**Межзвездная среда и туманности**

Л.С.Кудашкина

Вселенная - это, по сути, почти пустое пространство. Звезды занимают лишь ничтожную его долю. Однако, везде присутствует газ, хотя и в очень малых количествах. Это в основном водород, легчайший химический элемент. Если "зачерпнуть" обычной чайной чашкой (объем около 200 см3) вещество из межзвездного пространства на расстоянии 1-2 световых лет от Солнца, то в ней окажется примерно 20 атомов водорода и 2 атома гелия. В таком же объеме в обычном атмосферном воздухе содержится атомов кислорода и азота 1022.

Все, что заполняет пространство между звездами внутри галактик, называется межзвездной средой. И основное, что составляет межзвездную среду - это межзвездный газ. Он довольно равномерно перемешан с межзвездной пылью и пронизывается межзвездными магнитными полями, космическими лучами и электромагнитным излучением.

Из межзвездного газа образуются звезды, которые на поздних стадиях эволюции вновь отдают часть своего вещества межзвездной среде. Некоторые из звезд, умирая, взрываются как Сверхновые, выбрасывая обратно в пространство значительную долю водорода, из которого они когда-то образовались. Но значительно важнее, что при таких взрывах выбрасывается большое количество тяжелых элементов, образовавшихся в недрах звезд в результате термоядерных реакций. И Земля и Солнце сконденсировались в межзвездном пространстве из газа, обогащенного таким путем углеродом, кислородом, железом и другими химическими элементами. Чтобы постичь закономерности такого цикла, нужно знать, каким образом новые поколения звезд последовательно конденсируются из межзвездного газа. Понять, как образуются звезды, - важная цель исследований межзвездного вещества.

200 лет назад астрономам стало ясно, что кроме планет, звезд и появляющихся изредка комет на небе наблюдаются и другие объекты. Эти объекты из-за их туманного вида были названы туманностями. Французский астроном Шарль Мессье (1730-1817) был вынужден создать каталог этих туманных объектов, чтобы избежать путаницы при поисках комет. Его каталог содержал 103 объекта и был опубликован в 1784 г. Теперь известно, что природа этих объектов, впервые объединенных в общую группу под названием "туманности", совершенно различна. Английский астроном Уильям Гершель (1738-1822), наблюдая все эти объекты, за семь лет открыл еще две тысячи новых туманностей. Он же выделил класс туманностей, которые с наблюдательной точки зрения казались ему отличными от остальных. Он назвал их "планетарными туманностями", поскольку они имели некоторое сходство с зеленоватыми дисками планет.

Таким образом, мы будем рассматривать следующие объекты:

межзвездный газ;

межзвездная пыль;

темные туманности;

светлые туманности (самосветящиеся и отражательные);

планетарные туманности.

Примерно через миллион лет после начала расширения Вселенная еще представляла собой относительно однородную смесь газа и излучения. Не было ни звезд, ни галактик. Звезды образовались несколько позже в результате сжатия газа под действием собственной гравитации. Такой процесс называют гравитационной неустойчивостью. Когда звезда коллапсирует под действием огромного собственного гравитационного притяжения, ее внутренние слои непрерывно сжимаются. Это сжатие ведет к нагреву вещества. При температурах выше 107 К начинаются реакции, приводящие к образованию тяжелых элементов. Современный химический состав Солнечной системы является результатом реакций термоядерного синтеза, протекавших в первых поколениях звезд.

Стадия, когда выброшенное при взрыве Сверхновой вещество перемешивается с межзвездным газом и сжимается, снова образуя звезды, более всего сложна и хуже понятна, чем все остальные стадии. Во-первых, сам межзвездный газ неоднороден, он имеет клочковатую, облачную структуру. Во-вторых, расширяющаяся с огромной скоростью оболочка сверхновой выметает разреженный газ и сжимает его, усиливая неоднородности. В-третьих, уже через сотню лет остаток сверхновой содержит больше захваченного по пути межзвездного газа, чем вещества звезды. Кроме того, вещество перемешивается неидеально.

Может возникнуть вопрос, чем же завершается, в конце концов, космический цикл? Запасы газа уменьшаются. Ведь большая часть газа остается в маломассивных звездах, которые умирают спокойно, и не выбрасывают в окружающее пространство свое вещество. Со временем запасы его истощатся настолько, что ни одна звезда уже не сможет образоваться. К тому времени Солнце и другие старые звезды угаснут. Вселенная постепенно погрузится во мрак.

Но конечная судьба Вселенной может быть и иной. Расширение постепенно прекратится и сменится сжатием. Через много миллиардов лет Вселенная сожмется вновь до невообразимо высокой плотности.

**Межзвездный газ**

Межзвездный газ составляет около 99% массы всей межзвездной среды и около 2% нашей Галактики. Температура газа колеблется в диапазоне от 4 К до 106 К. Излучает межзвездный газ также в широком диапазоне (от длинных радиоволн до жесткого гамма-излучения).

Существуют области, где межзвездный газ находится в молекулярном состоянии (молекулярные облака) - это наиболее плотные и холодные части межзвездного газа. Есть области, где межзвездный газ состоит из нейтральных атомов водорода (области H I) и области ионизованного водорода (зоны H II), которыми являются светлые эмиссионные туманности вокруг горячих звезд.

По сравнению с Солнцем, в межзвездном газе заметно меньше тяжелых элементов, особенно алюминия, кальция, титана, железа и никеля.

Межзвездный газ есть в галактиках всех типов. Больше всего его в неправильных (иррегулярных), а меньше всего в эллиптических галактиках. В нашей Галактике максимум газа сосредоточено на расстоянии 5 кпк от центра. Наблюдения показывают, что кроме упорядоченного движения вокруг центра Галактики, межзвездные облака имеют также и хаотические скорости. Через 30-100 млн. лет облако сталкивается с другим облаком. Образуются газо-пылевые комплексы. Вещество в них достаточно плотно для того, чтобы не пропускать на большую глубину основную часть проникающей радиации. Поэтому внутри комплексов межзвездный газ холоднее, чем в межзвездных облаках. Сложные процессы преобразования молекул вместе с гравитационной неустойчивостью ведут к возникновению самогравитирующих сгустков - протозвезд.

Таким образом, молекулярные облака должны быстро (менее чем за 106 лет) превратиться в звезды.

Межзвездный газ постоянно обменивается веществом со звездами. Согласно оценкам, в настоящее время в Галактике в звезды переходит газ в количестве примерно 5 масс Солнца в год.

Итак, в процессе эволюции галактик происходит круговорот вещества: межзвездный газ -> звезды -> межзвездный газ, приводящий к постепенному увеличению содержания тяжелых элементов в межзвездном газе и звездах и уменьшению количества межзвездного газа в каждой из галактик. Не исключено, что в истории Галактики могли происходить задержки звездообразования на миллиарды лет.

**Межзвездная пыль**

Мелкие твердые частицы, рассеянные в межзвездном пространстве почти равномерно перемешаны с межзвездным газом.

Размеры крупных газо-пылевых комплексов, о которых мы говорили выше, достигают десятков сотен парсек, а их масса составляет примерно 105 масс Солнца. Но существуют и небольшие плотные газо-пылевые образования - глобулы размером от 0,05 до нескольких пк и массой всего 0,1 - 100 масс Солнца. Межзвездные пылинки не сферичны и размер их примерно 0,1-1 мкм. Состоят они из песка и графита. Образуются они в оболочках поздних красных гигантов и сверхгигантов, оболочках новых и сверхновых звезд, в планетарных туманностях, около протозвезд. Тугоплавкое ядро одето в оболочку изо льда с примесями, которую в свою очередь окутывает слой атомарного водорода. Пылинки в межзвездной среде либо дробятся в результате столкновений друг с другом со скоростями больше 20 км/с, либо наоборот, слипаются, если скорости меньше 1 км/с.

Присутствие в межзвездной среде межзвездной пыли влияет на характеристики излучения исследуемых небесных тел. Пылинки ослабляют свет от далеких звезд, изменяют его спектральный состав и поляризацию. Помимо этого пылинки поглощают ультрафиолетовое излучение звезд и перерабатывают его в излучение с меньшей энергией. Ставшее в итоге инфракрасным, такое излучение наблюдается в спектрах планетарных туманностей, зон H II, околозвездных оболочек, сейфертовских галактик.

На поверхности пылинок могут активно образовываться различные молекулы. Пылинки, как правило, электрически заряжены и взаимодействуют с межзвездными магнитными полями.

Именно пылинкам мы обязаны таким эффектом как космическое мазерное излучение. Оно возникает в оболочках поздних холодных звезд и в молекулярных облаках (зоны H I и H II). Этот эффект усиления микроволнового излучения "работает", когда большое количество молекул окажется в неустойчивом возбужденном вращательном или колебательном состоянии и тогда достаточно одному фотону пройти через среду, чтобы вызвать лавинообразный переход молекул в основное состояние с минимальной энергией. А в результате мы видим узконаправленный (когерентный) очень мощный поток радиоизлучения. На рисунке показана молекула воды. Радиоизлучение от этой молекулы идет на волне 1,35 см. Кроме нее очень яркий мазер возникает на молекулах межзвездного гидроксила ОН на волне 18 см. Еще одна мазерная молекула SiO располагается в оболочках холодных звезд, находящихся на заключительной стадии звездной эволюции и развивающихся к планетарной туманности.

**Темные туманности**

Туманности представляют собой участки межзвездной среды, выделяющиеся своим излучением или поглощением на общем фоне неба.

Темные туманности представляют собой плотные (обычно молекулярные) облака межзвездного газа и пыли, непрозрачные из-за межзвездного поглощения света пылью. Иногда темные туманности видны прямо на фоне Млечного Пути. Таковы, например, туманность "Угольный Мешок" и многочисленные глобулы. В тех частях, которые полупрозрачны для оптического диапазона, хорошо заметна волокнистая структура. Волокна и общая вытянутость темных туманностей связаны с наличием в них магнитных полей, затрудняющих движение вещества поперек силовых магнитных линий.

**Светлые туманности**

Отражательные туманности являются газо-пылевыми облаками, подсвеченными звездами. Примером такой туманности являются Плеяды. Свет от звезд рассеивается межзвездной пылью.

Большинство отражательных туманностей расположено вблизи плоскости Галактики. Некоторые отражательные туманности имеют кометообразный вид и называются кометарными. В голове такой туманности находится обычно переменная звезда типа Т Тельца, освещающая туманность.

Редкой разновидностью отражательной туманности является "световое эхо", наблюдавшееся после вспышки Новой 1901 г. в созвездии Персея. Яркая вспышка звезды подсветила пыль, и несколько лет наблюдалась слабая туманность, распространявшаяся во все стороны со скоростью света. На рисунке показано звездное скопление "Плеяды" со звездами, окруженными светлыми туманностями.

Если звезда, которая находится в туманности или рядом с ней достаточно горячая, то она ионизует газ в туманности. Тогда газ начинает светиться, а туманность называется самосветящаяся или туманность, ионизованная излучением.

Самыми яркими и распространенными, а также наиболее изученными представителями таких туманностей являются зоны ионизованного водорода H II. Существуют также зоны C II, в которых углерод почти полностью ионизован светом центральных звезд. Зоны С II обычно расположены вокруг зон H II в областях нейтрального водорода H I. Они как бы вложены друг в друга.

Остатки Сверхновых, оболочки Новых и звездный ветер также являются самосветящимися туманностями, так как газ нагрет в них до многих млн. К (за фронтом ударной волны). Звезды Вольфа-Райе создают очень мощный звездный ветер. В результате вокруг них появляются туманности размером в несколько парсек с яркими волокнами.

Аналогичны туманности вокруг ярких горячих звезд спектральных классов О - звезд Of, также обладающих сильным звездным ветром.

**Планетарные туманности**

К середине XIX века появилась возможность дать серьезное доказательство, что эти туманности принадлежат к самостоятельному классу объектов. Появился спектроскоп. Йозеф Фраунгофер обнаружил, что Солнце излучает непрерывный спектр, испещренный резкими линиями поглощения. Оказалось, что и спектра планет имеют многие характерные черты солнечного спектра. У звезд также обнаружился непрерывный спектр, однако, каждая из них имела свой собственный набор линий поглощения.

Уильям Хеггинс (1824-1910) был первым, кто исследовал спектр планетарной туманности. Это была яркая туманность в созвездии Дракона NGC 6543. До этого Хеггинс в течение целого года наблюдал спектры звезд, однако спектр NGC 6543 оказался совершенно неожиданным. Ученый обнаружил лишь одну единственную, яркую линию. В то же время яркая Туманность Андромеды показала непрерывный спектр, характерный для спектров звезд. Теперь мы знаем, что Туманность Андромеды на самом деле является галактикой, а следовательно, состоит из множества звезд.

В 1865 году тот же Хеггинс, применив спектроскоп более высокой разрешающей способности, обнаружил, что эта "единственная" яркая линия состоит из трех отдельных линий. Одну из них удалось отождествить с бальмеровской линией водорода Hb, но две другие, более длинноволновые и более интенсивные остались не узнанными. Их приписали новому элементу - небулию. Только в 1927 году этот элемент был отождествлен с ионом кислорода [O III]. А линии в спектрах планетарных туманностей до сих пор так и называются - небулярные.

Затем возникла проблема с центральными звездами планетарных туманностей. Они очень горячие, что ставило планетарные туманности в ряд перед звездами ранних спектральных классов. Однако исследования пространственных скоростей приводили к прямо противоположному результату. Вот данные по пространственным скоростям различных объектов: диффузные туманности - мала (0 км/с), звезды класса В - 12 км/с, звезды класса A - 21 км/с, звезды класса F - 29 км/с, звезды класса G - 34 км/с, звезды класса K - 12 км/с, звезды класса M - 12 км/с, планетарные туманности - 77 км/с.

Только когда открыли расширение планетарных туманностей, появилась возможность вычислить их возраст. Он оказался равным примерно 10 000 лет. Это было первым свидетельством, что возможно, большинство звезд проходит через стадию планетарной туманности.

Таким образом, планетарная туманность - это система из звезды, называемой ядром туманности, и симметрично окружающей ее светящейся газовой оболочки (иногда, несколько оболочек). Оболочка туманности и ее ядро генетически связаны. Для планетарных туманностей свойственен эмиссионный спектр, отличающийся от спектров излучения галактических диффузных туманностей большой степенью возбуждения атомов. Кроме линий двукратно ионизованного кислорода [O III], наблюдаются линии C IV, O V и даже O VI.

Масса оболочки планетарной туманности примерно 0,1 массы Солнца. Все многообразие форм планетарных туманностей, вероятно, возникает из-за проекции их основной тороидальной структуры на небесную сферу под разными углами.

Оболочки планетарных туманностей расширяются в окружающее пространство со скоростями 20 - 40 км/с под действием внутреннего давления горячего газа. По мере расширения оболочка становится разреженней, ее свечение ослабевает, и в конце концов она становится невидимой.

Ядра планетарных туманностей представляют собой горячие звезды ранних спектральных классов, претерпевающие значительные изменения за время жизни туманности. Температуры их обычно составляют 50 - 100 тыс. К. Ядра старых планетарных туманностей близки к белым карликам, но вместе с тем значительно ярче и горячее типичных объектов такого рода. Среди ядер встречаются и двойные звезды.

Образование планетарной туманности является одной из стадий эволюции большинства звезд. Рассматривая этот процесс, удобно разделить его на две части: 1) от момента выброса туманности до той стадии, когда источники энергии звезды в основном исчерпаны; 2) эволюция центральной звезды от главной последовательности до выброса туманности.

Эволюция после выброса туманности довольно хорошо изучена как наблюдательно, так и теоретически. Более ранние стадии гораздо менее понятны. Особенно стадия между красным гигантом и выбросом туманности.

Вспомним немного теорию эволюции звезд. При удалении от главной последовательности важнейшая стадия эволюции звезды начинается после того, как водород в центральных областях полностью выгорит. Тогда центральные области звезды начинают сжиматься, освобождая гравитационную энергию. В это время область, в которой водород еще горит, начинает продвигаться наружу. Возникает конвекция. В звезде начинаются драматические перемены, когда масса изотермического гелиевого ядра составляет 10-13% массы звезды. Центральные области начинают быстро сжиматься, а оболочка звезды расширяется - звезда становится гигантом, перемещаясь вдоль ветви красных гигантов. Ядро, сжимаясь, разогревается. В конце концов, в нем начинается горение гелия. Через некоторый период времени истощаются и запасы гелия. Тогда начинается второе "восхождение" звезды вдоль ветви красных гигантов. Звездное ядро, состоящее из углерода и кислорода, быстро сжимается, а оболочка расширяется до гигантских размеров. Такая звезда называется звездой асимптотической ветви гигантов. На этой стадии звезды имеют два слоевых источника горения - водородный и гелиевый и начинают пульсировать.

Остальная часть эволюционного пути изучена гораздо хуже. У звезд с массами, превосходящими 8-10 масс Солнца углерод в ядре в конце концов загорается. Звезды становятся сверхгигантами и продолжают эволюционировать, пока не образуется ядро из элементов "железного пика" (никель, марганец, железо). Это центральное ядро, вероятно, коллапсирует и образует нейтронную звезду, а оболочка сбрасывается в виде вспышки Сверхновой. Ясно, что планетарные туманности образуются из звезд с массами меньше 8-10 масс Солнца.

Два факта позволяют предполагать, что родоначальниками планетарных туманностей являются красные гиганты. Во-первых, звезды асимптотической ветви физически очень сходны с планетарными туманностями. Ядро красного гиганта по массе и размерам очень напоминает центральную звезду планетарной туманности, если удалить протяженную разреженную атмосферу красного гиганта. Во-вторых, если туманность сброшена звездой, то она должна иметь минимальную скорость, достаточную чтобы уйти из гравитационного поля. Расчеты показывают, что только для красных гигантов эта скорость сравнима со скоростями расширения оболочек планетарных туманностей (10-40 км/с). При этом масса звезды оценивается в 1 массу Солнца, а радиус лежит в пределах 100-200 радиусов Солнца (типичный красный гигант).

В заключение отметим, что наиболее вероятными кандидатами на роль родоначальников планетарных туманностей являются переменные звезды типа Миры Кита. Представителями одного из переходных этапов между звездами и туманностями могут быть симбиотические звезды. И конечно нельзя обойти вниманием объект FG Sge/

Таким образом, большинство звезд, массы которых меньше 6-10 масс Солнца, в конце концов, становятся планетарными туманностями, На предшествующих стадиях они теряют большую часть своей первоначальной массы; остается только ядро с массой 0,4-1 масса Солнца, которое становится белым карликом. Потеря массы влияет не только на саму звезду, но и на условия в межзвездной среде и на будущие поколения звезд.

**Список литературы**

1. Л.Спитцер. Пространство между звездами. М.- 1986.

2. С.Потташ. Планетарные туманности. М. - 1987.

3. Под ред. Р.А.Сюняева. Физика космоса. М. - 1986.

4. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image

5. http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod