

## МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

Вещество и поля, заполняющие межзвездное пространство внутри галактик, называются *межзвездной средой*. Основной составляющей межзвездной среды является межзвездный газ, состоящий примерно на 90% (по числу атомов) из водорода. Он довольно равномерно перемешан с *межзвездной пылью*, составляющей по массе около 1% межзвездной среды, и пронизывается межзвездными *магнитными полями*, *космическими лучами* и *электромагнитным излучением*.

Все компоненты межзвездной среды тесно взаимосвязаны. Межзвездный газ в большей или меньшей степени ионизован космическими лучами и жестким электромагнитным излучением и поэтому интенсивно взаимодействует с магнитными полями. Магнитное поле влияет на движение ионов, которые посредством соударений передают это влияние нейтральным атомам и пылинкам. Правда, последние обычно бывают электрически заряжены благодаря фотоэффекту, вызванному УФ-излучением, или «налипанию» электронов. На движение таких пылинок магнитное поле оказывает прямое действие.

Космические лучи и электромагнитное излучение, поглощаемые газом и пылью, нагревают и ионизуют их. В свою очередь межзвездные газ и пыль излучают электромагнитные волны в диапазонах от длинноволнового радиоизлучения до жестких гамма лучей. Давление космических лучей и магнитного поля играет большую роль в крупномасштабной динамике межзвездной среды. В то же время межзвездный газ, участвуя в дифференциальном вращении Галактики, увлекает за собой силовые линии магнитного поля и запутывает их, вызывая тем самым усиление магнитного поля. Космические лучи оказывают влияние на конфигурацию магнитных полей, которые со своей стороны определяют диффузию космических лучей в Галактике. Т.о. каждый компонент межзвездной среды находится во взаимодействии с другими компонентами.

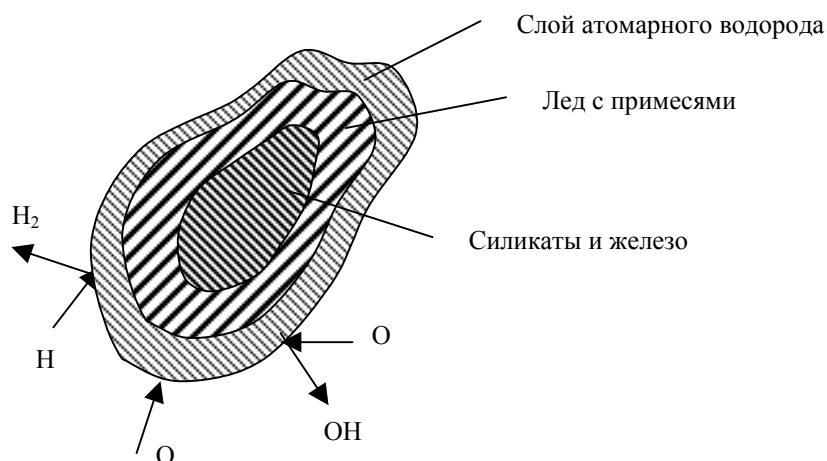
Межзвездная среда тесно связана со звездами и межгалактической средой. Из межзвездного газа образуются звезды, которые на поздних стадиях эволюции снова отдают часть своего вещества межзвездной среде. В результате этого обмена межзвездная среда обогащается создаваемыми в недрах звезд тяжелыми элементами. Звезды поставляют также в межзвездную среду электромагнитное излучение и космические лучи (особенно при взрывах сверхновых звезд). Часть вещества из межзвездной среды выбрасывается в межгалактическое пространство, а горячий межгалактический газ своим излучением и давлением может оказывать влияние на ионизацию межзвездной среды и ее динамику.

В настоящее время наиболее важные наблюдения межзвездной среды сделаны в радио и ИК-области электромагнитного излучения. Многие виды межзвездного вещества (такие как твердые тела с диаметром более одного миллиметра) почти невозможно обнаружить на основе их излучения или поглощения.

Масса этих видов материи может быть даже больше, чем наблюдаемая масса всех других видов вместе взятых. Однако верхний предел полной массы межзвездной материи может быть выведен на основе ее гравитационных эффектов.

### Межзвездная пыль

Межзвездная пыль представляет собой мелкие твердые частицы, рассеянные в межзвездном пространстве. Межзвездная пыль, как и межзвездный газ, концентрируется к галактической плоскости, образуя газово-пылевые облака клочковатой структуры. Размеры крупных газово-пылевых комплексов достигают десятков и сотен парсек, а их масса составляет величины порядка  $10^5 M_{\odot}$ . Изучение межзвездного поглощения света показывает, что пылинки межзвездной среды несферичны. Крупные пылинки имеют размер 0.1 – 1 мкм и состоят из тугоплавкого ядра и оболочки из летучих элементов. Имеются также очень маленькие силикатные и графитовые частицы, ответственные за поглощение излучения в далекой УФ-области спектра.



На этом рисунке приведено схематическое изображение межзвездной пылинки. Образование тугоплавких частиц происходит в достаточно плотной среде при температурах 500 – 2000К. Этим условиям могут удовлетворять внешние части атмосфер звезд-гигантов и

сверхгигантов поздних спектральных классов, оболочки новых и сверхновых звезд, планетарные туманности и газово-пылевые сгущения, из которых возникают протозвезды. Для перехода в твердую фазу необходимо, чтобы газовое давление превысило давление насыщенного пара конденсирующегося вещества. После того как тугоплавкие зародыши частиц возникнут в таких условиях, потоки газа и световое давление переносит их в более холодные области, где на них оседают более легкоплавкие соединения.

Присутствие в межзвездной среде межзвездной пыли вызывает экстинкцию (ослабление) излучения исследуемых небесных тел. Экстинкция, обусловленная пылью, сильно зависит от направления. Например, видимый свет от галактического центра (расстояние 10 кпк) ослабевает на 30 величин. Поэтому галактический центр невозможно наблюдать в оптическом диапазоне длин волн.

Крупинки пыли, диаметр которых близок к длине волны света, рассеивают его чрезвычайно эффективно. Газ тоже может вызывать экстинкцию рассеиванием, но у него эффективность рассеивания на единицу массы намного меньше. Экстинкция межзвездными частицами может быть обусловлена либо поглощением, либо рассеиванием. При поглощении лучистая энергия преобразовывается в тепловую, которая затем переизлучается в инфракрасных длинах волн, соответствующих температуре пылевых частиц. При рассеивании направление распространения света изменяется, приводя к сокращению его интенсивности в первоначальном направлении распространения.

Помимо экстинкции межзвездная пыль вызывает также другие наблюдаемые явления. Одно из них – покраснение света звезд. Покраснение обусловлено тем фактом, что величина экстинкции становится больше для более коротких длин волн. По этой причине свет от удаленных звезд краснее, чем можно было бы ожидать на основе их спектрального класса, который определяется по относительной интенсивности спектральных линий, не подверженных экстинкции.

Найдено, что межзвездная экстинкция наибольшая на коротких длинах волн в ультрафиолете и уменьшается для более длинных волн. В инфракрасной области имеется только ~10% оптической экстинкции, а в радиодиапазоне она пренебрежимо мала. Поэтому объекты, невидимые в оптической области, могут изучаться в инфракрасных лучах и на радиоволнах.

Другим наблюдаемым явлением, вызываемым пылью, является *поляризация* света звезд. Так как сферические частицы не могут производить какую-либо поляризацию, частицы межзвездной пыли должны иметь несферическую форму. Если частицы в пылевом облаке упорядочены межзвездным магнитным полем, они будут поляризовать излучение, проходящее через облако. Степень поляризации и ее зависимость от длины волны дают информацию о свойствах пылевых частиц. По направлению поляризации можно составить карту галактического магнитного поля.

В Млечном Пути межзвездная пыль сосредоточена в очень тонком слое (около 100 парсек) в галактической плоскости. Пыль в других спиральных галактиках имеет подобное распределение, и видна непосредственно как темная полоса на диске галактики.

Солнце расположено вблизи центральной плоскости слоя галактической пыли. Поэтому экстинкция в направлении галактической плоскости очень большая, тогда как полная экстинкция в направлении галактических полюсов может быть меньше чем  $0.^m1$ . Это сказывается на видимом распределении галактик на небе: в высоких галактических широтах имеется много галактик, тогда как вблизи галактической плоскости есть  $20^\circ$ -ная зона, где едва ли видны какие-либо галактики. Эта пустая область называется *зоной избегания*.

***Темные туманности.*** Наблюдения других галактик показывают, что пыль концентрируется в спиральных рукавах, особенно в их внутренних частях. Помимо этого пыль концентрируется в индивидуальных облаках, которые выглядят как бедные звездами области или темные туманности на фоне Млечного

Пути. Примерами объектов такого типа являются темные туманности «Конская голова» в Орионе и «Угольный мешок» в созвездии Южный Крест. Иногда темные туманности образуют расширяющиеся кольцеобразные полосы, а иногда малые, почти сферические объекты, которые Б. Бок назвал глобулами и выдвинул гипотезу, что они являются облаками, только начавшими сжиматься в звезды.

**Отражающие туманности.** Если пылевое облако находится вблизи яркой звезды, оно будет отражать ее свет. Поэтому отдельные пылевые облака могут иногда наблюдаться как яркие *отражающие туманности*. Известно около 500 отражающих туманностей.

Богатейшие отражающими туманностями области на небе находятся вокруг Плеяд и вокруг звезды-гиганта Антарес. Сам Антарес окружен большой красной отражающей туманностью. В нескольких градусах северо-западнее пояса Ориона, около большого плотного пылевого облака расположена отражающая туманность NGC 2068. Это одна из ярчайших отражающих туманностей и единственная, включенная в каталог Мессье (M78). Вокруг звезды Мерге в Плеядах находится отражающая туманность NGC 1435.

Еще одной светлой и хорошо изученной отражающей туманностью является NGC 7023 в Цефее. Она также связана с темной туманностью. Освещающая звезда имеет эмиссионные линии в спектре (спектральный тип Be). Внутри туманности открыты также инфракрасные звезды. Вероятно это область звездообразования.

**Температура пыли.** Помимо рассеивания межзвездные гранулы также поглощают излучение. Поглощенная энергия переизлучается гранулами в инфракрасных длинах волн, соответствующих их температуре. Температура пыли в межзвездном пространстве около 10 – 20К. Соответствующая длина волны, согласно закону смещения Вина, есть 300 – 150 мкм. Около горячей звезды температура пыли может быть 100 – 600К, а максимальная эмиссия будет тогда на длинах волн 30 – 5 мкм. В III областях температура пыли около 70 – 100К.

Все перечисленные пылевые источники излучения были открыты благодаря активному развитию инфракрасной астрономии с начала 1970-х годов. Инфракрасное излучение от ядер нормальных и активных галактик также является в большей части тепловым излучением пыли. Тепловая эмиссия от пыли является одним из наиболее важных источников инфракрасного излучения в астрономии.

Одним из сильнейших инфракрасных источников на небе является туманность вокруг звезды  $\eta$  Киля. Туманность состоит из ионизованного газа, но инфракрасное излучение от пыли также ясно различимо в ее спектре. В наиболее экстремальных случаях звезда может быть полностью затемнена туманностью, но выдает себя инфракрасным излучением от горячей пыли.

**Состав и происхождение пыли.** Межзвездная пыль содержит водяной лед, силикаты и, вероятно, графит. Размеры гранул можно определить из их

рассеивающих свойств; обычно они меньше 1 мкм. Самое сильное рассеивание обусловлено гранулами  $\sim 0.3 \mu\text{м}$ , но в пыли должны присутствовать также частицы более малых размеров.

Гранулы пыли образуются в атмосферах звезд поздних спектральных классов (К, М). Газ конденсируется в гранулы таким же образом, как вода в атмосфере Земли может конденсироваться в снег и лед. Затем гранулы выбрасываются в межзвездное пространство давлением излучения. Гранулы могут образовываться также при рождении звезды и, возможно, непосредственно из атомов и молекул в межзвездных облаках.

## Межзвездный газ

Хотя газа в межзвездном пространстве больше, чем пыли (по массе примерно в сто раз), его труднее наблюдать, так как газ не вызывает общую экстинкцию света. В оптической области его можно наблюдать только на основе малого числа спектральных линий.

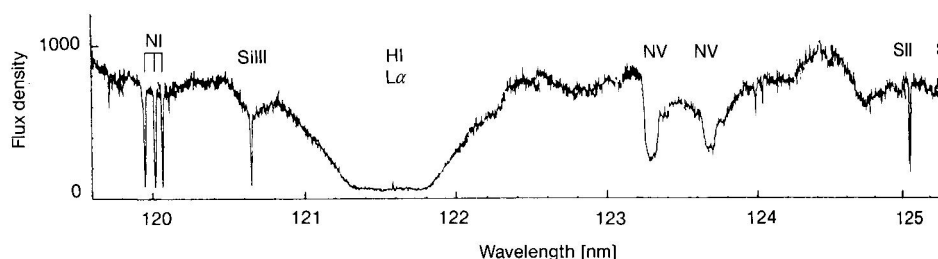
О существовании межзвездного газа заподозрили в первой декаде 20-го столетия, когда в 1904 г. И. Гартман заметил, что некоторые линии поглощения в спектрах некоторых двойных звезд не имели доплеровского сдвига от движения звезд подобно другим линиям. Был сделан вывод, что эти линии поглощения образуются в газовых облаках, расположенных между Землей и звездами. В спектрах некоторых звезд имелись линии, вероятно образованные в облаках, движущихся с различными скоростями. Наиболее сильными линиями в видимой области были линии нейтрального натрия и однократно ионизованного кальция. В ультрафиолетовой области линии более многочисленны. Сильнейшей является линия водорода Лайман  $\alpha$  ( $\lambda=121.6 \text{ нм}$ ).

На основе оптических и ультрафиолетовых линий было обнаружено, что многие атомы в межзвездном пространстве ионизованы. Эта ионизация обусловлена главным образом ультрафиолетовым излучением от звезд и, до некоторой степени, космическими лучами. Так как плотность межзвездного вещества очень мала, свободные электроны редко встречаются с ионами, и газ остается ионизованным.

Наблюдениями линий поглощения в видимой и ультрафиолетовой областях было открыто около тридцати элементов. С некоторыми исключениями были зарегистрированы все элементы от водорода до цинка (атомный номер 30) и несколько более тяжелых элементов. Подобно звездам, большая часть массы есть водород (около 70%) и гелий (почти 30%). Тяжелые элементы менее обильны, чем в Солнце и других звездах населения I. Полагают, что они входят в состав пылевых гранул, и потому не производят линий поглощения. Эта интерпретация подтверждается данными наблюдений, что в областях, где количество пыли меньше, чем обычно, обилие элементов в газе более близко к нормальному.

**Атомарный водород.** Инструментом изучения межзвездного *нейтрального водорода* являются ультрафиолетовые наблюдения. Сильнейшая межзвездная линия поглощения, как уже упоминалось, есть линия водорода Лайман  $\alpha$ . Эта линия соответствует переходу электрона в атоме водорода из состояния с главным квантовым числом  $n=1$  в состояние с  $n=2$ . Условия в межзвездном пространстве таковы, что почти все атомы водорода находятся в основном состоянии с  $n=1$ . Поэтому линия Лайман  $\alpha$  является сильной линией поглощения, тогда как Бальмеровские линии поглощения, которые возникают от возбужденного начального состояния  $n=2$ , не наблюдаемы. (Бальмеровские линии сильны в звездных атмосферах с температурой около 10000К, где большое число атомов находится в первом возбужденном состоянии.)

Первые наблюдения межзвездной линии Лайман  $\alpha$  были сделаны с ракеты уже в 1967 г. Более обширные наблюдения, содержащие 95 звезд, были получены спутником ОАО 2. Наблюдаемые звезды находились на расстояниях от 100 до 1000 парсек. На рисунке ниже представлены линии межзвездного поглощения в ультрафиолетовом спектре  $\zeta$  Змееносца. Видно, что наиболее сильной линией является линия водорода Лайман  $\alpha$  (эквивалентная ширина более 1нм). Наблюдения были сделаны со спутника «Коперник».



Особенно полезным оказалось сравнение наблюдений линии Лайман  $\alpha$  с наблюдениями линии нейтрального водорода  $\lambda = 21$  см. При помощи линии  $\lambda = 21$  см было картографировано распределение нейтрального водорода по всему небу. Однако из этих наблюдений трудно определить расстояния до близлежащих водородных облаков. В наблюдениях же линии Лайман  $\alpha$  обычно известно расстояние до звезды, перед которой лежат поглощающие облака.

Выведенная из наблюдений линии Лайман  $\alpha$ , средняя плотность газа внутри зоны примерно 1кпс от Солнца равна  $0.7$  атомов/см<sup>3</sup>. Межзвездная линия Лайман  $\alpha$  настолько сильна, что может наблюдаться даже в спектрах наиболее близких звезд. Например, она была обнаружена спутником «Коперник» в спектре Арктур, расстояние которого от Солнца всего лишь 11пк. Найденная плотность нейтрального водорода между Солнцем и Арктуром равна  $0.02 - 0.1$  атома/см<sup>3</sup>. Таким образом, Солнце расположено в сравнительно чистой области, где плотность межзвездной среды меньше  $0.1$  средней плотности.

**Линия водорода 21см.** Спины электрона и протона в нейтральном атоме водорода в основном состоянии могут быть либо параллельны, либо противоположны. Разность энергий между этими двумя состояниями соответствует частоте 1420.4мгц. Поэтому переходы между этими сверхтонкой структуры энергетическими уровнями будут приводить к возникновению спектральной линии на волне 21.049см. В каждом отдельном атоме такой переход происходит в среднем один раз за 11 млн. лет, но благодаря высокой распространенности атомарного водорода в межзвездной среде радиолния 21см оказывается достаточно интенсивной.

Существование этой линии было теоретически предсказано Хендриком ван де Хальстом в 1944 г., а наблюдали ее впервые Гарольд Ивен и Эдвард Перселл в 1951 г. Изучение этой линии дало больше знаний о межзвездной среде, чем какой-либо другой метод – можно даже говорить о специальной ветви 21-сантиметровой астрономии. Более половины массы галактического межзвездного вещества составляет нейтральный водород в основном состоянии. Его можно исследовать только по излучению в линии 21см. При помощи линии 21см может изучаться спиральная структура и вращение Млечного Пути и других галактик.

Интенсивность излучения на волне 21см содержит непосредственную информацию о числе атомов нейтрального водорода вдоль луча зрения (в столбике сечением  $1\text{см}^2$ ), а частота и профиль линии дают возможность определить движение водорода относительно наблюдателя. Данные о движении позволяют, в свою очередь, определить расстояние до излучающих объектов, т.е. найти распределение нейтрального водорода в Галактике.

Исследования линии 21см позволили установить, что нейтральный водород в основном заключен в очень тонком ( $\sim 220\text{пс}$ ) и ровном слое около плоскости Галактики. Так как радионаблюдения не подвержены экстинкции, с их помощью можно картографировать распределение плотности нейтрального водорода во всей галактической плоскости. Результаты выполненных наблюдений показывают, что Млечный путь есть спиральная галактика, и что межзвездный водород концентрируется в спиральных рукавах. Средняя плотность межзвездного водорода есть  $1\text{ атом}/\text{см}^3$ , но распределение очень неоднородно. Как правило, водород образует более плотные области размером в несколько парсек, где плотность может быть  $10 - 100\text{ атомов}/\text{см}^3$ . Области, в которых водород преимущественно нейтральный, известны как HI области (в противоположность HII областям ионизованного водорода).

Обычно линии 21см эмиссионная, но может также наблюдаться как линия поглощения, когда через облако проходит свет от яркого радиоисточника. Одно и то же облако может дать как спектр поглощения, так и эмиссионный спектр. В этом случае можно определить температуру, оптическую толщину и содержание водорода в облаке.

**Области ионизованного водорода (HII области).** Во многих уголках космического пространства водород встречается не в виде нейтральных ато-

мов, а в ионизованном виде. В частности, это возможно вблизи горячих О-звезд, которые сильно излучают в ультрафиолете. Если вокруг такой звезды имеется достаточно водорода, он будет виден как эмиссионная туманность, состоящая из ионизованного водорода. Такие туманности известны как НII области.

Типичной эмиссионной туманностью является большая туманность в Орионе, М42. Она видна даже невооруженным глазом, и является прекрасным зрелищем, когда рассматривается в телескоп. В середине туманности находится группа из четырех горячих звезд, известная как Трапеция, которые можно различить внутри яркой туманности даже при помощи небольшого телескопа. Звезды Трапеции испускают сильное ультрафиолетовое излучение, которое поддерживает газ туманности в ионизованном состоянии.

В противоположность звезде, облако ионизованного газа имеет спектр, в котором доминируют несколько узких эмиссионных линий. Непрерывный спектр областей НII является слабым. В видимой области особенно сильны эмиссионные Бальмеровские линии водорода.

Ионизация атома гелия требует больше энергии, чем ионизация атома водорода, и поэтому области ионизованного гелия образуются только вокруг наиболее горячих звезд. В этих случаях большая НII область будет окружать более малую центральную область  $\text{He}^+$  или  $\text{He}^{2+}$ . В спектре туманности будут тогда сильны линии гелия.

Хотя водород и гелий являются главными составляющими облаков, их эмиссионные линии не всегда сильнейшие в спектре. В начале 20-го столетия предположили даже, что некоторые сильные неидентифицированные линии в спектрах туманностей обусловлены новым элементом *небулием*. Однако это оказались *запрещенные линии* ионизованного кислорода и азота –  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{2+}$  и  $\text{N}^+$ . Запрещенные линии чрезвычайно трудно наблюдать в лаборатории. Вероятности этих переходов очень малы, и при лабораторных плотностях ионы успокоятся из-за столкновений раньше, чем успеют излучить. В чрезвычайно диффузном межзвездном газе столкновения существенно менее часты, и поэтому есть шанс, что возбужденный ион сделает переход в более низкое состояние, испустив фотон.

Из-за межзвездной экстинкции только ближайшие НII области можно изучать в видимом свете. В инфракрасных и радиоволнах могут быть изучены намного более удаленные области. Наиболее важными линиями на радиоволнах являются рекомбинационные линии водорода и гелия. Хорошо изучен водородный переход между энергетическими уровнями 110 и 109 на частоте 5.01 гигагерц. Эти линии важны также потому, что с их помощью могут быть определены лучевые скорости, и, следовательно, расстояния до НII областей и до нейтрального водорода (используя закон галактического вращения).

Физические свойства НII областей можно изучать также по их непрерывной радиоэмиссии. Эта эмиссия обусловлена *тормозным излучением* (излучение, испускаемое или поглощаемое в случае, когда свободный электрон ускоряется в поле атомного ядра, но не захватывается).



III области образуются, когда горячая O или B звезда начинает ионизировать окружающий ее газ. Ионизация постепенно распространяется от звезды. Из-за того, что нейтральный водород поглощает ультрафиолетовое излучение эффективно, граница между III областью и нейтральным газом очень резкая. В однородной среде III область вокруг одиночной звезды будет сферической, образуя так называемую сферу Стрёмгрена. Для B0V звезды радиус сферы Стрёмгрена 50пс, а для A0V звезды только 1пс.

Температура III области выше, чем температура окружающего газа, и поэтому она имеет тенденцию расширяться. Через миллионы лет III области станут чрезвычайно диффузными, и, в конце концов, соединятся с общей межзвездной средой.

### **Межзвездные молекулы**

Открытие первых межзвездных молекул датируется 1937 – 1938 гг., когда были обнаружены молекулярные линии поглощения в спектрах некоторых звезд. Были найдены три простые двухатомные молекулы – метилидин  $\text{CH}$ , его положительный ион  $\text{CH}^+$  и циан  $\text{CN}$ . Позже некоторые другие молекулы были обнаружены в ультрафиолете (например, молекулярный водород  $\text{H}_2$  и окись углерода  $\text{CO}$ ). Молекулярный водород есть наиболее распространенная межзвездная молекула, за ним следует окись углерода.

**Молекулярный водород.** Обнаружение и изучение молекулярного водорода стало одним из наиболее важных достижений УФ-астрономии. Молекулярный водород имеет сильную полосу поглощения на длине волны 105нм, которую впервые наблюдал в 1970 г. Джордж Р. Каррутерс (George R. Carruthers) при помощи ракеты, но более обширные наблюдения смогли быть проведены только с помощью спутника «Коперник». Наблюдения показали, что значительная часть межзвездного водорода является молекулярной, и что эта часть сильно возрастает для более плотных облаков с более высокой экстинкцией. В облаках с визуальной экстинкцией большей, чем  $1^m$ , по существу весь водород является молекулярным.

Водородные молекулы образуются на поверхности межзвездных гранул, которые действуют как химический катализатор. Пыль также необходима, чтобы заслонить молекулы от звездного ультрафиолетового излучения, которое иначе разрушило бы их. Т.о. молекулярный водород обнаруживается там, где пыль является обильной.

Наблюдения указывают на то, что газ и пыль хорошо перемешаны. Количеству пыли, приводящей к визуальной экстинкции в  $1^m$ , соответствует  $1.9 \cdot 10^{21}$  атомов водорода (одна молекула считается как два атома). Отношение массы газа и пыли, полученное таким способом, равно 100.

**Радиоспектроскопия.** Линии поглощения можно наблюдать только в случае, когда позади молекулярного облака находится яркая звезда. Из-за большой

пылевой экстинкции наблюдения молекул в наиболее плотных облаках, где они особенно обильны, невозможно сделать в оптической и ультрафиолетовой спектральных областях. Для таких объектов возможны только радионаблюдения.

Радиоспектроскопия позволила сделать огромный шаг вперед в изучении межзвездных молекул. В начале 1960-х все еще не верилось, что в межзвездном пространстве могут быть более сложные молекулы, чем двухатомные. Думали, что газ слишком диффузный (рассеянный) для того чтобы образовывать молекулы, и любые образовавшиеся молекулы были бы разрушены ультрафиолетовым излучением. Первая молекулярная радиолиния, гидроксильный радикал ОН, была открыта в 1963 г. С тех пор было открыто много других молекул. В 1993 г. было обнаружено свыше 80 молекул, наиболее тяжелой была 13-ти атомная молекула  $\text{HC}_{11}\text{N}$ .

Молекулярные линии в радиообласти могут наблюдаться либо в поглощении, либо в эмиссии. Излучение от двухатомных молекул типа СО может соответствовать трем видам энергетических переходов. *Электронные переходы* соответствуют изменениям в электронном облаке молекулы. Они подобны переходам в одиночных атомах, а их длины волн лежат в оптической или ультрафиолетовой области. *Колебательные переходы* соответствуют изменениям в колебательной энергии молекулы. Обычно они находятся в инфракрасной области. Наиболее важными для радиоспектроскопии являются *вращательные переходы*, которые есть изменения во вращательной энергии молекулы. Молекулы в их основном состоянии не вращаются, т.е. их угловой момент равен нулю, но они могут возбудиться и начать вращаться при столкновении с другими молекулами. Например, сульфид углерода CS возвращается в свое основное состояние через несколько часов, испуская фотон в миллиметровой области.

Многие из межзвездных молекул были обнаружены в наиболее плотных облаках, главным образом в облаке Sagittarius B2 в галактическом центре. Наиболее обильную молекулу  $\text{H}_2$  невозможно наблюдать на радиоволнах, потому что она не имеет подходящих спектральных линий. Ее электронные переходы лежат в УФ диапазоне. По ним эта молекула и была открыта в спектрах поглощения горячих звезд. Следующими наиболее обильными молекулами являются окись углерода СО, гидроксильный радикал ОН и аммиак  $\text{NH}_3$ , хотя их количество есть только малая доля от количества водорода. Однако масса межзвездных облаков так велика, что число этих молекул все же значительно. Так, например, облако Sagittarius B2 содержит этилового спирта,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ , в количестве вполне достаточном, чтобы наполнить  $10^{28}$  бутылок водки.

Чем больше плотность облака, тем более разнообразные молекулы в нем встречаются, причем каждая из молекул характерна для определенного интервала плотностей. Поэтому наблюдения в линиях СО, ОН,  $\text{NH}_3$ , HCN позволяют заглянуть практически в любую часть облака с разнообразными физическими условиями. Наблюдая несколько линий одной молекулы можно определить изотопный состав газа, его температуру и плотность.

Помимо молекулярного облака Sagittarius B2 наблюдается другое очень богатое молекулярное облако около НП области Orion A, т.е. хорошо известной Туманности Ориона M42.

Внутри НП областей молекул нет, так как они быстро бы распались под воздействием высокой температуры и сильного ультрафиолетового излучения. Около НП областей было найдено три типа молекулярных источников:

- а) большие газовые и пылевые оболочки вокруг НП области;
- б) малые плотные облака внутри этих оболочек;
- с) очень компактные OH и H<sub>2</sub>O мазерные источники.

Большие оболочки были обнаружены первоначально по наблюдениям CO. Были обнаружены также молекулы OH и H<sub>2</sub>CO. Как и в темных туманностях, газ в этих облаках есть, вероятно, главным образом молекулярный водород. Из-за большого размера и плотности ( $n = 10^3 - 10^4$  молекул/см<sup>3</sup>) этих облаков, их массы очень большие, 10<sup>5</sup> или даже 10<sup>6</sup> солнечных масс (SgrB2). Они принадлежат к наиболее массивным объектам Млечного Пути.

Пыль в молекулярных облаках может наблюдаться по ее тепловому излучению. Пик этого излучения приходится на длины волн 10 – 100 мкм, соответствующих температуре пыли 30 – 100К.

Некоторые межзвездные облака содержат очень малые *мазерные источники*. В них эмиссионные линии OH, H<sub>2</sub>O и SiO могут быть во много миллионов раз сильнее, чем еще где-либо. При этом диаметр излучающих областей всего лишь около 5 – 10 а. е. Условия в этих облаках таковы, что излучение в некоторых спектральных линиях усиливается стимулированной эмиссией, когда оно проходит через облако. Гидроксильные и водяные мазеры встречаются в сочетании с плотными НП областями и инфракрасными источниками, и, похоже, причастны к образованию протозвезд. Мазерная эмиссия (OH, H<sub>2</sub>O и SiO) встречается в сочетании с Мира-переменными и некоторыми красными звездами-сверхгигантами. Эта мазерная эмиссия приходит от молекулярной и пылевой оболочки вокруг звезды, которая приводит к наблюдаемому инфракрасному эксцессу.

### Образование протозвезд

Масса Млечного Пути равна примерно 10<sup>11</sup> солнечных масс. Так как возраст нашей галактики примерно 10<sup>10</sup> лет, звезды образуются со средней скоростью 10M<sub>☉</sub> за год. Эта оценка является верхним пределом для настоящего времени, потому что раньше скорость звездообразования должна была быть намного выше. Лучшую оценку скорости звездообразования можно сделать, основываясь на наблюдаемом числе O-звезд, так как их время жизни всего лишь около миллиона лет. Отсюда заключили, что в настоящее время новые звезды образуются в Млечном Пути со скоростью примерно три солнечных массы в год.

Теперь полагают, что звезды образуются внутри больших плотных межзвездных облаков, расположенных главным образом в спиральных рукавах

Галактики. Под действием собственной гравитации облако начинает сжиматься в те части, которые станут протозвездами. Наблюдения показывают, что звезды образуются не индивидуально, а большими группами. Молодые звезды обнаруживают в рассеянных скоплениях и в разреженных ассоциациях, содержащих, как правило, несколько сотен звезд, которые должны были образоваться одновременно.

Теоретические вычисления подтверждают, что образование одиночных звезд почти невозможно. Межзвездное облако может сжиматься только тогда, когда его масса достаточно велика, чтобы гравитация сокрушила давление. Предельной массой является масса Джинса, задаваемая соотношением

$$M_J \approx 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{T^3}{n}} M_\odot,$$

где  $n$  есть плотность в атомах/м<sup>3</sup>.

В типичном межзвездном облаке нейтрального водорода  $n = 10^6$ , а  $T = 100\text{К}$ , что дает массу Джинса  $30000 M_\odot$ . В наиболее плотных пылевых облаках  $n = 10^{12}$ , а  $T = 10\text{К}$ , и, следовательно,  $M_J = 1 M_\odot$ .

Полагают, что звездообразование начинается в облаках, имеющих несколько тысяч солнечных масс и диаметры около 10пк. Облако начинает сжиматься, но не разогревается, потому что освобождающаяся энергия уносится прочь излучением. С ростом плотности масса Джинса уменьшается. Вследствие этого в облаке образуются отдельные ядра конденсации, которые сжимаются независимо – *фрагменты* облака.

Это сжатие и фрагментация продолжаются до тех пор, пока плотность не станет настолько большой, что индивидуальные фрагменты становятся оптически толстыми. Энергия, освобождаемая при сжатии, не сможет больше уноситься прочь, и температура начнет расти. Вследствие этого масса Джинса начинает увеличиваться, дальнейшая фрагментация прекращается, а выросшее давление в существующих фрагментах останавливает их сжатие. Некоторые протозвезды, образованные таким образом, могут также быстро вращаться. Вращающиеся могут расщепляться на две, образуя двойные системы. Дальнейшая эволюция протозвезд была рассмотрена нами ранее.

Хотя представление о том, что звезды образуются в результате коллапса межзвездных облаков является общепринятым, множество деталей процесса фрагментации все еще сильно предположительно. Так, очень неточно известно влияние вращения, магнитных полей и входа энергии. Почему облако начинает сжиматься также не определено; одна из теорий предполагает, что проход через спиральный рукав сжимает облака и запускает сжатие. Это могло бы объяснить, почему молодые звезды обнаруживаются преимущественно в спиральных облаках Млечного Пути и других галактик. Сжатие межзвездного облака может также инициироваться близлежащей расширяющейся III областью или взрывом сверхновой.

	T, [K]	n, [см <sup>-3</sup> ]
1. Очень холодные молекулярные газовые облака (преимущественно водород H <sub>2</sub> )	20	> 10 <sup>3</sup>
2. Холодные газовые облака (преимущественно нейтральный атомарный водород)	100	20
3. Теплый нейтральный газ, обволакивающий более холодные облака	6000	0.05 – 0.3
4. Горячий ионизованный газ (преимущественно III области вокруг горячих звезд)	8000	> 0.5
5. Очень горячий и диффузный ионизованный корональный газ, ионизуемый и разогреваемый взрывом сверхновой	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-3</sup>

### Планетарные туманности

Яркие области ионизованного газа встречаются не только в сочетании с вновь образованными звездами, но и вокруг звезд в поздних стадиях их эволюции. Среди них так называемые *планетарные туманности* – газовые оболочки вокруг небольших горячих голубых звезд. Как мы уже видели, рассматривая звездную эволюцию, неустойчивость может привести к стадии гелиевого горения. Некоторые звезды начинают пульсировать, а у некоторых вся внешняя атмосфера может быть сброшена в пространство взрывным образом. В последнем случае вокруг небольшой и горячей (50000 – 100000K) звезды, ядра первоначальной звезды, будет образована газовая оболочка, расширяющаяся со скоростью 20 – 30км/с.

Планетарные туманности получили такое название в 19-м столетии, так как некоторые малые туманности визуально выглядели похожими на планеты, такие как Уран. Видимый диаметр наименьших известных планетарных туманностей всего лишь несколько дугowych секунд, тогда как наибольшие туманности (такие как Helix Nebula (Улитка)) могут быть до одного градуса в диаметре.

Расширяющийся газ в планетарных туманностях ионизируется ультрафиолетовым излучением от центральной звезды, и его спектр содержит много таких же ярких эмиссионных линий, как спектр III области. Наиболее яркие эмиссионные линии часто обусловлены запрещенными переходами. Например, зеленый цвет центральной части Кольцевой туманности в Лире обусловлен запрещенными линиями дважды ионизованного кислорода (495.9 и 500.7нм). Красный цвет внешних частей обусловлен α-линией Бальмеровской серии водорода (656.3нм) и запрещенными линиями ионизованного азота (654.8нм, 658.3нм).

Планетарные туманности обычно намного более симметричны по форме, чем большинство III областей, и они расширяются быстрее. Например, хорошо известная Кольцевая туманность в Лире (M57) заметно расширилась на фотографиях, сделанных с 50-летним интервалом. За несколько десятков тысяч

лет планетарные туманности растворяются в межзвездной среде, а их центральные звезды остывают, становясь белыми карликами. Полное число планетарных туманностей в Млечном Пути оценивается в 50000. Около 1000 действительно обнаружены.

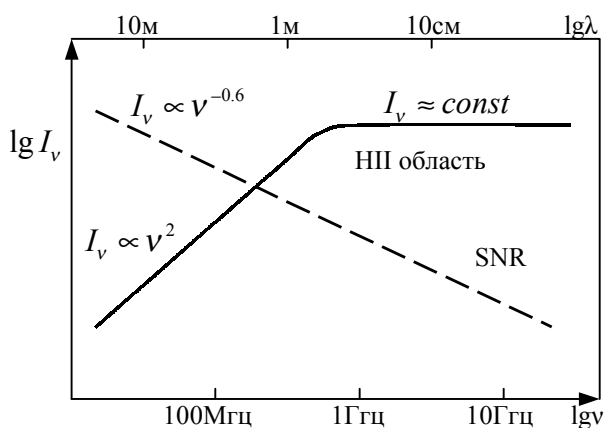
## Остатки сверхновых

Мы уже видели, что массивные звезды заканчивают свою эволюцию взрывом сверхновой. Коллапс звездного ядра приводит к резкому сбросу внешних слоев, которые становятся тогда расширяющимся газовым облаком.

В Млечном Пути открыто около 120 остатков сверхновых (SNR). Некоторые из них видны оптически как кольцо или неправильная туманность (например, Крабовидная туманность), но большинство обнаруживаются только в радиобласти (так как радиоэмиссия не подвергается экстинкции).

Крабовидная туманность в Тельце является остатком взрыва сверхновой, наблюдавшегося в 1054 г. Туманность является также сильным радиоисточником. Ее энергетическим источником является центральная быстровращающаяся нейтронная звезда, пульсар, которая есть сколлапсированное ядро первоначальной звезды.

В радиобласти SNR-ы являются расширяющимися источниками, аналогичными НII областям. Однако, в отличие от НII областей, излучение от SNR-ов часто поляризовано. Другим характерным отличием между этими двумя видами источников есть то, что радиояркость НII областей растет или остается постоянной с увеличением частоты, а радиояркость SNR-источников почти линейно падает.



*Радиоспектры типичных НII областей и остатков сверхновых. Излучение НII областей тепловое и подчиняется закону Релея – Джинса,  $I_\nu \sim \nu^2$ , при длинах волн  $\lambda > 1\text{м}$ . В остатках сверхновых интенсивность падает с ростом частоты.*

Эти различия обусловлены различными эмиссионными процессами в НII областях и SNR-источниках. В НII области радиоэмиссия есть свободно-свободное излучение от горячей плазмы. В SNR-источниках это есть *синхротронное излучение* от релятивистских электронов, движущихся по спиральям вокруг силовых линий магнитного поля. Синхротронное излучение приводит к непрерывному спектру, охватывающему все волновые области. Например,

Крабовидная туманность выглядит голубой или зеленой на цветных фотографиях из-за оптического синхротронного излучения.

В Крабовидной туманности видны также красные нити на ярком фоне. Эта эмиссия есть главным образом линия  $H_{\alpha}$  водорода. Водород в SNR-источнике ионизируется не центральной звездой, как в НП областях, а ультрафиолетовым синхротронным излучением.

Остатки сверхновых в Млечном Пути разделяются на два класса. Один тип имеет ясно выраженную кольцеобразную структуру (например, Кассиопея А или Вуалевая туманность в Лебеде); другой тип является неправильным и ярким в середине (подобно Крабовидной туманности). В остатках типа Крабовидной туманности всегда имеется быстровращающийся пульсар в центре. Этот пульсар обеспечивает большую часть энергии остатка непрерывным впрыскиванием релятивистских электронов в облако. Эволюция этого типа SNR-источника отражает эволюцию пульсара, и по этой причине имеет временную шкалу несколько десятков тысяч лет.

Кольцеобразные SNR-ы не содержат энергетический пульсар; свою энергию они получили от взрыва сверхновой. После взрыва облако расширяется со скоростью 10000 – 20000 км/с. Через 50 – 100 лет после взрыва остаток начинает формировать сферическую оболочку, когда сброшенный газ начинает сметать межзвездный газ, и его внешние слои замедляются. Оболочка расширяется с уменьшающейся скоростью и остывает, пока примерно через 100000 лет не сольется в межзвездную среду. Два типа остатков сверхновых могут быть соотнесены с двумя типами (I и II) сверхновых.

## Горячая корона Млечного Пути

Еще в 1956 г. Л. Спитцер (Lyman Spitzer) показал, что Млечный Путь должен быть окружен большой оболочкой очень горячего газа. Почти два десятилетия спустя спутник «Коперник», чья научная программа направлялась Спитцером, обнаружил наличие этого вида газа, который стали называть *галактическим корональным газом*, по аналогии с солнечной короной. Спутник наблюдал эмиссионные линии, например, пятикратно ионизованного кислорода (OVI), четырехкратно ионизованного азота (NV) и трехкратно ионизованного углерода (CIV). Образование этих линий требует высокой температуры (100000 – 1000000К). На высокую температуру показывало также уширение линий.

Галактический корональный газ распределен по всему Млечному Пути и простирается на несколько тысяч парсек от галактической плоскости. Его плотность порядка  $10^{-3}$  атомов/см<sup>3</sup> (вспомним, что средняя плотность в галактической плоскости 1 атом/см<sup>3</sup>). Поэтому корональный газ похож на море, из которого более плотные и более холодные формы межзвездной материи, такие как нейтральный водород и молекулярные облака, поднимаются как острова. В начале 1980-х аналогичные короны были обнаружены в Большом Магеллановом Облаке и в спиральной галактике M100. Корональный газ является, вероятно, совершенно общей и важной формой материи в галактиках.

Взрывы сверхновых являются, вероятно, источником и коронального газа и его энергии. Когда сверхновая взрывается, она образует горячий пузырь в окружающей среде. Пузыри от соседних сверхновых будут расширяться и сливаться, образуя пенообразную структуру. В дополнение к сверхновым, некоторую энергию корональному газу добавляет звездный ветер от горячих звезд.

## Космические лучи и межзвездное магнитное поле

**Космические лучи.** Элементарные частицы и атомные ядра, приходящие на Землю из космического пространства, называются *космическими лучами*. Они пронизывают все межзвездное пространство с плотностью энергии того же порядка величины, что и излучение от звезд. Поэтому они играют важную роль в ионизации и разогреве межзвездного газа.

Так как космические лучи заряжены, направление их распространения в пространстве постоянно изменяется магнитным полем. Поэтому направление их прибытия не дает информации о месте их происхождения.

Наиболее важными свойствами космических лучей, которые могут наблюдаться с Земли, являются состав их частиц и распределение энергии. Как было отмечено раньше, эти наблюдения должны проводиться в верхней атмосфере или со спутников, так как частицы космических лучей разрушаются в атмосфере.

Главная составляющая космических лучей (около 90%) – ядра водорода (протоны). Второй наиболее важной составляющей (около 9%) являются ядра гелия ( $\alpha$ -частицы). Остальные частицы есть электроны и ядра более массивные, чем гелий.

Большая часть космических лучей имеет энергию, меньшую чем  $10^9$  эВ. Число более энергетических частиц быстро падает с ростом энергии. Наиболее энергетические протоны имеют энергию  $10^{20}$  эВ, но такие частицы очень редки. (На наибольшем ускорителе частиц достигается энергия только  $5 \times 10^{11}$  эВ).

Распределение низкоэнергетических (менее  $10^8$  эВ) космических лучей не может уверенно определяться с Земли, так как солнечные «космические лучи», высокоэнергетические протоны и электроны, образованные солнечными вспышками, наполняют Солнечную систему и сильно воздействуют на движение низкоэнергетических космических лучей.

Распределение космических лучей в Млечном Пути может быть выведено непосредственно из гамма и радио наблюдений. Столкновения протонов космических лучей с межзвездными атомами водорода приводит к возникновению пионов, которые затем распадаются, образуя  $\gamma$ -лучевой фон. Радиофон образуется электронами космических лучей, которые испускают синхротронное излучение в межзвездном магнитном поле.

И радио и  $\gamma$ -лучевая эмиссия сильно концентрируются к галактической плоскости. Из этого можно сделать вывод, что источники космических лучей также должны располагаться в галактической плоскости. Имеются также индивидуальные пики фона вокруг известных остатков сверхновых. В  $\gamma$ -лучевой об-



ласти такие пики наблюдаются, например, в Крабовидной туманности и Vela-пульсаре; в радио области имеется большая, почти кольцеобразная, область повышенной эмиссии, так называемая Северная Полярная Шпора (North Polar Spur).

По-видимому, большая доля космических лучей имеет свое происхождение от сверхновых. Действительно, взрыв сверхновой приводит к возникновению энергетических частиц. Наблюдения показывают, что если образуется пульсар, то он будет ускорять окружающие его частицы. Наконец, ударные волны, образованные при взрыве остатком сверхновой, также приведут к возникновению релятивистских частиц.

На основе относительного обилия различных ядер в космических лучах можно вычислить, как долго они пропутешествовали, прежде чем достигли Земли. Было найдено, что типичный представитель космических лучей, протоны, путешествуют с периодом в несколько миллионов лет (и, следовательно, проходят расстояние в несколько миллионов световых лет) от точки их происхождения. Так как диаметр Млечного Пути около 100000 световых лет, протоны пересекают Млечный Путь десятки раз в галактическом поле.

**Межзвездное магнитное поле.** Силу и направление **межзвездного магнитного поля** трудно определить надежно. Прямые измерения невозможны, так как магнитные поля Земли и Солнца намного сильнее.

Мы видели, что межзвездные гранулы приводят к возникновению межзвездной поляризации. Для того чтобы поляризовать свет, гранулы пыли должны быть одинаково ориентированы; это может достигаться только общим магнитным полем. Найденное распределение межзвездной поляризации показывает, что соседние звезды имеют, в общем, одинаковую поляризацию. На низких галактических широтах поляризация почти параллельна к галактической плоскости, исключая области, где она выглядит направленной вдоль спирального рукава.

Более точные оценки силы магнитного поля могут быть получены из вращения плоскости поляризации радиоизлучения от удаленных источников. Это так называемое вращение Фарадея пропорционально силе магнитного поля и электронной плотности. Другим методом является измерение Зеемановского расщепления радиолнии 21см. Эти измерения дают значение 0.1 – 1 нТ для силы межзвездного магнитного поля. Эта величина составляет примерно 1/1000000 межпланетного поля в Солнечной системе.