ H	Пропонил (радикал)	Р 3 мм	1984
C ₃ O	Моноокись триуглерода	Р 1,7 см	1984
H ₃ O ⁺	Гидроний		1986
C ₃ S	Сульфид триуглерода		1987
5-атомные молекулы			

HCOOH	Муравьиная кислота	Р 18 см	1970
HC_3N	Цианоацетилен	Р 3,3 см	1970
CH_2NH	Метанимин	Р 5,7 см	1972
NH_2CN	Цианамид	Р 3,7 мм	1975
CH_2CO	Кетен	Р 2,9 мм	1976
C_4H	Бутадиинил (радикал)	Р 2,6 мм	1978
SiH_4	Силан	ИК	1984
C_3H_2	Циклопропенилидин (радикал)	Р 2 см	1985
6-атомные молекулы			
CH_3OH	Метанол (древесный спирт)	Р 36 см	1970
CH_3CN	Метилциан	Р 2,7 мм	1971
NH_2CHO	Формаид	Р 6,5 см	1971
CH_3SH	Метилмеркаптан	Р 3,0 мм	1979
C_5H	Пентадинил (радикал)	Р 3 мм	1986
H_2CCH_2	Этилен		1987
7-атомные молекулы			
$\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$	Метилацетилен	Р 3,5 мм	1971
CH_3CHO	Ацетальдегид	Р 28 см	1971
CH_3NH_2	Метиламин	Р 3,5 мм	1974
CH_2CHCN	Акрилонитрил (винилцианид)	Р 22 см	1975
HC_5N	Цианодиацетилен	Р 3,0 см	1976
C_6H	Гексатринил	Р 22 см	1987
8-атомные молекулы			
HCOOCH_3	Метилформиат	Р 18 см	1975
$\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$	Метилцианоацетилен	Р 1,5 см	1983
9-атомные молекулы			
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	Этиловый (винный) спирт	Р 2,9 мм	1974
$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	Диметилэфир	Р 9,6 мм	1974
$\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$	Пропионитрил (этилцианид)	Р 3 мм	1977
HC_7N	Цианотриацетилен	Р 2,9 см	1977
$\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$	Метилдиацетилен	Р 1,5 см	1984
10-атомные молекулы			
$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	Ацетон		1987
11-атомные молекулы			
HC_9N	Цианоктотетрен	Р 2,9 см	1977
13-атомные молекулы			
HC_{11}N	Цианодекапентин	Р 1,3 см	1981

Таблица 10.1. Межзвездные молекулы (спектральный диапазон: Опт - оптический, Р - радио, ИК - инфракрасный, УФ - ультрафиолетовый).

Линии этой молекулы были обнаружены в спектрах нескольких сотен звезд, но, естественно, лишь в том случае, если газовое облако было полупрозрачным и не сильно ослабляло свет звезды. Такие облака не очень интересны с точки зрения процесса звездообразования. Однако эти наблюдения позволили установить два важных факта: во-первых, пыль и газ в межзвездной среде перемешаны достаточно однородно - не существует преимущественно пылевых или газовых облаков; во-вторых, с увеличением плотности и непрозрачности облаков доля молекулярного водорода в них по сравнению с атомарным возрастает - она изменяется от 0,01% у разреженных облаков, лежащих на высоких галактических широтах, до 60% у плотных, почти непрозрачных облаков, сквозь которые с трудом может пройти излучение звезды. В более плотных облаках практически весь водород находится в молекулярной форме.

Существует еще одна, редкая возможность наблюдать молекулы H_2 : речь идет об их слабом излучении в ИК диапазоне, где находятся квадрупольные линии излучения, образующиеся при энергетических переходах молекулы между вращательными и вращательно-колебательными уровнями. Эти линии наблюдаются там, где газ нагрет до $(1 - 4) \cdot 10^3$ К, но УФ излучение, способное разрушить молекулы, отсутствует, т. е. за фронтами ударных волн. Они возбуждаются либо при взаимном столкновении облаков, либо под действием звездного ветра от молодых массивных звезд. ИК излучение молекулы H_2 - возникает в сравнительно тонком слое газа непосредственно за фронтом ударной волны, там где температура газа максимальна. За счет этого излучения газ быстро остывает и молекулы снова становятся невидимыми.

Таким образом, многочисленные молекулы H_2 почти не дают о себе знать; в этом смысле они могут соперничать со скрытым веществом Галактики. Поэтому астрономы изучают свойства холодного газа по излучению других, менее распространенных молекул. Второй по распространенности после водорода является молекула угарного газа CO. Хотя их в тысячи раз меньше, чем молекул водорода, обнаруживаются они значительно легче. При низких температурах, господствующих в плотных облаках, молекулы H_2 с их высокоэнергетическими уровнями практически не возбуждаются; зато молекулы CO, имеющие уровни в радиодиапазоне, возбуждаются весьма охотно и излучают на волне 2,6 мм.

Именно на эту волну настроены многие радиотелескопы во всем мире: молекула CO уже второе десятилетие служит самым популярным индикатором холодной межзвездной среды. И ценят ее не только за относительную легкость обнаружения, но и за удивительное сродство с молекулой водорода: где одна, там и другая. А причина кроется в одном любопытном совпадении.

Вообще говоря, молекула водорода не очень прочна: для ее разрушения (диссоциации) нужна энергия в 4,5 эВ или больше. Такую энергию имеют кванты с $\lambda < 2756$ Å. Подобных УФ квантов в Галактике много: их излучают все горячие звезды. Однако молекула H_2 поглощает эти кванты весьма неохотно. Виной тому, как и в случае с излучением, высокая степень симметрии молекулы. Поэтому, как правило, разрушение молекул водорода происходит следующим образом. Квант с энергией 11,2 эВ переводит один из электронов молекулы в возбужденное состояние. Обратный переход в основное состояние обычно сопровождается излучением такого же кванта, но иногда энергия молекулы расходуется не на излучение кванта, а на возбуждение внутренних колебаний молекулы, которые заканчиваются ее распадом. Поэтому условно можно считать, что энергия диссоциации молекулы H_2 составляет 11,2 эВ.

И вот оказывается, что энергия диссоциации молекулы CO почти в точности такая же: она равна 11,1 эВ. Поэтому обе молекулы существуют и разрушаются практически в одних и тех же областях межзвездной среды. Вот почему радиоастрономы уверены, что там, где зарегистрирована молекула CO, обязательно присутствует и молекулярный водород. Как видно из табл. 8.1, молекулярный газ в Галактике занимает ничтожный объем. Причина этого в относительной непрочности молекул. Как известно, жесткие УФ кванты с энергией более 13,6 эВ ионизируют атомы водорода и поэтому полностью поглощаются межзвездной

средой в непосредственной близости от горячих звезд. Но более мягкие кванты, в том числе и с энергией 11,1 - 11,2 эВ почти беспрепятственно распространяются в Галактике и разрушают молекулы водорода и угарного газа, как, впрочем, и большинство других молекул. Единственное место, где молекулы могут выжить - это недра плотных газопылевых облаков, куда ультрафиолетовое излучение не проникает (рис. 10.1).

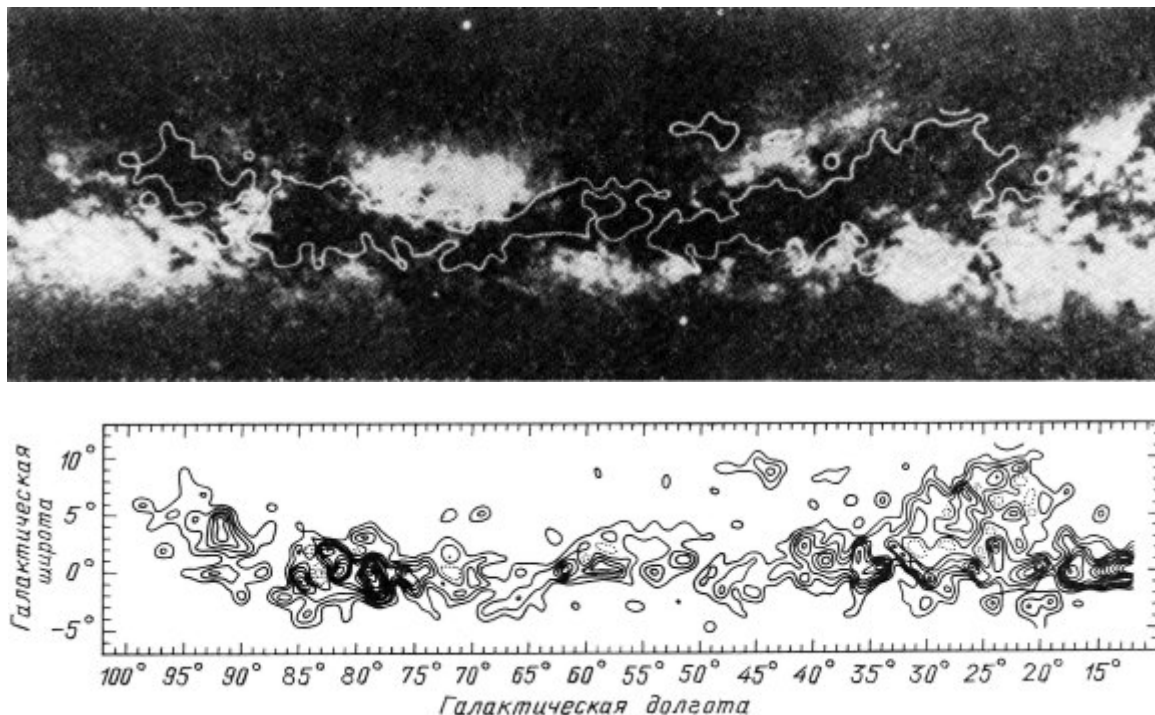


Рис. 10.1. Распределение молекулярных облаков вдоль Млечного Пути в созвездиях Лебедь, Лисичка, Стрела, Орел и Щит. Внизу: радиокарта излучения молекулы CO. Вверху: фотография Млечного Пути с нанесенным на неё контуром областей радиоизлучения. Заметно хорошее совпадение областей концентрации молекул (в радио) и пыли (в оптике).

Обычно чем больше плотность облака, тем более разнообразные молекулы в нем встречаются. Радионаблюдения в линиях молекул CO, OH, NH₃, HCN позволяют заглянуть практически в любую часть облака с разнообразными физическими условиями. Наблюдения нескольких линий одной молекулы дают возможность определить изотопный состав газа, его плотность и температуру. В табл. 10.1 не приведены различные изотопические аналоги молекул, хотя их встречается довольно много. Например, у молекулы угарного газа наблюдается несколько аналогов: наиболее распространенный ¹²C¹⁶O, который обычно записывают просто как CO, а также менее распространенные - ¹³CO, C¹⁷O, C¹⁸O и очень редкий ¹³C¹⁸O. Линии излучения этих молекул чуть-чуть не совпадают друг с другом (изотопический сдвиг), и это помогает детально исследовать облако: если в линии распространенного изотопа облако непрозрачно, то в линии редкого изотопа оно просвечивает насквозь.

Доплеровское смещение молекулярных линий позволяет измерять скорость облаков в Галактике и отдельных конденсаций внутри облака, а полный поток в линиях излучения прямо связан с числом молекул в облаке, а значит, и с его массой. Правда, связь эта не всегда простая.

До сих пор точно не измерено соотношение между числом молекул CO и H₂. Вероятно, оно различается не только от одной галактики к другой, но и в различных частях нашей Галактики. Обычно считают, что на каждую молекулу ¹³CO приходится порядка миллиона молекул H₂. Но точное значение коэффициента перехода еще не установлено, поэтому оценка массы молекулярных облаков у разных исследователей может различаться в 2-3 раза. До 1975 г. радиоастрономы достаточно подробно изучили лишь облака нейтрального атомарного водорода (HI), обычно имеющие массы от 1 до 10³ M_☉. Полная масса атомарного водорода в Галактике составляет 3·10⁹ M_☉, причем большая часть облаков HI

находится на периферии диска, за пределом орбиты Солнца.

После 1975 г., когда были закончены первые, еще неполные обзоры галактического диска в линии молекулы CO, стало ясно, что масса межзвездной среды раза в два больше, чем считалось раньше. Большинство астрономов считает сейчас, что масса молекулярного водорода в Галактике около $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$, и почти весь он находится внутри орбиты Солнца. А если учитывать не только водород в различных формах, но также гелий и другие элементы, то полная масса межзвездной среды оценивается в $8 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Это составляет около 5 % от массы Галактики в пределах радиуса 16 - 18 кпк, т.е. в пределах видимого тела Галактики.

До сих пор, используя термин "облака", мы ни разу не определили точно, что же это такое. В общем, аналогия с облаками на земном небосводе, которая естественно приходит на ум каждому читателю, недалеко от истины. Но при выделении межзвездных облаков есть свои тонкости и даже некоторая несогласованность терминологии. Желая увидеть по возможности больше галактических облаков, радиоастрономы наблюдают их в тех линиях излучения, в которых облака почти прозрачны, а следовательно, сливаются друг с другом. К счастью, разделить облака помогает разница в их лучевых скоростях. Этот метод не работает только в направлениях на центр и антицентр Галактики, поскольку, там все облака имеют лучевую скорость, близкую к нулю.

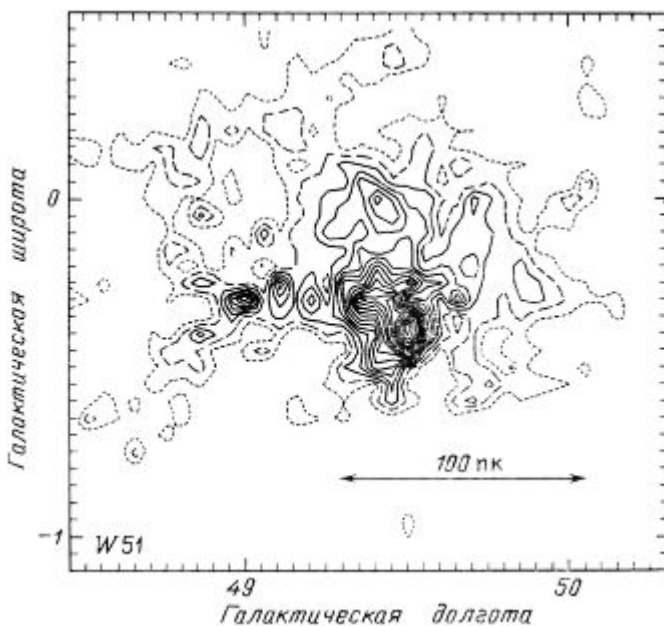


Рис. 10.2. Двумерная (в проекции на небесную сферу) радиокарта в линии излучения молекулы CO гигантского молекулярного облака, связанного с областью звездообразования W51.

бы, например, установить границей облака определенный уровень поверхностной яркости. Но при наблюдении облаков в проекции друг на друга, а это случается очень часто, их излучение складывается и расшифровать картину становится невозможно. Но, как отмечалось выше, разделить излучение разных облаков помогает разница их лучевых скоростей, изменяющаяся, благодаря эффекту Доплера, длину волны молекулярных линий. К тому же молекулярный газ, как самая холодная и спокойная составляющая Галактики, движется почти точно в галактической плоскости по круговым орбитам. Поэтому, зная лучевую скорость облака относительно Солнца, можно довольно точно определить их взаимное расстояние: ведь скорость движения по круговой орбите не зависит от времени и однозначно связана с распределением вещества в Галактике, которое изучено достаточно надежно.

Таким образом, лучевая скорость облака эффективно играет роль третьей пространственной координаты. С появлением у радиоастрономов многоканальных приемников - своеобразных радиоспектрографов, они стали исследовать межзвездную среду в трехмерном пространстве $\{b, l, v\}$, координатами которого являются галактическая широта (b), галактическая долгота (l) и лучевая скорость (v), фактически эквивалентная расстоянию от наблюдателя. Как известно, астрономы-оптики имеют такую ситуацию лишь для космологических расстояний.

Обычно облака выделяются повышенной яркостью излучения (рис. 10.2). Картина распределения яркости полезна для изучения структуры облака, для поиска в нем уплотнений, горячих областей. Обычно в центре облака находится одно или несколько плотных образований - ядер. Если наблюдения ведутся с аппаратурой низкой чувствительности, то замеченными окажутся только ядра и будут интерпретированы как группа самостоятельных облаков. Для более чувствительной аппаратуры оказывается доступным и менее плотное вещество, в которое погружены ядра. В этом случае весь конгломерат назовут одним облаком со сложной структурой. Это и есть источник неопределенности.

Чтобы понятие "облако" стало более четким, необходимо ввести какой-то количественный критерий. Можно было

Пример перехода от двумерного представления облаков к трехмерному мы видим на рис. 10.2 и 10.3. Если на первом из них замкнутые линии объединяют на плоскости точки с одинаковой яркостной температурой, то на втором это уже не линии, а замкнутые поверхности. Точнее говоря, это одна многосвязная поверхность, объединяющая точки с температурой $T = 4$ К. Выбор такого значения температуры, конечно, условен. Можно было выбрать $T = 3$ К или 5, 6, 7 К. В этом случае мы увидели бы очертания, соответственно, менее плотных - наружных, или более плотных - внутренних частей облака.

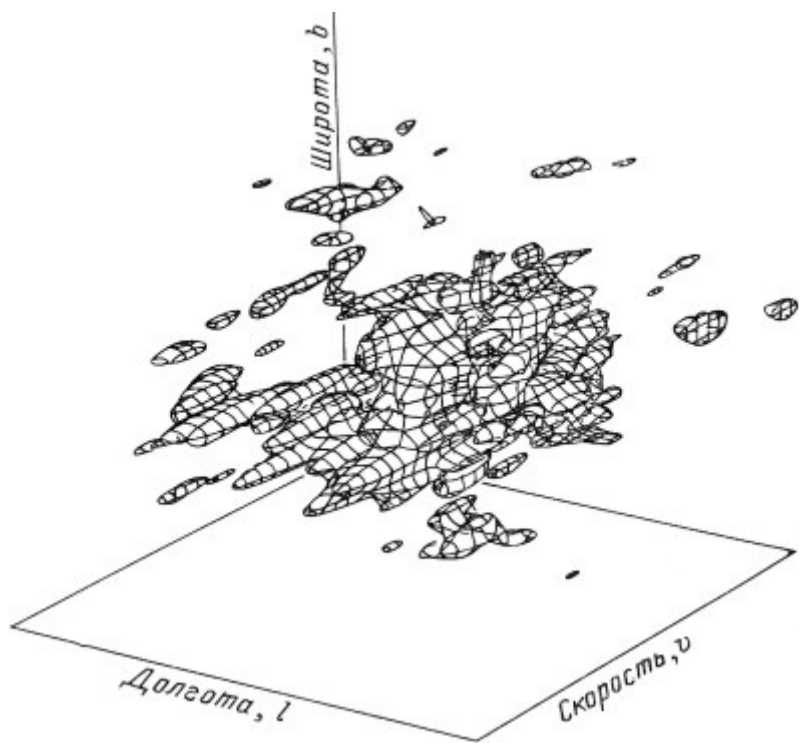


Рис. 10.3. Квазитрехмерное изображение того же облака, что и на рис. 10.2. В качестве границы облака принята поверхность равной яркостной температуры $T = 4$ К.

Таким образом, с точки зрения радиоастрономии, межзвездное облако - это область равной антенной температуры в пространстве $\{b, l, v\}$. Ясно, что рис. 10.2 и 10.3 не исключают, а дополняют друг друга. Двумерное изображение позволяет заглянуть в глубь облака, но дает весьма смутное представление о его форме и даже о количестве облаков, лежащих на луче зрения. Трехмерное представление содержит значительно больше информации о топологии облака, но не позволяет одновременно изобразить внешние и внутренние его области. К тому же трехмерное изображение не совсем точно отражает геометрическую форму облака. Обратите внимание на сигарообразную форму отдельных конденсаций облака. Она возникла на изображении по той причине, что вещество облака движется не только под действием гравитационного поля Галактики, но ощущает также притяжение других частей облака и давление окружающего газа. Любое отклонение от точного кругового движения по галактической орбите заставляет точки поверхности на рис. 10.3 перемещаться по координате v . Поэтому на рисунке многие части облака оказались вытянуты вдоль этой координаты: так проявило себя хаотическое движение газа внутри них.

Как показывают наблюдения, молекулярные облака могут иметь самую разную массу: от единиц до миллионов масс Солнца. Именно эти, наиболее массивные облака, сильнее всего поразили воображение астрономов. Они получили название "гигантские молекулярные облака" (ГМО). Обычно нижней границей их массы считают значение $10^5 M_{\odot}$, но некоторые специалисты предпочитают значение $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Выбор между этими значениями не столь уж важен, если вспомнить о невысокой точности измерения массы самих облаков.

Обзоры галактического диска в линии излучения молекулы CO и подсчет облаков различной массы показывает, что распределение облаков по массе (спектр масс) может быть выражено простой формулой: $dN/dM = AM^{\alpha}$, где A - постоянная, зависящая от полного числа облаков, попавших в обзор, а α - показатель степени. Из наблюдений следует, что $\alpha = -1,55 \pm 0,10$, но для простоты обычно считают, что $\alpha = -3/2$.

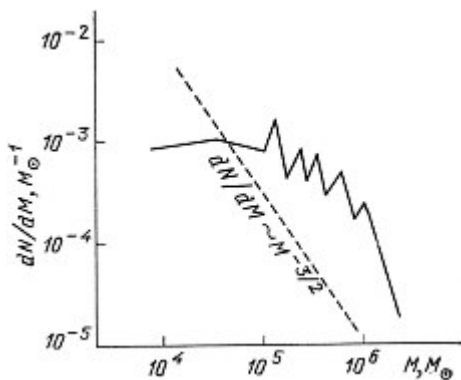


Рис. 10.4. Распределение молекулярных облаков по массе (дифференциальный спектр масс). Наблюдения полны в области $M \geq 5 \cdot 10^4 M_{\odot}$, где они хорошо аппроксимируются степенной функцией (штриховая линия). В области меньших масс наблюдения неполны, т. е. в процессе подсчета учтены не все облака.

Как мы знаем, распределение звезд по массе тоже описывается подобной степенной функцией, но для них $\alpha = -2,4$. При таком значении α количество звезд стремительно увеличивается с уменьшением их массы, так что большая часть вещества Галактики заключена в маломассивных звездах. Спектр масс молекулярных облаков имеет не такой крутой наклон, поэтому большая часть холодного газа содержится в немногочисленных наиболее холодных облаках (рис. 10.4). Так, 90% молекулярного газа заключено в облаках с $M \geq 10^5 M_{\odot}$, т. е. в ГМО. Их в Галактике около 6000. А 30% молекулярного газа содержится в облаках с $M \geq 10^6 M_{\odot}$; их всего около 1000. Таким образом, именно гигантские молекулярные облака служат главным резервуаром холодного плотного газа - предшественника новорожденных звезд.

Основные параметры ГМО представлены в табл. 10.2, в которой указаны их типичные и крайние значения. Накопленные к середине 80-х годов результаты наблюдения ГМО показали, что существует два типа (или, как говорят, две подсистемы) ГМО - теплая и холодная. Как явствует из названия, они различаются температурой газа. В качестве пограничного значения принято считать кинетическую температуру газа $T_{\text{кин}} = 10$ К. У холодных облаков $T_{\text{кин}} = 5 - 10$ К, а у теплых $T_{\text{кин}} = 11 - 30$ К. Холодные облака имеют относительно меньшую массу и заполняют весь диск Галактики - как рукава, так и межрукавное пространство. Поэтому подсистему холодных облаков называют *населением диска*. Процесс звездообразования в недрах этих облаков если и протекает, то очень вяло.

Теплые облака, напротив, тесно ассоциируют в пространстве с областями НП, с горячими О- и В-звездами, с остатками вспышек сверхновых, т. е. с очагами звездообразования. По существу, сами теплые облака являются очагами звездообразования, потому они и теплые. Подобно молодым звездам теплые ГМО распределены по диску Галактики очень неравномерно: есть все основания считать, что и те и другие сконцентрированы в спиральных рукавах. Поэтому теплые облака относят к *населению рукавов*.

Параметр	Среднее значение	Диапазон значений
Масса, M_{\odot}	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$
Радиус, пк	20	10 - 50
Средняя плотность, $\text{H}_2/\text{см}^3$	300	$100 - 10^3$
Температура, К	10	5 - 30
Гравитационная энергия связи GM^2/R , эрг	10^{51}	$10^{50} - 10^{52}$
Энергия диссоциации молекулярного водорода, эрг	$2 \cdot 10^{52}$	$3 \cdot 10^{51} - 10^{53}$
Скорость ухода с поверхности, км/с	15	10 - 20
Скорость турбулентного движения газа внутри облака, км/с	9	2 - 17
Характерное время жизни, лет	10^8	$10^7 - 10^9$
Индукция магнитного поля, Гс	$5 \cdot 10^{-5}$	$(2 - 10) \cdot 10^{-5}$

Таблица 10.2. Параметры гигантских молекулярных облаков.

Заметим, что делить ГМО на два разных населения нельзя столь однозначно, как мы это делаем со звездами. Звезде гало уже никогда не стать звездой диска, а звезда диска никогда не станет малометаллической звездой гало. Облака же, пересекая в своем галактическом вращении спиральные рукава, могут из холодного состояния переходить в теплое, а возможно, и вновь

становиться холодными. Вообще процесс формирования ГМО и инициирования в них звездообразования изучен пока слабо. Разговор об этом нам еще предстоит в следующих главах. Ясно лишь, что на эволюцию ГМО огромное влияние оказывают окружающие условия: столкновения с другими облаками, наличие вблизи горячих звезд или вспышки сверхновой, пересечение галактической ударной волны на краю спирального рукава. Поэтому облако испытывает постоянные превращения, и его вещество непрерывно обменивается между различными составляющими межзвездной среды и звездным населением Галактики.

В отличие от маломассивных облаков атомарного и молекулярного водорода гигантские молекулярные облака имеют сложную внутреннюю структуру. Некоторое упрощенное представление о ней дает рис. 10.5 и табл. 10.3. Такая "матрешечная" структура, когда более мелкие и плотные конденсации вложены в более крупные и разреженные, вообще говоря, характерна для самогравитирующих объектов - звезд, планет. В эволюции маломассивных облаков гравитация играет второстепенную роль; более важной для них является сила газового давления. Поскольку различные фазы межзвездной среды не разделены твердыми стенками, давление между ними в большинстве случаев выравнивается и близко к $P_0 \propto T \cdot n =$

2000 K cm^{-3} . В диффузных облаках газ плотнее и холоднее, чем в межоблачной среде, но давление в них одинаковое и поэтому они пребывают в относительном равновесии.

Физический параметр	Малые уплотнения	Мелкомасштабные конденсации	Крупномасштабные конденсации	Основное тело	Оболочка HI
Масса, M_{\odot}	1	$10^2 - 10^3$	10^4	$10^5 - 10^6$	10^5
Радиус, пк	0,1	1	1 - 10	10 - 100	50
Температура, К	20	20	20	10	50
Плотность, H_2/cm^3	$10^4 - 10^5$	10^4	$5 \cdot 10^3$	300	100 (H)
Гравитационная энергия связи, эрг	10^{42}	$10^{45} - 10^{47}$	$10^{48} - 10^{49}$	$10^{50} - 10^{51}$	10^{49}
Энергия диссоциации молекул, эрг	10^{47}	$10^{49} - 10^{50}$	10^{51}	$10^{52} - 10^{53}$	-
Время свободного сжатия, лет	$(1-4) \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$

Таблица 10.3. Физические параметры основных структурных элементов гигантских молекулярных облаков.

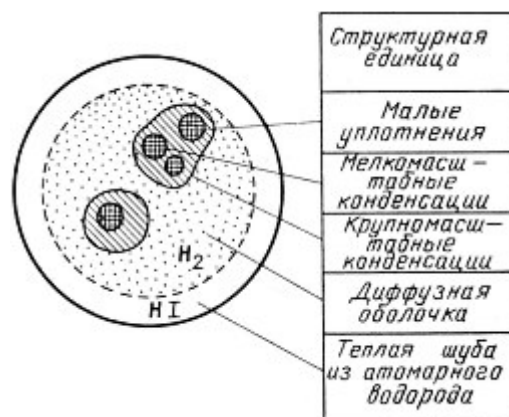


Рис. 10.5. Основные структурные элементы гигантского молекулярного облака.

Если в каком-то месте межзвездной среды давление возрастает (например, в облаке сформировалась звезда и нагрела его), то газ расширяется и давление падает до значения P_0 . Поэтому горячие плотные облака - эмиссионные туманности существуют не долго. Обычно они расширяются с околосветовыми скоростями ($\sim 10 \text{ км/с}$) и живут порядка 1 млн лет. ГМО по многим признакам значительную часть своей жизни проводят в стационарном состоянии, но равновесие в их недрах поддерживается весьма своеобразно. Не газовое давление играет в нем определяющую роль, хотя и оно достаточно велико. Главное противоборство происходит между гравитацией и динамическим давлением крупномасштабных потоков вещества, движущихся со скоростью 2-10 км/с. Это

существенно сверхзвуковое движение: при температуре 10 К скорость звука в газе составляет 0,2 км/с. ГМО - единственный сорт межзвездных облаков, расширение которых сдерживается собственной гравитацией, а не давлением окружающего газа.

Как долго может поддерживаться равновесие внутри ГМО? Для нас этот вопрос не праздный: только в том случае, когда гравитация выигрывает поединок, и происходит сжатие облака, могут рождаться звезды. Физикам хорошо известно, что при дозвуковом течении газа кинетическая энергия потоков рассеивается постепенно вследствие молекулярной вязкости. Но чем больше скорость, тем важнее становятся крупномасштабные возмущения, турбулентность, тем быстрее разрушаются потоки. При сверхзвуковом течении столкновение потоков порождает ударные волны, в которых их кинетическая энергия мгновенно "разменивается" в тепловую и уносится излучением. Без постоянного подвода энергии сверхзвуковые потоки быстро затухают.

Поскольку это крупномасштабные потоки, и их размер сравним с размером ГМО, то считается, что за время своей жизни поток может не более одного раза пересечь облако прежде, чем он столкнется с подобным ему потоком и прекратит свое существование. Если радиус типичного ГМО $R = 20$ пк, а скорость потока $v \approx 9$ км/с, то необходимое для этого время $\Delta t = 2R/v = 5 \cdot 10^6$ лет. Нетрудно оценить полную кинетическую энергию газа в облаке: $E_{\text{кин}} = Mv^2/2 = 6 \cdot 10^{50}$ эрг. Значит, для поддержания достаточно быстрого движения газовых потоков к облаку необходимо подводить энергию с мощностью $E_{\text{кин}}/\Delta t = 4 \cdot 10^{36}$ эрг/с. Каков может быть источник этой энергии?

Источником наиболее крупномасштабных газовых потоков в ГМО могут быть его взаимные столкновения с облаками меньшей массы, которые происходят примерно раз в миллион лет. Сверхзвуковое движение газа в масштабе порядка 1 пк могут генерировать молодые звезды, которые, как мы узнаем дальше, часто являются источниками быстрых газовых потоков. Новорожденная маломассивная звезда обычно выбрасывает два противоположно направленных потока газа с мощностью $\sim (10^{32} - 10^{33})$ эрг/с. Массивные звезды делают это значительно энергичнее (до 10^{37} эрг/с). Поэтому процесс звездообразования в облаке может некоторое время поддерживать его в относительном равновесии, хотя рождение массивных звезд в итоге приводит к разрушению облака.

При изучении ГМО особый интерес представляют их ядра: происходящие в них процессы самым непосредственным образом связаны с формированием звезд. Группа американских радиоастрономов исследовала в 1987 г. ядра двух массивных ГМО. Наблюдения проводились с высоким угловым разрешением $2 \div 6''$ в линиях излучения различных молекул (HCO^+ , HCN , SiO и др.), а также в радиорекомбинационных линиях водорода и в континууме. Одно из исследованных облаков связано с яркой НП-областью W 51, что расположена в спиральном рукаве Стрельца. В этом облаке плотное ядро имеет диаметр 1,4 пк и массу $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Хотя облако в целом вращается довольно медленно, его ядро вращается со значительно большей угловой скоростью, что указывает на недавнее сжатие ядра с сохранением момента вращения ("эффект фигуристки"). Не исключено, что сжатие ядра еще продолжается. Во всяком случае, признаков звездообразования в этом ядре пока не заметно: оно не имеет высокой ИК светимости и других признаков рождения звезд.

Подобная картина наблюдается и в ранее изученном облаке, связанном с НП-областью W 58. Размер ядра у этого облака около 1 пк, масса $\sim 10^4 M_{\odot}$, а температура молекулярного газа около 40 К. Как и ядра других облаков, это ядро быстро вращается: скорость на краю достигает 6 км/с, а направление совпадает с направлением вращения Галактики. Правда, Галактика совершает один оборот за $2 \cdot 10^8$ лет, а ядро облака за $5 \cdot 10^5$ лет. Очевидно, ядрышко раскрутилось при сжатии. Но на первом этапе сжатия оно не могло этого сделать: пока сжимающееся облако было полупрозрачным и частично ионизованным, межзвездное магнитное поле оставалось "вмороженным" в него и, как резиновый жгут, связывало между собой медленно вращающуюся межзвездную среду и быстро вращающееся облако, тормозя тем самым его вращение. В какой же момент поле отпустило центральную часть облака, дав ей возможность сжиматься с сохранением момента и приобрести угловую скорость в сотни раз превосходящую скорость галактического газа?

Используя закон сохранения момента, легко рассчитать, что когда ядро облака вращалось

синхронно с газовым диском Галактики, его размер был около 20 пк, а плотность примерно 100 см^{-3} . С другой стороны, можно рассчитать, в какой момент, сжимаясь, облако стало оптически непрозрачным. Именно в этот момент УФ излучение окружающих звезд перестало проникать в облако, газ стал быстро остывать, из ионизованного он стал нейтральным, а с нейтральным газом, как известно, магнитное поле не взаимодействует. Так вот, оказывается, что магнитное поле отпустило газ, когда размер ядрышка был 20 пк и плотность, естественно, 100 см^{-3} . Значит, с этого момента ядрышко действительно могло сжиматься самостоятельно, увеличивая свою угловую скорость. Сценарий эволюции ядрышка получается, как говорят теоретики, самосогласованным.

Сейчас, в момент наблюдения, ядро облака, по-видимому, стабилизировалось: центробежная сила уравновесила гравитацию, и сжатие прекратилось. Активность новорожденных звезд тоже может играть роль в поддержании равновесия. Во всяком случае, заметная ИК светимость ядра говорит о том, что процесс звездообразования там уже начался.

Значительно дальше проэволюционировало в этом смысле ядро другого массивного ГМО, связанного с НП-областью W 49. Это облако находится на расстоянии 14 кпк от Солнца, но методами радиоспектроскопии динамику его ядра удалось изучить достаточно подробно.

При радиусе около 1 пк ядро, так же как в случае W 51, имеет массу $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Заметим, что массы этих ядер определялись надежным динамическим методом, основанным на измеренной скорости их вращения: $M \approx Rv^2/G$. Этот метод учитывает гравитирующую массу в любой форме - не только в виде газа, но и в виде звезд. А звезд, судя по всему, там немало.

При полной массе $\sim 10^6 M_{\odot}$ облако W 49 имеет ИК светимостью $\sim 10^7 L_{\odot}$, что указывает на активно протекающее в нем звездообразование. При этом почти все индикаторы новорожденных звезд (H_2O -мазеры, биполярные потоки, плотные области ионизованного газа) сосредоточены в области ядра. По излучению в радиоконтинууме обнаружено 40 отдельных плотных конденсаций ионизованного газа, в каждой из которых, вероятно, находится недавно сформировавшаяся O-звезда. Дюжина или больше таких звезд образуют кольцевую структуру по периферии ядра. Поскольку такая структура динамически неустойчива и вряд ли может существовать более одного оборота, образующие ее звезды должны были сформироваться за время менее 1 млн. лет ($\approx R/v$). Естественно полагать, что кроме массивных O-звезд в этой области сформировались и звезды меньших масс. При нормальном распределении звезд по массе (функция Солпитера) в ядре W 49 сейчас должно быть не менее $10^4 M_{\odot}$ молодых звезд. Это заметная доля массы ядра в целом. Вероятно, ядра ГМО в некоторых случаях почти целиком превращаются в звезды.

Американские астрофизики, исследовавшие облако W 49, считают, что как и в случае с W 58 резкий коллапс ядра и вызванное этим одновременное рождение большого количества звезд может быть связано с тем, что давление магнитного поля, препятствовавшее сжатию ядра, в какой-то момент резко ослабло. Как мы знаем, это происходит в тот момент, когда в результате охлаждения газа электрическая проводимость достигает критически низкого значения, при котором магнитное поле быстро диссипирует, т. е. исчезает, преобразуя свою энергию через затухающие электрические токи в джоулево тепло.

Как правило, в центральной части ГМО находится не одно, а несколько компактных уплотнений, которые мы по традиции называем ядрами. То, что ядро не одно, легко объяснить: обычно облака имеют сложную форму, далекую от шарообразной, и уже поэтому нельзя ожидать, что сила тяготения будет выделять только одно ядро. К тому же формирование локальных уплотнений может происходить при столкновении сверхзвуковых потоков газа, которые движутся во всем объеме облака.

Но особенно интересный случай представляют кратные ядра, происхождение которых связывают с процессом гравитационной фрагментации. Расстояние между ядрами того же порядка, что и их собственный размер ($\sim < 1$ пк), поэтому вполне вероятно, что это фрагменты некогда единого ядра, разделившегося при сжатии под влиянием центробежных сил и гравитационной неустойчивости. В табл. 10.4 приведены параметры некоторых двойных ядер по результатам наблюдений в далеком ИК и субмиллиметровом диапазонах. Температура газа в этих ядрах 30-50 К, плотность молекулярного водорода $10^5 - 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, а поглощение света достигает сотен звездных величин. Ядра в этих парах движутся друг

относительно друга со скоростями 1,4 - 4,0 км/с. Возможно, что это взаимное орбитальное движение, такое же как у звезд в двойных системах.

Облако	Параметры ядер	
	размер, пк	масса, M_{\odot}
W 3	0,5	650
	0,3	450
OMC	0,1	100
	0,1	100
S 255	0,7	350
	0,3	500

Таблица 10.4. Параметры двойных ядер у некоторых ГМО.

Любопытно, что будет происходить с двойными ядрами, когда в них начнут формироваться звезды? Судя по массам ядер, каждое из них может стать предком нормального рассеянного скопления. Сохранят ли они после этого свою гравитационную связь друг с другом? Расчеты показывают, что если звездообразование будет протекать достаточно эффективно, и большая часть газа превратится в звезды, то это вполне возможно: из двойных ядер родятся двойные звездные скопления. Если же в звезды превратится менее половины массы ядер, то они не смогут удержаться рядом, и система распадется.

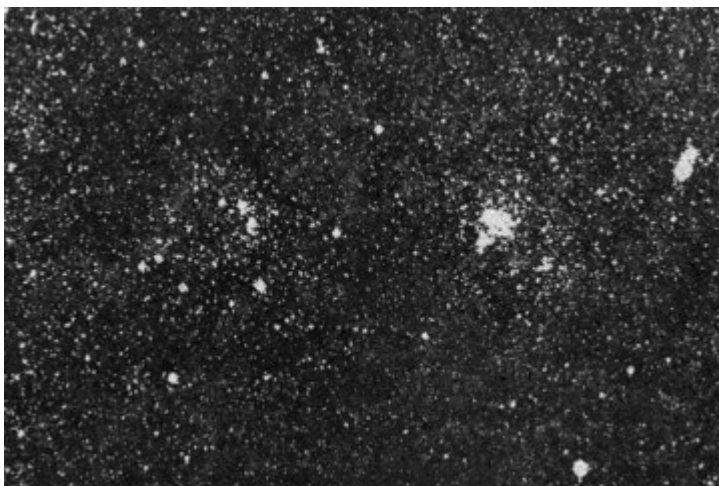


Рис. 10.6. Двойное звездное скопление χ и h Перс в созвездии Персей.

Астрономам известны некоторые случаи, когда звездные скопления расположены очень близко друг к другу и имеют сходные параметры: возраст, массу, пространственное движение. Например, знаменитая пара рассеянных скоплений χ и h Персея в нашей Галактике (рис. 10.6). Размер центральных, наиболее плотных частей их ядер составляет около 2 пк, радиусы самих скоплений около 10 пк, но к тому же они окружены "коронами" из молодых звезд, простирающимися на многие десятки парсеков [47]. Это очень

молодой звездный агрегат: его возраст порядка 1 млн. лет. Среди старых звездных скоплений - как рассеянных, так и шаровых,- двойные системы не обнаружены.

Одной из главных причин, разрушающих двойные звездные скопления, служат гравитационные возмущения со стороны близко пролетающих ГМО. Но этим роль массивных облаков в жизни звездного скопления не ограничивается: массы ГМО столь велики, что они способны нарушить не только связь между скоплениями, но и взаимную связь звезд внутри каждого из них. Именно гравитационные "удары" со стороны ГМО разрушают рассеянные скопления в диске Галактики.

Так любопытно завершается одна из спиралей космической эволюции: рожденное в облаке скопление звезд другими подобными облаками разрушается.

Мы постепенно приближаемся к тому месту, где происходит таинство рождения звезд. В этой главе мы вступаем в область, непосредственно влияющую на эволюцию протозвезды, либо - напротив, подвергающуюся влиянию со стороны формирующейся звезды.

Массивные молекулярные облака, безусловно, являются основными очагами звездообразования. Но изучать процесс рождения звезд внутри них непросто: они очень непрозрачны и удалены от Солнца. Для наблюдений более пригодны маленькие плотные облака - глобулы. Их происхождение, вероятно, связано с разрушением более плотных облаков, но полной определенности в этом нет. Возможно, что некоторые из глобул сконденсировались самостоятельно и пока не участвовали в процессе звездообразования.

С конца 40-х годов, когда Барт Бок обнаружил первые глобулы, и до начала 70-х, когда появились радиотелескопы миллиметрового диапазона, крохотные темные облачка обычно находили на фоне ярких эмиссионных туманностей или на фоне густого звездного поля. Позже их стали искать и исследовать радиометодами. Вообще говоря, изолированные глобулы рассеяны по всему Млечному Пути, но концентрируются к тем областям, где много темных туманностей. На нашем северном небе это прежде всего созвездия Телец и Змееносец, а в южном полушарии - созвездие Южный Крест, где находится знаменитый Южный Угольный Мешок - огромная темная область на фоне Млечного Пути, размером $6^\circ \times 6^\circ$.

Как мы уже знаем, первые глобулы были обнаружены еще Барнардом, но не выделены в специальный класс. Сделал это и дал им название Б. Бок. Другой американский астроном - Беверли Линде - составила обширный каталог темных туманностей, пользуясь фотографиями всего неба, полученными в конце 50-х годов с помощью широкоугольного телескопа Шмидта на Паломар-ской обсерватории (США). В начале 70-х годов в списках у астрономов значилось уже более сотни глобул. Их физические характеристики довольно разнообразны. В табл. 11.1 представлены типичные крупные глобулы, а также наиболее мелкие из обнаруженных. В последнем случае для каждого объекта, в котором наблюдается обычно группа мелких глобул, указаны характеристики самой маленькой и самой большой из них.

Отто Струве (1950) [27]

Объект	Предполагаемое расстояние, пк	Радиус, пк	Масса, M_\odot
Крупные глобулы			
Барнард 227	600	0,4	30
Барнард 34	600	1,1	70
Барнард 361	600	0,9	50
Орион (вблизи звезды ϵ Ori)	400	0,1	2,2
IC 1848	1700	0,3	20
NGC 2264	900	0,14	4
Мелкие глобулы			
NGC 2244	1660	0,02 0,06	0,1 0,8
IC 2944	2200	0,005 0,03	0,01 0,2
M 8	1260	0,02 0,08	0,1 1,4

Таблица 11.1. Параметры некоторых глобул.



Рис. 11.1. Темные глобулы, обнаруженные южноафриканским астрономом А. Д. Теккереем (1910-1977) в начале 50-х годов в эмиссионной туманности IC 2944, связанной с ассоциацией Кентавр OB2.

Например, облако Барнард 5, находящееся от нас на расстоянии 0,5 кпк, имеет радиус 1,2 пк, а его масса оценивается почти в $10^3 M_{\odot}$. Низкая температура газа в нем свидетельствует об отсутствии в данный момент массивных звезд, но потенциально это облако может стать предком небольшого звездного скопления.

Несколько лет назад американский астроном Р. Снелл подробно исследовал дюжину глобул, находящихся сравнительно недалеко от Солнца, на расстоянии 150-200 пк. Диаметры исследованных облаков оказались от 0,5 до 1,5 пк, а массы - от 10 до 140 M_{\odot} . Средняя плотность газа от одной глобулы к другой меняется не сильно и близка к $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Но распределение газа в каждом облаке очень неоднородно: плотность увеличивается к центру по закону $\rho \sim 1/r^2$ и достигает значения 10^5 см^{-3} . Вблизи центра глобул температура газа очень низка - всего 10-20 К. Горячих звезд там наверняка нет. Зато вблизи внешней границы глобулы температура газа увеличивается - ведь облако нагревается снаружи потоками звездного света и космических лучей.

Результаты детального исследования глобулы Бок 2 в Южном Угльном Мешке представили в 1984 г. Т. Джонс, А. Хайлэнд и Дж. Бэйли. Используя ИК спектры и измерения поляризации света звезд, просвечивающих эту глобулу насквозь, ученые установили, что масса облачка составляет $12 M_{\odot}$, радиус 0,2 пк, температура газа 10 К, а скорость хаотического движения газовых потоков около 0,5 км/с. Вычисления показали, что гравитационная энергия связи глобулы близка к кинетической энергии газовых потоков и к энергии теплового движения молекул ($3 \cdot 10^{43}$ эрг). Судя по всему, энергия магнитного поля в глобуле также близка к этому значению. Совместное давление газа и магнитного поля поддерживает глобулу в равновесии и препятствует ее быстрому сжатию. Дополнительным подтверждением стационарного состояния глобулы служит регулярная структура магнитного поля (рис. 11.2) и резкое возрастание плотности к центру облака, характерное для самогравитирующих объектов.

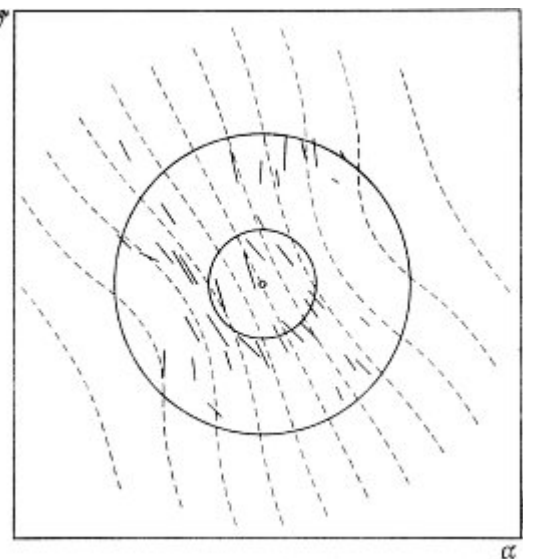


Рис. 11.2. Силовые линии межзвездного магнитного поля (штриховые кривые) в окрестности сжавшейся глобулы. Направление поля установлено по поляризации света далеких звезд (черточки).

Одни глобулы концентрируются в областях звездообразования, и на них заметно влияют потоки горячего газа, разлетающиеся от молодых звезд (рис. 11.1). Другие сконцентрированы в спокойных, холодных облаках, где активность молодых звезд пока не проявляется. Как правило, вблизи областей НП глобулы невелики по размеру и массе. Своим происхождением они, вероятно, обязаны расширяющемуся горячему газу, который за счет высокого давления обжимает и уплотняет небольшие конденсации холодного газа. В областях же, где звездообразования пока нет, глобулы крупнее и массивнее, вероятно, потому, что там они спокойно могут расти, увеличивая свою массу за счет аккреции окружающего газа.

Особенно интересны уединенные крупные глобулы, имеющие правильную сфероидальную форму и большую массу.

В состоянии равновесия глобула может пребывать довольно долго. В описанной выше глобуле нет точечных ИК источников, значит, в ней нет ни звезд, ни протозвезд. Поскольку звездное излучение частично проникает в глобулу, ее газ поддерживается в частично ионизованном состоянии, и магнитное поле не затухает. Но если посторонняя сила немного сожмет глобулу и ее прозрачность уменьшится, то по мере затухания магнитного поля и турбулентного движения газа глобула будет необратимо сжиматься и породит одну или несколько звезд.

По оценкам Барта Бока, сделанным в середине 70-х годов, в нашей Галактике должно быть около 30 тыс. крупных глобул, готовых при благоприятном стечении обстоятельств превратиться в звезды. Б. Бок в шутку называл их протопротозвездами. Судьба бесчисленного множества мелких глобул не совсем ясна. Вообще говоря, эти крохотные облачка должны испаряться, растворяться в теплом межоблачном газе. Но кто знает, возможно, некоторые из них под действием внешнего давления сжимаются и превращаются... Вот только непонятно, во что именно они превращаются. Может быть в межзвездные планеты-гиганты, окруженные роем спутников?

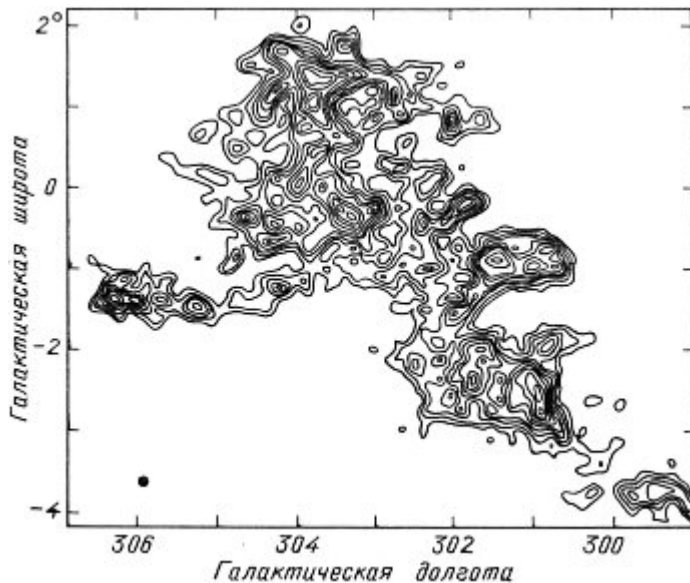


Рис. 11.3. Радиокарта темного облака Южный Угольный Мешок в линии излучения молекулы CO. Черный кружок внизу слева указывает угловую разрешающую способность радиотелескопа международной обсерватории Серро Тололо (Чили), на котором выполнены наблюдения.

Как мы знаем, небольшие глобулы часто бывают объединены в общем родительском облаке. Таков, кстати, знакомый нам Южный Угольный Мешок, находящийся в 175 пк от Солнца и имеющий размеры 18 x 15 пк. Полная масса этого агрегата довольно велика, только молекулярного водорода в нем 3500 M_{\odot} . Внешне это облако неправильной формы похоже на облака в Тельце и Змееносце (рис. 11.3). Так же, как и они, Угольный Мешок содержит множество разнообразных по размеру глобул. Но в то время как в Тельце и Змееносце происходит рождение звезд, в Угольном Мешке этот процесс не наблюдается: там нет ни точечных источников ИК излучения, ни эмиссионных объектов, ни звезд типа Т Тельца или вспыхивающих звезд, характерных для молодого

населения. Температура газа в этом облаке всюду близка к 10 К, что также говорит об отсутствии источников нагрева.

Любопытно было бы установить, как долго пребывают подобные облака в "замороженном" состоянии. Астрофизики пытаются использовать для этого "химические часы": соотношение между количеством различных молекул, которое изменяется со временем в ходе химических реакций. Но это сложная задача пока не решена.

Познакомимся еще с одной парой глобул, лежащей от нас на расстоянии 225 пк в направлении созвездия Змееносец ($l=3^{\circ}$, $b=10^{\circ}$). Небольшая глобула Барнард 61 (B61) ничем нас не удивит: это типичное стационарное облачко без признаков звездообразования. Зато ее более крупный сосед - глобула Барнард 62 (B62), она же Линдс 100 (L 100), достойна внимания (рис. 11.4). Ее размер 0,65 x 0,42 пк, и она сильно поглощает свет лежащих внутри нее и за нею звезд. Но с помощью крупных телескопов датскому астроному Б. Рейпурту и англичанину Г. Ги недавно удалось обнаружить в этой глобуле 4 красных карлика с эмиссионными линиями в спектре.

Эти звезды относятся к классу Т Тельца и по всем признакам очень молоды. Две из них образуют двойную систему. Еще одна звезда этого типа - пятая по счету, спряталась в самом ядре глобулы, но и ее удалось обнаружить с помощью ИК телескопа, работавшего на борту спутника IRAS (InfraRed Astronomical Satellite). Эту звезду выдало тепловое излучение окружающего ее газа и пыли. Поглотив свет звезды, близлежащая пыль нагрелась до 35 К, в то время как остальное вещество глобулы значительно холоднее. Правда, на внешней поверхности глобул В61 и В62 видны ободки и выступы из горячего светящегося газа - так называемые "римы". Своим появлением они обязаны излучению горячих звезд, которых много в этом районе активного звездообразования. Вероятно, важнейшее влияние на глобулы оказывает соседняя с ними звезда ζ Orh. Этот голубой гигант сам недавно родился где-то поблизости, а теперь активно стимулирует звездообразование в других глобулах, повышая температуру и давление межоблачной среды. Поскольку глобула В62 массивнее, она первая уступила натиску внешнего давления, а соседнее облачко пока ему сопротивляется.



Рис. 11.4. Глобулы В61 (вверху) и В62 (внизу) в созвездии Змееносца. На фоне более крупной глобулы В62 видны три молодые звезды с эмиссионными линиями в спектре (изображение негативное).

Астрономическая техника становится все более "дальнобойной". Сейчас мы можем обнаруживать рождающиеся звезды не только вблизи Солнца, но и в других областях Галактики. Например, глобула L810 входит в состав молодого звездно-газового комплекса Лисичка 0В 1 на расстоянии 2,5 кпк от Солнца. В 1989 г. в этом облачке была обнаружена дюжина молодых и формирующихся звезд, две из которых имеют такой мощный звездный ветер, что в недалеком будущем вполне смогут разрушить саму глобулу. Вообще, как мы увидим дальше, протозвезды и молодые звезды отличаются высокой активностью, которая проявляется в форме звездного ветра, мощных газовых струй, оптических вспышек и др. Второй период столь высокой активности наблюдается у звезд лишь незадолго до их смерти. Астрофизики сейчас с увлечением исследуют то, как рождающиеся и умирающие звезды воздействуют на окружающее их межзвездное вещество. Все больше фактов в пользу того, что активные звезды могут стимулировать рядом с собой новый процесс звездообразования [48, 49].

Признаком того, что глобула подвергается влиянию соседних звезд, как мы знаем, служат яркие ободки - римы, окаймляющие внешнюю поверхность глобулы. Исследование нескольких подобных глобул закончили в 1989 г. японские астрономы К. Сугитани и Ю. Фукуи. По данным, полученным со спутника IRAS, они обнаружили в этих глобулах точечные ИК источники, локализованные на расстоянии 0,1-0,2 пк от ярких римов. Очевидно, что сами источники связаны с протозвездами или только что сформировавшимися звездами. А их положение вблизи римов объясняется тем, что разогретый на поверхности глобулы газ увеличивает свое давление и возбуждает волну сжатия (ударную волну), которая устремляется внутрь облака и стимулирует превращение небольших газовых конденсаций в протозвезды.

Двигаясь со скоростью около 10 км/с, волна сжатия проходит расстояние в 0,1 пк за 10^4 лет; значит, за столь короткое время процесс звездообразования охватывает значительную часть глобулы. Стимулированное внешней причиной звездообразование протекает более активно, чем самопроизвольное или как его еще называют спонтанное звездообразование,

происходящее в уединенных глобулах, находящихся вдали от ярких звезд. Количественной характеристикой интенсивности рождения звезд может служить отношение ИК светимости глобулы к ее массе. Для уединенных глобул это отношение составляет $0,03 - 0,3 L_{\odot}/M_{\odot}$, а для глобул, окруженных яркими римами, а значит, подвергающихся внешнему воздействию, оно в десятки раз выше: у трех исследованных японскими учеными глобул (ORI-I-2, L 1206 и rim E в облаке IC 1396) это отношение от 3 до $13 L_{\odot}/M_{\odot}$.

Чтобы окончательно убедиться, что повышенное ИК излучение связано с формированием новых звезд, японские астрономы исследовали ряд глобул с помощью одного из крупнейших в мире радиотелескопов миллиметрового диапазона - параболической антенны диаметром 45 метров на обсерватории Нобеяма. В глобулах с яркими римами и повышенным ИК излучением они обнаружили быстрые струи газа - верный признак формирующейся звезды.

С наблюдательной точки зрения глобулы хороши тем, что в них рождается немного звезд, а активно взаимодействуют с окружающим газом, как правило, не более одной (в жизни звезды это непродолжительный этап). Чтобы исследовать картину детально, обычно ограничиваются одним типичным объектом и на нем сосредотачивают все усилия. В последние годы таким "избранником" у астрономов оказалась глобула В 335 в созвездии Орел ($\alpha = 19^{\text{h}}35^{\text{m}}$, $\delta = 7^{\circ} 27'$). Наблюдатели исследуют ее во всех доступных диапазонах излучения, а теоретики строят все более рафинированные модели.

Расстояние до В 335 всего 250 пк, поэтому ее структуру удалось изучить достаточно подробно. Размер глобулы около 2 пк, а масса $35 M_{\odot}$. По всему объему глобулы разбросано 5 небольших конденсаций газа размером около 0,2 пк каждая и с массами от 0,2 до $0,9 M_{\odot}$. Их плотность сравнительно невелика ($\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$) и пока неясно, суждено ли им стать звездами. Но в центре глобулы находится значительно более интересный объект - конденсация с массой $10 M_{\odot}$. Ее средняя плотность превышает 10^5 см^{-3} , и она уже несколько лет привлекает внимание астрофизиков.

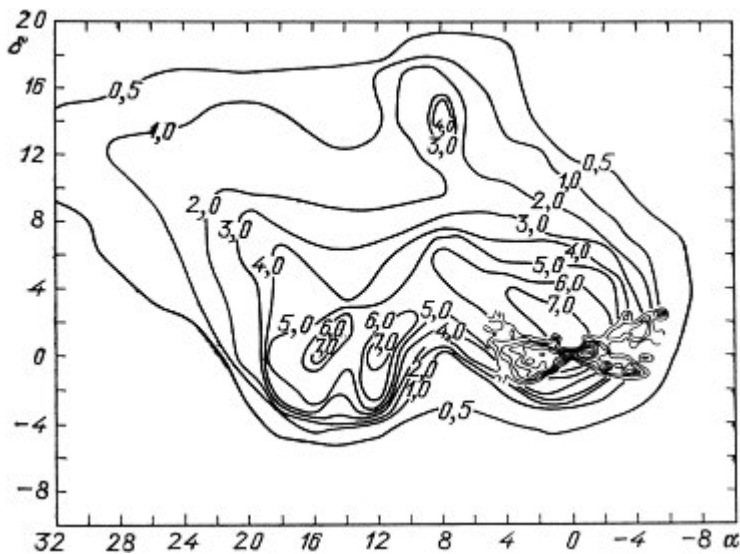


Рис. 11.5. Радиокарта глобулы В335. Проведены линии равной антенной температуры T_A (^{12}CO) - изоденсы; температура указана в Кельвинах. В ядре облака показаны изоденсы биполярного потока, изученного с большим угловым разрешением, чем другие части облака. Правая часть потока удаляется от нас, а левая приближается со скоростью 5-10 км/с.

В 1985 г. группа английских ученых исследовала глобулу В 335 в диапазоне далекого ИК излучения (360 - 750 мкм), способного частично преодолевать пылевую завесу глобулы. Для наблюдений использовался специальный ИК телескоп, установленный на вершине древнего вулкана Мауна-Кеа (Гавайские о-ва). Ранее в этой глобуле уже был замечен компактный ИК источник, от которого в двух противоположных направлениях движутся газовые потоки (рис. 11.5). Как известно, эта особенность считается характерным признаком очень молодых или еще только формирующихся звезд, и поэтому объект привлек к себе повышенное внимание.

Цель исследования английских астрофизиков состояла в том, чтобы выяснить, родилась ли уже в недрах В 335 нормальная звезда (источником энергии которой являются термоядерные реакции) или она находится на стадии формирования. Характерным признаком протозвезды считают аккрецию на нее окружающего вещества: именно за счет его гравитационной энергии протозвезда светится, причем ее размер и светимость на этой стадии эволюции должны быть связаны с параметрами окружающей межзвездной среды.

Измерив угловой размер источника, ученые определили, что диаметр ИК объекта составляет 0,034 пк. Его светимость около $3L_{\odot}$, но практически все излучение находится в далекой ИК

области, так как рождается оно довольно холодными пылинками ($T=14$ К), заполняющими оболочку объекта. Судя по всему, эта оболочка в основном состоит из молекулярного водорода высокой плотности ($3 \cdot 10^6$ см⁻³). Полная масса объекта оценивается в несколько масс Солнца. Что же это за объект - закутанная в газопылевой кокон молодая звезда или сжимающаяся из межзвездного вещества протозвезда?

Плотность объекта так высока, что при существующей в нем температуре он не может быть гравитационно устойчивым и должен существенно сжаться за предстоящие 20 тыс лет. Ни тепловое давление газа, ни вращение, ни энергия турбулентных газовых потоков не в состоянии удержать его от сжатия. Правда, вращение играет определенную роль в его эволюции. Внешняя часть оболочки вращается с периодом 17 млн лет, но внутренняя должна вращаться быстрее. Астрономы считают, что именно вращение придало внутренней части оболочки форму диска или тора, который служит своеобразным "отражателем" и формирует две газовые струи, быстро текущие в противоположных направлениях вдоль оси вращения. Причина, по которой этот газ ускоряется и покидает окрестности формирующейся звезды, пока не вполне ясна.

Однако для астрономов теперь очевидно, что источником энергии объекта в В 335 является гравитационное сжатие. Наблюдения свидетельствуют о том, что из внешних частей оболочки значительный поток вещества со всех сторон падает на диск и нагревает его до температуры 14 К в наружной части и до 40-50 К в центральной области: на это указывает ИК спектр источника. Объекты, в которых одновременно происходит как аккреция, так и разлет газа, наблюдаются крайне редко. Должно быть, это непродолжительная фаза в жизни протозвезды. А в том, что здесь мы имеем дело именно с протозвездой, ученые уже не сомневаются.

Хотя объект В 335, в отличие от "замороженных" глобул, демонстрирует явные признаки активности, все же низкая температура пыли и невысокая светимость источника говорят о том, что термоядерные реакции пока не вступили в дело. Близкие к нему по массе объекты, в недрах которых уже сформировалась звезда, имеют значительно более высокую светимость, а энергия газовых потоков у них в сотни раз выше, чем у объекта в глобуле В 335. Таков, например, источник L 1551 - IRS 5 или известный инфракрасный объект Беклина - Нейгебауэра (BN-объект) в Орионе, являющийся прототипом объектов этого класса.

В табл. 11.2 приведены некоторые данные об объектах типа BN, любезно предоставленные нам доктором Т. Хеннингом из обсерватории Йенского университета (ФРГ). Указанные в таблице объекты имеют болометрическую (полную) светимость в тысячи раз больше, чем у источника В 335, однако, с учетом масштаба явления их наблюдательные проявления во многом схожи. Просто объект В 335 находится на более ранней стадии эволюции и, вероятно, немного менее массивен.

К тому же объекты, представленные в табл. 11.2, более далеки от нас, чем В 335, поэтому у астрономических приборов часто не хватает разрешающей способности, чтобы детально изучить их структуру. Когда же применяются приборы со сверхвысоким угловым разрешением, например, радиоинтерферометры, то оказывается, что у далекого источника сложная структура, и содержит он не один, а десятки и сотни объектов. Так, исследовав окрестности источника Беклина - Нейгебауэра с помощью многоантенного радиотелескопа VLA (Very Large Array) Национальной радиоастрономической обсерватории, американские ученые обнаружили 80 газо-пылевых коконов в области диаметром 0,025 пк. Потенциально каждый из них - будущая звезда. А все вместе они являются образцом протоскопления, которое в скором времени должно освободиться от излишков газа и пыли и появиться на свет.

Заметим, кстати, что пространственная плотность протозвезд в этом протоскоплении ($\sim 10^7$ пк⁻³) значительно выше, чем плотность звезд в рассеянных скоплениях (1 - 100 пк⁻³) и даже в ядрах шаровых скоплений ($< 10^5$ пк⁻³). Это дает ясное указание на эволюционный путь звездных скоплений. Его можно разделить на три этапа: 1) газовое облако сжимается и, достигнув максимальной плотности, превращает часть своего вещества в звезды; 2) за счет энерговыделения формирующихся и молодых звезд остатки газа изгоняются из области звездообразования; 3) вызванное этим уменьшение силы тяжести дает возможность молодому скоплению расширяться. До какой степени будет происходить это расширение и остановится ли оно вообще, или группа молодых звезд образует гравитационно не связанную

ассоциацию, зависит от скорости хаотического движения звезд и их суммарного гравитационного потенциала.

Обозначение			Координаты α [hms] δ [°] (1950.0)	Расстояние от Солнца, кпк	Светимость L_{bol}, L_{\odot}	Наблюдаемые феномены	
Каталог BN-объектов Т. Хеннинга	Каталог точечных источников IRAS	Другие				H ₂ O- мазер	молекулярный поток
6	03236+583 6	AFGL 490	03 23 39,0 +58 36 35	0,9	$2 \cdot 10^3$	+	Биполярный
19	06319+041 5	AFGL 951E	06 31 59,1 +04 15 09	1,4	$7 \cdot 10^3$	-	Биполярный
20	06384+093 2	AFGL 989	06 38 24,9 +09 32 29	0,8	$3 \cdot 10^3$	+	Монополярный, только красный компонент
22	13395- 6153	AFGL 4176	13 39 41,0 -61 53 45	4,0	$2 \cdot 10^5$	-	
26	18018- 2426	AFGL 2059 = M 8E- IRS	18 01 49,1 -24 26 57	1,5	$2 \cdot 10^4$	-	Изотропный
28	18117- 1753	W 33A	18 11 44,2 -17 52 59	3,7	$1 \cdot 10^5$	+	
32	20275+400 1	AFGL 2591	20 27 35,8 +40 01 14	1,5	$4 \cdot 10^4$	+	Биполярный
33	22176+630 3	AFGL 2884 = S 140- IRS	22 17 41,2 +63 03 44	1,05	$3 \cdot 10^4$	+	Биполярный

Таблица 11.2. Некоторые объекты типа Беклина-Нейгебауэра (молодые массивные звезды в пылевом коконе?).

Например, если описанная выше группа из восьмидесяти звезд (пусть каждая из них имеет массу $1M_{\odot}$) внезапно освободится от межзвездного вещества, то их суммарного притяжения будет достаточно, чтобы удержать только те из звезд, скорости которых относительно центра масс этой системы не превышают 7 км/с (это вторая космическая скорость для звездного скопления, равная $\sqrt{2GM/R}$). Но наблюдения указывают, что хаотические скорости газовых конденсаций сейчас составляют 8-10 км/с. Поэтому можно ожидать, что родившиеся из них звезды после разлета остатков газа также покинут область звездообразования и будут выглядеть как расширяющаяся ассоциация. В Орионе уже известно несколько таких ассоциаций (см. табл. 7.2, 7.3 и рис. 11.6). Впрочем, не исключено, что часть звезд, имеющих небольшие скорости, сохранит свою гравитационную связь друг с другом и сформирует рассеянное скопление.

Судьба этого протоскопления будет зависеть от эволюции единственной массивной звезды в нем: той самой, в которую сейчас превращается объект Беклина - Нейгебауэра. Открытый в 1967 г. как мощный компактный ИК источник с температурой излучения 600 К, этот объект считается прототипом массивных протозвезд. Его светимость сейчас $2 \cdot 10^3 L_{\odot}$, а масса звезды, в которую он превратится, будет около $8M_{\odot}$. Ядро этого объекта окружено сверхкомпактной и очень плотной ($d \approx 10 \div 100$ а. е., $n_e \geq 10^7 \text{ см}^{-3}$) зоной Н II, которая проявляет себя в радиоизлучении. Судя по всему, это быстрый и мощный звездный ветер, начавший "дуть" недавно и еще не успевший разрушить холодную оболочку протозвезды.

Через несколько сотен тысяч лет объект Беклина - Нейгебауэра станет нормальной звездой спектрального класса В и будет сильно нагревать и ионизовать окружающий газ, расширяя вокруг себя зону Н II. А через 20 млн. лет, заканчивая свою эволюцию, эта звезда, возможно, взорвется как сверхновая и сбросит быстро расширяющуюся оболочку. Это приведет к выметанию из протоскопления остатков межзвездного газа и к последующему расширению самого звездного скопления. Если часть звезд после этого сохранит гравитационную связь друг с другом, то через некоторое время на этом месте можно будет видеть небольшое звездное скопление подобное Плеядам.

Сейчас астрономам известны объекты типа BN на разной стадии эволюции. Те, что помоложе, имеют низкую температуру излучения ($T \approx 300 \div 600$ К) и пока еще не окружены зоной Н II, хотя их высокая ИК светимость говорит о большой массе протозвезды. Среди этих объектов S255 - IRS1 ($L = 10^5 L_{\odot}$), NGG7538 - IRS9 ($L = 6 \cdot 10^4 L_{\odot}$) и другие. Более продвинувшиеся в своей эволюции объекты типа BN окружены компактными областями Н II ($d \sim 0,5$ пк, $n_e \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$), расширяющимися со скоростью 10-15 км/с и, по существу, уже заканчивающими разрушение газо-пылевого кокона протозвезды.

Не правда ли, чисто внешне процесс формирования звезды в непрозрачном коконе напоминает зарождение птенца в яйце или животного в теле матери. Недаром в современной литературе по звездообразованию мы встречаем множество биологических терминов: родильные дома звезд, плацентарный кокон, вылупление из оболочки и др. И подобно тому, как живая природа постаралась скрыть от наших глаз процесс формирования юного организма, так же неживая природа старательно скрывает процесс формирования звезды, ярко демонстрируя лишь его окончательный результат.

Говоря о причинах, поддерживающих равновесие молекулярных облаков, мы уже упоминали быстрые газовые потоки (струи), наблюдающиеся в окрестности формирующихся звезд. Обычно они проявляют себя доплеровским расщеплением линий в радиоспектре молекулы CO, за что получили название молекулярных потоков, или CO-потоков. На определенной стадии эволюции протозвезды любой массы в ее окрестности наблюдается оттекание "излишков" родительского газа. Но для массивных протозвезд более характерно сферически-симметричное оттекание, поскольку любые формирующие поток структуры в окрестности протозвезды быстро ею разрушаются. Для маломассивных протозвезд характерны направленные потоки, уходящие в тех направлениях, где они не встречают препятствия в

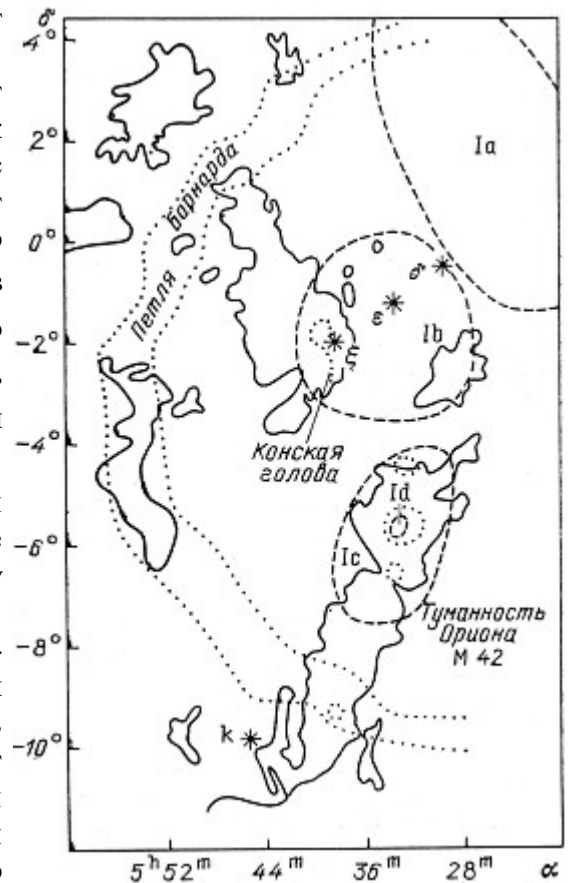


Рис. 11.6. Центральная часть созвездия Орион. Сплошными линиями указаны границы молекулярных облаков; пунктирными - границы отражательных и эмиссионных туманностей; штриховыми - границы подгрупп ассоциаций Ori OB I. Возраст подгрупп Ia, Ib, Ic и Id составляет, соответственно, 12, 8, 6 и 2 млн лет. Возраст Туманности Ориона оценивается в сотни тысяч лет.

виде околозвездного диска. Впрочем, если газовый диск достаточно массивен, то и звезда высокой светимости не сразу может его разрушить, и ей приходится укладывать свой звездный ветер в прокрустово ложе диска.

Именно такой случай наблюдается вблизи отражательной туманности NGC 2071, расположенной в северной части молекулярного облака Орион В. Здесь находится район активного звездообразования: молодые массивные звезды, ИК источник со светимостью $750L_{\odot}$, источники мазерного излучения в линиях молекул OH и H_2O (с этим явлением мы еще познакомимся подробнее). Свет одной из этих молодых звезд как раз и отражает туманность NGC 2071.

Наблюдение в линии молекулы CO показало, что в самом центре этого района, в ядре молекулярного облака, в направлении на ИК источник расположен вращающийся газовый диск диаметром около 1 пк и массой порядка $200M_{\odot}$. Плотность газа в нем довольно высока ($\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$), а температура низка ($\approx 20 \text{ K}$), так что это в основном молекулярный газ. Ось вращения диска почти параллельна оси вращения Галактики, что и должно быть при сжатии газового облака, принимающего участие в общем вращении межзвездной среды вокруг галактического центра.

Наибольший же интерес представляет то, что вдоль оси вращения диска симметрично в обе стороны движутся быстрые газовые потоки. Полная масса газа в них около $20M_{\odot}$, скорость движения около 40 км/с, так что кинетическая энергия потоков $E_k \sim 10^{47}$ эрг. Любопытно, какой источник мог обеспечить выброс этих быстрых газовых потоков из центра газового диска? Наличие в этой области мазерных конденсаций и ИК объектов ясно указывает на присутствие там молодых или еще только формирующихся звезд. В этой же области в центре газового диска обнаружены две компактные зоны III, каждая из которых образована, по-видимому, массивной звездой. Именно эти две звезды, судя по всему, спектрального класса В3 и являются сейчас там главным источником энергии. Обычно такие звезды обладают горячими коронами и мощным звездным ветром, "дующим" со скоростью до 1000 км/с и уносящим с поверхности звезды более $10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$. Это как раз то, что нужно

для объяснения наблюдаемой у газовых потоков энергии.

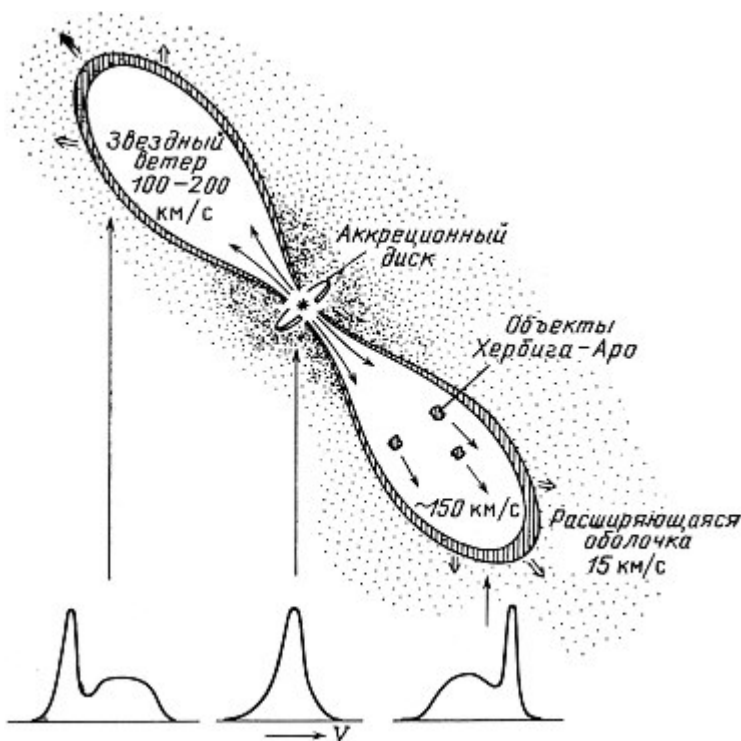


Рис. 11.7. Схема биполярного потока, образованного звездным ветром вблизи формирующейся звезды, окруженной аккреционным диском. Внизу показана форма спектральной линии в излучении, приходящем от различных частей объекта.

Очевидно, что в этом случае быстрый звездный ветер служит лишь "поршнем", который гонит перед собой холодный газ, окружающий звезды (рис. 11.7). Поэтому масса движущегося газа существенно возрастает, а скорость потока снижается до 40 км/с. Причина преимущественного движения газа к полюсам вращения диска кажется вполне ясной: "поршень" звездного ветра не в состоянии продавить толстый слой холодного газа вдоль плоскости диска, но способен прорваться перпендикулярно к этой плоскости сквозь относительно тонкий слой газа. Таким образом, и сформировался двухсторонний биполярный поток, перпендикулярной плоскости массивного диска. Диск при этом

сыграл роль направляющего устройства - коллиматора. Разумеется, для этого он должен быть достаточно толстым и напоминать скорее ватрушку с углублением посередине, чем грампластинку.

Среди астрономов сейчас очень популярна идея о том, что толстые газовые диски способны коллимировать, т. е. направлять в определенную сторону потоки горячего газа и даже пучки релятивистских частиц (см. рис. 11.8). Например, такова одна из моделей уникального объекта SS 433, выбрасывающего во взаимно противоположных направлениях две очень тонкие и чрезвычайно быстрые ($v \approx 80$ тыс. км/с) газовые струи. Такая же модель предлагается для объяснения направленных выбросов (джетов) из ядер радиогалактик. Но в этих моделях имеются в виду аккреционные диски вокруг старых объектов, скорее всего вокруг черных дыр различной массы. А в нашем случае мы видим толстый газовый диск вокруг очень молодого звездного скопления или, что бывает чаще, вокруг одиночных формирующихся звезд.

При этом, как показывают наблюдения, в газовом комплексе Ориона объект NGC 2071 не является уникальным. Быстрые потоки газа выбрасываются еще из нескольких очагов звездообразования: Орион А, NGC 2024, ОМС-2 и др. Скорость этих газовых потоков составляет 10-80 км/с, но в области объекта HH 1 и 2 газ движется со скоростью около 300 км/с. Полная энергия, поставляемая этими потоками в комплекс Ориона столь велика, что способна удержать его от быстрого остывания и сжатия, которое ему неминуемо грозило бы при отсутствии внутренних источников энергии.



Рис. 11.8. Этот шуточный рисунок шотландского астронома М. Торнера указывает на популярность идеи газовых струй у современных астрономов.

Параметры некоторых хорошо изученных молекулярных потоков приведены в табл. 11.3. Обозначения в ней следующие: R_{\max} - максимальный радиус (длина) потока; $\alpha = R_{\max}/R_{\min}$ - параметр коллимации, позволяющий судить о наблюдаемой форме потока (R_{\min} - полуширина потока в наиболее узкой части). Реальная форма потока из-за эффекта проекции отличается от наблюдаемой: если ось потока направлена на нас, то $\alpha \approx 1$, хотя в действительности поток может быть тонким и длинным. Зная массу газа в потоке (M) и его скорость $\{V$, обычно она составляет 5-25 км/с), вычисляют поток механического момента ($MV \equiv MV^2/R$) и механическую "светимость", т. е. поток энергии ($L_m \equiv MV^3/2R$); а чтобы судить об эффективности механизма ускорения газа, ее необходимо сравнить с радиационной светимостью центральной звезды (L_*).

Объект	R_{\max} , пк	α	M , (M_{\odot})	MV , (M_{\odot} км с ⁻¹ год ⁻¹)	L_m , L_{\odot}	L_* , L_{\odot}
Mon R 2	2,1	3,0	100	$2 \cdot 10^{-2}$	240	$5 \cdot 10^4$
Sep A	0,50	6,2	10	$1 \cdot 10^{-2}$	25	$5 \cdot 10^4$
M 8 E	0,31	1,5	9,6	$5 \cdot 10^{-3}$	2,9	$3 \cdot 10^4$
Orion A	0,04	1,0	5	$5 \cdot 10^{-1}$	2600	$1 \cdot 10^4$
GGD 12-15	0,87	6,2	1	$4 \cdot 10^{-4}$	0,42	$1 \cdot 10^4$
AFGL 490	0,62	1,9	14	$4 \cdot 10^{-2}$	115	1400
NGC 2071	0,41	3,7	20	$6 \cdot 10^{-2}$	175	750
HH 26	0,46	2,7	3,1	$2 \cdot 10^{-3}$	2	50÷300
HH 7-11	0,40	1,9	4	$4 \cdot 10^{-3}$	6,4	90
PV Cep	0,78	3,5	1,7	$9 \cdot 10^{-4}$	0,03	80

T Tau	0,15	1,0	0,1	$6 \cdot 10^{-5}$	0,07	22
B 335	0,4	2,8	0,1-0,8	$0,4 \div 3,2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} \div 10^{-2}$	7,6
AS 353	0,27	2,2	0,05	$6 \cdot 10^{-6}$	0,003	4

Таблица 11.3. Физические параметры молекулярных потоков.

Идея о горячих газовых струях, вылетающих вдоль оси диска и разгоняющих холодный окружающий газ, получила недавно прямое подтверждение: у некоторых молодых объектов эти струи были открыты в оптическом диапазоне (рис. 11.9). Они вытянуты в двух противоположных направлениях от объекта на несколько тысяч астрономических единиц и очень хорошо сфокусированы: угол их раствора составляет всего $5-10^\circ$, а скорость движения - более 100 км/с.

Обратимся еще к одному типу объектов, непосредственно связанных с процессом звездообразования. В 1954 г. Дж. Хербиг и Г. Аро обнаружили на фотографиях туманности Ориона, снятых с интервалом в несколько лет, появление звездобразных объектов, невидимых на предыдущих снимках. Однако дальнейшие исследования показали, что объекты Хербига - Аро, или как их называют НН-объекты (Herbig - Haro), не являются в прямом смысле звездами, хотя они несомненно связаны с формированием звезд. Давайте познакомимся с ними поближе.

Объекты Хербига - Аро - это маленькие, размером в несколько угловых секунд яркие конденсации, обычно окруженные менее яркой диффузной оболочкой. Спектр самой конденсации и ее оболочки в основном состоит из линий излучения водорода и некоторых других элементов, требующих небольшой степени возбуждения: [O I], [S II], [N I], [Fe II]. Физический размер такой конденсации обычно 500 - 1000 а. е. Нередко они образуют группы или цепочки размером 5000 - 10^4 а. е.

Все НН-объекты расположены внутри комплексов темных облаков или тесно связаны с ними. Очень часто они соседствуют со звездами типа Т Тельца. Во многих случаях с НН-объектами ассоциируют (но не совпадают) ИК источники и H_2O -мазеры. Все это прямо указывает на связь НН-объектов с процессом звездообразования.

Спектры более чем 100 детально исследованных НН-объектов говорят о том, что основным источником возбуждения оптического излучения в них служит ударная волна, налетающая со скоростью 40 - 200 км/с на газ с плотностью порядка 100 см^{-3} . Это хорошо согласуется с тем фактом, что НН-объекты, как правило, движутся с большими лучевыми и тангенциальными скоростями: до 400 км/с. Несомненно, что НН-объекты и высокоскоростные молекулярные потоки связаны друг с другом: как минимум половина НН-объектов наблюдается не далее $10'$ от известных молекулярных потоков.

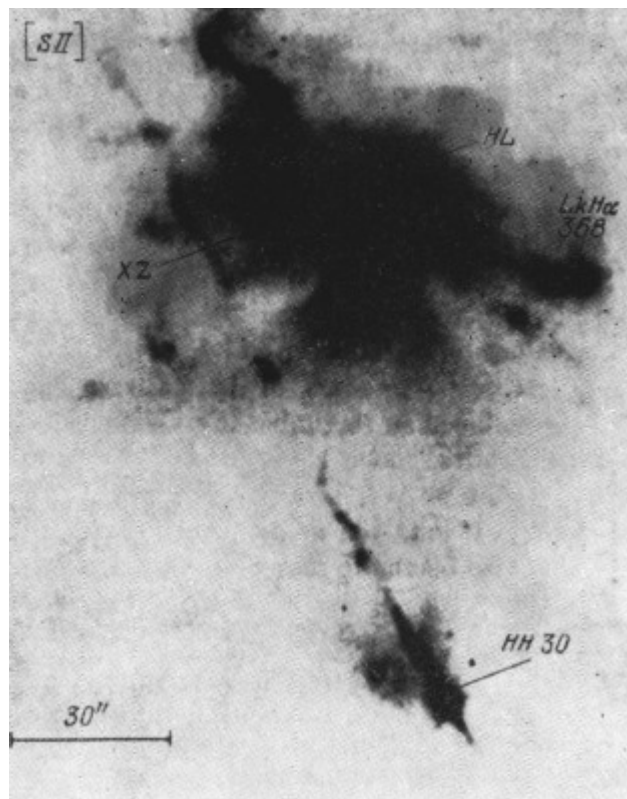


Рис. 11.9. Изображение окрестности звезды HL Tau (негатив), полученное в линиях излучения серы [SII] 6716 и 6731 Å. Отчетливо видны струи газа, выброшенного из звезд XZ Tau, HL Tau и HH 30. В линейном масштабе высота фотографии чуть превышает 0,1 пк.

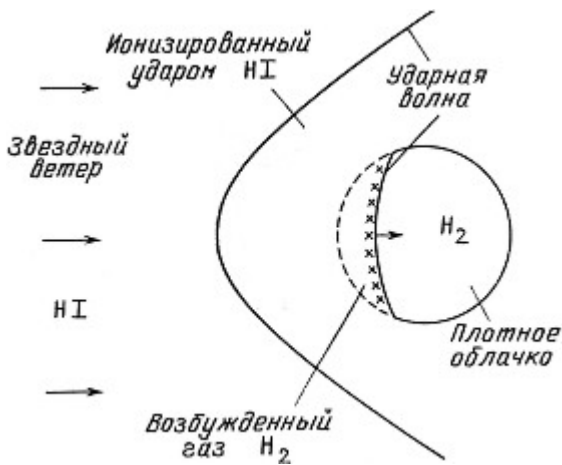


Рис. 11.10. Модель объекта Хербига-Аро в виде плотного облачка, взаимодействующего со звездным ветром.

связан с непрерывным действием на них звездного ветра (см. рис. 11.7).

Но может ли сверхзвуковой ветер просто ускорить за счет своего напора плотные газовые конденсации? В большинстве случаев - нет. Ибо при существующей плотности газа в потоках и в НН-объектах для этого требуются скорости потоков более 500 км/с, чего в действительности не наблюдается. Вероятно, ускорение НН-объектов в основном связано с реактивным эффектом, возникающим при оттекании собственного газа конденсации, разогретого падающим на него излучением центральной звезды и быстрым газом сверхзвукового потока.

Существует, однако, и иная точка зрения на природу НН-объектов, возникающая в самое последнее время. Эту модель разрабатывали в 80-е годы Дж. Канто, Л. Родригес и др. в связи с исследованием газодинамических процессов, происходящих при взаимодействии быстрого звездного ветра молодой звезды с окружающим ее плотным холодным веществом облака. И в этой модели предполагается, что толстый протозвездный диск способствует формированию биполярного потока звездного ветра. Далее каждый из диаметрально противоположных потоков пробивает себе "дорогу" сквозь плотный газ облака, раздвигая его и образуя горячую полость - каверну (рис. 11.11).

Течение уплотненного звездного ветра вдоль стенок каверны приводит в движение холодный газ облака, хотя и с меньшей скоростью, чем движется сам звездный ветер. Увлекаемый вдоль стенок каверны холодный газ как раз и образует наблюдаемые СО-потоки. В результате трения и излучения энергия звездного ветра уменьшается, давление в нем падает, и, начиная с некоторого расстояния от центральной звезды, стенки каверны сближаются. Сквозь образовавшуюся горловину выходит охлажденный звездный ветер.

В этой модели НН-объекты интерпретируются именно как горловины горячих каверн, откуда вытекает сверхзвуковой поток уплотненного звездного ветра. Но некоторые НН-объекты могут быть связаны с горячими точками на стенках каверн, возникшими в местах локального уплотнения газа. Такая модель во всяком случае более статична, чем первая из описанных нами, поскольку в ней отсутствуют быстролетающие массивные "пули"-облачка. Считается, что хорошим примером для этой

Обычно считают, что НН-объекты связаны с плотными газовыми конденсациями, на которые налетает сверхзвуковой поток звездного ветра (рис. 11.10). Несомненно, что источник энергии НН-объектов расположен вне их. Например, между объектами НН 1 и НН 2 (так они обозначаются в каталоге Хербига и Аро) виден ИК и радиоисточник, окруженный плотным молекулярным диском. Существует несколько гипотез о происхождении НН-объектов. Возможно, их разлет связан с единичным взрывным явлением, наподобие вспышки звезды FU Ori (фуора, о которых мы еще будем говорить). Действительно, звезды этого типа найдены вблизи объектов НН 28 и НН 29 (источник L 1551 - IRS 5) и объекта НН 57. Но возможно, что разлет газовых конденсаций

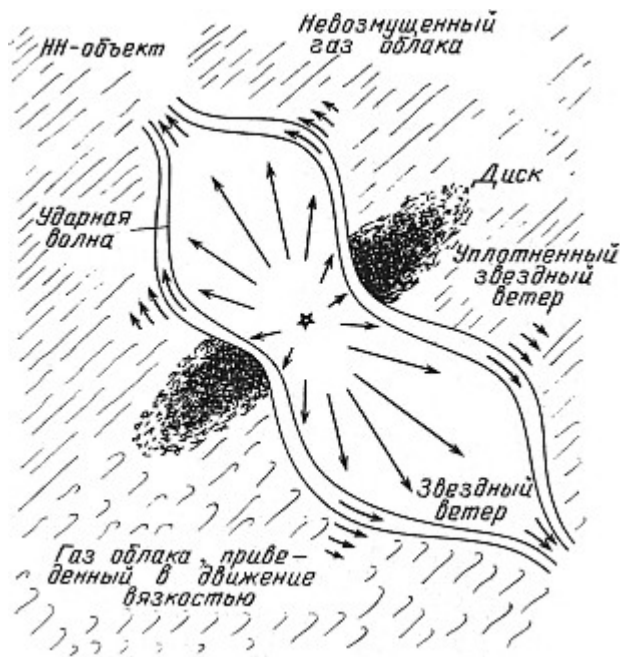


Рис. 11.11. Модель объекта Хербига-Аро в виде горловины, образованной звездным ветром при взаимодействии с протозвездным диском и веществом облака.

хорошим примером для этой

модели служит объект R Mon - HH 39.

Рассматривая физические процессы вблизи формирующихся и молодых звезд, мы видим, что часто они связаны не только со сжатием и аккрецией вещества, но и с его выбрасыванием, рассеиванием. Процесс рождения звезды безусловно является саморегулирующимся, но механизмы обратной связи еще не совсем ясны. Неясно, например, когда и по какой причине останавливается аккреция окружающего вещества на протозвезду. Известный американский астрофизик, профессор Калифорнийского университета Франк Шу сформулировал этот вопрос так: "Откуда гигантское молекулярное облако в 10^5 - $10^6 M_{\odot}$ знает, как формировать звезды в $1 M_{\odot}$? Или даже более глубоко: откуда межзвездная среда знает, что необходимо собрать приблизительно $(\hbar c / G m_H^2)^{3/2}$ атомов водорода с массой m_H , чтобы получился самогравитирующий объект, способный к термоядерному синтезу?"

Профессор Шу отвечает на свой вопрос так: "Я предполагаю, что межзвездная среда фактически не подозревает об этой комбинации фундаментальных постоянных..., но сами звезды знают это число". Его идея заключается в том, что потоки газа, уносящие вещество из молодых звездных объектов, начинают функционировать при освобождении энергии, запасенной в дифференциальном вращении. У протозвезд малой массы выделение этой энергии начинается вместе с возгоранием дейтерия, когда внешняя оболочка звезды становится полностью конвективной. Сочетание конвекции и дифференциального вращения посредством динамо-эффекта приводит к усилению магнитной активности звезды, в результате которой появляются мощные хромосферы, такие как, например, у звезд типа T Тельца. Горячий замагниченный газ в хромосфере накапливается как под крышкой кастрюли до тех пор, пока не прорвется сквозь поток падающего на протозвезду холодного газа. А поскольку падающий газ в результате вращения формирует вокруг протозвезды толстый диск, то хромосферному газу легче всего прорваться вдоль оси вращения диска: образовавшиеся газовые потоки поддерживают баланс массы протозвезды.

Как видим, этот механизм, регулирующий массу звезд, запускается в момент включения в их недрах термоядерного котла. Вот откуда знают звезды, какую массу им нужно иметь, чтобы быть... звездами! Очевидно, что активность молодых звезд регулирует не только их собственную массу, но и частоту их рождения в Галактике. До обнаружения гигантских молекулярных облаков астрономы стремились понять, какие же процессы *стимулируют* рождение звезд из межзвездного газа. После обнаружения ГМО перед астрономами встал прямо противоположный вопрос: почему интенсивность звездообразования так низка, и почему все ГМО за короткое время *не превращаются* целиком в звезды?

В самом деле, нет сомнения, что ГМО - гравитационно связанные объекты. Если бы они сжимались в динамической шкале времени (t_{ff}) и полностью фрагментировали на звезды, как это обычно предполагалось в старых космогонических схемах, то темп звездообразования в Галактике был бы $M \sim M_{ГМО} / t_{ff} \sim 10^3 M_{\odot} / \text{год}$. В действительности же наблюдаемый темп рождения звезд в Галактике $M \sim (3 \div 5) M_{\odot} / \text{год}$. Следовательно, либо ГМО длительное время могут находиться в равновесном состоянии ($\sim 10^8$ лет), либо процесс звездообразования в них протекает чрезвычайно малоэффективно и заканчивается разрушением облака после превращения небольшой доли его массы ($\sim 1\%$) в звезды.

Скорее всего оба эти фактора замедляют превращение облаков в звезды.

Энерговыделение маломассивных звезд, происходящее в форме газовых потоков, поддерживает турбулентное движение вещества в облаке, а значит, и его равновесие. А массивные звезды разрушают облака, не дав им полностью превратиться в звезды (рис. 11.12). В заключение этой главы рассмотрим одно любопытное явление,

наблюдаемое вблизи массивных протозвезд и молодых звезд.

В 1965 г. в некоторых областях звездообразования был обнаружен

очень интересный феномен - мазерное радиоизлучение. Сначала оно было открыто в линиях излучения молекулы гидроксила (OH), затем - воды (H₂O), окиси кремния (SiO) и метанола (CH₃OH). Проявляется мазерное излучение следующим образом: спектральная линия имеет очень высокую яркость, как будто бы ее излучает чудовищно горячее тело, но ширина линии при этом невелика и указывает, согласно эффекту Доплера, что излучающие атомы не испытывают сильных тепловых колебаний.

Так, некоторые мазерные линии излучения имеют яркостную температуру до 10¹⁶ К, в то время как доплеровская ширина этих линий соответствует кинетической температуре, обычной для молекулярных облаков (~10² К). Оказалось, что в некоторых областях межзвездной среды, так же как и в физическом приборе - мазере, создаются своеобразные условия для усиления определенных спектральных линий за счет эффекта стимулированного излучения (MASER - Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Феномен мазерного усиления предполагает наличие активной среды, в которой под действием того или иного механизма "накачки" создана инверсная населенность уровней, т. е. такая ситуация, когда число молекул на верхнем энергетическом уровне какого-либо перехода превышает число молекул на нижнем уровне (в условиях термодинамического равновесия такая ситуация исключена).

Если в активную среду попадают кванты с соответствующей энергией, то в результате индуцированных переходов молекул с верхнего уровня на нижний в данной спектральной линии больше квантов будет излучаться, чем поглощаться. В результате когерентного усиления излучение в линии становится поляризованным, что также наблюдается в космических мазерах. Еще одна их особенность - это быстрая переменность во времени, вообще говоря, не характерная для межзвездной среды. Мазерное излучение демонстрирует переменность за время от суток до нескольких лет, но отмечались случаи еще более быстрой переменности - до 5 мин. Проявляется переменность в изменении потока излучения, лучевой скорости, поляризации, формы линии и, судя по всему, носит случайный непериодический характер. За время порядка одного года спектры многих мазерных источников меняются совершенно.

Очевидно, что быстрая переменность говорит о малых размерах источников, не превышающих в ряде случаев нескольких астрономических единиц. Именно таков размер газовых конденсаций, в которых возникает мазерный эффект. Светимость межзвездных мазеров обычно невелика (~10⁻⁵ L_☉); у самого мощного галактического источника, связанного с эмиссионной туманностью W 49, она составляет ~1 L_☉ (не следует, однако, забывать, что вся эта мощность излучается в одной узкой спектральной линии).

В соседних галактиках есть мазеры и помощнее, со светимостью (10 ÷ 10³) L_☉. Их называют "мегамазерами". Наблюдаются они в галактиках, богатых межзвездной средой и проявляющих

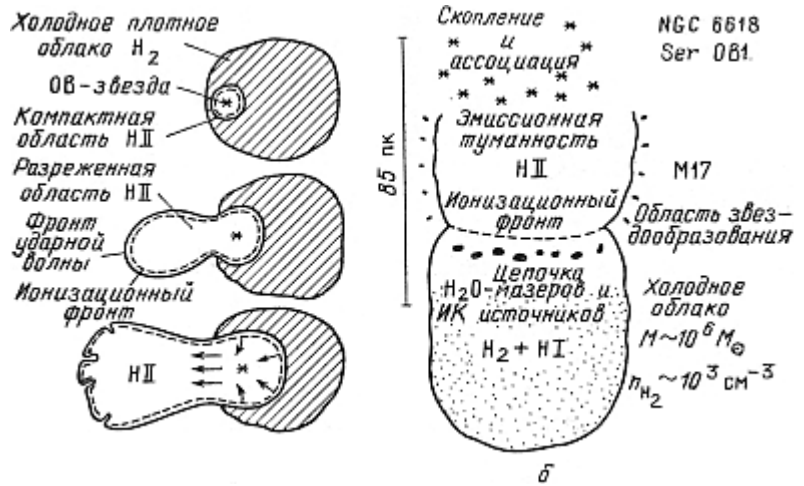


Рис. 11.12. Схема разрушения молекулярного облака под влиянием массивной звезды (а). Схема области звездообразования, связанной с туманностью M17 (б). Волна звездообразования движется по облаку, разрушая его.

высокую активность, например, в сейфертовских галактиках с активными ядрами. Часто эти галактики необычной формы: двойные, взаимодействующие или даже слившиеся вместе галактики [50]. Пока неясно, является ли мегамазер просто суммой миллионов обычных мазеров, связанных с формирующимися звездами, или это излучение генерируется всей межзвездной средой галактики, а источником накачки служит ее активное ядро. Ясно одно - мазерное излучение есть верный признак нестационарности протекающих процессов.

Действительно, - любое тело с постоянной температурой в состоянии термодинамического равновесия излучает кванты всевозможной энергии в широком диапазоне спектра. Но чтобы получить узкополосное, когерентное, одним словом, мазерное (или лазерное) излучение, необходимо создать очень специфические условия, далекие от равновесных. В приборах этого добиваются по-разному, используя импульсный источник света или заставляя горячий газ со сверхзвуковой скоростью расширяться в пустоту. В космосе, как мы знаем, нестационарные процессы чаще всего наблюдаются в окрестности формирующихся и умирающих звезд. Именно поэтому космические мазеры связаны с теми и другими.

Часто мазерные источники (в особенности H_2O -мазеры) имеют в спектре не одну линию, а целую "гребенку" линий, раздвинутых доплеровским смещением. Скорость отдельных конденсаций бывает очень велика: в источнике W 49 она достигает до 500 км/с. Эти мазерные источники связаны с массивными ($M > 10 M_{\odot}$) молодыми звездами, интенсивно разрушающими свой пылевой кокон потоками звездного ветра.

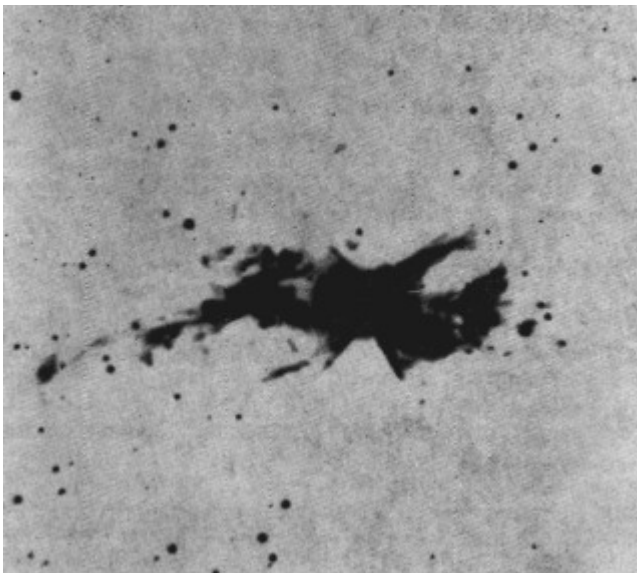


Рис. 11.13. Биполярная туманность (негатив).

туманности (рис. 11.13). Источник их освещения лежит в центре, в месте соединения лепестков туманности, однако скрыт от прямого наблюдения оптически толстым диском. Свет звезды выходит только вдоль оси вращения диска и в этих направлениях рассеивается пылинками отражательной туманности. Примерами таких объектов служат туманности Roberts 22, OH 0739-14, S 106, связанные также с мазерами OH и H_2O .

Среди старых звезд мазерное излучение демонстрируют холодные красные гиганты, окруженные пылевыми оболочками, по внешним признакам очень похожие на протозвезды. Обычно они имеют массу от 1 до 8-10 M_{\odot} и температуру поверхности $(2-3) \cdot 10^3$ К, т. е. спектральный класс М. Понятно, что большая часть излучения этих звезд лежит в ИК диапазоне спектра. Эти два феномена - инфракрасное (IR) излучение и наличие OH-мазеров - стали причиной того, что соответствующие звезды получили название OH/IR-звезд. Многие из этих звезд обладают долгопериодической переменностью блеска с периодами от 600 до 2000 суток. Прототипом этого класса переменных была звезда Мира Кита, поэтому всех их еще называют миридами.

Как мы знаем, в атмосферах этих звезд столь низкая температура, что из атомов тяжелых элементов там конденсируются пылинки, а уж о молекулах и говорить нечего - их там очень много. Поскольку светимость звезд на этом этапе эволюции очень высока ($10^3 \div 10^4$) L_{\odot} , давление излучения на молекулы и пылинки приводит к расширению атмосферы, к формированию

Мазеры H_2O вокруг менее массивных звезд демонстрируют более простую форму спектральных линий: часто встречаются источники с симметричным профилем линии, обусловленным наличием околозвездного газо-пылевого диска. Вращение диска приводит к тому, что часть излучения имеет "красное" доплеровское смещение, а часть - "голубое". В результате спектральная линия расширяется и приобретает правильную двугорбую форму. Мы знаем уже несколько различных проявлений околозвездных дисков: это и биполярные (или монополярные) быстрые струи газа, и регулярное распределение лучевых скоростей у мазеров. Еще с ними связаны биполярные отражательные

сильного звездного ветра или, как его называют, сверхветра, уносящего до $10^{-4} M_{\odot}$ в год. Именно на этом этапе у OH/IR-звезд появляется мощное лазерное излучение. В таком состоянии звезда может жить десятки тысяч лет, пока вокруг нее не сформируется планетарная туманность, а ядро звезды не превратится в белого карлика.

Итак, мы видим, что в проявлениях протозвезд и стареющих красных гигантов много общего. Протозвезды тоже являются источниками ИК-излучения: в областях звездообразования их мощность доходит до $10^4 - 10^6 L_{\odot}$, что как раз необходимо для накачки лазеров. Важно, что эта энергия выделяется в форме мягких ИК квантов, не разрушающих молекулы. И у формирующихся, и у стареющих звезд наблюдается наиболее сильное отклонение от термодинамического равновесия, обнаруживаются интенсивные потоки звездного ветра, распространяются ударные и ионизационные фронты. В одном случае система еще не успела прийти в квазистационарное состояние, а в другом она уже из него вышла (рис. 11.14). Правда, протозвезды часто бывают окружены газо-пылевым диском, чего не скажешь о красных гигантах. Но и здесь наблюдается любопытная аналогия. Диски окружают лишь протозвезды умеренной массы; вокруг более массивных звезд диск, по-видимому, разрушается интенсивным звездным ветром. Стареющие звезды большой массы, не успев сформировать вокруг себя планетарную туманность, взрываются как сверхновые. В то же время менее массивные старые звезды окружают себя планетарной туманностью, причем во многих случаях она, вероятно, имеет тороидальную форму, более или менее напоминающую толстую часть протозвездного диска.

Говоря о подобии протозвезд другим объектам, мы не можем не коснуться одной темы, волнующей всех любителей астрономии. Оказывается, проблема поиска протозвезд неожиданно пересеклась с проблемой поиска внеземных цивилизаций. Как полагают некоторые ученые, в погоне за новыми источниками энергии развитые цивилизации рано или поздно сталкиваются с необходимостью использовать всю энергию своего солнца. Для этого они должны окружить солнце непрозрачной оболочкой, получившей название "сфера Циолковского - Дайсона".

После того, как солнечные лучи будут преобразованы в другие виды энергии и совершат определенную работу для нужд цивилизации, они превратятся в тепло, которое необходимо сбросить в окружающее пространство. Очевидно, что сфера Циолковского - Дайсона должна иметь такие параметры (прежде всего - радиус), при которых температура ее поверхности будет комфортной для создателей этой конструкции. В частности, для белковой жизни $T \approx (270 - 320)$ К. Нагретая до такой температуры сфера Циолковского-Дайсона станет источником инфракрасного излучения и может быть обнаружена при проведении астрономических наблюдений.

Именно эта идея руководила одним из авторов книги лет пятнадцать назад, когда он решил искать "сферу разума" по результатам проводившихся тогда ИК обзоров неба. Без труда удалось обнаружить несколько ИК источников с температурой $T \approx 300$ К. Но очень быстро выяснилось, что почти все они лежат в областях современного звездообразования. Это оказались формирующиеся звезды, окутанные газо-пылевым коконом. Как и сфера Циолковского - Дайсона, пылевая оболочка кокона нагревается лучами центрального светила и становится ИК источником комнатной температуры.

Описанный случай явился проявлением общей парадоксальной ситуации: как только предлагается очередной тест для поиска следов космических цивилизаций, так почти сразу же обнаруживается класс естественных объектов, "маскирующихся под цивилизацию" именно таким образом. Достаточно вспомнить периодические радиоисточники (пульсары), узкополосные радиоисточники (OH, H₂O-мазеры), химически пекулярные звезды (Ар-

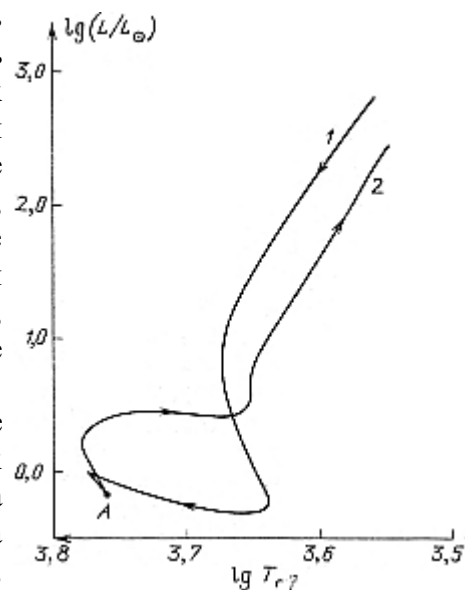


Рис. 11.14. Эволюционные треки: 1 - протозвезды и 2 - красного гиганта имеют много общего, за исключением направления движения. Точка А - место на начальной главной последовательности, соответствующее данной звезде с массой в $1 M_{\odot}$.

звезды), ИК источники (протозвезды). Пока еще никому не удалось предсказать следы астроинженерной деятельности, характерные для разумных существ, но не для природы.

ОТ ОБЛАКА К ЗВЕЗДЕ

Теперь мы вплотную подошли к вопросу о том, как происходит превращение газо-пылевого облака в звезду. Но прежде чем начать об этом рассказ, сделаем два замечания. Во-первых, чтобы понять суть проблем, стоящих перед космогонистами сегодня, нам придется познакомиться с тем, как складывались современные представления о заключительных этапах звездообразования. Второе замечание касается формы изложения. Большинство результатов, о которых пойдет речь, получено с помощью громоздких численных расчетов на ЭВМ, проверить истинность которых можно, лишь повторив эту гигантскую работу. Поэтому мы поневоле ограничимся описанием постановки задачи и результатов расчета, а читатель может интуитивно либо доверять этим результатам, либо нет.

"Расширение Вселенной во многих отношениях подобно коллапсу звезды, если не считать того, что направление времени при расширении обратное."

С. Хокинг, Дж. Эллис [43]

Однако в ряде случаев суть дела можно понять с помощью простых оценок, что, впрочем, требует от читателя известной подготовки.

Наша книга посвящена протозвездам. Но если вы попытаетесь найти определение, что же такое протозвезда, то обнаружите, что сделать это не так-то легко. Судите сами. На с. 231 книги "Происхождение и эволюция галактик и звезд" [40] написано: "Под термином "протозвезды" обычно понимают такую фазу эволюции звезды, когда она уже освободилась от сжимающейся среды, больше не фрагментирует и сжимается дальше самостоятельно... до тех пор, пока не включатся термоядерные источники энергии и звезда не перейдет на главную последовательность".

В другой книге "Протозвезды и планеты" [51], написанной в том же году, на стр. 322 не менее категорично утверждается: "Обычно считается, что протозвезды - это объекты с температурой поверхности ниже 3000 К, в ходе эволюции проходящие через область диаграммы Герцшпрунга - Рассела, которая... запрещена для моделей звезд, находящихся в гидростатическом равновесии". В маленькой энциклопедии "Физика космоса" [52] на с. 263 читаем: "Протозвезды - непрозрачные массы газа, в которых гравитация уравновешена внутренним давлением", но там же на с. 725 утверждается, что "коллапсирующие объекты звездной массы называются протозвездами".

Этот разнобой отнюдь не случаен. Он отражает ситуацию, возникающую при попытке согласовать теоретические расчеты с наблюдениями процесса рождения звезд из газовых облаков. Чтобы стало ясно, в чем причина сегодняшних трудностей, нам придется сначала описать ранние, еще несовершенные представления о протозвездах, а уже затем перейти к результатам исследований последних лет.

Итак, после того, как сила тяготения по той или иной причине превысила силу газового давления, облако начинает сжиматься. Рассмотрим для начала случай сферически симметричного облака массой $1 M_{\odot}$, пренебрегая его вращением и присутствием магнитного поля. Если причиной сжатия служит гравитационная неустойчивость, то облако в начале сжатия должно иметь размер $\lambda_J \approx 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см} \approx 2 \cdot 10^6 R_{\odot}$, среднюю плотность $\rho \approx 10^{-19} \text{ г/см}^3$ и температуру около 15 К. При таких параметрах облако непрозрачно для видимого и более коротковолнового излучения, но прозрачно для ИК излучения с длиной волны $\lambda > 10 \text{ мкм}$.

Работа сил тяготения при сжатии облака вначале идет в основном на увеличение кинетической энергии движущихся к центру частиц, и лишь малая ее часть переходит в тепло за счет соударений молекул друг с другом и с пылинками. Но температура газа при этом не меняется, поскольку рождающиеся при столкновении частиц кванты ИК излучения свободно покидают облако, унося тепловую энергию.

Из-за того, что сжатие протекает при почти постоянной температуре (т. е. изотермически), давление газа растет гораздо медленнее, чем сила гравитации, и вскоре после начала сжатия давлением газа в расчетах можно просто пренебречь. Это означает, что время, необходимое облаку для существенного сжатия, будет близко к времени свободного падения (t_{ff}), которое в нашем случае составляет около 0,2 млн лет.

По мере сжатия облака плотность газа возрастает, и кванты ИК излучения начинают застревать в веществе, передавая свою энергию молекулам и пылинкам. Предположим, как это сделали в начале 60-х годов японские астрофизики Ч. Хаяши и Т. Накано, что на стадии свободного падения сжатие облака происходит однородно, т. е. плотность облака меняется со временем одинаково во всех точках. Тогда в этом облаке стадия непрозрачности наступит в тот момент, когда его радиус уменьшится примерно в 100 раз. Необходимое для этого время очень близко к t_{ff} . Как только облако станет непрозрачно для собственного теплового излучения, температура газа начнет повышаться. Давление газа при этом быстро возрастет и в определенный момент остановит сжатие облака.

Проиллюстрируем сказанное с помощью простых оценок. В сферически симметричном облаке сила тяготения, действующая на 1 г газа, равна $F_T = GM(R)/R^2$. Противодействует ей выталкивающая сила Архимеда, т. е. разность газового давления сверху и снизу: в расчете на 1 г вещества эта сила равна $F_g = (dP/dR)/\rho$, где ρ и P - соответственно плотность и давление газа. Не стремясь к идеальной точности, производную можно заменить отношением величин: $F_g \approx P/(\rho R)$. А учитывая, что по закону Клапейрона - Менделеева температура газа $T \sim P/\rho$, получаем $F_g \sim T/R$.

Таким образом, при изотермическом сжатии облака сила тяготения возрастает со временем по закону R^{-2} , а сила газового давления - по закону R^{-1} , т. е. медленнее. В исходном состоянии ($R \approx \lambda_J/4$) эти силы были равны, но когда радиус облака при сжатии уменьшился в несколько раз, во столько же раз увеличилась сила F_T , по сравнению с F_g , и дальнейшее сжатие можно рассматривать в режиме свободного падения.

Изменение непрозрачности облака по мере его сжатия оценивается также просто. Вероятность поглощения кванта пропорциональна числу атомов на его пути, т. е. величине ρR . А так как $\rho \sim M/R^3$, то $\rho R \sim 1/R^2$, следовательно, непрозрачность быстро возрастает по мере сжатия облака.

В 1964 г. Ч. Хаяши и Т. Накано впервые подробно исследовали динамику сжатия (коллапса) протозвездного облака. Они рассчитали эволюцию первоначально однородного изотермического шара массой $1 M_\odot$, начиная с момента, когда облако стало непрозрачным.

В этот момент радиус облака $2,5 \cdot 10^4 R_\odot$, плотность $4 \cdot 10^{-14}$ г/см³ и температура 15 К.

Расчеты показали, что возрастание непрозрачности вещества происходит столь быстро, что диффузия излучения наружу не успевает отводить выделяющееся при сжатии тепло. Поэтому недра протозвезды становятся горячее ее поверхности и в действие вступает дополнительный механизм теплоотвода - конвекция. Иными словами, начинается интенсивное перемешивание вещества, переносящее горячий газ к поверхности протозвезды, а остывший - в ее недра.

Всплытие горячих элементов газа происходит гораздо быстрее, чем диффузия излучения сквозь них. Поэтому они не обмениваются друг с другом тепловой энергией, а лишь адиабатически расширяются при всплытии, попадая в область пониженного давления вблизи поверхности протозвезды. Таким образом, конвекция не только отводит тепло, но и превращает распределение давления, плотности и температуры в адиабатическое.

В этот период сила гравитации все еще играет основную роль, т. е. сжатие происходит в режиме свободного падения. Однако для адиабатического распределения характерно уменьшение плотности облака от центра к периферии. А поскольку t_{ff} увеличивается с уменьшением плотности, центральная часть облака будет сжиматься быстрее, чем внешняя, и распределение плотности с течением времени будет становиться все более и более неоднородным.

В результате уже через несколько лет после начала адиабатического сжатия в центральной

области протозвезды формируется гидростатически равновесное ядро массой $10^{-2} M_{\odot}$, радиусом $6 \cdot 10^3 R_{\odot}$, центральной температурой 2100 К и плотностью $2 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3$. В то же время внешние слои по-прежнему свободно падают к центру. Наталкиваясь на ядро со скоростью около 1 км/с, вещество внешних слоев резко тормозится, и на границе ядра возникает ударная волна, в которой кинетическая энергия падающего газа превращается в тепло.

Падающее вещество оболочки влияет на ядро двояким образом: во-первых, оно увеличивает его массу, заставляя быстрее сжиматься, а во-вторых, способствует его нагреву. Пока температура в центре не поднимется до 10^4 К , ядро остается в гидростатическом равновесии. Однако выше этой температуры начинается ионизация атомов водорода, и тепловая энергия расходуется не только на нагрев газа, но и на разрушение атомов - сходная ситуация возникает при плавлении твердых тел и при кипении жидкостей, только в этом случае энергия затрачивается на разрыв не внутриатомарных, а межатомарных связей.

Пока продолжается ионизация водорода, температура газа почти не возрастает. По этой причине давление в результате сжатия увеличивается медленнее, чем сила тяжести, и гидростатическое равновесие в ядре нарушается. Оно начинает сжиматься быстро и неоднородно.

Когда же весь газ становится ионизованным, возобновляется быстрый рост температуры, что приводит к появлению нового гидростатически равновесного ядра меньшего размера ($M \approx 10^{-2} M_{\odot}$, $R \approx 10^3 R_{\odot}$). На границе нового ядра возникает вторая ударная волна, гораздо более сильная, чем первая: ведь сила тяжести и скорость падения здесь существенно выше. Эта ударная волна движется наружу и примерно за 100 суток достигает поверхности протозвезды, преобразуя по пути направленное движение внешних слоев в тепло.

В результате почти во всем объеме протозвезды разрушаются молекулы, а затем и атомы водорода и гелия, испаряется пыль, и объект в целом достигает гидростатического равновесия. На этом завершается адиабатическое сжатие, общая продолжительность которого около 20 лет, и протозвезда вступает в новую фазу эволюции - в так называемую стадию Хаяши. Мы не случайно использовали выше термин "протозвезда": именно так в работе Хаяши и Накано называется сжимающееся облако после того, как оно стало непрозрачным для собственного теплового излучения.

Теперь следует сказать о параметрах протозвезды в момент достижения ею гидростатического равновесия. Как мы видим, быстрое сжатие протозвезды останавливается в тот момент, когда все ее вещество превращается в плазму. Следовательно, протозвезда будет сжиматься до тех пор, пока работа силы гравитации не превратит в плазму весь молекулярный газ. Конечно, часть тепловой энергии, выделяющейся при сжатии, уносится излучением. Однако фаза адиабатического сжатия в расчетах японских ученых оказалась столь короткой, что за это время излучение не может унести заметную долю энергии и этими потерями вполне можно пренебречь. Предшествовавшая ей фаза изотермического сжатия длится гораздо дольше, но светимость протозвезды в этот период очень мала, и поэтому потеря энергии на излучение также оказывается мизерной.

Чтобы подтвердить сказанное, вновь обратимся к простым оценкам. Как известно, гравитационная энергия шара равна kGM^2 / R , где k - коэффициент порядка единицы, зависящий от распределения плотности внутри шара. Для однородного шара $k_1 = 0,6$, а при адиабатическом распределении плотности, когда давление и плотность связаны соотношением $P \sim \rho^{5/3}$, $k_2 = 6/7$. Источником энергии как для излучения протозвезды, так и для ионизации ее вещества, служит выделение гравитационной энергии при сжатии, по абсолютной величине равное разности гравитационных энергий исходного облака ($-k_1 GM^2 / R_j$) и сжавшейся протозвезды ($-k_2 GM^2 / R$). Но поскольку $R_j \gg R$, то выделение гравитационной энергии составляет $\Delta E \approx k_2 GM^2 / R$.

Как следует из теоремы вириала, к моменту установления гидростатического равновесия половина этой энергии затрачивается на нагревание газа, а вторая половина может быть израсходована на диссоциацию молекул, ионизацию атомов и на излучение. Для диссоциации 1 кг молекулярного водорода и последующей ионизации атомов водорода и

гелия необходимо затратить $\chi \approx 10^9$ Дж/кг. Значит, чтобы все вещество протозвезды превратить в плазму, необходимо затратить энергию χM . Из равенства $\chi M = k_2 GM^2 / 2R_x$ получим радиус протозвезды в момент установления гидростатического равновесия: $R_x \approx k_2 GM / 2\chi$.

За время изотермического сжатия не может быть высвечена энергия более той, что выделяется гравитационным механизмом: GM^2 / R_0 , где R_0 - радиус, при котором облако становится непрозрачным. Но поскольку $R_0 \gg R_x$, то эта энергия ничтожно мала по сравнению с энергией, выделяющейся на стадии адиабатического сжатия, и ею можно пренебречь.

Установление гидростатического равновесия означает, что в каждой точке протозвезды соблюдается равенство сил гравитации и газового давления:

$$\frac{dP}{dR} = - \frac{GM\rho}{R^2}$$

или по порядку величины $P / R \approx GM\rho / R^2$. Тогда, учитывая, что для водородной плазмы $T = P / (2\rho A)$, где A - универсальная газовая постоянная, получим: $T \sim M / R_x$. А так как $R_x \sim M$, то T не зависит от массы протозвезды.

Хотя в приведенных выше оценках фигурируют некие средние величины P , ρ и T , можно показать, что аналогичные соотношения справедливы и для соответствующих величин P_c , ρ_c и T_c в центре протозвезды. В частности, $\rho_c \sim \rho \sim M / R_x^3 \sim M^{-2}$.

По расчетам Хаяши и Накано в момент достижения гидростатического равновесия радиус протозвезды с массой в $1 M_\odot$ составляет $50 R_\odot$, а у прочих протозвезд он отличается от этой величины пропорционально их массе. Из этого следует, что в начале стадии Хаяши температура в центре протозвезд почти не зависит от их массы и равна $2 \cdot 10^5$ К, а центральная плотность протозвезды обратно пропорциональна квадрату ее массы. Но чем меньше плотность, тем более прозрачно вещество для излучения. Поэтому у массивных протозвезд для отвода тепла из центральных областей достаточно только излучения: в их ядре конвекция отсутствует и поэтому говорят, что у массивных протозвезд формируется "лучистое ядро". Звезды же с массой менее $3 M_\odot$ остаются полностью конвективными.

Информацию о любом астрономическом объекте мы получаем прежде всего из анализа его излучения. Поэтому вопрос о том, как будет излучать протозвезда в ходе своей эволюции, представляет особый интерес. На стадии изотермического сжатия светимость облака резко возрастает со временем, поскольку скорость сжатия непрерывно увеличивается. Из-за низкой температуры газа излучение сосредоточено в далеком ИК диапазоне - это прежде всего излучение молекул H_2 в линиях с длиной волны около 28 мкм и тепловое излучение пыли в области около длины волны 200 мкм. Максимум светимости, равный примерно $0,2 L_\odot$ для протозвезды массой $1 M_\odot$, должен достигаться непосредственно перед тем, как облако станет непрозрачным.

Рост непрозрачности приводит к уменьшению светимости, практически не меняя спектрального состава излучения. Резкое повышение светимости до $300 L_\odot$ происходит в результате выхода на поверхность протозвезды ударной волны, которая нагревает внешние слои до температуры около 3000 К. При такой температуре протозвезда уже становится оптическим источником излучения красного цвета.

Таким образом, в модели Хаяши - Накано после окончания быстрого сжатия протозвезда должна выглядеть как обычная холодная звезда, причем переход от стадии инфракрасного объекта к оптическому должен произойти очень быстро - менее чем за 100 суток.

Теперь остается рассказать о последнем этапе эволюции протозвезды - о стадии медленного сжатия. Поскольку для наблюдателя протозвезда теперь принципиально не отличается от обычных звезд, описывать дальнейшую ее эволюцию удобно с помощью диаграммы Герцшпрунга - Рассела (рис. 12.1). В 1961 г. Хаяши доказал, что для медленно сжимающейся полностью конвективной протозвезды справедливы два следующих утверждения: во-первых, ее светимость должна убывать с уменьшением радиуса, а во-вторых, температура поверхности таких протозвезд слабо зависит от их массы и почти не зависит от светимости.

Как мы уже знаем, протозвезды с массой менее $3M_{\odot}$, подходят к стадии медленного сжатия полностью конвективными. Следовательно, в соответствии с теорией Хаяши их пути на диаграмме Герцшпрунга - Рассела должны выглядеть как почти вертикальные линии. Этот этап жизни протозвезд и называют стадией Хаяши.

Протозвезды массой менее $0,3 M_{\odot}$ в процессе медленного сжатия остаются полностью конвективными и опускаются на главную последовательность по вертикальному пути. У протозвезд большей массы из-за повышения центральной температуры в ходе сжатия в определенный момент возникает лучистое ядро. Это существенно изменяет дальнейшую связь между температурой поверхности протозвезды и ее светимостью: температура поверхности в ходе дальнейшего сжатия начинает быстро увеличиваться.

Для тех, кто знаком с основами физики звезд, попытаемся обосновать приведенные выше утверждения. Сначала покажем, что трек (путь) полностью конвективной звезды на диаграмме Герцшпрунга - Рассела должен быть вертикальным. Мы уже видели, что для звезды, находящейся в гидростатическом равновесии, температура и плотность в центре связаны с массой и радиусом соотношениями:

$$T_c \sim \frac{M}{R}, \quad \rho_c \sim \frac{M}{R^3} \quad (12.1)$$

Если звезда полностью конвективна, то энтропия газа S постоянна вдоль радиуса. А поскольку для идеального газа $S \sim T^{3/2} \rho^{-1}$, то параметры звезды в центре связаны с параметрами вблизи поверхности следующим приближенным соотношением:

$$\frac{T_c^{3/2}}{\rho_c} \approx \frac{T_{ef}^{3/2}}{\rho_{ef}} \quad (12.2)$$

Напомним, что эффективной температурой звезды (T_{ef}) называется температура абсолютно черного тела, мощность излучения которого с единицы поверхности равна мощности излучения данной звезды. Используя это определение и закон Стефана - Больцмана, можно выразить светимость звезды (L) через ее радиус и эффективную температуру поверхности:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad \text{или} \quad L \sim R^2 T_{ef}^4 \quad (12.3)$$

Теория звездных атмосфер утверждает, что если в фотосфере звезды перенос энергии осуществляется излучением (а в большинстве случаев это действительно так, поскольку из-за малой плотности вещества конвекция там неэффективна), то температура этих слоев

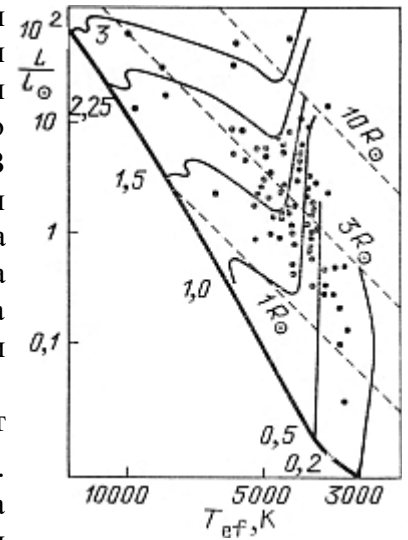


Рис. 12.1. Диаграмма светимость-температура поверхности для звезд типа Т Тельца (точки) из области звездообразования в Туманности Ориона: сплошная толстая линия - начальная главная последовательность; сплошными тонкими линиями показаны треки протозвезд различной массы, значение которой в единицах M_{\odot} указано вблизи главной последовательности; штриховые линии - положение протозвезд с радиусами 1, 3 и $10 R_{\odot}$

почти постоянна, а плотность экспоненциально уменьшается в направлении к поверхности. Поэтому, как и в случае земной атмосферы, можно говорить об эффективной толщине (H) атмосферы звезды, причем $H \ll R$. Более того, теория указывает, что плотность газа у основания фотосферы (ρ_{ef}) связана с величиной H соотношением $k\rho_{ef}H \approx 1$, где k ($\text{см}^2/\text{г}$) - коэффициент поглощения излучения. Это соотношение следует из определения фотосферы как слоя, ниже которого вещество звезды уже непрозрачно.

При температурах $T \approx (3 \div 5) \cdot 10^3$ К основную роль в поглощении излучения играют различные молекулы и отрицательный ион водорода. Зависимость коэффициента поглощения от температуры и плотности при данном химическом составе очень сложна, но в первом приближении ее можно аппроксимировать простой формулой: $k \sim T^\alpha \rho^\beta$, где α и β - некоторые постоянные коэффициенты. Хаяши и Накано в своих расчетах использовали значения k , предварительно вычисленные по сложным формулам и представленные в виде таблиц. Но они неплохо могут быть аппроксимированы нашей формулой при $\alpha = 4$ и $\beta = 0,5$. Тогда получим:

$$H \sim \frac{1}{\rho_{ef}^{3/2} T_{ef}^4} \quad (12.4)$$

В фотосфере, как и во всей звезде, соблюдается гидростатическое равновесие. Поскольку $H \ll R$, то из уравнения равновесия получаем:

$$P_{ef} \approx \frac{GM}{R^2} \rho_{ef} H \quad (12.5)$$

Комбинируя соотношения (12.1) - (12.5), находим связь между светимостью звезды, ее массой и эффективной температурой:

$$\frac{T_{ef}}{L^{1/62}} \sim M^{7/31} \quad (12.6)$$

Полученное выражение как раз и доказывает то, что при изменении светимости полностью конвективной звезды ее эффективная температура остается почти постоянной. На диаграмме Герцшпрунга - Рассела трек такой звезды будет практически вертикальным. А поскольку при сжатии протозвезды ее радиус уменьшается, то, как видно из формулы (12.3), светимость протозвезды на этой стадии будет убывать со временем.

В отличие от фотосферы в глубине протозвезды газ полностью ионизован и зависимость коэффициента поглощения от ρ и T имеет уже другой вид (эту зависимость называют законом Крамерса):

$$k \sim \rho / T^{7/2} \quad (12.7)$$

А поскольку у конвективной звезды $\rho \sim T^{3/2}$, то мы видим, что $k \sim T^{-2}$, или, используя формулу (12.1), $k \sim R^2$. Значит, вещество в центре протозвезды наиболее прозрачно для излучения. Теперь становится понятным, почему на определенном этапе сжатия вокруг центра звезды возникает область, в которой перенос энергии осуществляется излучением - лучистое ядро.

По мере сжатия протозвезды все меньшая часть ее объема остается охваченной конвекцией. Это приводит к изменению направления перемещения протозвезды по диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Рассмотрим предельный случай: определим форму трека для звезды, полностью находящейся в состоянии лучистого равновесия, у которой перенос энергии происходит только за счет диффузии квантов из недр к поверхности. Поддерживается этот процесс за счет градиента температуры:

$$\sigma T^3 \frac{dT}{dr} = - \frac{3kL_r \rho}{64\pi r^2} \quad (12.8)$$

где L_r , T и ρ - величины в точке, отстоящей от центра звезды на расстояние r . Для средних значений этих величин, как и раньше, получаем:

$$\frac{T^4}{R} \sim kL\rho / \quad (12.9)$$

Используя для k выражение (12.7), а для T и ρ - выражение (12.1), с учетом формулы (12.3) получаем:

$$\frac{L}{T_{ef}^{4/5}} \sim M^{22/5} \quad (12.10)$$

Следовательно, на диаграмме Герцшпрунга - Рессела форма трека для полностью лучистой протозвезды с фиксированной массой описывается следующей зависимостью:

$$\lg \frac{L}{T_{ef}} \sim 0.8 \lg M \quad (12.11)$$

Значит, при переходе от конвективного переноса энергии к лучистому вертикальный трек протозвезды переходит в наклонную линию.

До 1961 г. вообще считалось, что эволюция протозвезд полностью описывается наклонными ("лучистыми") траекториями. Это вызывало серьезные трудности при интерпретации диаграмм "спектр - светимость" молодых звездных скоплений. Работа Хаяши, указавшего на необходимость учета конвекции, позволила устранить возникшие противоречия между теорией и наблюдениями. Поэтому термины "стадия Хаяши" и "трек (траектория) Хаяши" заслуженно отражают большой вклад японского астрофизика в решение этой проблемы.

Итак, протозвезда медленно сжимается, и наступает момент, когда температура в ее недрах достигает значения около $3 \cdot 10^6$ К, при котором начинаются термоядерные реакции. Вначале выделение термоядерной энергии не компенсирует потерь на излучение с поверхности протозвезды. Поэтому сжатие продолжается, температура в недрах возрастает, интенсивность ядерного горения усиливается. Сжатие должно прекратиться, когда мощность термоядерного "котла" станет равной светимости протозвезды. После этого события протозвезду уже можно считать нормальной звездой, хотя различные переходные процессы еще некоторое время будут продолжаться.

Превращение протозвезды массой $1 M_{\odot}$ в нормальную звезду на диаграмме Герцшпрунга - Рессела происходит в точке с координатами $L \approx 0,7 L_{\odot}$ и $T_{ef} \approx 5800$ К. Если отметить на этой диаграмме аналогичные точки для звезд разных масс, то получится линия, которую принято называть начальной главной последовательностью. Это своеобразная "стартовая линия" нормальных звезд. Однако не каждой протозвезде суждено стать звездой: лишь объекты массой более $0,07 M_{\odot}$ "удостаиваются этой чести". У менее массивных протозвезд температура в центре никогда не поднимается до уровня, необходимого для интенсивного протекания термоядерных реакций.

Сжатие таких протозвезд останавливает не тепловое а квантовомеханическое давление газа. Из принципа запрета Паули следует, что при большой плотности плазмы электроны начинают испытывать сильное взаимное отталкивание, которое делает плазму чрезвычайно упругой. Этот эффект, названный давлением вырожденного электронного газа, особенно важен для маломассивных протозвезд, центральная плотность у которых в начале стадии Хаяши значительно выше, чем у протозвезд большой массы.

Как видно из рис. 12.2. у протозвезды массой $0,07 M_{\odot}$ давление вырожденного электронного газа останавливает сжатие еще до того, как энерговыделение термоядерных реакций сможет компенсировать потери на изучение энергии с поверхности. В конце концов такие протозвезды, так и не став нормальными звездами, превращаются в холодные планетообразные тела. С такими сверхлегкими "звездо-планетами" мы уже познакомились в гл. 6.

Для того чтобы оценить, насколько электронный газ близок к вырождению, нужно сравнить температуру газа с величиной T_F , называемой температурой Ферми. Если $T \gg T_F$, то газ не вырожден и квантовомеханическими эффектами можно пренебречь. Но если $T \sim T_F$, то пользоваться классическим уравнением состояния (т. е. законом Клапейрона - Менделеева) уже нельзя.

Для нерелятивистской электронной компоненты водородной плазмы $T_F \approx 3 \cdot 10^5 K \rho^{2/3}$. Поэтому в центре звезды справедливо отношение

$$\left(\frac{T}{T_F} \right)_C \sim M^{1/3} R \quad (12.12)$$

Отсюда видно, что по мере сжатия электронный газ приближается к вырождению, причем более заметно вырождение проявляется у звезд малой массы.

У протозвезд большой массы по мере их приближения к начальной главной последовательности одна за другой "включаются" различные термоядерные реакции. При относительно низкой температуре начинают гореть изотопы лития и бериллия. Они быстро превращаются в гелий, выделяя сравнительно мало тепла. Затем с повышением температуры начинается основная реакция превращения водорода в гелий. Поскольку в ходе этой реакции рождаются промежуточные изотопы (D^2 , He^3), которых в нормальной межзвездной среде практически нет, в недрах протозвезды некоторое время происходят процессы выравнивания (релаксации), после которых в равновесие приходят не только физические параметры объекта, но и его изотопный состав. В результате процессов релаксации сжатие протозвезды в центральной области может на время смениться расширением, при этом ее траектория вблизи начальной главной последовательности испытывает довольно причудливые изгибы.

В заключение этой главы скажем о характерном времени, которое проводят протозвезды в стадии медленного сжатия. Оценить это время довольно просто: по существу, это уже было сделано 100 лет назад лордом Кельвином (гл. 4). Действительно, высвечивание тепловой энергии происходит за счет изменения энергии гравитационной. Полное выделение гравитационной энергии к моменту, когда протозвезда достигает главной последовательности, составляет $\Delta E = GM^2 / R$, где R - радиус звезды. Половина этой энергии идет на нагревание вещества звезды, а половина высвечивается. Характерное время сжатия найдем, разделив потерю энергии на мощность излучения (естественно, что это время называют "кельвиновским" или "кельвин-гельмгольцевским"):

$$t_{KH} = GM^2 / \quad (12.13)$$

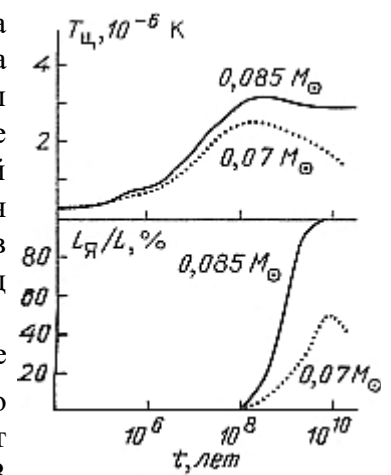


Рис. 12.2. Для протозвезд с массами 0.085 и $0.07 M_{\odot}$ показано, как изменяется с возрастом их центральная температура (вверху) и вклад ядерного энерговыделения L_n в полную светимость L . Видно, что объект с массой $0.07 M_{\odot}$ так и не превращается в звезду главной последовательности.

Заметим, что основной запас гравитационной энергии выделяется, когда радиус протозвезды уже близок к своему конечному значению, а светимость уменьшилась до значения, с которым объект вступает на начальную главную последовательность (L). По этой причине скорость движения протозвезды по эволюционному треку уменьшается по мере ее сжатия, и большую часть времени она проводит вблизи главной последовательности. Поэтому, подставив в формулу (12.13) значение светимости звезды на главной последовательности, мы получим достаточно точную оценку времени медленного сжатия.

Для протосолнца ($M = 1 M_{\odot}$) это время составляет примерно 30 млн лет. Для протозвезд иной массы оно зависит от соотношения между массой, радиусом и светимостью их конечного "продукта" - нормальных звезд. Как известно, у звезд главной последовательности умеренных масс $L \sim M^5$, а у более массивных $L \sim M^3$. Поэтому в среднем можно принять, что $L \sim M^4$. А радиус этих звезд почти пропорционален их массе ($R \sim M$). Отсюда нетрудно найти зависимость времени медленного сжатия от массы протозвезды:

$$t_{\text{кн}} \sim M^{-3} \quad (12.14)$$

Следовательно, чем массивнее протозвезда, тем меньше ей нужно времени, чтобы достигнуть главной последовательности. И наоборот, у предков звезд минимально возможной массы ($\sim 10^{-1} M_{\odot}$) время сжатия примерно равно возрасту Галактики ($\approx 2 \cdot 10^{10}$ лет). Мы уже говорили (гл. 6), что таких малюток немало в окрестности Солнца. Вероятно, многие из них все еще пребывают в протозвездном состоянии.

Поскольку продолжительность медленного сжатия протозвезды сильно зависит от ее массы, а продолжительность стадии свободного падения - не очень, все протозвезды можно разделить на две группы, границей между которыми служит значение массы $3 M_{\odot}$. У менее массивных протозвезд медленное сжатие продолжается значительно дольше свободного падения, поэтому к моменту прихода протозвезды на главную последовательность ее оболочка уже полностью осела на ядро. Но у массивных протозвезд медленное сжатие длится недолго, поэтому ядро быстро превращается в нормальную звезду а оболочка еще продолжает свое падение, окутывая родившуюся звезду холодным газопылевым "коконом".

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ ПРОТОЗВЕЗДЫ?

Описанное выше представление о рождении звезд "Из чего же возникают эти группы звезд? сформировалось к середине 60-х годов и сразу же Тела, из которых эти группы формируются, получило признание у астрономов-наблюдателей. должны еще присутствовать во многих ассоциациях, где мы имеем явные признаки того, что звездообразование интенсивно продолжается... Эти тела, излучение которых в мере, странными. Прежде всего теория подтвердила, видимой области спектра не наблюдается и что неправильные переменные звезды типа Т Тельца которые нам непосредственно не видны, были и так называемые Ae- и Be-звезды Хербига являются нами названы протозвездами."

протозвездами (раньше на это указывали лишь косвенные аргументы). На диаграмме Герцшпрунга - Рессела молодых звездных скоплений эти звезды лежат заметно выше главной последовательности, что противоречило теории "лучистых" треков, но "Единомыслие - вот в чем тупик развития... непринужденно объяснялось теорией Хаяши. Ложная мысль, давшая повод к опровержению, продвигает познание дальше, чем повторение сотни превосходных истин. Автор "стимулирующий ошибки"... не менее достоин уважения, чем человек, сумевший опровергнуть ее."

Познакомившись с новой теорией, астрономы сразу же попытались с ее помощью объяснить загадку переменной звезды FU Ориона. Как-то, просматривая старые фотопластинки, Г. Хербиг обнаружил, что в 1936 г. эта звезда за 120 сут увеличила свою яркость в 250 раз (см. рис. 13.1). С такой амплитудой могут вспыхивать только Новые. Однако в отличие от них FU Ориона, во-первых, находится в области звездообразования, а во-вторых, ее яркость не меняется на протяжении уже нескольких десятков лет и остается высокой, тогда как оболочка Новой при расширении быстро остывает, и яркость ее падает.

Академик В. А. Амбарцумян

*Член-корреспондент АН СССР
Г. А. Заварзин (1988 г.)*

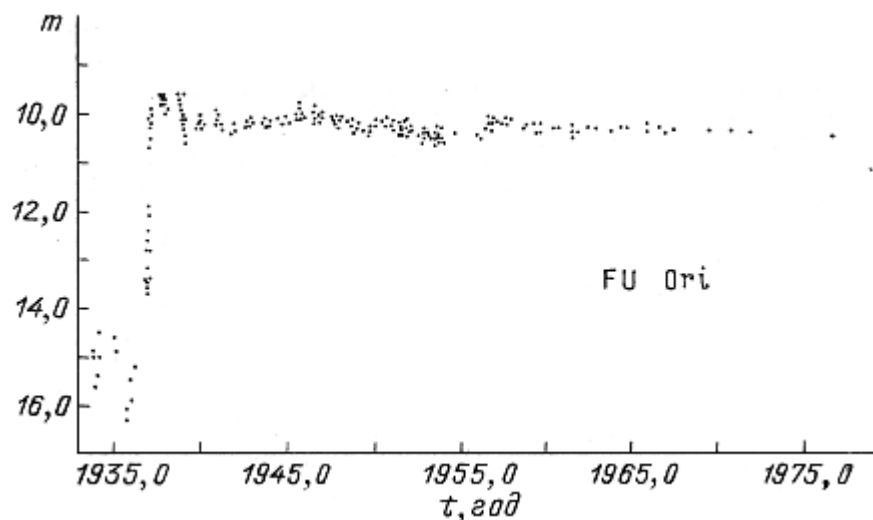


Рис. 13.1. Изменение блеска звезды FU Ориона.

Впоследствии были открыты еще несколько таких объектов, получивших название "фуоры" - по имени первого представителя этого класса (см. табл. 13.1). Было весьма соблазнительно интерпретировать феномен фуора как переход протозвезды от стадии быстрого сжатия к медленному: в этот момент ударная волна выходит на поверхность протозвезды, и яркость ее стремительно возрастает. Такая возможность приложения новой теорию к наблюдениям произвела на астрономов большое впечатление.

Таблица 13.1. Фуоры (объекты типа FU Ori)

Название	Координаты α (1950) δ	Момент максимума блеска	Амплитуда вспышки	Время возрастания блеска
FU Ori	05 ^h 42 ^m 38 ^s + 09°03'	1937	6 ^m	120 - 380 сут
V 1057 Cyg	20 ^h 57 ^m 06 ^s + 44°03'	1970	5,5 ^m	390 сут

V 1515 Cyg	20 ^h 22 ^m 03 ^s + 42°02'	1980?	4 ^m	менее 13 лет
V 1735 Cyg	21 ^h 45 ^m 27 ^s + 47°18'	после 1952, но до 1965	более 5 ^m	?
V 346 Nor	16 ^h 28 ^m 57 ^s - 44°49'	после 1984	более 2 ^m	менее 7 лет

Таблица 13.1. а) Звезды, у которых наблюдалось увеличение блеска.

Название	Координаты α (1950) δ	Характерными признаками для зачисления звезд в эту группу считался поздний спектральный класс (F - K), профиль типа P Cyg у спектральной линии H α , быстрое вращение звезды, интенсивная потеря вещества в виде звездного ветра, наличие полосы CO (2 мкм) и линии LiI λ 6707 Å.
L 1551 / IRS 5	04 ^h 28 ^m 40 ^s + 18°01'	
Z CMa	07 ^h 01 ^m 23 ^s - 11°28'	
V 1025 Tau	04 ^h 32 ^m 54 ^s + 22°48'	
SU Anr	04 ^h 52 ^m 47 ^s + 30°29'	
BBW 76	07 ^h 48 ^m 40 ^s - 32°58'	

Таблица 13.1. б) Звезды - кандидаты в фуоры по спектральным признакам.

Теория Хаяши соответствовала наблюдениям не только качественно, но в некоторых случаях и количественно. Приведем такой пример. Большинство звезд типа Т Тельца погружены в плотные газо-пылевые облака, из вещества которых они, судя по всему, и родились. Однако наблюдаются такие звезды и вне облаков, хотя и недалеко от них. Измерив скорость движения звезды в пространстве и разделив на эту скорость расстояние до ближайшего облака, можно определить время, в течение которого звезда удаляется от места своего предполагаемого рождения. Оказалось, что это время, как правило, совпадает с возрастом звезды, который можно найти, сравнивая ее положение на диаграмме Герцшпрунга - Рессела с теоретическими расчетами Хаяши.

Таким образом, со стороны наблюдателей в это время претензий к теории не было. Однако вскоре претензии появились у теоретиков. Во второй половине 60-х годов они обратили внимание на то, что уже в исходном состоянии распределение плотности газа в облаке не может быть однородным. Поскольку продолжительность быстрого сжатия (t_{ff}) уменьшается с ростом плотности, малая начальная неоднородность облака должна резко возрастать уже на стадии изотермического сжатия. С учетом этого обстоятельства американский астрофизик Р. Ларсон первым теоретически проследил превращение облака в звезду. В 1969 г. он выполнил численные расчеты, результат которых для облака массой $1 M_{\odot}$ и начальной плотностью 10^{-19} г/см³ мы сейчас коротко опишем.

Вскоре после начала сжатия распределение плотности в облаке становится очень неоднородным: плотность существенно возрастает к центру. Спустя время, равное $1,3 t_{ff}$, центральная область становится непрозрачной для инфракрасного излучения, и температура в ней начинает быстро увеличиваться. Вскоре формируется ядро, параметры которого в начальный момент следующие: $T = 200$ К, $M = 0,05 M_{\odot}$, $R = 10^2 R_{\odot}$. Как и в модели Хаяши - Накано вокруг ядра возникает ударная волна, отделяющая непрозрачную область равновесия от свободно падающей изотермической оболочки.

Медленное сжатие ядра продолжается до тех пор, пока при температуре около 2000 К не начнется разрушение молекул водорода, а вскоре и ионизация его атомов. Эти процессы поглощают много энергии; равновесие ядра нарушается, и оно стремительно сжимается. Новое состояние равновесия теперь уже у плазменного ядра наступает при следующих параметрах: $T \approx 2 \cdot 10^4$ К, $M = 1,5 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$, $R = 1,3 R_{\odot}$. Это ядро более компактно, чем в модели Хаяши - Накано, и поэтому скорость падающего на его поверхность вещества больше - около 15 км/с. Соответственно выше оказываются температура и светимость в ударной волне.

Другое существенное отличие заключается в том, что к моменту образования плотного ядра

основная масса оболочки имеет почти такие же параметры, как и в начале сжатия. Причина в том, что существенное уменьшение плотности от центра к краю протозвезды вызывает перепад давления, который замедляет сжатие. В результате возникает качественно новое состояние: горячее компактное ядро, интенсивно излучающее в оптическом диапазоне, на которое сравнительно долго (около 1 млн лет) происходит аккреция (падение) вещества протяженной оболочки.

Рост массы ядра за счет аккреции продолжается до тех пор, пока не упадет все вещество. В этот период, протозвезда для внешнего наблюдателя выглядит как крайне холодный, инфракрасный объект, поскольку излучение ядра полностью поглощается веществом оболочки и переизлучается в длинноволновом диапазоне спектра.

В некотором смысле сходная ситуация возникала и в расчетах японских астрофизиков, когда объект проходил стадию адиабатического сжатия. Однако продолжительность этой стадии столь невелика (около 20 лет), что трудно было надеяться застать будущую звезду именно на этом этапе эволюции. Вероятно, по этой причине для объектов такого рода в то время ученые не придумали специального названия. Но после появления работ Ларсона такая необходимость возникла, и было предложено называть протозвездами сжимающиеся облака, в центре у которых сформировалось равновесное ядро.

Когда же оболочка полностью упадет на ядро и все вещество из молекулярного газа превратится в плазму, протозвезда попадает на траекторию Хаяши. По новой терминологии объекты на стадии Хаяши следует называть молодыми звездами или звездами на стадии приближения к главной последовательности. Этой терминологии мы и будем в дальнейшем придерживаться.

Расчеты Ларсона не только увеличили длительности протозвездной стадии эволюции, но и изменили размер молодой звезды в момент ее появления из непрозрачного "кокона". В самом деле, согласно этим расчетам, ударная волна на границе ядра возникает рано и существует очень долго. Нагретое в ней вещество излучает большой поток энергии, которая черпается из энергии гравитационного сжатия протозвезды. Поэтому к моменту, когда протозвезда попадает на траекторию Хаяши, работа сил гравитации должна обеспечить не только разрушение молекул и атомов, но и длительное излучение света в ударной волне. Поэтому переход от протозвезды к молодой звезде происходит при радиусе R_x всего $2 R_{\odot}$, а не $50 R_{\odot}$, как в модели японских астрофизиков.

Дальнейшая эволюция молодой звезды протекает так же, как это предсказывала теория Хаяши. Соответственно все выводы относительно звезд типа Т Тельца сохранили свою силу и в новой теории. Единственная, но очень важная претензия наблюдателей к теории Ларсона заключалась в том, что многие звезды типа Т Тельца имеют радиусы, значительно больше $2 R_{\odot}$, хотя и меньше $50 R_{\odot}$. Что могла ответить на это теория?

Как мы видели, величина R_x однозначно связана с количеством энергии, излучаемой протозвездой за время ее жизни. Поэтому увеличить R_x можно либо за счет сокращения времени жизни, либо за счет уменьшения светимости протозвезды. Светимость сильно зависит от того, насколько корректно в расчетах описана структура ударной волны и прилежащих к ней слоев. В 70-х годах появилось несколько работ, авторы которых пытались согласовать теорию с наблюдениями, внося уточнения в физическую постановку задачи и в методику численных расчетов. Итоги этих исследований подвели в начале 80-х годов К. Уинклер и М. Ньюмэн, которые пришли к выводу, что корректное численное описание физических процессов приводит в конечном счете к значению R_x полученному Ларсоном.

Следовательно, на этом пути согласовать теорию с наблюдениями не удастся.

Остается второй путь - уменьшение времени аккреционной фазы. Ее длительность примерно в 3 - 5 раз превышает время t_{ff} , величина которого тем меньше, чем больше исходная плотность облака. В расчетах Ларсона начальная плотность соответствовала условию джинсовской (гравитационной) неустойчивости. Но если начальную плотность облака выбрать более высокой, то продолжительность аккреционной фазы сократится.

Правда, выбранная в моделях Ларсона и Хаяши - Накано начальная плотность ($\sim 10^{-19}$ г/см³) как раз типична для уплотнений в молекулярных облаках; области с более высокой плотностью встречаются там нечасто. Поэтому такой путь решения проблемы не является универсальным.

Еще одна возможность сокращения длительности фазы аккреции связана с возникновением интенсивного звездного ветра, "дующего" от ядра протозвезды и "сдувающего" с него остатки оболочки. Эта возможность исследовалась более детально, и на ней мы остановимся подробнее. Начнем с массивных протозвезд с массой больше $3 M_{\odot}$. У них характерное время медленного сжатия ядра на пути к главной последовательности меньше времени свободного падения оболочки. Поэтому, и это доказали расчеты Ларсона, у таких звезд ядро придет на главную последовательность еще до того, как исчезнет непрозрачная оболочка (см. рис. 13.2).

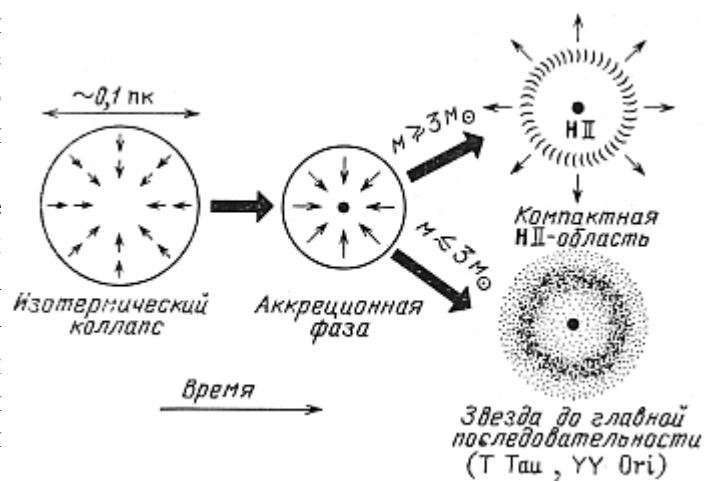


Рис. 13.2. Схема формирования протозвезд различной массы.

Около 20 лет назад в областях звездообразования были обнаружены подобные звезды-коконы (см. табл. 11.2). В длинноволновом диапазоне они выглядят как компактные (0,1 - 1 пк), яркие ($10^2 - 10^5 L_{\odot}$) зоны H II, скрытые под мощной пылевой оболочкой с эффективной температурой около 100 К. Интересной особенностью этих объектов оказалось то, что их оболочки не сжимаются, а расширяются. Причиной этого является давление излучения на пыль. В процессе сжатия, когда светимость ядра становится достаточно большой, начинается торможение падающего вещества до полной его остановки, а затем оболочка вообще выметается.

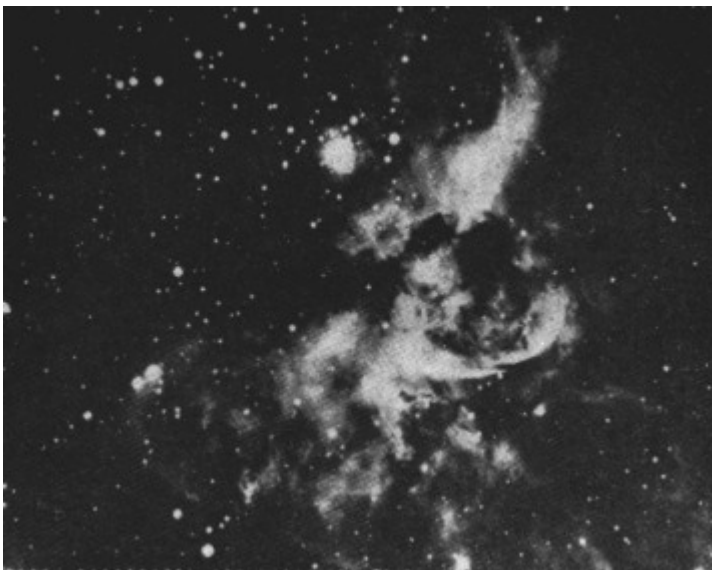


Рис. 13.3. Центральная часть туманности NGC 3372 вокруг массивной звезды η Car в созвездии Киля.

В результате масса звезды главной последовательности оказывается меньше массы исходного облака, причем, чем массивнее облако, тем меньше доля массы, которая превращается в звезду: согласно расчетам В. Чарнугера облако массой $150 M_{\odot}$ порождает звезду массой "всего" $65 M_{\odot}$. По-видимому, именно этот механизм ограничивает сверхмассы звезд главной последовательности. Точное значение верхнего предела массы очень чувствительно к начальным условиям и химическому составу облака. Для современных условий в диске Галактики теория дает значение этого предела около $70 M_{\odot}$. Учитывая

большое количество упрощений, принятых для этих расчетов, это не так уж плохо соотносится с наблюдаемыми массами крупнейших звезд ($\approx 100 M_{\odot}$), например, с массой звезды η Car (см. рис. 13.3).

Вернемся теперь к протозвездам малой массы ($< 3 M_{\odot}$). Их светимость не настолько велика, чтобы излучение могло "сдуть" часть оболочки и сократить тем самым продолжительность фазы аккреции. Однако звездный ветер у этих объектов может возникнуть по другой причине. Как показывают расчеты К. Уинклера, М. Ньюмена и других астрофизиков, максимум в распределении температуры вдоль радиуса у протозвезд малой массы находится не в центре, а на фронте ударной волны. Когда температура в этой области поднимается до значения порядка 1 млн К, там начинаются термоядерные реакции с участием дейтерия: $D^2 + H^1 \rightarrow He^3$.

С энергетической точки зрения эта реакция практически не играет никакой роли: содержание

дейтерия в межзвездной среде очень мало, да и теплотворная способность этой реакции существенно ниже, чем у классической водород-водородной ($4\text{H}^1 \rightarrow \text{He}^4$). Тем не менее, горение дейтерия приводит к появлению на границе ядра конвективной зоны, которая затем распространяется в глубь него. Можно предположить, что конвективное движение плазмы приведет к генерации магнитного поля и возникновению звездного ветра, подобно тому, как это "происходит на Солнце.

Энергия, уносимая звездным ветром, может быть гораздо меньше энергии, уносимой излучением, но при этом давление на вышележащие слои звездный ветер создаст существенно большее (импульс фотона равен E/c , а газовой частицы $2E/v$). К сожалению, описанный выше механизм не получил пока количественного обоснования прежде всего потому, что для генерации поля, кроме наличия конвекции, необходимо, чтобы протозвезда вращалась вокруг оси, а о вращении протозвезд мы почти ничего не знаем.

Поскольку проблема вращения представляет самостоятельный интерес, о ней следует поговорить особо. Наблюдения показывают, что отдельные глобулы и молекулярные облака вращаются вокруг своей оси с периодом 10 - 100 млн лет. В зависимости от того, какую долю кинетическая энергия вращения составляет от тепловой и гравитационной энергии облака, его дальнейшая судьба может сложиться различным образом.

Предположим, что в процессе сжатия момент количества движения облака сохраняется, хотя, как мы уже видели, этого может и не быть из-за влияния магнитного торможения. Но если момент сохраняется, то по мере сжатия скорость вращения облака должна возрастать. Одновременно будут возрастать и центробежные силы, которые заставят облако сплющиваться вдоль оси вращения. Так происходит в случае, когда начальная кинетическая энергия вращения сравнима с гравитационной энергией облака.

Если же вначале облако вращалось относительно медленно, то, как показывают расчеты, изотермическое сжатие приводит к образованию в центре ядра, вокруг которого формируется кольцо. Чем быстрее вращается облако перед началом сжатия, тем большая масса сосредотачивается в кольце; при определенных параметрах она может значительно превышать массу ядра. Возникшая кольцевая структура, по-видимому, неустойчива и распадается на несколько фрагментов, из которых образуется кратная звездная система. При этом основная доля исходного углового момента переходит в орбитальный момент, а сами протозвезды могут вращаться вокруг оси сравнительно медленно.

Эволюция медленно вращающихся протозвезд, начальный момент количества движения которых не превышает 10^{52} г·см²/с, представляет особый интерес. В ходе эволюции такой протозвезды вокруг ее центрального тела должен сформироваться маломассивный диск. Поскольку это имеет прямое отношение к формированию планетной системы, то естественно, что наибольшее количество расчетов было выполнено для сжатия медленно вращающегося облака солнечной массы. Вырисовывается следующая качественная картина.

Вначале газовый протопланетный диск был почти на порядок меньше размеров современной Солнечной системы, т. е. целиком умещался в орбите Юпитера. Взаимное трение газовых потоков в диске привело к тому, что внутренние его части тормозились и падали на протозвезду, а их момент передавался внешним слоям, которые наоборот удалялись от протозвезды все дальше и дальше. При этом система диск-звезда была погружена в непрозрачную оболочку, как и в случае сферически симметричного коллапса. В определенный момент оболочка становится прозрачной для оптического излучения, и протозвезда превращается в молодую звезду, окруженную диском - зародышем будущей планетной системы.

Для астрономии типична ситуация, когда физическая картина того или иного явления зависит от множества параметров и включает в себя большое количество разнообразных процессов. Однако, как правило, наблюдения позволяют существенно ограничить круг начальных условий или допустимых ситуаций. К сожалению, наблюдения протозвезд на данном этапе не дают нам почти никакой информации, способной помочь в решении возникающих проблем. Самые интересные процессы - фрагментация, формирование ядер и зарождение протопланетных дисков - надежно скрыты от внешнего наблюдателя за непроницаемой оболочкой облака.

С другой стороны, мы пока еще слишком плохо представляем, как именно должны выглядеть протозвезды, и как их отличить от других холодных объектов, например,

упоминавшихся IR/ОН - звезд.

В 1983 г. американский астрофизик Вини-Вильямс, подводя неутешительные итоги поиска кандидатов в протозвезды, назвал эти объекты "чашей Грааля инфракрасной астрономии". Как известно, эта мифическая чаша с кровью Христа обладает, если верить легенде, чудодейственной силой; ее поисками долго и безрезультатно занимались многие поколения христиан в Средние века.

За последние несколько лет ситуация с поиском протозвезд немного изменилась. У нескольких молодых звезд методом спекл-интерферометрии были обнаружены холодные спутники. В частности, в середине 80-х годов два таких объекта обнаружили в окрестности звезды Т Тельца (Т Tau). Один из них Т Tau S с цветовой температурой всего 800 К был найден на расстоянии 0,6" к югу от Т Tau, а второй Т Tau N - на 0,3" севернее Т Tau (рис. 13.4). В оптическом и ИК диапазонах оба объекта в десятки раз слабее, чем звезда Т Tau, но зато мощность радиоизлучения от объекта Т Tau S на порядок выше чем от самой Т Tau.

Пока мы не можем с уверенностью сказать, являются ли эти объекты протозвездами. С одной стороны, расстояние между компонентами системы слишком мало, чтобы с помощью наземных телескопов получить спектры спутников по отдельности. А с другой стороны, это расстояние слишком велико (~100 а. е.) для того, чтобы за короткое время проследить относительное движение объектов и определить, представляют ли они собой связанную систему.

По той причине, что собственно протозвездная стадия наблюдается с большим трудом, особый интерес представляет изучение молодых звезд: они еще не успели "забыть" предшествующую стадию, и по горячим следам можно восстановить ряд особенностей эволюции протозвезд.

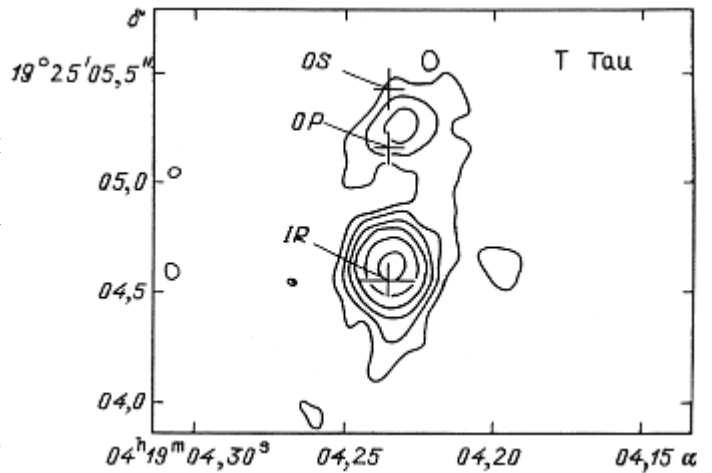


Рис. 13.4. Относительное положение компонент тройной звезды Т Тельца: OP - оптическая компонента, давно известная астрономам как переменная звезда Т Тельца; OS и IR - ее холодные спутники, недавно обнаруженные в инфракрасном диапазоне. Тонкими сплошными линиями показано распределение интенсивности радиоизлучения на волне 2 см. Рисунок из статьи И. Аппенцеллера и Р. Мундта.

ЗВЕЗДЫ ТИПА Т ТЕЛЬЦА

Еще в начале нашего века вблизи некоторых темных туманностей были обнаружены звезды сравнительно позднего спектрального класса с яркими эмиссионными линиями водорода и ионизованного кальция. Но только в 1945 г. американский астрофизик А. Джой доказал, что эти звезды не экзотические аномалии, а новый класс объектов, природу которых еще предстоит выяснить. Джой не только дал название этому классу - звезды типа Т Тельца, но и указал, что искать новых представителей этого класса следует по наличию яркой эмиссионной линии водорода H_{α} .

Фотографируя окрестности темных туманностей с помощью широкоугольного телескопа, перед объективом которого была установлена стеклянная призма, превращающая изображение каждой звезды в коротенький спектр, американский астроном быстро обнаружил несколько десятков таких звезд.

В дальнейшем большой вклад в изучение нового класса звезд внес известный американский

"Теоретики склонны относиться к фактам "выборочно". Вспомним, что, как утверждают его современники, отец теоретической физики предпочтению версии, более подходящей для теории, которую он защищал".

В. Карцев "Ньютон"

астрофизик Г. Хербиг, который сам обнаружил много новых звезд этого типа, а затем проанализировал все имеющиеся данные и в 1962 г. опубликовал первый сводный каталог содержащий основные параметры звезд типа Т Тельца. Хербиг уточнил предложенные Джемом критерии, на основании которых звезды следует относить к данному типу: 1) спектральный класс от G до M, 2) наличие в спектре эмиссионных линий водорода и ионизованного кальция, 3) наличие аномально интенсивных эмиссионных линий нейтрального железа Fe I 4063 Å и Fe I 4132 Å, что является специфической особенностью данного типа звезд.

Как видим, критерии эти чисто спектроскопические, хотя большинство ярких звезд типа Т Тельца изменяет свой блеск и поэтому еще раньше их выделили в особую группу переменных звезд с быстрыми и неправильными колебаниями блеска - в так называемую группу орионовых переменных. Своим названием эта группа обязана тому факту, что ближайший крупный очаг звездообразования, где эти звезды наблюдаются в избытке, находится в созвездии Ориона. В дальнейшем оказалось, что группа орионовых переменных неоднородна, т. е. содержит объекты с весьма разнообразными свойствами, тогда как выделенный по спектральным критериям класс звезд типа Т Тельца, по-видимому, объединяет объекты одинаковой физической природы.

Прогресс в понимании эволюционного статуса звезд типа Т Тельца наметился очень быстро. Уже в конце 40-х годов советский астрофизик В. А. Амбарцумян, исходя из соображений звездной динамики, высказал предположение о недавнем рождении этих звезд. В пользу гипотезы В. А. Амбарцумяна свидетельствовала несомненная концентрация звезд типа Т Тельца вблизи темных газо-пылевых облаков. К тому же, наличие в спектрах этих звезд интенсивной линии поглощения лития Li I 6707 Å говорило об аномально большом обилии этого элемента, который должен быстро "выгорать" в звездах после начала термоядерных реакций.

Последние сомнения относительно эволюционного статуса звезд типа Т Тельца рассеялись после появления теории Хаяши. Расчеты показали, что в той области диаграммы спектр - светимость, где расположились звезды типа Т Тельца, как раз должны находиться молодые звезды с массой $M < 3 M_{\odot}$, еще не достигшие главной последовательности.

В те годы астрономам казалось, что быстро удастся выяснить и природу процессов, ответственных за наблюдаемые свойства молодых звезд. Однако и сейчас, спустя 40 лет после начала их пристального изучения, физика звезд типа Т Тельца остается предметом споров. В последнее время этим звездам ежегодно посвящается около сотни научных статей. Однако нужно признаться, что пока ситуация довольно точно описывается известной поговоркой: "Дальше в лес - больше дров". До сих пор применение новых методов исследования лишь увеличивало число нерешенных проблем.

Итак, что же мы знаем о звездах типа Т Тельца и что еще предстоит выяснить? Сейчас известно около 700 звезд этого типа. Основные сведения о них недавно опубликованы Г. Хербигом в виде третьего каталога молодых звезд. (Первый каталог, как мы уже говорили был опубликован в 1962 г., а второй - десять лет спустя.) Большая часть этих звезд - около 66%, относится к спектральному классу K, примерно 30 % - к спектральному классу M, а остальные - к классу G.

Значительная часть звезд типа Т Тельца имеет избыточное излучение в голубой и инфракрасной областях непрерывного спектра по сравнению со звездами главной последовательности тех же спектральных классов. Из рис. 14.1 видно, что величина избытков в коротковолновой области спектра может существенно изменяться от звезды к звезде. Примерно у 10 % звезд интенсивность избыточного излучения в континууме столь велика, что фотосферные линии поглощения вообще не наблюдаются.

Однако основная особенность спектров этих звезд - наличие сильных эмиссионных линий. В оптическом диапазоне это прежде всего линии бальмеровской серии водорода (H_α , H_β , H_γ и т. д.) и ионизованного кальция Ca II 3968 и 3934 Å (так называемые, H и K линии Ca II). Из них наиболее интенсивная линия - H_α ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$).

В астрономии интенсивность спектральных линий принято характеризовать эквивалентной шириной, т. е. шириной полосы непрерывного спектра в окрестности линии, в которой излучается столько же энергии, сколько в самой линии. Так вот, у некоторых звезд типа Т Тельца (например, RU Волка, XZ Тельца, Lk H_α -197) эквивалентная ширина линии H_α , превышает 200 Å. Это означает, что в одной линии излучается несколько процентов от общей светимости звезды! На рис. 14.2 показана относительная численность звезд с различной эквивалентной шириной линии H_α . Эта гистограмма построена на основе наблюдений М. Коэна и Л. Кухи. Число звезд с малой эквивалентной шириной здесь, скорее всего, занижено, поскольку их труднее обнаруживать.

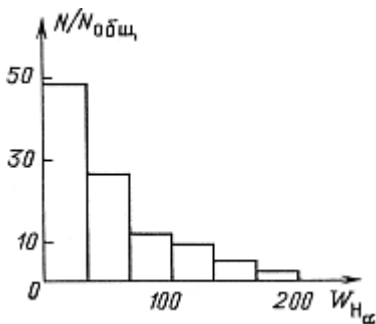


Рис. 14.2. Относительная численность звезд типа Т Тельца с различной эквивалентной шириной линии H_α . Гистограмма построена по данным для 356 звезд.

Кроме линий водорода и кальция в спектрах звезд типа Т Тельца присутствуют эмиссионные линии и других элементов: Fe I, Fe II, Na I, He I, ... Как правило, у звезд с более интенсивной линией H_α наблюдается большее число и разнообразие эмиссионных линий других элементов, причем интенсивность этих линий в среднем пропорциональна интенсивности линии H_α . Но следует подчеркнуть, что у каждой отдельной звезды поток в линии H_α может меняться со временем, и при этом линии с разными потенциалами возбуждения могут вести себя по-разному. Вероятно, это свидетельствует о сильной стратификации физических условий, в областях формирования эмиссионного спектра.

Особо следует сказать о линиях Fe I 4064 и 4132 Å, наличие которых, по Хербигу, служит одним из классификационных признаков. На рис. 14.3 показана часть схемы энергетических уровней Fe I. Из нее видно, что интересующие нас линии возникают при переходе с общего верхнего уровня $u^3F_3^0$. Этот же верхний уровень соответствует другой спектральной линии железа, возникающей при переходе с уровня a^3F_4 ; длина ее волны равна 3969,26 Å, что всего на 0,8 Å превышает длину волны линии Ca II H. Из-за поглощения атомами железа квантов, излученных в широком крыле интенсивной линии Ca II H, уровень $u^3F_3^0$ оказывается аномально населенным, что приводит к повышению яркости линии Fe I 4064 и 4132 Å. Такой механизм возбуждения называется флуоресцентным.

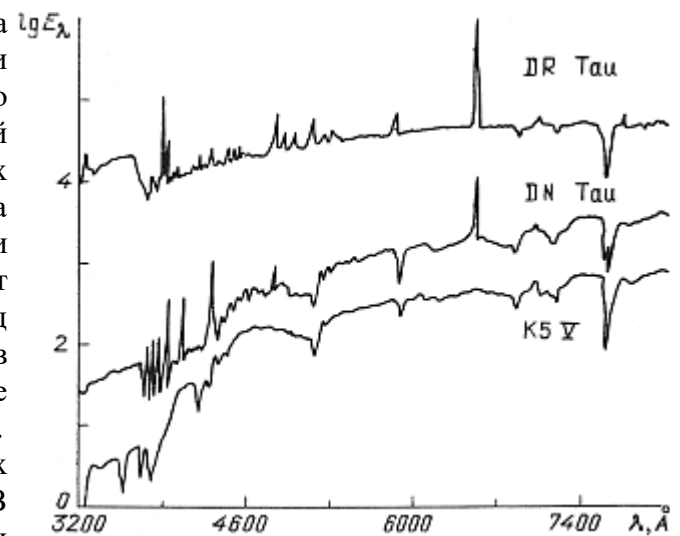


Рис. 14.1. Распределение энергии E_λ ($\text{Вт}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Å}^{-1}$) в спектрах двух звезд типа Т Тельца и звезды главной последовательности спектрального класса K5. Для удобства сравнения кривые сдвинуты вдоль оси ординат относительно друг друга на произвольную величину.

Таким образом, наличие в спектре звезды сравнительно ярких линии Fe I 4064 и 4132 Å обусловлено большой шириной линии Ca II H. Отметим здесь, что флуоресцентные линии железа Fe I 4064 и 4132 Å наблюдаются в спектрах солнечных вспышек, во время которых резко возрастают ширина и интенсивность линии Ca II H.

Как мы уже видели, у большинства молодых звезд эмиссия в линии H_{α} (а следовательно, и в линии Ca II

H) не очень велика, и поэтому в их спектрах флуоресцентные линии железа не наблюдаются. Более того, даже у звезд с развитым эмиссионным спектром флуоресцентные линии Fe I могут на время исчезать, вероятно, вследствие уменьшения ширины и/или интенсивности "накачивающей" их линии кальция. Таким образом, нет основания считать наличие указанных линий железа одним из признаков принадлежности к звездам типа Т Тельца, как это ранее делал Хербиг.

Однако такое утверждение порождает ряд проблем. Как известно, у звезд более горячих, чем звезды спектрального класса G, железо в фотосфере полностью ионизовано, поэтому линии Fe I вообще не могут наблюдаться. По-видимому, именно это обстоятельство и побудило в свое время Хербига ограничиться при отборе звезд типа Т Тельца только поздними спектральными классами, т. е. сравнительно холодными звездами. Но наряду с ними в областях звездообразования наблюдаются молодые звезды более ранних спектральных классов - Ae и Be звезды Хербига с эмиссионными линиями в спектре (здесь e = emission). Их известно сейчас около шестидесяти и по наблюдательным проявлениям они во многом сходны со звездами типа Т Тельца. Естественно возникает вопрос: связано ли деление молодых звезд на две группы с исторической традицией или оно отражает реальные различия в их физике и эволюции? Подробнее мы обсудим эту проблему ниже, а здесь отметим, что ответа на поставленный вопрос пока нет.

Вернемся теперь к самому факту наличия интенсивных эмиссионных линий в спектрах звезд типа Т Тельца. Из теории звездных атмосфер известно, что линейчатый абсорбционный спектр, характерный для звезд главной последовательности, обусловлен уменьшением температуры наружу во внешних (фотосферных) слоях звезды. Следовательно, присутствие эмиссионных линий в спектрах молодых звезд указывает на то, что у этих звезд над фотосферой располагаются области с более высокой температурой, по-видимому, ответственные также и за наблюдаемое избыточное излучение в коротковолновом диапазоне непрерывного спектра.

Наличие над фотосферой слоев более горячего газа - явление достаточно распространенное в мире звезд. В частности, в солнечной фотосфере температура уменьшается с высотой вплоть до 4200 K, а затем начинает возрастать в хромосфере и далее в короне, достигая значения $2 \cdot 10^6$ K. Первые попытки дать теоретическое объяснение инверсии температуры в солнечной атмосфере были предприняты в конце 40-х, начале 50-х годов.

В основе этих теорий лежало предположение о том, что турбулентное движение газа в верхних слоях конвективной зоны возбуждает звуковые волны. Выходя наружу, в разреженную атмосферу звезды, звуковые волны увеличивают свою амплитуду и становятся ударными. После этого они быстро затухают, отдавая свою энергию окружающему газу. Происходит это там, где атмосфера звезды уже совершенно прозрачна и не поглощает идущее снизу электромагнитное излучение. Поэтому поток звуковых волн является основным источником нагрева разреженного газа над фотосферой звезды.

Охлаждение же разреженного газа происходит в основном за счет излучения, причем излучательная способность хромосферного газа тем выше, чем больше его плотность и температура. Если волновое нагревание хромосферы происходит более или менее равномерно по всей ее толщине, то для равномерного ее охлаждения в условиях уменьшающейся наружу плотности газа его температура должна возрастать в этом же направлении. Так объяснялось существование слоя с инверсной температурой над фотосферой.

Хромосферу Солнца удается наблюдать в моменты полного затмения, когда не видна яркая

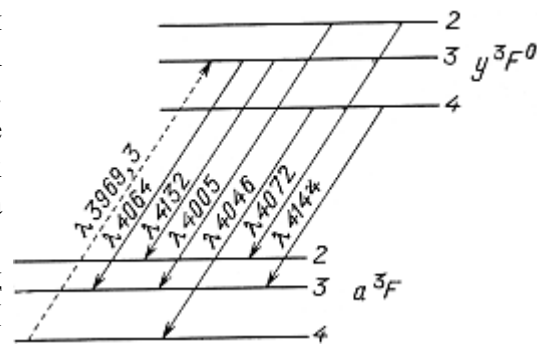


Рис. 14.3. Часть схемы энергетических уровней атома железа Fe I.

фотосфера. В остальное же время хромосфера в оптическом диапазоне проявляет себя весьма слабо: чуть ли не единственным признаком ее существования является наличие в центре глубоких линий поглощения H и K Ca II небольших эмиссионных пиков. Однако не будем забывать, что светимость хромосферы равна мощности звуковых волн, генерируемых в конвективной зоне. А теория Хаяши предсказывает, что у звезд типа G Тельца должны быть протяженные конвективные зоны, скорость движения вещества в которых заметно превосходит скорость конвекции на Солнце. С другой стороны, физики знают, что мощность генерации звуковых волн (W) сильно зависит от скорости движения вещества (v_T): при изотропно турбулентном движении $W \sim v_T^5$. Таким образом, вполне естественной выглядела гипотеза, согласно которой избыточное излучение в коротковолновой области и мощный эмиссионный спектр звезд типа G Тельца обусловлены горячим газом их хромосфер. В пользу этого предположения говорило и сходство спектров ярчайших звезд этого типа со спектром солнечной хромосферы, наблюдаемым во время затмений. Отметим, правда, что Ae и Be звезды Хербига, как более массивные, не должны по теории Хаяши иметь мощных конвективных зон, поэтому объяснить их избыточное излучение с помощью хромосферной гипотезы не представлялось возможным.

В дальнейшем, однако, оказалось, что разработать детально хромосферную модель для молодых звезд не так-то просто. Прежде всего выяснилось, что даже для Солнца не удастся объяснить нагрев хромосферы затуханием в ней чисто акустических волн. Дело в том, что по ряду причин, в частности, из-за явления рефракции звуковые волны не в состоянии проникнуть в верхние слои хромосферы. Вместе с тем, в солнечной атмосфере могут переносить энергию не только звуковые волны, но и волны иных типов: магнитозвуковые, альвеновские, гравитационные (аналогичные волнам на поверхности воды). В них кроме газового давления существенную роль играют сила тяжести и электромагнитное взаимодействие. Но при попытках создать теорию этих процессов возникло множество проблем, связанных с описанием распространения различных типов волн и перераспределения энергии между ними. В результате астрофизикам не удалось построить сколько-нибудь надежную теорию волнового нагрева даже для Солнца, не говоря уже о молодых звездах.

Ситуация еще более усложнилась после запуска в 1979 г. рентгеновской обсерватории "Эйнштейн": после проведенных с ее помощью наблюдений возникли сомнения в том, что теория волнового нагрева применима вообще. Причиной для сомнения послужило то, что согласно этой теории среди объектов главной последовательности наиболее мощные короны должны быть у звезд спектрального класса G, а наблюдения указывали на более холодные карлики: именно у них нагрев атмосферы происходит наиболее эффективно. Когда это обнаружилось, теоретики принялись искать альтернативные источники разогрева хромосферы и короны. Высказывалась, в частности, гипотеза о том, что выделение тепла в верхних слоях звездных атмосфер происходит из-за протекания электрического тока, вызванного индукцией магнитного поля, которое генерируется в конвективной зоне и затем всплывает к поверхности звезды.

Несмотря на то, что хорошей теории нагрева хромосфер долго создать не удавалось, ясно было, что исходной причиной существования хромосфер является наличие у звезд конвективной зоны. А значит, не было оснований сомневаться и в том, что хромосферы существуют и у звезд типа G Тельца. Но вот беда - никак не удавалось построить самосогласованную модель, в которой распределение плотности и температуры получалось бы из решения соответствующих уравнений гидростатического равновесия и теплового баланса. Поэтому в 70-х годах появились работы, авторы которых пытались в рамках хромосферной модели подобрать такое распределение плотности и температуры с высотой, которое позволило бы объяснить наблюдаемые спектры молодых звезд. В общих чертах им удалось воспроизвести наблюдаемые интенсивности линий железа и бальмеровской серии водорода, а также избыточное излучение в континууме. Но при этом теоретические профили эмиссионных линий, как правило, получались совершенно непохожими на наблюдаемые. Чтобы понять причину этого, давайте немного подробнее обсудим, как формируются профили эмиссионных линий в спектрах молодых звезд.

Форма профилей эмиссионных линий у звезд типа Т Тельца весьма разнообразна, причем наибольшее разнообразие наблюдается у линий бальмеровской серии водорода (рис. 14.4). Вообще говоря, вид профиля изменяется от линии к линии, от звезды к звезде и у каждой линии меняется со временем. Это указывает на сильную стратификацию и нестационарность физических условий в области формирования линейчатого излучения и создает серьезные трудности при попытке построить модель надфотосферных областей. Ситуация на сегодняшний день кажется настолько сложной, что астрономы даже не берутся моделировать оболочки каких-то конкретных звезд, а мечтают о создании модели хотя бы для "типичной", "средней" звезды типа Т Тельца. Что же предстоит объяснить в рамках такой усредненной модели?

Прежде всего - большую ширину эмиссионных линий, которая для бальмеровской серии водорода по уровню нулевой интенсивности достигает несколько сотен километров в секунду⁽¹⁾. В рамках гидростатической модели, т. е. при отсутствии сильных газовых течений, такая ширина линий может быть следствием их большой оптической толщи, иначе говоря большого числа рассеяний, которые испытывают кванты прежде, чем выйти за пределы хромосферы.

Дело в том, что квант, поглощенный движущимся атомом, а затем вновь им излученный, изменяет свою частоту (это следует из законов сохранения энергии и импульса, когда меняется направление полета кванта). Если учитывать только тепловое движение атомов, то при однократном рассеянии изменение частоты невелико. Однако, чем больше рассеяний испытывают кванты, тем сильнее "расползается" профиль линии. Наглядным примером действия этого механизма уширения служат линии поглощения H и K Ca II в спектре Солнца: за счет колоссальной оптической толщи их ширина по уровню половинной интенсивности превышает 1000 км/с.

Как мы уже знаем, в хромосферной модели удалось воспроизвести наблюдаемую интенсивность бальмеровских линий. Однако у звезд с большой интенсивностью и шириной этих линий оптическая толщина оказывалась столь велика, что в центре расчетного профиля линии H_{α} возникал абсорбционный провал. Кроме того, при описанном выше механизме уширения, линии должны иметь форму, симметричную относительно центральной длины волны. Однако у звезд с большой шириной бальмеровских линий этого как раз не наблюдается, и потому сейчас принято считать, что большая ширина и асимметричная форма профилей эмиссионных линий в спектрах молодых звезд вызваны крупномасштабными движениями вещества в их надфотосферных слоях, приводящими к доплеровскому расширению линии.

Однако ширина линий у молодых звезд довольно велика, поэтому излучающий их газ должен двигаться со скоростями, превышающими 100 км/с. Что же заставляет его двигаться столь быстро? Нужно учесть, что линейчатый спектр водорода обычно формируется в газе с температурой $\sim 10^4$ К. При этом скорость звука в нем ≈ 10 км/с, т. е. на порядок меньше той, которая оценивается по ширине линии. Может ли сравнительно холодный газ так эффективно ускоряться? Законы газодинамики указывают, что даже при адиабатическом расширении газа в пустоту, когда его тепловая энергия полностью переходит в энергию направленного движения, скорость расширения газа не может превысить скорость звука более, чем в 3 раза. Такой скорости (≈ 30 км/с) явно недостаточно для объяснения ширины линий. Значит, необходим дополнительный источник энергии.

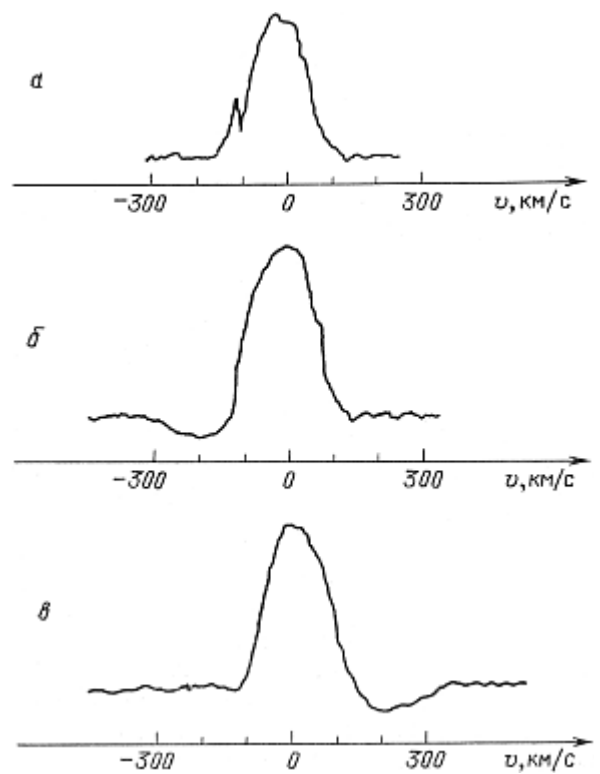


Рис. 14.4. Схематическое изображение формы профилей водородных линий: типичный вид линии H_{α} в спектрах "классических" звезд типа Т Тельца (а, б); характерный профиль типа "обратного Р Лебеда" для линий H_{β} , H_{γ} , ... в спектрах звезд типа YY Ориона (в).

В 1964 г. американский астрофизик Л. Кухи предположил, что в хромосферах звезд типа Т Тельца непрерывно происходят взрывные явления, аналогичные солнечным вспышкам, в результате чего в окружающее пространство выбрасывается горячее вещество со скоростью ~ 100 км/с. Выброшенный газ образует расширяющуюся оболочку и остывает до температуры $\sim 10^4$ К. В этой оболочке и происходит формирование эмиссионных линий. Сделав ряд упрощающих предположений, в частности, о сферической симметрии и изотермичности оболочки, а также о квазистационарном характере движения вещества в ней, Кухи рассчитал ожидаемые в такой модели профили линий водорода. Оказалось, что они такие же, как у известной звезды Р Лебедя, эмиссионные линии которой имеют яркий пик и относительно широкую депрессию в континууме со стороны фиолетового крыла линии. Их внешний вид столь характерен, что обычно их так и называют - профили типа Р Суг. У некоторых молодых звезд с развитым эмиссионным спектром бальмеровские линии действительно имеют профили такой формы (см. рис. 14.4 б). Подобрать параметры модели, Кухи в ряде случаев удалось добиться поразительно точного совпадения теоретических профилей с наблюдаемыми.

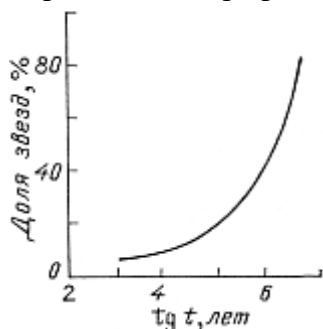


Рис. 14.5. Зависимость, показывающая, какая доля звезд типа Т Тельца имеет возраст менее величины, указанной на оси абсцисс.

Расчеты американского ученого произвели большое впечатление на астрономов и с тех пор принято считать, что звезды типа Т Тельца постоянно теряют вещество в виде расширяющейся оболочки. По оценкам Кухи темп потери массы $M \equiv dM/dt = 4\pi r^2 \rho v$; (где ρ и v - плотность и скорость движения вещества на расстоянии r от звезды) для этих звезд должен быть $\sim 10^{-8} M_{\odot}$ / год. Это очень большое значение: если принять, что молодые звезды на стадии Т Тельца проводят $\sim 10^7$ лет (рис. 14.5) и имеют массы $M \sim 1 M_{\odot}$, то оказывается, что за счет истечения они должны потерять значительную часть своей массы. Такое "похудение" звезды должно было бы проявиться в изменении формы треков молодых звезд на диаграмме Герцшпрунга - Рассела и, как следствие, в изменении вида диаграмм спектр - сведимость молодых звездных скоплений,

что, однако, противоречит наблюдениям.

Более того, теперь имеются наблюдения, которые противоречат исходному предположению об интенсивной вспышечной активности молодых звезд. Точные измерения блеска звезд указывают на отсутствие микропеременности на малых временных интервалах, а наблюдаемые редкие вспышки большой амплитуды явно не в состоянии обеспечить необходимый темп истечения вещества.

Таким образом, пришлось отказаться от модели разгона "холодного" ($T \sim 10^4$ К) газа за счет взрывных явлений. Но может быть сгустки "холодного" газа могут возникать в горячей стационарной короне, истекающей наружу как солнечный ветер? Ведь при корональной температуре ($T \gg 10^6$ К) скорость звука, а следовательно, и скорость разлета газа должна быть как раз $\gg 100$ км/с. Расчеты, выполненные в середине 70-х годов советскими астрофизиками, показали, что образование более холодных и плотных сгустков в корональном газе возможна за счет, так называемой, тепловой неустойчивости. Но для этого плотность газа в хромосферах и коронах молодых звезд должна на два-три порядка превышать соответствующие значения в атмосфере Солнца. А это означало, что молодые звезды должны быть источниками мощного рентгеновского и ультрафиолетового излучения. В конце 70-х годов на околоземную орбиту были выведены два астрономических спутника: НЕАО-В для наблюдения рентгеновского излучения и IUE для наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне. В соответствии с предсказанием от звезд типа Т Тельца было обнаружено мощное излучение в жестком ультрафиолете (1100 - 3000 Å) и в рентгене (2-6 кэВ). Однако вскоре выяснилось, что количественно объяснить результаты наблюдений, пользуясь лишь аналогией с верхней атмосферой Солнца, весьма непросто, если вообще возможно.

В ультрафиолетовых спектрах звезд типа Т Тельца были обнаружены линии ионов высокой степени ионизации, таких как Si III, Si IV, C III, C IV, N V, для существования которых необходима температура $\sim 10^5$ К. Подобные линии наблюдаются и в спектре верхних слоев хромосферы Солнца, но у молодых звезд их интенсивность оказалась невероятно велика:

например, звезда RU Волка превосходит Солнце по светимости в линии C IV 1549 Å почти в миллион раз.

Аналогия с Солнцем требовала, чтобы при столь мощных хромосферах молодые звезды обладали коронами со светимостью в рентгеновском диапазоне $\geq 10^{33}$ эрг/с. Однако наблюдения этого не подтвердили: у одних звезд рентгеновское излучение вообще не было зарегистрировано, а у других его мощность оказалась в тысячу раз меньше ожидаемой. Более того, наблюдаемый жесткий спектр и сильные колебания интенсивности рентгеновского излучения позволяли предположить, что его источником являются не постоянно существующие области с корональной температурой, а процессы взрывного характера возможно, аналогичные солнечным вспышкам.

К середине 80-х годов удалось показать, что дефицит рентгеновского излучения нельзя объяснить поглощением жестких квантов в околосветной оболочке. Иными словами, стало ясно, что мощных корон у молодых звезд нет. Пытаясь объяснить этот факт в рамках хромосферной гипотезы, несколько астрофизиков независимо и почти одновременно предложили модель "теплого" ветра. Согласно ей, разгон газа до скорости ~ 100 км/с происходит уже в хромосфере за счет давления альвеновских и/или магнитозвуковых волн. Расширение хромосферы со столь большой скоростью должно приводить к охлаждению газа, препятствуя образованию областей с корональной температурой.

Следует отметить, что все модели "теплого" ветра являются феноменологическими: нагрев и разгон вещества волнами описывается в них с помощью макроскопических уравнений магнитогидродинамики со свободными параметрами. Построение модели для конкретной звезды сводится, таким образом, к соответствующему подбору свободных параметров, в число которых входят плотность газа, напряженность магнитного поля, характерная длина затухания волн и т. п. Но до сих пор для моделей этого типа не построена микроскопическая теория, которая позволила бы ответить на вопросы: возможны ли при заданных физических условиях подобранные в модели значения свободных параметров, и почему не наблюдается разгон плазмы волновым давлением в атмосфере Солнца?

Итак, попытки объяснить феномен звезд типа Т Тельца в рамках хромосферной модели пока не привели к успеху. Вместе с тем все больше астрофизиков склонны видеть причину экзотических свойств молодых звезд не в наличии у них мощных хромосфер, а во взаимодействии звезды с остатками родительской туманности. Идея эта появилась давно - еще в 40-х годах, однако всерьез ее начали обсуждать лишь 30 лет спустя, когда появились первые экспериментальные доказательства падения вещества на поверхность одиночных звезд. В основном они были получены, благодаря наблюдениям М. Уолкера, который обнаружил, что примерно у 5 % звезд типа Т Тельца линии бальмеровской серии, начиная с H_{β} , имеют профили, обратные Р Суг, т.е. депрессия в континууме расположена не с голубой, а с красной стороны от эмиссионного пика. С теоретической точки зрения профили такого типа (см. рис. 14.4 б) должны возникать при аккреции сферической оболочки на центральную звезду. Учитывая это обстоятельство, Уолкер предложил выделить найденные им звезды в особый подкласс, прототипом которого стала звезда YY Ориона.

Вначале казалось, что открытие Уолкера не противоречит хромосферной гипотезе: просто звезды типа YY Ориона - это наиболее молодые звезды, на которые, в отличие от остальных звезд типа Т Тельца, не успели до конца упасть остатки протозвездного облака. Но, во-первых, выяснилось, что по положению на диаграмме Герцшпрунга - Рассела эти звезды не отличаются от остальных молодых звезд, а во-вторых, оказалось, что у многих "классических" звезд типа Т Тельца, например, у RW Возничего, профили водородных линий время от времени приобретали вид, характерный для звезд типа YY Ориона. Появились и первые теоретические модели, в которых эмиссионный спектр формировался во внутренней части аккрецирующей оболочки.

Среди этих моделей нужно особо отметить модель, предложенную в 1974 г. Д. Линден-Беллом и Дж. Принглом. Опираясь на теорию, развитую советскими астрофизиками Р. А. Сюняевым и Н. И. Шакурой, английские теоретики предположили, что на звезды типа Т Тельца происходит аккреция вещества из газо-пылевого диска, окружающего звезду. Нельзя сказать, что эта работа осталась совсем незамеченной, но в то время хромосферная гипотеза считалась наиболее естественной и привлекательной. Лишь к середине 80-х годов под напором новых наблюдательных фактов теория дисковой аккреции оказалась в центре внимания большинства астрофизиков.

Что же заставило астрономов так радикально изменить взгляд на природу процессов, происходящих вблизи поверхности молодых звезд? Прежде всего - результаты инфракрасных наблюдений. Уже в 60-х годах было известно, что наряду с избыточным излучением в коротковолновом диапазоне у молодых звезд имеется избыток излучения и в инфракрасной области спектра по сравнению со звездами главной последовательности тех же спектральных классов (рис. 14.6). Другой важный факт - заметная поляризация излучения звезд типа Т Тельца и Ae, Ве звезд Хербига.

Интерпретация этих фактов никогда не вызывала трудностей, поскольку из расчетов коллапса следовало, что в окрестности молодых звезд должны в той или иной мере сохраняться остатки вещества исходного протозвездного облака. Входящая в это вещество пыль должна частично поглощать свет звезды и переизлучать его в инфракрасном диапазоне. Это легко решает проблему длинноволновых избытков, а рассеяние света на пылинках продолговатой формы позволяет объяснить его поляризацию.

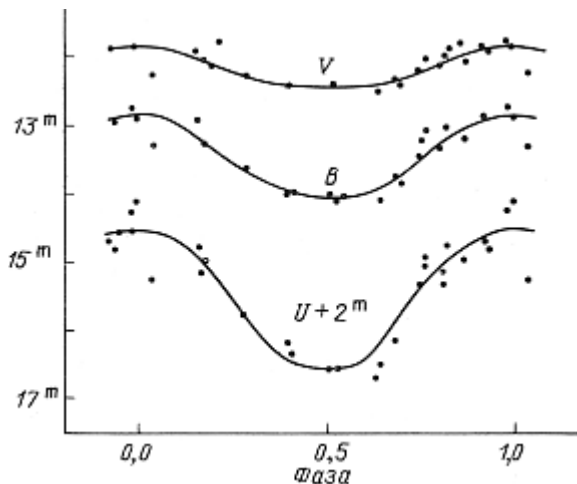


Рис. 14.7. Кривая блесна DF Tau в спектральных диапазонах U, B и V. Кривая для фильтра U смещена вдоль оси ординат на 2^m . По оси абсцисс отложена фаза, т. е. время в долях периода изменения блеска.

поглощения, можно найти величину $v_0 \sin i$, где i - угол наклона оси вращения звезды к направлению на наблюдателя. Правда, анализ профиля линий поглощения у таких слабых звезд, как звезды типа Т Тельца, дело очень сложное. Но все же к настоящему времени астрономы смогли определить v_0 и $v_0 \sin i$ примерно у двух десятков звезд, а значит, найти для них величину i . В частности, у самой Т Тельца $i \approx 10^\circ$, значит, мы видим эту звезду почти с полюса.

Довольно легко можно доказать, что если оси вращения звезд ориентированы относительно наблюдателя случайным образом, то к нему чаще будут обращены экваториальные области звезды, чем полярные. Однако среди наблюдавшихся молодых звезд нет ни одной, у которой был бы угол $i > 70^\circ$. Отсюда следует важный вывод: вблизи экваториальной плоскости молодых звезд имеется дискообразная пылевая оболочка, которая, поглощая свет звезды, не позволяет нам увидеть ее при наблюдении сбоку.

Насколько такая аргументация убедительна, предоставляем судить самим читателям. Заметим лишь, что подобного рода косвенных аргументов в пользу гипотезы о существовании газо-пылевых дисков вокруг молодых звезд накопилось уже немало. Не следует также забывать и предсказание теории, согласно которой в процессе коллапса

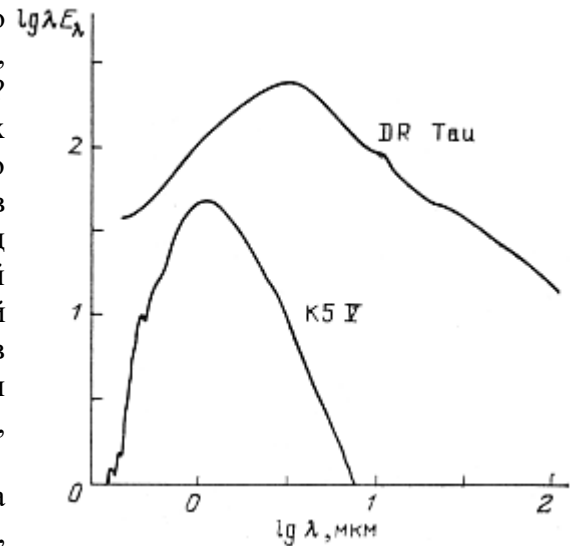


Рис. 14.6. Распределение энергии в спектре одной из звезд типа Т Тельца по сравнению со звездой главной последовательности спектрального класса K5. Спектры смещены вдоль оси ординат на произвольную величину.

Со временем накапливается все больше аргументов в пользу того, что пылевые оболочки у молодых звезд имеют уплощенную, дисковидную форму. Правда, аргументы эти пока косвенные. Например, у некоторых звезд типа Т Тельца время от времени возникают периодические колебания блеска с типичным периодом около 3 суток (рис. 14.7). Вероятно, причиной этих колебаний является появление на поверхности звезды обширной области, аналогичной солнечным пятнам или факелам. При этом вращение звезды вокруг оси приводит к периодическим колебаниям видимого блеска. Определив таким образом период осевого вращения звезды и зная ее радиус, нетрудно найти скорость вращения на экваторе (v_0).

С другой стороны, анализируя профили линий

вращающегося протозвездного облака неизбежно должна формироваться дискообразная оболочка. Наконец, уместно вспомнить и нашу Солнечную систему: поскольку орбиты всех планет лежат почти в одной плоскости, резонно предполагать, что и протопланетное облако имело форму диска.

Одним словом, большинство астрономов убеждено сейчас в том, что молодые звезды окружены газо-пылевыми (протопланетными?) дисками. Внешняя граница этих дисков простирается на десятки, а иногда и на сотни астрономических единиц от звезды, а внутренняя удалена от нее не более, чем на несколько звездных радиусов. Каждый элемент диска движется вокруг звезды под действием силы тяготения с круговой скоростью $v = (GM / r)^{1/2}$. При этом угловая скорость меняется с расстоянием ($\omega \sim v/r \sim r^{-3/2}$), а значит, между слоями возникает сила трения. В результате должна происходить дисковая аккреция, при которой внутренние слои диска тормозятся внешними и стремятся упасть на звезду. А падение вещества должно приводить к выделению энергии и вызывать наблюдаемые эффекты.

Возникла идея - а не может ли дисковая аккреция объяснить существование горячих областей над фотосферами молодых звезд? Вскоре она оформилась в следующую картину. В зависимости от исходного углового момента коллапсирующего облака вокруг молодой звезды формируется более или менее массивный аккреционный диск. Вплоть до внутренней границы энергетический баланс диска определяется выделением тепла из-за трения соседних слоев и отводом этой энергии наружу в виде инфракрасного излучения. При этом температура вещества в диске убывает от $(2 \div 3) \cdot 10^3$ К на внутренней границе до десятков кельвинов на периферии. Толщина диска быстро увеличивается с удалением от центра, и поэтому он может перехватывать заметную часть излучения звезды.

Вблизи поверхности звезды вещество диска движется до круговой орбите со скоростью около 200 км/с, тогда как скорость вращения самой звезды на порядок меньше. Значит, чтобы осесть на поверхность звезды, вещество диска должно погасить свою избыточную скорость. Оценки показывают, что торможение происходит в узком пограничном слое вблизи поверхности звезды. В этом слое кинетическая энергия орбитального движения превращается в тепло, создавая вдоль экватора звезды кольцо газа, нагретого до $\sim 10^4$ К.

Расчеты спектра излучения кольцевой переходной зоны неплохо воспроизводят наблюдаемое распределение энергии в спектрах некоторых звезд типа Т Тельца. При этом удается объяснить и большую ширину эмиссионных линий: она обусловлена доплеровским уширением профиля за счет орбитального движения вещества. Отметим, что при таком подходе нет принципиальной разницы между звездами типа Т Тельца и Ae, Be звездами Херbiga, поскольку не учитывается роль магнитного поля звезды.

В середине 80-х годов появились работы, в которых сделана попытка объяснить поведение фуоров в рамках теории дисковой аккреции, не привлекая гипотезу Хаяши о всплеске светимости при выходе ударной волны в поверхностные слои звезды.

Например, выяснилось, что фуор V 1057 Суг до его вспышки, произошедшей в 1970 г., наблюдался в оптическом диапазоне и выглядел как типичная звезда типа Т Тельца. А ведь согласно модели Хаяши до вспышки протозвезда должна быть крайне холодным объектом, излучающим лишь в далеком ИК-диапазоне. Кроме того, сравнительно медленное увеличение

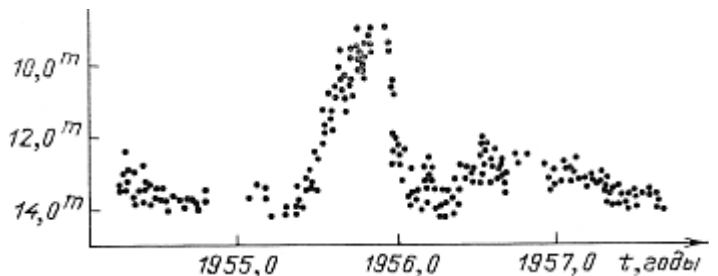


Рис. 14.8. "Медленная вспышка", обнаруженная у звезды EX Волка в середине 50-х годов.

блеска (хотя и с меньшей амплитудой) неоднократно наблюдалось у многих звезд типа Т Тельца, после чего они возвращались в исходное состояние (рис. 14.8).

Повторяемость крупномасштабных вспышечных явлений у звезд типа Т Тельца, а также ряд спектральных особенностей фуоров привели к гипотезе о том, что всплески светимости вызваны временным повышением темпа аккреции вещества (M) из окружающего звезду газо-пылевого диска. Предполагается, что темп аккреции у фуоров может достигать величины $M \sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. При этом внутренняя часть диска как бы переполняется

веществом и становится очень толстой. Такой диск сильно экранирует центральную звезду, и мы видим излучение не столько самой звезды, сколько суммарное излучение различных слоев диска, нагретых до разной температуры.

Так что же, основные проблемы, связанные с наблюдательными проявлениями молодых звезд, можно считать, в принципе, решенными? Увы, нет. Прежде всего пока не удалось воспроизвести наблюдаемые профили эмиссионных линий. А значит, нет ответа на вопрос - в чем разница между звездами типа YY Ориона и остальными звездами типа Т Тельца; ведь их положение на диаграмме Герцшпрунга - Рессела не различается. В модели дисковой аккреции остается также открытым вопрос о природе высокотемпературных ($T \sim 2 \cdot 10^4$ К) областей у звезд типа Т Тельца. И наконец, не ясно, каков механизм потери массы у молодых звезд?

Последний вопрос заслуживает особого внимания. Поскольку в модели дисковой аккреции движение вещества со скоростями свыше 100 км/с происходит по круговым орбитам, то большая ширина эмиссионных линий уже не является указанием на наличие звездного ветра. Однако за последнее десятилетие накопилось множество других фактов, свидетельствующих о бурном истечении вещества из окрестностей молодых звезд. Начнем их описание с результатов наблюдений в радиодиапазоне.

Повышение чувствительности приемной аппаратуры и увеличение размеров антенн позволило во второй половине 70-х годов зарегистрировать в сантиметровом диапазоне излучение от звезд типа Т Тельца на уровне $> \sim 10$ мДж⁽²⁾. По-видимому, это радиоизлучение имеет тепловую природу и связано с протяженной ($\sim 10^3$ а. е.) оболочкой из ионизованного газа с температурой $\sim 10^4$ К. Пытаясь объяснить форму спектра радиоизлучения, астрономы обнаружили, что эта оболочка должна расширяться, а вызванная этим потеря массы звездой оказывалась $M \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$.

Чуть позже в оптическом диапазоне были получены еще более прямые указания на разлет ионизованного газа. Давно уже было известно, что в спектрах примерно трети звезд типа Т Тельца присутствуют, так называемые запрещенные линии кислорода [OI] 6300 Å и ионизованной серы [S II] 4069 Å, 4076 Å, которые могут возникать лишь в газе с температурой $T \sim 10^4$ К и плотностью менее чем 10^5 см⁻³. Появление новых крупных телескопов и замена фотопластинок высокочувствительными полупроводниковыми приемниками света (ПЗС-матрицы) позволило в начале 80-х годов исследовать профили запрещенных линий с высоким разрешением.

Посмотрите на рис. 14.9 а. Смещение длины волны линии [OI] 6300 Å по сравнению с лабораторным значением нельзя объяснить иначе, чем результатом доплеровского сдвига, а следовательно, мы имеем прямое указание на движение ионизованного газа со скоростью порядка 100 км/с. Существенно, что мы видим лишь газ, движущийся к нам: на это указывает голубое смещение линий. Поскольку это наблюдается у всех изученных звезд, о случайном совпадении не может быть и речи. Объяснение этому скорее всего следующее: движение газа имеет радиальный характер, но мы видим лишь обращенную к нам область течения, другую половину загораживает непрозрачный пылевой диск (рис. 14.9 б). Кстати, вот и еще одно косвенное подтверждение гипотезы о пылевом диске.

В начале 80-х годов с помощью ПЗС-матриц удалось получить изображения окрестностей молодых звезд с высоким угловым разрешением ($\sim 1''$). Вблизи некоторых звезд были обнаружены струи ионизованного газа (см. рис. 11.9) с такой же температурой и плотностью, как найденные из анализа запрещенных линий и радиоконтинуума.

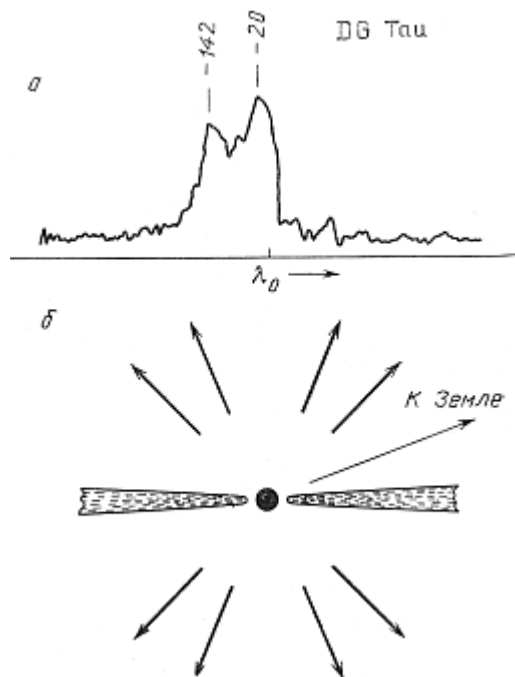


Рис. 14.9. Профиль запрещенной линии кислорода [OI] 6300,3 Å в спектре звезды DF Tau (а); схема, позволяющая объяснить форму профиля: непрозрачный пылевой диск загораживает газ, летящий от наблюдателя (б). У двух максимумов указана лучевая скорость газа в км/с.

Длина струй порядка 10^{17} - 10^{16} см, а поток массы в них от 10^{-10} до 10^{-9} M_{\odot} /год. Не совсем ясно, что является источником ионизации газа в околозвездных оболочках. Если ионизация вызвана ультрафиолетовым излучением звезды, то нетрудно вычислить, что светимость молодых звезд в этом диапазоне ($\lambda < 912 \text{ \AA}$) должна составлять несколько процентов от полной светимости звезды. Но это чудовищно большая величина - у звезд главной последовательности аналогичных спектральных классов светимость в ультрафиолетовом диапазоне на много порядков меньше. В свое время это обстоятельство считалось сильным аргументом в пользу теории мощных хромосфер, однако времена меняются и происходит переоценка некоторых идей.

Между тем, появляются все новые факты, говорящие о разлете вещества из окрестности молодых звезд. Радиоастрономы обнаружили у некоторых звезд анизотропное, а в ряде случаев - биполярное движение молекулярного газа: речь идет об упоминавшихся ранее СО-потоках. Оценки показывают, что ежегодно каждая из подобных звезд выбрасывает в окружающее пространство свыше 10^{-8} M_{\odot} холодного ($T \sim 10 \text{ K}$) вещества, летящего со скоростью свыше 10 км/с (см. табл. 11.3).

Природа молекулярных потоков, по-видимому, такова. Звездный ветер молодых звезд, сталкиваясь с остатками родительского протозвездного облака, передает свой импульс холодному веществу, выметая его из окрестности звезды. Правда, количественный анализ показывает, что объяснить наблюдаемую интенсивность молекулярных потоков разлетом только первоначально ионизованного газа невозможно. К тому же, анализ ИК-спектра водорода показывает, что наряду с ионизованным газом в окрестности молодых звезд имеется и значительное количество нейтрального водорода. Первоначально считалось, что этот газ входит в состав дисков, но решая проблему ускорения молекулярных потоков, пришлось предположить, что наряду с разлетом ионизованного газа существует не менее интенсивный звездный ветер из нейтрального водорода.

И вот совсем недавно поступило сообщение о том, что радионаблюдения на волне 21 см, кажется, подтверждают существование потоков нейтрального водорода. Этот вывод носит пока предварительный характер, поскольку очень трудно выделить интересующий нас газ на фоне гигантского количества нейтрального водорода, заполняющего области звездообразования. Поэтому вряд ли сейчас стоит говорить о количественных характеристиках "атомарного" звездного ветра. Ясно лишь, что вещество в "нейтральном" ветре более холодное и плотное, чем в потоке ионизованного газа, а скорость движения "холодного" ветра в несколько раз меньше, чем "горячего".

Подведем итог. Сейчас нет сомнения, что молодые звезды являются источниками мощного ветра, в результате которого из ближайших окрестностей звезды ежегодно уносится свыше 10^{-8} M_{\odot} газа. Если предположить что продолжительность стадии, на которой молодые звезды интенсивно теряют массу, составляет $\sim 3 \cdot 10^6$ лет, то получается, что за время своей бурной молодости звезда теряет значительную часть своей начальной массы. Однако такая возможность по ряду причин выглядит маловероятной. Куда более привлекательной представляется идея о том, что вещество теряется не самой звездой, а окружающим ее диском.

Все больше астрономов приходят к убеждению, что в окрестности молодых звезд мы наблюдаем сложную картину: в экваториальной плоскости звезды происходит дисковая аккреция, а в направлениях, перпендикулярных плоскости диска, вещество улетает от звезды. Что же заставляет падающее вещество изменить направление своего движения? Окончательного ответа на этот вопрос пока нет. Однако нам представляется, что основную роль в этом должно играть магнитное поле звезды.

Дорогой читатель, ты должен знать, что авторы сейчас с трудом удерживаются перед искушением широкими мазками нарисовать картину взаимодействия крупномасштабного магнитного поля звезды с веществом аккреционного диска. Лихо жонглируя понятиями радиус коротации, альвеновский радиус, потенциальный барьер центробежных сил, полярная аккреционная колонка, перезамыкание силовых линий на границе магнитосферы, и наконец, сверхкритическая светимость в холодном газе, мы могли бы на ближайших двух-трех страницах кавалерийским наскоком "разрешить" все проблемы физики молодых звезд и "объяснить" все, что до сих пор представлялось загадкой.

Однако мы решаем этого не делать. Возможно, потому, что в нашей памяти всплыл эпизод, имевший место несколько лет назад на одном из научных семинаров в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга, где мы работаем. После эмоционального выступления докладчика, убежденно отстаивавшего свой вариант теоретической интерпретации новейших наблюдательных данных, кто-то из слушателей неожиданно спокойно и как-то даже задушевно спросил: "Ну, хорошо, Коля, а Вы дадите руку на отсечение, что Вы правы?" Столь резкий переход от абстрактной научной полемики к конкретной проблеме членовредительства заставил докладчика задуматься, и через минуту красноречивого молчания он признался: "Нет, и пальца не дам."

В самом деле, сколько раз уже казалось, что та или иная астрофизическая модель объясняет все или почти все наблюдения. Но проходило время и "почти все" превращалось в "практически ничего". К тому же теория взаимодействия замагниченных звезд с аккреционным диском на сегодняшний день не доведена до уровня конкретных моделей, позволяющих сравнивать теоретические предсказания с результатами наблюдений. И поэтому мы вынуждены наступить на горло собственной песне, точнее, гимну новой модели, горячими сторонниками которой являются, как минимум, половина авторов этой книги.

Единственный аргумент, который мы приведем в пользу новой теории, носит общий характер: в зависимости от параметров звезды, магнитного поля и аккреционного диска следует ожидать большого разнообразия физических условий и процессов в окрестности молодых звезд. Но именно об этом и свидетельствуют многолетние наблюдения, и именно это обстоятельство становилось камнем преткновения для многих теорий прежде.

¹⁾ С помощью известного выражения для эффекта Доплера $\Delta\lambda = \lambda_0 v / c$ можно произвольный интервал длин волн $\Delta\lambda$ выражать в единицах скорости. Удобство такого выбора единиц в том, что величина $\Delta\lambda$ перестает зависеть от λ_0 .

²⁾ 1 mJy (1 миллиджанский) - единица спектральной плотности потока излучения, принятая в радиоастрономии: 1 mJy = 10^{-3} Jy = 10^{-29} Вт / (Гц·м²).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос о происхождении звезд является хотя и очень важной, но лишь частью общей проблемы происхождения всего сущего вокруг нас. Вспоминаются в связи с этим слова академика Я. Б. Зельдовича из его последней научно-популярной статьи: "Человек, живо и наглядно ощущающий всю огромность пространства и массы, открывающихся современным телескопам, не может остаться равнодушным. Соответствующие величины потрясают воображение настолько, что ощущаешь головокружение. Первым, естественным следствием этого потрясения является отвращение к теории расширяющейся Вселенной. Неужели все величие и громадность Вселенной когда-то умещалось в шаре размером в несколько сантиметров? И еще более диким кажется вопрос: неужели все сущее, все наблюдаемое могло образоваться буквально "из ничего"?"

У исследователей звезд возникает аналогичное "головокружение" при попытке представить формирование звезды из гигантского разреженного облака размером в несколько парсеков путем его сжатия в миллионы раз. Конечным продуктом звездной эволюции является объект размером в несколько километров, вещество, в котором сжато по сравнению с его начальной плотностью в межзвездной среде в 10^{40} раз! Неужели можно надеяться описать количественным языком физики ту невероятно широкую гамму явлений, которые сопутствуют превращению гигантского межзвездного облака в компактный релятивистский объект? Астрофизики верят, что это возможно [53, 54].

Мы уже далеко продвинулись по пути познания природы звезд. В общих чертах мы уже знаем, как рождаются, живут и умирают звезды. Но эта картина похожа на космические фотографии Земли: некоторые детали видны четко, но огромные пространства еще покрыты непроницаемой облачностью. Открыв научные статьи по проблемам звездообразования, вы

увидете множество вопросительных знаков. Например, как показали наблюдения последних лет, процесс звездообразования может протекать в самых неожиданных местах и при существенно различающихся физических условиях. Так, раньше считалось, что межзвездная среда в эллиптических галактиках отсутствует, и молодые звезды там давно уже не рождаются. Однако оказалось, что в относительно небольшом количестве газ в эллиптических галактиках все же есть: его постоянно теряют старые звезды. Попадая в сильное гравитационное поле ядра эллиптической галактики, этот газ ведет себя довольно активно. Свидетельством тому быстрые газовые струи, выбрасываемые из центральных областей этих галактик. Какова при этом роль звездообразования, пока неясно. Но в ядрах таких галактик и в их газовых струях найдены следы молодых звезд.

Как выяснилось в последние годы, некоторые эллиптические галактики пополняются газом извне с невероятной скоростью: поток аккрецирующего межгалактического газа на NGC 1275 составляет около $300 M_{\odot}/\text{год}$, а на PKS 0745-191 порядка $10^3 M_{\odot}/\text{год}$. Судя по всему в потоках этого газа идет процесс звездообразования, причем свойства формирующихся там звезд оказываются существенно иными, нежели в молекулярных облаках спиральных галактик. Как видим, рождение звезд может происходить в самых неожиданных местах. Но, с другой стороны, там где его следовало бы ожидать, оно не происходит. Речь идет о так называемых межгалактических газовых облаках, по существу, небольших галактиках, целиком состоящих из газа без признаков звездного населения. Известны также карликовые галактики, в которых сейчас звездообразование идет чрезвычайно интенсивно, но старых звезд почти нет. Почему эти галактики медлили с рождением звезд и что стимулировало их к этому сейчас? Не исключено, что понять эти явления удастся лишь в рамках более общих теорий, опирающихся на понятие самоорганизации вещества, использующих теорию катастроф и описывающих поведение и взаимодействие крупных популяций как в живой, так и в неживой природе.

В тот день, когда работа над рукописью этой книги завершилась, на околоземную орбиту был выведен крупный оптический телескоп им. Хаббла. Большие надежды возлагают на него астрономы всех направлений, в том числе и исследователи молодых и формирующихся звезд. Мы будем очень рады, если под напором новых наблюдательных фактов сведения, собранные в этой книге, отступят с передового рубежа науки в глубину ее истории. Тогда мы попытаемся написать для вас новую, еще более интересную книгу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сванте Аррениус. Представление о мироздании за протяжении веков.- М.: Сфинкс, 1911.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. - М.: Прогресс, 1986.
3. Рожанский И.Д. Анаксагор. - М.: Наука, 1972.
4. Аристотель. Сочинения. Т. 3. - М.: Мысль, 1981.
5. Цицерон. Философские трактаты. - М.: Наука, 1985.
6. Еремеева А.И. Астрономическая картина мира и ее творцы - М.: Наука, 1984.
7. Галилео Галилей. Пробирных дел мастер, - М.: Наука, 1987.
8. Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира - птоломеевой и коперниковой.- М.- Л.: Гостехиздат, 1948.
9. Николай Кузанский. Сочинения в 2-х томах.- М.: Мысль, 1979.
10. Мишель Монтень. Опыты. - М.: Наука, 1979.
11. Гадаскина И.Д., Толоконцев Н.А. Яды - вчера и сегодня. - М.: Наука, 1988.
12. Кеплер И. Разговор с звездным вестником, недавно ниспосланным смертным Галилео Галилеем, падуанским математиком. В кн. И. Кеплер. О шестиугольных снежинках. - М.: Наука, 1982.
13. Дибай Э.А. Звездная космогония. В кн. Развитие астрономии в СССР. - М.: Наука, 1967.
14. Тиссеран Ф., Андуайе А. Космография. - С.-Петербург, 1908.
15. Пэйн-Гапошкина Ц. Рождение и развитие звезд. - М.: Издательство иностранной

- литературы, 1956.
16. Сурдин В.Г. Как рождаются звезды. - М.: Знание, 1985.
 17. Беркли Дж. Философские заметки. В кн.: Дж. Беркли. Сочинения. - М.: Мысль, 1978.
 18. Уитни Ч. Открытие пашей Галактики. - М.: Мир, 1975.
 19. Еремеева А.И. Вселенная Гершеля. - М.: Наука, 1966.
 20. Хоскин М.В. Гершель и становление современной астрономии. В мире науки, № 4, 1986.
 21. Клейн Г. Астрономические вечера. - М., 1908.
 22. Максвелл Дж.К. Речи и статьи. - М.: Гостехиздат, 1940.
 23. Покровский К.Д. Анжело Секки. - Мир божий, № 9, 1903, с. 174.
 24. Масевич А.Г., Тутуков А. В. Эволюция звезд: теория и наблюдения. - М.: Наука, 1988.
 25. Юнг Ч. Солнце. - М.-Петроград: Гос. издательство, 1923.
 26. Морэ Т. Солнце. - С.-Петербург: Издание Ф.И. Булгакова, 1904.
 27. Струве О. Эволюция звезд. - М.: Издательство иностранной литературы, 1954.
 28. Струве О., Зебергс В. Астрономия XX века, - М.: Мир, 1968.
 29. Дарвин Дж.Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. - М.: Наука, 1965.
 30. Тассуль Ж.-Л. Теория вращающихся звезд. - М.: Мир, 1982.
 31. Клейн Г. Прошлое, настоящее и будущее Вселенной. - С.-Петербург, 1911.
 32. Шварцшильд М. Конвекция в звездах // В Кн. Происхождение и эволюция звезд. - М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
 33. Козенко А.В. Джеймс Хопвуж Джинс, 1877-1946. - М.: Наука, 1985.
 34. Джинс Дж. Вселенная вокруг нас. - Л.-М.: Гостехиздат, 1932.
 35. Сурдин В.Г. Приливные явления во Вселенной. - М.: Знание, 1986.
 36. Джинс Дж.Г. Движение миров. - М.: Гостехиздат, 1933.
 37. Вейнберг С. Гравитация и космология. - М.: Мир, 1975.
 38. Пиблс Ф.Дж.Э. Структура Вселенной в больших масштабах. - М.: Мир, 1983.
 39. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. - М.: Наука, 1975.
 40. Происхождение и эволюция галактик и звезд / Под ред. Пикельнера С.Б. - М.: Наука, 1976.
 41. Ефремов Ю.Н. Звездные скопления. - М.: Знание, 1980.
 42. Холопов П.Н. Молодые и возникающие звездные скопления. - М.: Знание, 1982.
 43. Хокинг С., Эллис Дж. Крупномасштабная структура пространства-времени. - М.: Мир, 1977. - С. 387.
 44. Сурдин В.Г. Гигантские молекулярные облака. М.: Знание, 1990.
 45. Вощинников Н.В. Межзвездная пыль. Исследование космического пространства. Т. 25 (Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР), М., 1986.
 46. Кометы и происхождение жизни. - М.: Мир, 1984.
 47. Холопов П.Н. Звездные скопления. - М.: Наука, 1981.
 48. Лозинская Т.А. Сверхновые звезды и звездный ветер: взаимодействие с газом Галактики. - М.: Наука, 1986.
 49. Ефремов Ю.Н. Очаги звездообразования в галактиках: звездные комплексы и спиральные рукава. - М.: Наука, 1989.
 50. Бурдюжа В.В. Мегамазеры. Успехи физических наук. Т. 155, вып. 4. 1988.
 51. Протозвезды и планеты / Под ред. Т. Герелса. - М.: Мир, 1982.
 52. Физика космоса. Маленькая энциклопедия / Под ред. Р.А. Сюняева. - М.: Советская Энциклопедия, 1986.
 53. Аршуткин Л.Н. и др. Строение и эволюция областей звездообразования / Под ред. И.Г. Колесника. - Киев: Наукова думка, 1990.
 54. Современные проблемы физики и эволюции звезд / Под ред. А.Г. Масевич. - М.: Наука, 1989.

ББК
С90
УДК

22.632

524.3-52

ISBN

5-02-014210-7.

Ил.	50.	Табл.	15.	Библ.	54	назв.
Рецензент	доктор	физико-математических	наук	Ю.	И.	Ефремов
Заведующий		редакцией	Н.	А.		Носова
Редакторы	Т.	Г.	Борисова,	О.	В.	Салецкая

Художественный
Технический
Корректор

редактор
редактор
Т.

Г.
И.

М.
Ш.
С.

Коровина
Аксельрод
Вайсберг

ИБ № 32478

Сдано в набор 29.08.91. Подписано к печати 13.04.92. Формат 84x108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10.08. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 4380 экз. Заказ № 996. С-048.

Издательско-производственное и книготорговое объединение "Наука"
Главная редакция физико-математической литературы 117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15
Четвертая типография издательства "Наука" 630077 г. Новосибирск, 77, Станиславского, 25