

Межзвёздная среда, или Встреча с прекрасным

На ночном небе ярче всего видны звёзды, но они составляют лишь часть видимого вещества в Галактике¹. О том, что между звёздами тоже есть вещество, мы узнали не сразу. Это вещество называют межзвёздным веществом.

Первые попытки описания межзвёздного вещества относятся к 18-му веку. Причиной всему были кометы. В то время они считались очень большими космическими объектами, столкновение с которыми опасно для человечества. Среди множества учёных, кто занимался их поисками, был и французский астроном Шарль Мессье. Он искал на небе медленно перемещающиеся туманные пятна — именно так выглядят кометы на больших расстояниях от Солнца. Но кроме движущихся пятен обнаруживались также неподвижные, которые астрономы называли туманностями. Чтобы не путать их с кометами, Мессье в 1774 году создал отдельный список туманностей, известный сейчас как каталог Мессье.

Ближе к последней четверти 18-го века исследованием туманностей занялся Уильям Гершель. Он наблюдал сотни разных туманностей с помощью построенных им телескопов и обнаружил, что многие из них состоят из отдельных звёзд. Но некоторые туманности даже в самый большой телескоп выглядели как размытые пятна. Исходя из этих наблюдений, Гершель пришёл к выводу, что эти туманности состоят не из звёзд, а из какого-то другого вещества.

Сейчас под туманностями понимают облака межзвёздного газа и пыли, видимые благодаря собственному излучению, отражению или поглощению света звёзд или других туманностей. Туманности бывают 2 видов — светлые и тёмные. Светлые туманности, в свою очередь, разделяют на отражательные и эмиссионные.



Шарль Мессье
(1730–1817)



Уильям Гершель
(1738–1822)

✎ Светлые и тёмные
туманности



Рис. 1. Звёздное скопление Плеяды, в котором находятся отражательные туманности NGC 1432 и NGC 1435

¹Галактика пишется с большой буквы, если речь идёт о нашей галактике Млечный Путь.

Отражательные туманности представляют собой холодные межзвёздные облака, которые отражают свет находящихся рядом с ними ярких звёзд. Например, туманности NGC 1432 и NGC 1435 (Рис. 1), которые видны за счёт света звёзд Майя и Меропа, принадлежащих к звёздному скоплению Плеяды² в созвездии Телец, — это отражательные туманности.

✎ Отражательные туманности



Рис. 2. Эмиссионная туманность Душа в созвездии Кассиопея

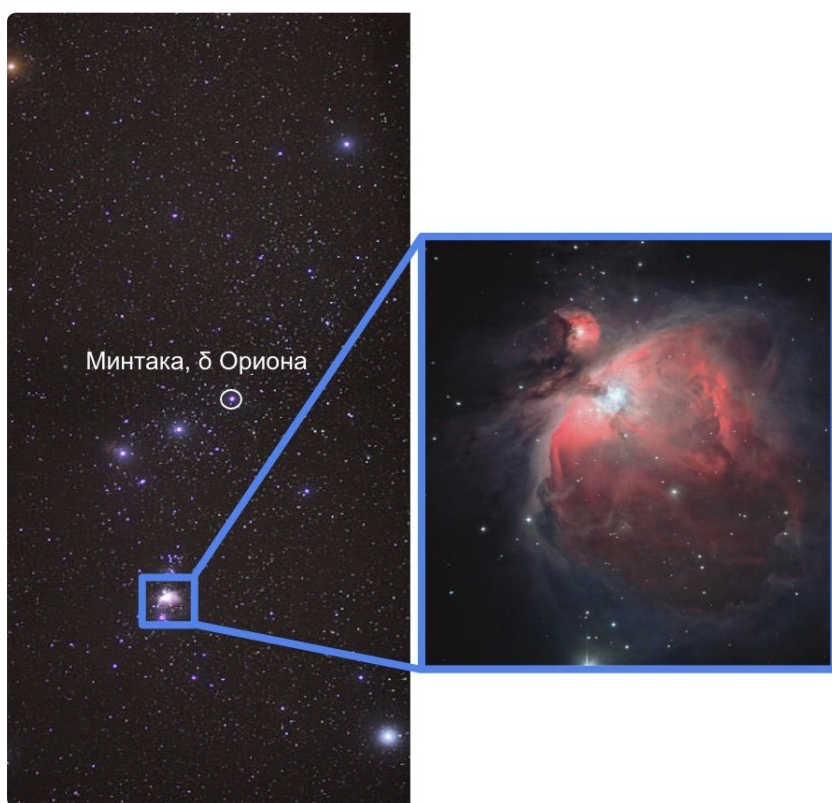


Рис. 3. Туманность Ориона – эмиссионная туманность в созвездии Орион

Эмиссионные туманности видны благодаря их собственному излучению (эмиссии), они состоят из очень горячего газа, ярко светящегося в видимом диапазоне. Однако, чтобы заставить межзвёздный газ так светиться, требуется мощный источник излучения, например, молодая массивная звезда или скопление таких звёзд (Рис. 2).

✎ Эмиссионные туманности

²Скопление Плеяды было занесено в каталог Мессье под номером 45, поэтому его также называют М45.

Наглядный пример такого объекта, который светится благодаря присутствию молодого скопления, вы могли видеть на небе невооружённым глазом — это центральная часть туманности Ориона (Рис. 3), которая расположена в одноимённом созвездии. Также к эмиссионным относятся планетарные туманности, то есть оболочки из горячего газа и пыли, сброшенные звездой на последних стадиях эволюции (Рис. 4). В этом случае вещество туманности нагрето умирающей звездой, сбросившей оболочку.



Рис. 4. Планетарная туманность Кошачий Глаз (NGC 6543). Изображение получено космическим телескопом им. Хаббла



Рис. 5. Тёмные туманности Конская Голова и Угольный Мешок

Тёмная (поглощательная) туманность, наоборот, поглощает свет находящихся за ней звёзд или светлых туманностей и поэтому выглядит как «дыра» в небе. Тёмные туманности — это плотные облака, сквозь которые с трудом проходит звёздный свет. Невооружённым глазом видна тёмная туманность Угольный Мешок в созвездии Южный Крест, расположенном на южном небе (Рис. 5).

 Тёмные туманности

Наблюдение межзвёздного вещества

Революция в исследовании межзвёздного вещества связана с появлением спектрального анализа. Пионером здесь стал английский астроном-любитель Уильям Хаггинс, который в 1864 году решил получить спектры туманностей. Он направил свой телескоп на уже известную нам туманность Ориона и на планетарные туманности, в том числе туманность Кошачий Глаз, и обнаружил, что их спектры состоят из нескольких узких линий и похожи на спектр горячего газа. Это позволило понять, что эмиссионные туманности состоят не из звёзд, а из светящегося газа.

Постепенно накапливались свидетельства того, что некоторое вещество, ослабляющее свет, есть не только в тёмных туманностях, но и в пространстве между звёздами. В 1904 году немецкий астроном Йоханнес Хартман наблюдал звезду дельта Ориона (Минтака). Минтака — двойная звезда: две звезды вращаются вокруг общего центра масс, то приближаясь к нам, то отдаляясь, и мы видим, что происходит смещение спектральных линий то в синюю, то в красную область (уже знакомый нам эффект Доплера). Хартман обратил внимание, что некоторые линии поглощения в спектре остаются на месте, и сделал вывод, что они не связаны с системой Минтаки, а относятся к веществу, находящемуся между Минтакой и наблюдателем.

К идее о существовании межзвёздного вещества спустя 26 лет вернулся Роберт Трюмплер — американский астроном, который определял расстояния до звёздных скоплений. Он выяснил, что, во-первых, блеск звёзд в скоплениях падает с расстоянием R быстрее, чем R^2 , а во-вторых, чем дальше от нас скопление, тем оно краснее. Так появился термин «межзвёздное покраснение и поглощение света». Оно наблюдалось именно у рассеянных звёздных скоплений, которые, в отличие от шаровых скоплений, находятся вблизи плоскости Млечного Пути. Наблюдения хорошо согласовывались с предположением, что вещество, ослабляющее свет звёзд, находится именно в плоскости Галактики.

Благодаря всем этим наблюдениям удалось обнаружить межзвёздное вещество, которое заполняет диск нашей Галактики. Теперь известно, что 99% массы межзвёздной среды составляет газ — именно он создаёт линии поглощения, которые наблюдал Хартман, и яркие эмиссионные линии в туманностях, обнаруженные Хаггинсом. Оставшийся 1% приходится на межзвёздную пыль — мельчайшие частицы, которые поглощают свет звёзд и делают его более тусклым и красным.



Уильям Хаггинс
(1824–1910)



Йоханнес Хартман
(1865–1936)



Роберт Трюмплер
(1886–1956)

 **Рассеянное звёздное скопление** – гравитационно связанная группа звёзд, состоящая из тысяч звёзд, чаще всего молодых (от 10 млн до 2 млрд лет). Рассеянное скопление имеет неправильную форму и расположено в основном в плоскости Галактики

 **Шаровое звёздное скопление** – гравитационно связанная группа из большого числа звёзд, имеющая сферическую форму. Расположены обычно вне плоскости Млечного Пути и концентрируются к его центру. Состоят из десятков и даже сотен тысяч звёзд, обычно очень старых (12–14 млрд лет)



Межзвёздный газ

Сам межзвёздный газ в основном состоит из водорода (H) – самого распространённого во Вселенной элемента. Девять из десяти атомов, входящих в состав межзвёздного газа, – это атомы водорода, поэтому состояние межзвёздной среды (молекулярное, атомарное или ионизированное) определяют именно по нему. Молекулярный водород H_2 – это два атома водорода, объединённых в одну молекулу. Атомарный водород H – это отдельно существующие атомы. Ионизированный водород H^+ – это ядра атома водорода (протоны), отделённые от электронов.

То, что основным компонентом межзвёздного газа является водород, стало ясно благодаря наблюдениям российско-американского астронома Отто Струве и американского астронома и геофизика Кристиана Элви, а также теоретической интерпретации датского астронома Бенгта Георга Даниеля Стрёмгрена. В 1938 году Струве и Элви впервые сумели зафиксировать линии излучения водорода H-альфа за пределами ярких эмиссионных туманностей. Механизм образования этих линий предложил в 1939 году Стрёмгрен, который связал их появление с наличием источника ионизирующего излучения – горячих звёзд. Их температура настолько высока, что их излучение может ионизировать достаточно большую часть водорода рядом с ними. То есть оторвать электроны от атомов водорода. Помимо процесса ионизации в среде происходит процесс рекомбинации или воссоединения электрона с ионом, но при этом электрон может рекомбинировать в одно из возбуждённых состояний, а потом спускаться на более низкие энергетические уровни, например, на второй, воспроизводя различные серии линий в спектре. Таким образом Стрёмгрен объяснил возникновение линий H-альфа в спектре межзвёздного газа и подтвердил гипотезу об обнаружении ионизированного водорода: эта линия возникает при переходе электрона с третьего на второй энергетический уровень.

Новым важным каналом для исследования космоса стали наблюдения в радиодиапазоне. Они начались в 1932 году с открытия Карла Янского – американского физика и радиоинженера. Он не был астрономом и занимался технической задачей – поиском помех для трансатлантической радиосвязи. В процессе работы Янский неожиданно обнаружил неопознанный источник радиоизлучения, который появлялся над горизонтом раз в сутки. Точное измерение периода (23 часа 56 минут) показало, что он не движется относительно звёзд и находится где-то в созвездии Стрелец. Теперь мы знаем, что это был центр Галактики, ярко светящийся в радиодиапазоне.



Отто Струве
(1897–1963)



Бенгт Стрёмгрен
(1908–1987)



Карл Янский
(1905–1950)

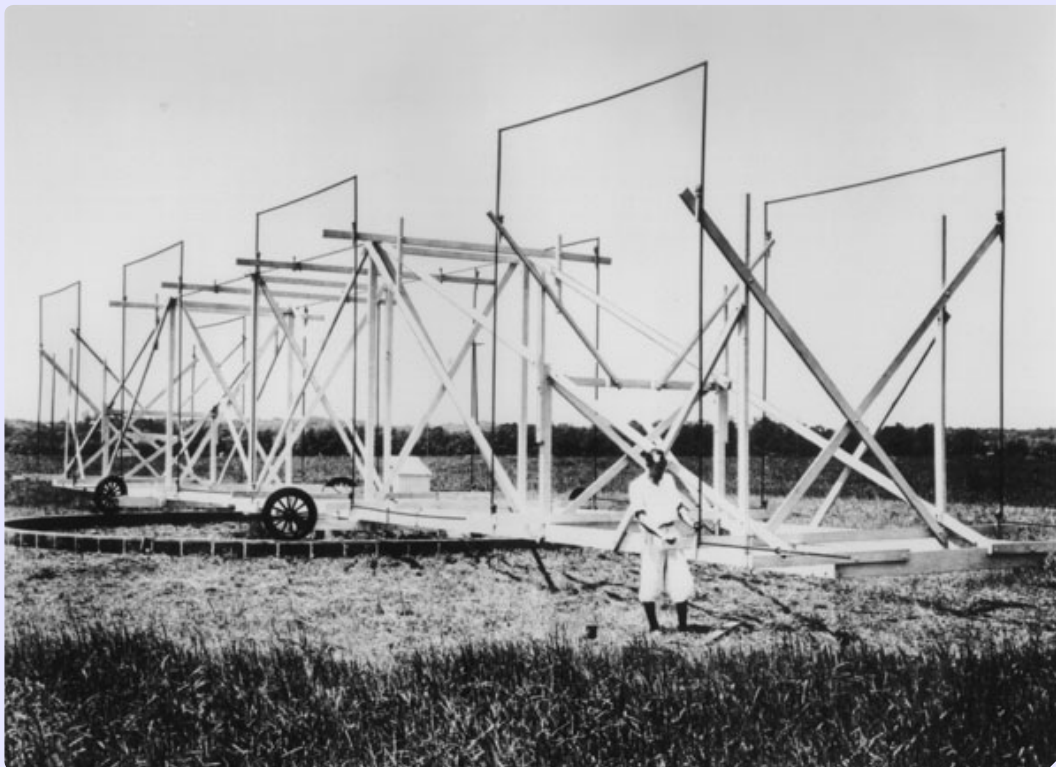


Рис. 6. Антенна Карла Янского

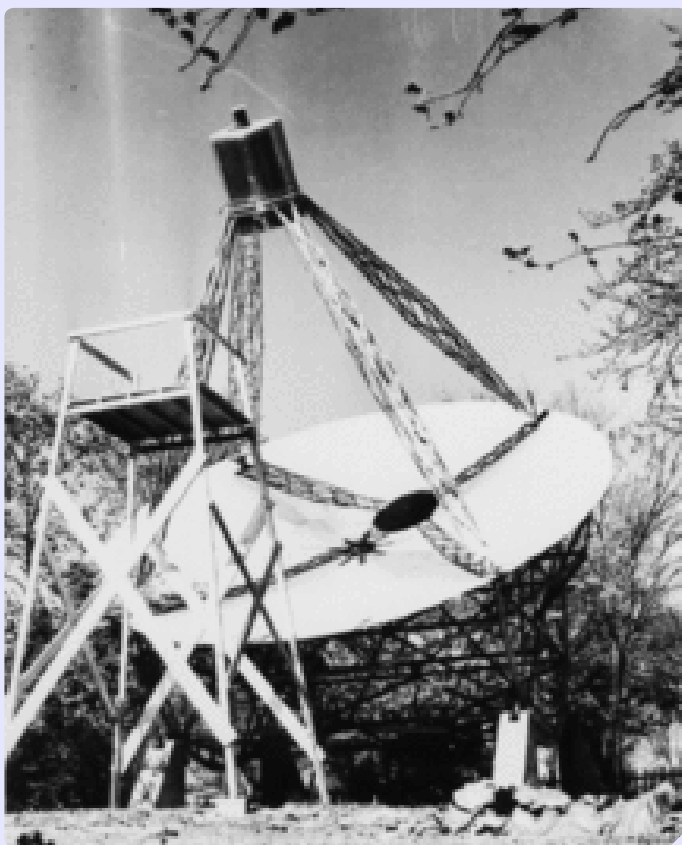


Рис. 7. Первый радиотелескоп. США, штат Иллинойс, 1937 год. Построен Гроутом Ребером

В 1944 году знаменитый нидерландский астроном Ян Оорт предложил своему аспиранту Хендрику ван де Хюлсту подумать, есть ли в радиодиапазоне спектральная линия, которую можно было бы наблюдать. Ван де Хюлст предсказал существование такой линии у нейтрального атомарного водорода на длине волны 21 см –



Ян Оорт
(1900–1992)

в этом диапазоне излучение почти беспрепятственно проходит через земную атмосферу. В 1951 году эту линию пронаблюдали в плоскости Галактики американский астроном Гарольд Юэн и американский физик Эдуард Пёрселл. Их наблюдения показали, что полная масса атомарного водорода в межзвёздной среде сопоставима с полной массой водорода, который есть в звёздах.



Хендрик ван
де Хюлст
(1918–2000)

Молекулярный водород H_2 наблюдать оказалось сложнее, поскольку его спектральные линии находятся в ультрафиолетовом диапазоне, недоступном для наблюдения с Земли из-за поглощения атмосферой. Прямые наблюдения стали возможны в 1970-е годы после запуска геофизических ракет в верхние слои атмосферы, только тогда линии межзвёздного H_2 удалось зарегистрировать на фоне спектра звезды кси Персея.



Рис. 8. Многообразие физических условий в межзвёздной среде. По горизонтальной оси показана концентрация вещества, по вертикальной оси – температура вещества

Многообразие состояний межзвёздной среды можно представить на диаграмме концентрация-температура (Рис. 8). От физических свойств газа, его температуры и плотности зависит и состояние водорода. Межзвёздная среда включает в себя как плотные холодные молекулярные облака, так и горячий разреженный (неплотный) ионизированный газ; кроме того, существуют диффузные облака, межоблачный газ и области ионизированного водорода.

Впрочем, то, что в межзвёздной среде принято называть плотным газом, по земным меркам считается вакуумом — в таком газе в кубическом миллиметре находится в среднем всего одна частица. Межзвёздная среда может быть ещё более разреженной: в горячем корональном³ газе с температурой около миллионов градусов, например, одна частица приходится на целый кубический дециметр. Если плотность «плотных и холодных» молекулярных облаков на деле оказывается не такой уж высокой, то их температура действительно очень низкая — меньше минус 200 градусов Цельсия. Такие температуры на Земле получают на специальных установках только физики-экспериментаторы.

³Корональный газ назван так по аналогии с разогретым газом в солнечной короне, но имеет меньшую плотность.

Химический состав межзвёздного вещества

Однако в межзвёздной среде есть не только водород, в ней присутствуют все элементы таблицы Менделеева. Самые лёгкие элементы — водород, гелий и литий — образовались в первые минуты жизни Вселенной, остальные — в процессе эволюции звёзд. Все элементы, кроме водорода и гелия, составляют всего около одного процента от массы всех межзвёздных атомов, но именно эти элементы порождают огромное разнообразие химических соединений как в космосе, так и на Земле.

Элемент	Содержание по отношению к водороду
He	0,0977
C	0,0000912
N	0,0000617
O	0,000389
Mg	0,00000148
Si	0,00000224
Fe	0,000000257

Таблица 1. Список наиболее распространённых элементов с их содержанием в межзвёздной среде

Даже самые плотные участки межзвёздной среды по сравнению с земными условиями очень разреженные, и поначалу считалось, что при таких низких плотностях никаких химических процессов происходить не может. Кроме того, ультрафиолетовое излучение от молодых горячих звёзд должно эффективно разрушать молекулы. Несмотря на это, межзвёздные молекулы были обнаружены.



В 1937 году линии поглощения, найденные в спектрах ярких звёзд в оптическом диапазоне, удалось соотнести с определёнными молекулами — CH , CH^+ , CN . В лабораторных условиях такие молекулы быстро разрушаются, а в межзвёздной среде, как оказалось, могут существовать стабильно. В последующие десятилетия в радиодиапазоне были открыты линии излучения гидроксила OH на длине волны 18 см (1963), аммиака NH_3 на длине волны 1 см (1968), воды H_2O на длине волны 1 см (1969). В миллиметровом диапазоне наблюдали линии угарного газа CO (1970) — второй по распространённости молекулы после молекулярного водорода.

На сегодняшний день известно более 200 типов межзвёздных молекул. Большинство из них очень простые и состоят из 2–3 атомов. Самые распространённые молекулы могут быть привычными и безопасными, как знакомые нам вода H_2O , углекислый газ CO_2 или молекулярный азот N_2 , которого много в земной атмосфере. Но очень многие из межзвёздных молекул ядовиты, например, угарный газ CO , синильная кислота HCN .

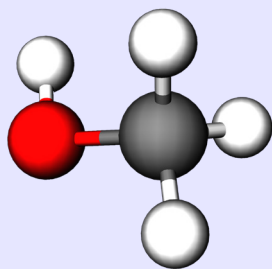


Рис. 9. Молекула метилового спирта (метанола) CH_3OH

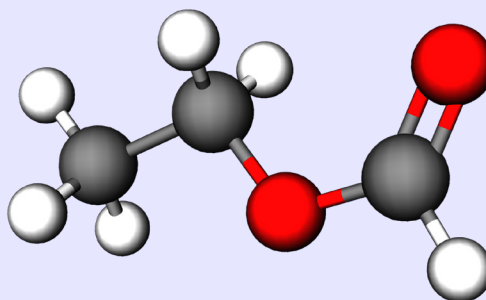


Рис. 10. Молекула этилформиата $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$

Обнаруживаются и более сложные молекулы, в том числе органические. Например, метиловый спирт CH_3OH (Рис. 9) и этилформиат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ (Рис. 10), который является важной составляющей характерного вкуса лесной малины. Подобные открытия демонстрируют, что в межзвёздной среде формируются сложные органические молекулы. Исходя из этого, можно предположить, что и аминокислоты, и другие предбиологические молекулы могли появиться ещё в молекулярных облаках.

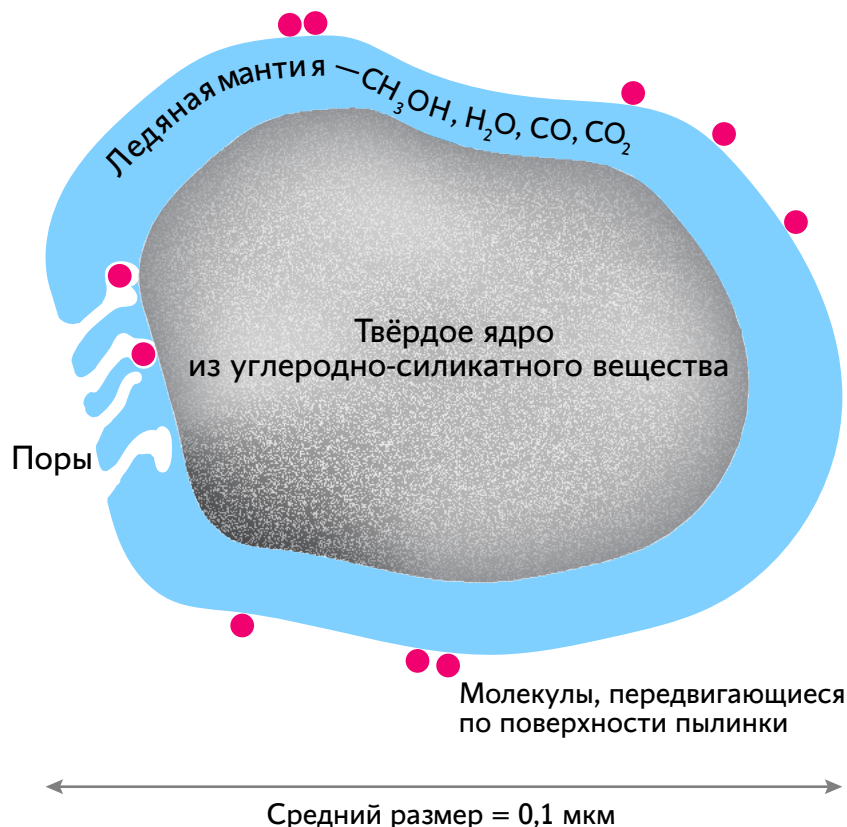
Космическая пыль

С молекулами тесно связан ещё один компонент межзвёздного вещества — космическая пыль. Пыль — это мельчайшие твёрдые частицы из соединений углерода и кремния, похожие на мелкий песок. Они состоят из тугоплавкого ядра, иногда покрытого ледяной мантией. Размер межзвёздных пылинок обычно составляет всего несколько миллионных долей сантиметра. Частицы пыли образуются в оболочках красных гигантов на поздней стадии эволюции и при взрывах некоторых сверхновых. Именно из пыли впоследствии формируются планеты.

Пыль защищает (экранирует) молекулы от разрушительного действия ультрафиолетового излучения молодых звёзд. Кроме того, пылинки помогают ускорить химические реакции. В холодных условиях молекулярных облаков многие атомы и молекулы могут столкнуться с пылинкой и прилипнуть к ней (Рис. 11). На пыли химические реакции происходят гораздо эффективнее, а сформированные на ней молекулы могут затем перейти в газ.

 Пыль — это мельчайшие твёрдые частицы из соединений углерода и кремния

Рис. 11. Пылинка, покрытая ледяной мантией

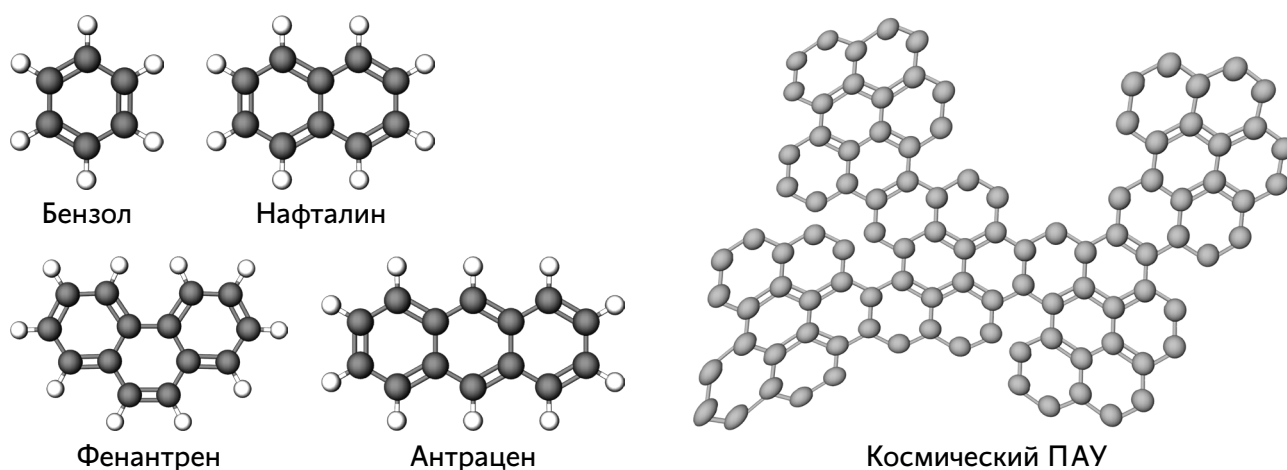


На пыли формируются как сложные органические молекулы (метанол, этанол, уксусная кислота, диметиловый эфир, формамид, метилформиат), так и самые простые — вода и молекулярный водород. Именно сформированная в космосе вода наполняет земные океаны.

Одни из самых мелких пылинок, которые называются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), имеют размер около десятимиллионной доли сантиметра. ПАУ — это даже не совсем пылинки, скорее, сложные органические молекулы, содержащие несколько бензольных колец (Рис. 12). Одной из простейших таких молекул является нафталин, тот самый, который кладут в шкаф для борьбы с молью. Колец внутри одной ПАУ может быть очень много, и точная структура этих частиц пока остаётся неизвестной. На поверхности ПАУ, как и на пылинках, могут происходить химические реакции, а фрагменты ПАУ могут сами участвовать в формировании молекул.

✎ Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)

Рис. 12. Простые ароматические углеводороды и космические ПАУ





Помимо формирования молекул на пылинках, в астрономии важно взаимодействие излучения, исходящего от звёзд, с пылью. В зависимости от соотношения между длиной волны λ и размером пылинки d это взаимодействие можно разделить на три типа:

1. $\lambda \ll d$ – крупные пылинки полностью заслоняют свет, как непрозрачная стенка⁴;
2. $\lambda \gg d$ – мелкие пылинки почти не препятствуют распространению света;
3. $\lambda \sim d$ – сложное взаимодействие.

То есть пылинки типичных межзвёздных размеров (~0,1 мкм) хорошо поглощают ультрафиолетовое и более коротковолновое излучение, сложным образом взаимодействуют с видимым излучением и слабо препятствуют распространению инфракрасных и радиоволн.

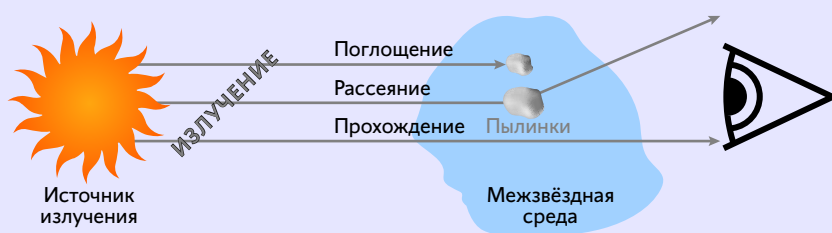


Рис. 13. Взаимодействие излучения с пылью в зависимости от размера пыли и длины волны

К третьему типу как раз относится взаимодействие межзвёздной пыли с излучением в видимом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах. В этом режиме более длинноволновое (более красное) излучение далёких звёзд лучше проходит через содержащую пыль среду, отчего и возникает наблюдаемое межзвёздное покраснение света.

Другие компоненты межзвёздной среды

Кроме газа, пыли и ПАУ в межзвёздной среде присутствуют магнитное поле, космические лучи и межзвёздное излучение.

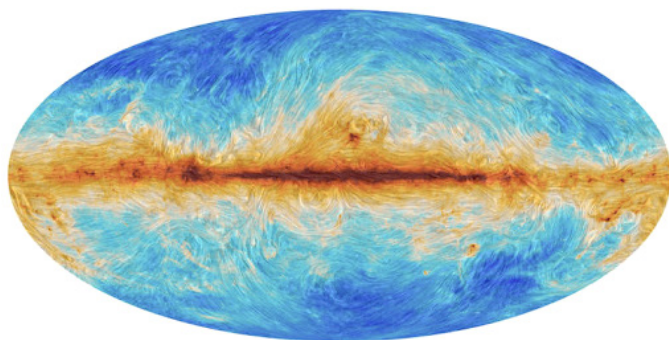


Рис. 14. Магнитные поля в нашей Галактике. Данные космического телескопа «Планк» (Planck). Цвет соответствует тепловому излучению пыли, что можно интерпретировать как количество пыли

Магнитное поле влияет на движение заряженных частиц газа, а также заставляет пылинки неправильной (не сферической) формы выстраиваться вдоль линий поля. Наблюдение света, отражённого такими пылинками, позволяет определить направление магнитного поля в Галактике (Рис. 14).

Магнитное поле

⁴ Очень энергетичные фотоны (рентген, гамма-лучи) пронзают пылинку насквозь.

Космические лучи — ядра водорода, гелия, железа и других элементов, движущиеся с огромными скоростями, — могут проникать глубоко в облака и разрушать или ионизировать молекулы, отрывая от них электроны. Они могут образовываться, например, при вспышках сверхновых, но пока об их происхождении известно не всё.

 Космические лучи

Межзвёздное излучение — это распространяющиеся в межзвёздной среде фотоны, то есть свет от всех объектов Галактики, в основном от молодых горячих звёзд. Оно может нагревать вещество и участвовать в химических реакциях. Эффективнее всего это делают ультрафиолетовые фотоны.

 Межзвёздное излучение

Ещё в начале 20-го века межзвёздное вещество открывали в основном случайно, и его свойства часто оказывались неожиданными. Шаг за шагом наблюдательные факты складывались в согласованную научную картину, и межзвёздная среда стала одним из важных объектов исследования в астрономии. К концу 20-го века были обнаружены основные компоненты и фазы межзвёздной среды, и в настоящее время у нас есть наблюдательные данные, которые позволяют исследовать её природу более детально.

Именно в межзвёздной среде происходит процесс звездообразования.

Межзвёздная среда и рождение звёзд

Чтобы сформировать звёзды из межзвёздного вещества, его нужно сжать. Для этого плохо подходит горячий корональный газ или неплотная нейтральная среда, состоящая из атомарного газа. Звёзды рождаются в молекулярных облаках — самых холодных (от 10 до 50 K) участках межзвёздной среды с самой высокой концентрацией частиц (более 200 частиц/см³). Как раз в молекулярных облаках, которые занимают меньше процента объёма межзвёздной среды и содержат около 1/5 массы межзвёздного вещества в Галактике, можно найти физические условия, идеально подходящие для звездообразования.

 Молекулярные облака

Основным компонентом молекулярных облаков является молекулярный водород H₂, однако его сложно наблюдать, поэтому их в основном исследуют по косвенным данным. Так, например, по излучению молекулы CO, которой в молекулярных облаках довольно много (10⁻⁴ от водорода), удалось примерно оценить массу этих объектов. Масса типичного молекулярного облака в плоскости Галактики составляет несколько миллионов масс Солнца. Размеры молекулярных облаков составляют десятки световых лет. В основном они находятся в спиральных рукавах Галактики.

Вещество в молекулярных облаках неоднородно, его плотность может сильно различаться в зависимости от того, куда мы смотрим. В них присутствуют как более разреженные области, так и плотные волокноподобные структуры, с которых начинается процесс звездообразования. Наиболее плотными участками молекулярного облака являются плотные ядра, в которых могут сформироваться звёзды. Их называют протозвёздными ядрами.

 Протозвёздные ядра

Благодаря высокой плотности протозвёздные ядра могут начать сжиматься под воздействием собственной гравитации. В какой-то момент давления газа в облаке становится недостаточно, чтобы противостоять силе притяжения, которая сжимает массивный газ. Говорят, что облако стало гравитационно неустойчивым. В процессе сжатия газ нагревается и уплотняется, что приводит к образованию протозвезды, а также протопланетного диска, а затем и планетной системы вокруг неё.

Противодействие давления нагретого газа и гравитации продолжается и после формирования протозвезды. В первые несколько миллионов лет она находится в равновесии за счёт энергии, выделяемой при сжатии под действием сил тяготения, и только потом в её недрах загораются термоядерные реакции. В маломассивных протозвёздах ($<0,08$ масс Солнца) не может начаться термоядерное горение водорода, в них горят только дейтерий, литий, бериллий и бор. Такие объекты называют коричневыми карликами. Другие протозвёзды имеют достаточно массы, чтобы в них началось термоядерное горение водорода с образованием ${}^4\text{He}$ (CNO и p-p цикл, см. урок Эволюция звёзд, или Самые грандиозные события во Вселенной). На диаграмме Герцшпрунга — Расселла протозвёзды находятся чуть выше главной последовательности, они постепенно сжимаются и разогреваются, приближаясь к ней. Путь до главной последовательности занимает от менее 100 тыс. лет у массивных звёзд (>8 масс Солнца) до 100 млн лет и дольше у маломассивных звёзд.

Молекулярные облака не могут существовать в Галактике бесконечно долго. На них воздействуют различные факторы, из-за которых изначально устойчивое облако может уплотниться и стать гравитационно неустойчивым. Таким фактором может быть столкновение двух молекулярных облаков, близкий взрыв сверхновой, воздействие излучения молодых массивных звёзд или галактических спиралей. Хотя образование звёзд начинается не сразу, наблюдения показывают, что время жизни молекулярных облаков всего в несколько раз превышает время, необходимое для сжатия под действием гравитационной неустойчивости. В зависимости от конкретного облака продолжительность его жизни может варьироваться от 3 до 100 миллионов лет, что совсем немного по галактическим меркам. Солнце делает один оборот вокруг центра Галактики примерно за 250 миллионов лет, а молекулярные облака за время своей жизни не успевают сделать ни одного оборота.

 Коричневые карлики

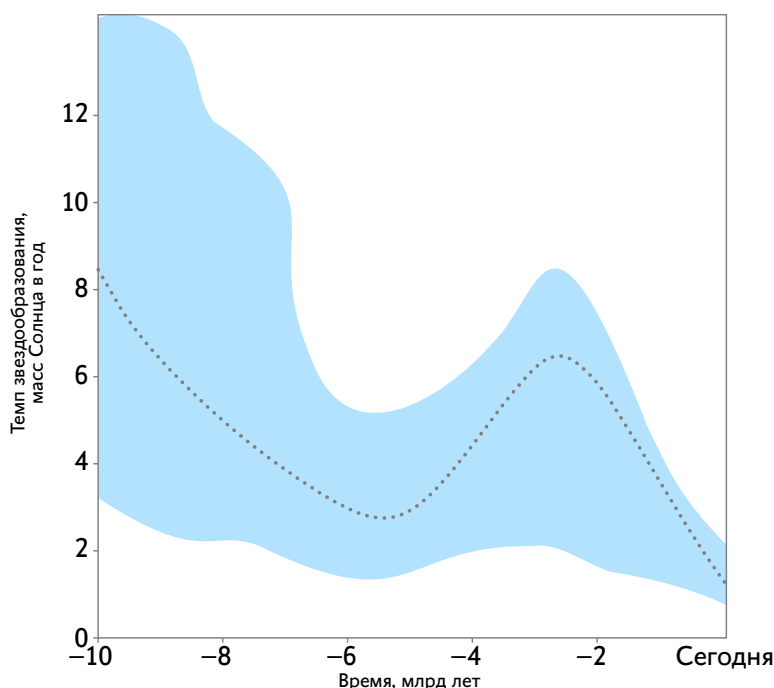


Рис. 15. Столпы Творения – молекулярное облако. Плотные облака, где формируются звёзды, окружены разреженным газом и УФ-излучением от близких молодых звёзд. Изображение получено космическим телескопом им. Хаббла

Благодаря большой плотности молекулярных облаков в них с трудом проникает разрушительное ультрафиолетовое излучение, например, приходящее от зарождающейся рядом звезды. Поэтому в этих облаках спокойно формируются и существуют разные молекулы, даже довольно сложные. И пыль, и молекулы играют важную роль в звездообразовании. Для того, чтобы гравитационно неустойчивое облако продолжало сжиматься, а после сформировалась протозвезда, необходимо в процессе сжатия снижать давление, а именно, охлаждать среду. Как раз пыль (и в меньшей степени молекулы) хорошо этому способствует, так как она забирает энергию газа и высвечивает её за пределы облака в длинноволновом диапазоне, в котором облако более прозрачно.

Звёзды образуются во всей Галактике, но темп звездообразования, то есть скорость образования звёзд, меняется во времени и пространстве. В настоящее время в Млечном Пути он составляет в среднем около одной массы Солнца в год. Построив модель образования и эволюции звёзд в Галактике и сравнив её предсказания с наблюдаемым распределением звёзд разных спектральных классов, можно восстановить историю звездообразования. В прошлом можно найти две эпохи, когда темп звездообразования был во много раз выше: 1–5 млрд лет назад и более 8–10 млрд лет назад (Рис. 16). Звёзды, сформировавшиеся в те времена, можно соответственно разделить на две большие группы. К первой группе относятся звёзды так называемого населения I, самого молодого, наиболее позднего, — это звёзды тонкого диска Галактики, в том числе Солнце. К населению II относятся звёзды толстого диска Галактики и гало, в том числе шаровые скопления.

Кроме них отдельно выделяют гипотетические звёзды населения III — самые первые звёзды, образовавшиеся во Вселенной, которые пока не удалось пронаблюдать. Возможно, увидеть свет первых звёзд удастся с помощью космического телескопа им. Джеймса Уэбба, который был успешно запущен 25 декабря 2021 года.



 Толстый диск — область дисковых галактик, толщина которого в несколько раз превосходит толщину тонкого диска

 Гало — звёздная подсистема галактики, имеющая сферическую структуру, уплотнённую к центру. Состоит из старых звёзд низкой металличности

Рис. 16. Темп звездообразования в Галактике в зависимости от времени (по данным из статьи Mor et al. 2019). Голубым закрашен возможный диапазон значений

Важно отметить, что пыль участвует в образовании только современных звёзд населения I и II. Звёзды населения III, формировавшиеся в ранней Вселенной, состояли только из лёгких элементов (водород, гелий, литий) и в конце своей жизни обогатили межзвёздное пространство новыми элементами и пылью.

Межзвёздная среда и образование планетных систем

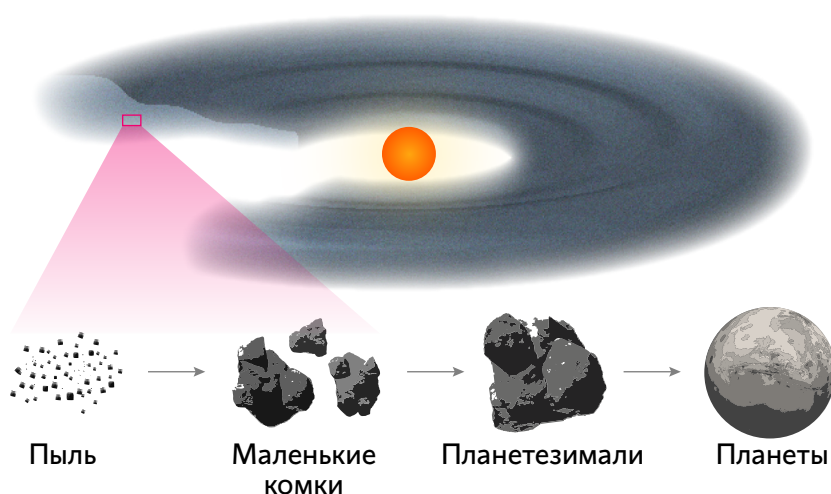
Звёзды, формирующиеся из протозвёздных ядер, могут быть как маломассивными (меньше 8 масс Солнца), так и массивными. Процесс звездообразования несколько отличается для этих двух групп.

Формирование маломассивных звёзд, подобных Солнцу, занимает десятки миллионов лет. В процессе сжатия облака образующаяся звезда успевает частично рассеять окружающий газ, из которого она сформировалась, поэтому мы можем наблюдать ранние стадии её образования. В частности, можно видеть, что не всё вещество облака сразу падает на образовавшуюся протозвезду. Газ в исходном облаке не неподвижен, для него характерно хаотичное движение и образование вихрей, то есть разные участки облака могут иметь разные скорости. При сжатии некоторые из этих скоростей компенсируют друг друга, но небольшой избыток вращения в каком-то направлении всё равно остаётся. Во вращающемся и сжимающемся протозвёздном облаке центробежная сила затрудняет сжатие в направлении, перпендикулярном оси вращения, и не препятствует сжатию вдоль оси вращения. Так получается, что газ и пыль вращаются вокруг протозвезды примерно в одной плоскости и образуют уплотнённую структуру, которая называется протопланетным диском (Рис. 17).

 Формирование маломассивных звёзд

 Протопланетный диск

Рис. 17. Схематическое изображение протопланетного диска и его превращения в планетную систему



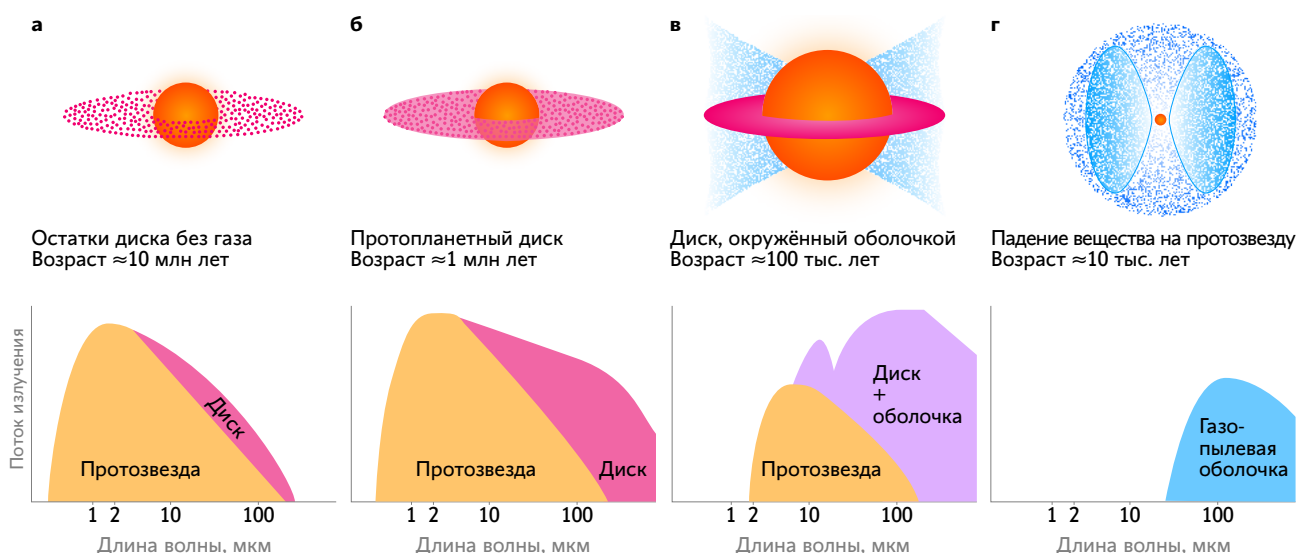
Впоследствии протопланетные диски превращаются в планетные системы. По размеру протопланетные диски чуть больше Солнечной системы, они имеют небольшую толщину, которая увеличивается к внешнему краю. Часть падающего на звезду вещества диска не попадает на неё, а выбрасывается в перпендикулярном направлении в виде джетов—узких струй быстро движущегося газа. Кроме того, на ранних стадиях диск окружает оболочка из остатков межзвёздного облака, которая понемногу добавляет в него

вещество. Она рассеивается, когда звезда становится достаточно яркой, чтобы излучаемые ею фотоны, поглощаясь, придавали частицам газа скорость, достаточную для покидания формирующейся планетной системы.

Протопланетные диски очень малы по астрономическим масштабам, они во много тысяч раз меньше, например, звёздных скоплений или молекулярных облаков, и их трудно разглядеть в деталях даже в самые большие телескопы. Но даже если звезда видна только как светящаяся точка, можно понять, что вокруг неё есть диск. У объектов с протопланетными дисками, помимо излучения протозвезды в видимом диапазоне, есть дополнительное инфракрасное излучение, которое идёт от нагретой пыли в диске. С течением времени диск рассеивается, звезда становится ярче, и инфракрасное излучение ослабевает, так что по его величине можно судить и о возрасте молодой звезды.

Для этого достаточно сравнить яркость излучения объекта в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, например, на длинах волн 2 и 25 мкм (Рис. 19). В одних объектах излучение на 2 мкм (от протозвезды) гораздо сильнее, чем на 25 мкм (от диска). В них диск уже почти рассеялся, и их возраст составляет около 10 млн лет (Рис. 18 а). У более молодых объектов излучения на 25 мкм больше, почти столько же, сколько на 2 мкм, это полноценные протопланетные диски возрастом около миллиона лет (Рис. 18 б). Если на 25 мкм излучение ярче, чем на 2 мкм, то мы имеем дело с молодым объектом, в котором диск ещё окружён пылевой оболочкой, именно она добавляет излучение на 25 мкм и заслоняет свет звезды на 2 мкм — таким объектам всего несколько сотен тысяч лет (Рис. 18 в). В некоторых объектах излучения звезды не видно совсем, она окружена плотной газопылевой оболочкой и имеет возраст всего несколько десятков тысяч лет (Рис. 18 г).

Рис. 18. Молодые звёзды на разных стадиях эволюции. Эволюция идёт справа налево



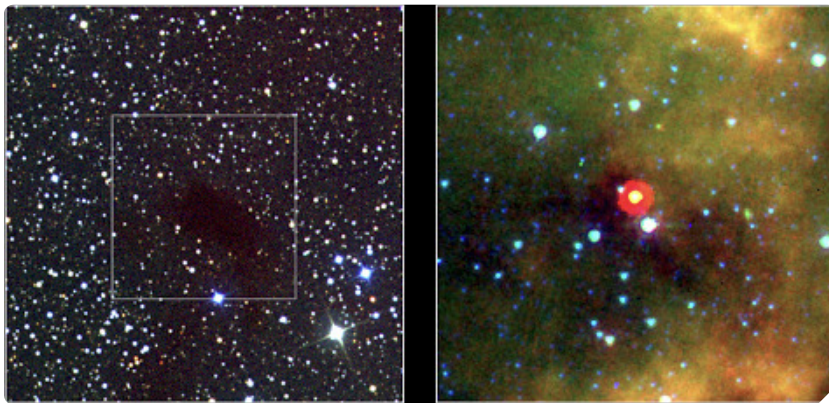


Рис. 19. Протозвёздное ядро туманности L1014 в видимом (слева) и инфракрасном (справа) диапазонах

Если мы посмотрим на газопылевую туманность L1014 в видимом диапазоне, то мы увидим только плотное тёмное облако. В инфракрасном диапазоне в ней уже видна формирующаяся звезда (Рис. 19).

Массивные звёзды тоже образуются в плотных газопылевых структурах молекулярных облаков, но благодаря большой массе их сжатие и эволюция происходят намного быстрее, чем у маломассивных звёзд. Ранние стадии этого процесса почти невозможно разглядеть, поскольку окружающая поглощающая оболочка ещё не успевает рассеяться за время, необходимое для формирования и эволюции диска. Несмотря на это, в отдельных случаях диски вокруг молодых массивных звёзд были обнаружены, хотя разглядеть в них детали по-прежнему не удавалось (Рис. 20). Молодые массивные звёзды становятся хорошо заметны на более поздних стадиях, когда они способны уже ионизировать и нагреть окружающую среду, образуя вокруг себя область ионизированного водорода (Рис. 21). В таких областях редко видна сама молодая массивная звезда — в основном там ярко светит газ в линии H-альфа. Такие объекты можно наблюдать и в инфракрасном диапазоне, где светит нагретая пыль разного размера и химического состава. На границе области, где рождается массивная звезда, также могут обнаруживаться протозвёздные ядра, которые начали сжиматься под действием её расширяющейся оболочки.

✎ Формирование массивных звёзд

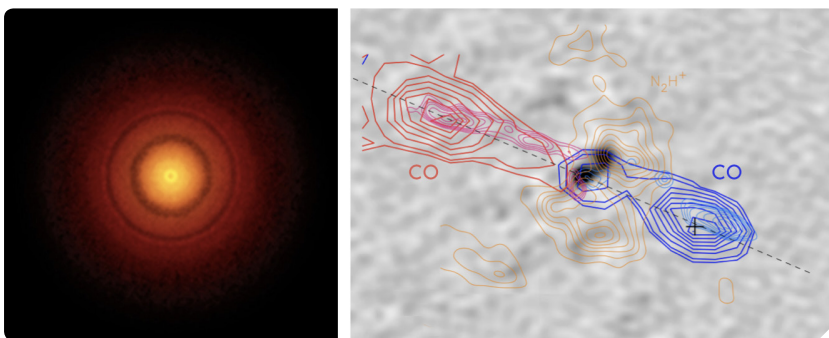


Рис. 20. Слева протопланетный диск вокруг звезды TW Гидры ($0,7 M_{\odot}$), видны детали распределения пыли в диске. Справа – вещество вокруг S255IR ($20 M_{\odot}$), присутствие диска выявляется только по скорости движения газа (красный от нас, синий к нам)

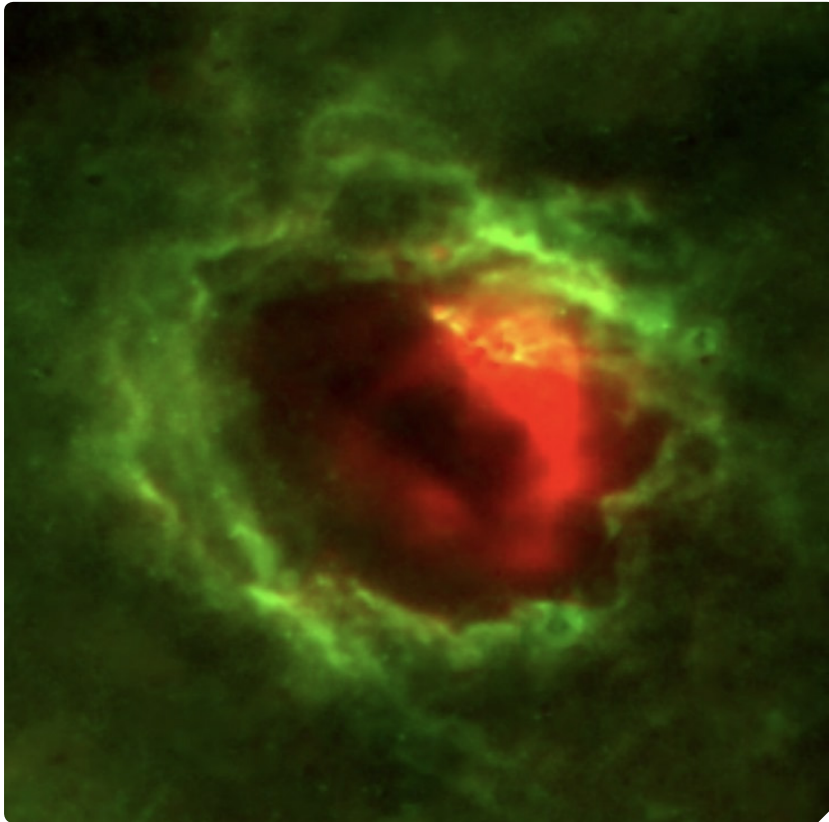


Рис. 21. Туманность N80 – область ионизированного водорода вокруг молодой массивной звезды (или нескольких звёзд). Красным цветом показано излучение 24 мкм (крупная пыль), зелёным – излучение на 8 мкм (ПАУ и мелкая пыль). Изображение космического телескопа Спитцер (Spitzer Space Telescope)

В молекулярных облаках звёзды образуются обычно целыми скоплениями. В процессе звездообразования часть газа рассеивается, и со временем звёзды могут разлететься в разные стороны и продолжить жизнь в одиночку. Однако если исходное облако было достаточно массивным, то образовавшиеся из него звёзды будут связаны гравитацией и продолжат существовать как скопление.

Долгие годы изучения межзвёздной среды позволили многое узнать о её структуре и свойствах, и ещё многое, несомненно, предстоит узнать. В межзвёздной среде идёт химическая эволюция, порождающая сложные органические молекулы, которые могут быть предшественниками зарождения жизни, формируются новые звёзды и планеты, среди которых могут быть планеты, подобные Земле. Почти незаметная для обычного земного наблюдателя, межзвёздная среда играет важную роль в жизни Галактики.



Автор текста:

Тамара Молярова,
к. ф.-м. н., младший научный
сотрудник Института
астрономии РАН



Автор текста:

Анастасия Топчиева,
к. ф.-м. н., младший научный
сотрудник Института
астрономии РАН

Используемые иллюстрации:

Рис. 1. Скопление Плеяды. Donald Pelletier.

Рис. 2. Эмиссионная туманность Душа. NASA.

Рис. 3. Минтака и туманность Ориона. Matthew Spinelli.

Рис. 4. Туманность Кошачий Глаз. NASA.

Рис. 5. Тёмные туманности Конская Голова и Угольный Мешок. Арне Хенден (US Naval Observatory, Flagstaff). Изображение обработано Алом Келли. ESO.

Рис. 6. Телескоп Карла Янского. NRAO // AUI // NSF.

Рис. 7. Первый радиотелескоп. Grote Reber.

Рис. 14. Магнитные поля в нашей Галактике. ESA.

Рис. 15. Столпы Творения. NASA, Jeff Hester, and Paul Scowen (Arizona State University).

Рис. 19. Протозвёздное ядро в видимом и инфракрасном диапазонах. NASA // JPL-Caltech // N. Evans (University of Texas at Austin).

Рис. 20. Протопланетный диск вокруг звезды TW Гидры и вещество вокруг S255IR. Andrews et al. 2016, Zinchenko et al. 2015.

Рис. 21. Туманность N80. Spitzer Space Telescope NASA, обработка: А.П. Топчиева.