12+

Алексей Дмитриевич Часов

Пространство и излучение



Алексей Часов

Пространство и излучение

«Издательские решения»

Часов А. Д.

Пространство и излучение / А. Д. Часов — «Издательские решения»,

Межзвёздное пространство не пусто. Его заполняют газ, пыль, магнитные поля, космические лучи и излучение. От этих факторов зависят условия полётов за пределами Солнечной системы.В книге изложен состав межзвёздной среды, её фазы, взаимодействие с гелиосферой, виды космического излучения и их влияние на технику и живые организмы. Отдельное место занимает авторская динамическая модель мультиверсума — от пре-Большого Взрыва до фазового существования в волне инфляции.

© Часов А. Д.
© Издательские решения

Содержание

Введение 6
Глава 1. Пространство 9
Конец ознакомительного фрагмента. 108

Пространство и излучение

Алексей Дмитриевич Часов

Из цикла «Астра — справочник фантазёра»

© Алексей Дмитриевич Часов, 2026

ISBN 978-5-0071-6520-4
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

Введение

Когда мы смотрим на ночное небо, пространство между звёздами выглядит почти пустым.

На самом деле пространство меж звезд не пустое. Оно заполнено межзвездной средой: газом во всевозможных формах — от разреженной плазмы до плотных облаков, пылью, магнитными полями, потоками заряженных частиц и электромагнитным излучением. Именно в этой среде рождаются новые звёзды, и именно через неё проходят космические аппараты, когда покидают пределы Солнечной системы. Её плотность очень низкая — в среднем от десятых долей до единиц атомов на кубический сантиметр, но объёмы настолько велики, что общая масса этой среды в Галактике — внушительна.

Наша планетная система не просто находится в межзвёздной среде, она активно с ней взаимодействует. Солнце создаёт вокруг себя обширную область, которую называют гелиосферой, по сути это гигантский пузырь, наполненный солнечным ветром — потоком заряженных частиц, которые непрерывно истекают с поверхности Солнца. Гелиосфера простирается далеко за орбиты планет и служит своеобразным щитом: она отклоняет значительную часть галактического вещества и космических лучей. Граница гелиосферы, где давление солнечного ветра уравновешивается давлением межзвёздной среды, называется гелиопаузой. Понимание межзвёздной среды важно по нескольким причинам. Во-первых, от её состояния зависят условия, в которых формируются звёзды и планетные системы. Плотные холодные облака становятся колыбелью новых звёзд, а более разреженный горячий газ заполняет большие объёмы. Во-вторых, состав и структура среды влияют на то, как распространяется излучение и как движутся космические лучи. В-третьих, для любых будущих полётов за пределы Солнечной системы нужно знать, с чем столкнётся аппарат: какая плотность газа, какие потоки частиц, какие магнитные поля. В 2012 и 2018 годах аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» пересекли её и вышли в межзвёздное пространство. Их данные, вместе с дистанционными наблюдениями спутника IBEX, показали, что гелиосфера несимметрична, а её граница представляет собой протяжённую турбулентную область взаимодействия, а не тонкую разделительную поверхность. Данные «Вояджеров» уже дали первые прямые измерения этих условий. Они показали, что межзвёздная среда в окрестностях Солнца не является однородной и что локальное облако, в котором мы находимся, имеет свои особенности.

Современные наблюдения существенно дополнили наши знания о структуре и составе межзвездного пространства. Космический телескоп «Джеймс Уэбб», обсерватории Gaia, Chandra и другие инструменты позволили лучше увидеть распределение газа и пыли, обнаружить сложные органические молекулы в холодных облаках и проследить, как сверхновые взрывы обогащают среду тяжёлыми элементами. Эти данные хорошо укладываются в трёхфазную модель межзвёздной среды — холодные плотные облака, тёплый нейтральный и ионизованный газ и очень горячий разреженный газ, — она по-прежнему остаётся рабочей, хотя точные пропорции фаз и их взаимодействие продолжают уточняться. Всё это делает межзвёздную среду не просто фоном, а активной и структурированной составляющей Галактики.

Зачем об этом говорить в начале книги? Прежде чем обсуждать более общие вопросы о происхождении Вселенной и природе тёмных компонентов, полезно узнать, что уже известно о среде, которая находится буквально рядом — между звёздами нашей Галактики. Мы располагаем конкретными данными о ней, полученными из прямых наблюдений. Перед нами встают еще более масштабные загадки: почему обычная материя составляет лишь небольшую долю от того, что влияет на движение галактик, и откуда берётся ускоренное расширение. Но сначала, имеет смысл подробнее разобраться с тем, из чего состоит эта среда и почему она так важна для понимания как ближнего, так и дальнего космоса.

Прежде чем переходить к широким космологическим вопросам, стоит увидеть главное: между звёздами не пустота, а сложная среда, которую мы уже можем изучать напрямую. Знания о межзвёздной среде, гелиосфере и космическом излучении дают довольно подробную картину того, что происходит в нашей Галактике и в её ближайших окрестностях. Мы видим, как распределён газ, как сверхновые обогащают среду тяжёлыми элементами, как солнечный ветер взаимодействует с межзвёздным веществом и какое излучение приходит к нам из разных уголков космоса. Эти сведения опираются на прямые измерения и на наблюдения во всех диапазонах спектра. Однако даже при таком понимании остаются вопросы, которые выходят за пределы локальной среды и касаются Вселенной в целом.

Один из самых популярных вопросов связан с тёмной материей. Наблюдения показывают, что звёзды на окраинах галактик движутся быстрее, чем позволяет видимое вещество, а свет далёких объектов искривляется сильнее, чем можно было бы ожидать. Такие факты невозможно объяснить только обычной материей, поэтому в стандартную космологическую картину вводят дополнительную массу, называемой тёмной материей, она не излучает и не поглощает свет. Тёмная материя остаётся необходимой для описания наблюдений, но её природа по-прежнему неизвестна, поскольку за несколько десятилетий поисков ни в подземных лабораториях, ни на ускорителях, ни в космических лучах не было найдено частиц, которые могли бы её составлять. Это не означает, что общепринятая космологическая модель неверна, а лишь указывает, что она хорошо описывает поведение галактик и скоплений, принимая существование этой массы как данность.

С тёмной энергией ситуация похожая, но ещё более отстранённая. Наблюдения показывают, что расширение Вселенной в последние несколько миллиардов лет ускоряется. Если бы действовала только гравитация обычной и тёмной материи, расширение должно было бы замедляться, однако для объяснения эффекта ускорения, в модель включают дополнительный компонент — тёмную энергию. Её вклад вычисляется по данным реликтового излучения, распределению галактик и скорости расширения. Но откуда она берётся и почему её так много по сравнению с обычной материей, стандартная картина не объясняет, более того, неясно даже, чем именно является тёмная энергия: энергией вакуума, новым физическим полем или проявлением неизвестных свойств гравитации на огромных масштабах. Однако есть и более тонкие несоответствия. Например, стандартная модель ΛCDM не объясняет фундаментальный вопрос: почему во Вселенной почти нет антивещества? В ранней Вселенной вещества и антивещества должно было быть примерно поровну, однако сегодня мы видим почти только вещество. Сильное взаимодействие могло бы углубить асимметрию между частицами и античастицами сильнее, чем наблюдается на практике. Нарушение этой симметрии может происходить за счёт механизма, известного как электрослабый бариогенезис, однако наблюдаемая величина эффекта значительно ниже той, что следует из расчётов. Ещё одна проблема касается самой большой структуры Вселенной. На самых больших масштабах в реликтовом излучении заметны небольшие отклонения от идеальной однородности, которые стандартная модель описывает лишь частично. Все эти вопросы не разрушают общепринятую космологическую модель (ΛCDM), а наоборот, показывают границу её возможностей: модель хорошо работает, когда тёмная материя, тёмная энергия и некоторые начальные условия принимаются как данность, но хуже отвечает на вопрос, откуда эти данности взялись.

Именно поэтому возникает потребность посмотреть на эти явления с другой стороны. Если обычная материя составляет лишь несколько процентов от того, что влияет на крупномасштабную структуру и на расширение, возможно, остальные компоненты связаны не только с новыми частицами, но и с устройством самого пространства-времени. Геометрические идеи, например, гипотеза о дополнительных измерениях или теория струн, уже давно используются для описания устройства Вселенной. Такие геометрические концепции не обязательно верны, но именно они позволяют предположить, что у темных компонентов может быть общая при-

рода. В этой книге будет предложена геометрическая концепция — модель «Центральная нить теней мультиверсума», которая по своей сути не отрицает того, что уже известно о межзвёздной среде и излучении, и не претендует на то, чтобы заменить стандартную космологию, в приведенной модели автор пытается предложить единую картину происхождения тёмной материи и ускоренного расширения через геометрию пространства-времени. Пока же достаточно увидеть, что за пределами хорошо изученной локальной среды все еще остаются большие вопросы, которые не обесценивают уже полученные знания. Напротив, именно потому, что мы довольно много знаем о газе, пыли, магнитных полях и излучении, становится яснее, чего именно не хватает в объяснении более общих свойств Вселенной. И вот тут-то нам поможет геометрия, с помощью нее можно попытаться построить единую картину происхождения тёмной материи и ускорения Вселенной, используя лишь устройство самого пространства-времени. Именно воплощение предложенной модели и предлагает сделать автор во второй части книги. Не стоит воспринимать эту идею как истину в последней инстанции, это просто одна из дорог.

Книга состоит из двух частей. Первая часть книги рассказывает о том, что уже достаточно хорошо известно и опирается на наблюдения: как устроена межзвёздная среда, какое излучение приходит к нам из космоса и что современная наука знает о тёмной материи и тёмной энергии. Эти главы можно читать почти независимо друг от друга. Они дают конкретные сведения о среде между звёздами, о гелиосфере, о космических лучах и о том, почему для описания движения галактик и расширения Вселенной приходится вводить дополнительные компоненты, природа которых пока неизвестна. Затем начинается то, ради чего книга и писалась. Это изложение авторской геометрической концепции — модели «Центральная нить теней мультиверсума». Здесь уже не пересказ установленных фактов, а попытка собрать открытые вопросы в одну схему. Модель предлагает посмотреть, можно ли объяснить плотность тёмной материи через гравитационные тени от близких слоёв в дополнительных измерениях, а позднее ускоренное расширение — через медленную эволюцию радиона. Эта концепция не подаётся как готовая и доказанная теория; это гипотетическая конструкция, область применения которой ограничена рамками определённых допущений.

Вторую часть книги, автор рекомендует читать последовательно. Сначала объясняется, почему стандартная космология оставляет ряд вопросов открытыми, затем рассматривается исходная идея с пре-Большим Взрывом эфиром и рождением лагун, после этого — геометрия, которая могла сформироваться внутри вселенной. Только потом появляются более специальные вещи: гравитационные тени, динамика радиона и редкие локальные процессы в зонах отражения. При последовательном чтении связи между этими частями становятся яснее.

Книгу не обязательно читать за один раз. Главы, описывающие пространство, излучение и тёмные компоненты, могут быть прочтены по отдельности.

Если читать не спеша, основная идея будет постепенно проясняться. Сначала мы подробно разберём то, что уже известно о среде между звёздами и об излучении. Затем будет представлена одна из возможных геометрических гипотез, которая пытается связать открытые вопросы космологии. Книга предлагает посмотреть, можно ли найти единое объяснение тёмной материи и ускоренного расширения через геометрию пространства-времени. Модель оставляет место для дальнейшей работы. Именно поэтому имеет смысл начать с того, что лежит между звёздами, а затем постепенно перейти к самым большим тайнам космоса.

Глава 1. Пространство

В данной главе собрана информация по межзвёздной (МЗС) и около солнечной среде.

Межзвездная среда

Что заполняет бескрайние просторы между звездами? Глава, которую вы открываете, посвящена Межзвездной Среде (МЗС) — отнюдь не пустоте, а удивительно сложной и динамичной составляющей нашей Галактики. Это разреженная, но критически важная «ткань», сплетенная из атомарного и молекулярного газа, ионизованной плазмы, микроскопических пылевых частиц, пронизанная магнитными полями и потоками частиц. Благодаря революционным инструментам и миссиям начала XXI века — гигантским наземным и космическим телескопам, способным улавливать малейшие следы этого вещества в различных диапазонах излучения, — наше понимание состава, структуры и физики МЗС достигло невиданных высот. Мы готовы погрузиться в мир этой незримой материи, которая служит колыбелью для новых звезд и архивом галактической эволюции.

Наша собственная планетная система не плавает в МЗС безнадзорно. Солнце создает вокруг себя гигантский защитный магнитный «пузырь» — Гелиосферу. Этот кокон, наполненный солнечным ветром, простирается далеко за орбиты планет и служит щитом, отклоняющим значительную часть галактического вещества и излучений. Прорывные открытия последних лет принадлежат миссиям-первопроходцам: Вояджеры 1 и 2, Пионеры 10 и 11, которые в 2012 и 2018 годах соответственно прорвались сквозь гелиопаузу — границу, где давление солнечного ветра ослабевает перед напором межзвездной среды, — и вышли в истинно межзвездное пространство. Их данные, дополненные дистанционным картированием границы спутником *IBEX* (*Interstellar Boundary Explorer*, с 2008 г.), радикально изменили наши представления. Мы узнали, что гелиосфера не симметрична, а ее граница — это турбулентная зона сложного взаимодействия, а не резкая стенка.

Изучение МЗС и гелиосферы — это ключ к разгадке фундаментальных космических процессов: от зарождения звездных систем, подобной нашей, до крупномасштабной циркуляции вещества в Галактике. Научные данные первой четверти XXI века рисуют картину активной, структурированной среды, где происходят тонкие, но мощные взаимодействия. Эта глава представит вам последние точные факты о веществе, заполняющем межзвездное пространство, и о границе, отделяющей наш дом от галактического окружения, закладывая основу для понимания того, *как* мы изучаем еще более неуловимые космические феномены.

Межзвёздное пространство далеко не пусто. Хотя на первый взгляд оно кажется безбрежной пустыней, на самом деле оно заполнено нейтрино, заряженными частицами, отдельными атомами, молекулами, фотонами самых разных энергий — от жёсткого гамма-излучения до едва уловимого реликтового свечения космического микроволнового фона.

Согласно современным данным Gaia DR4 (2026) и уточнённым моделям Национальной радиоастрономической обсерватории, в окрестностях Солнца среднее расстояние между звёздами составляет примерно пять световых лет. В центральных областях Галактики звёзды теснятся гораздо плотнее, однако на её окраинах, где расположена наша Солнечная система, пространство между ними заметно шире. Именно поэтому всё, что находится в этой огромной области, учёные объединяют под одним названием — межзвёздная среда (МЗС).

Межзвёздная среда — это сложная смесь вещества и физических полей, пронизывающая пространство внутри галактик. В неё входят межзвёздный газ, космическая пыль (около одного процента от общей массы газа), электромагнитные поля, потоки космических лучей и, по современным представлениям, гипотетическая тёмная материя. Химический состав этой среды сложился в результате первичного нуклеосинтеза вскоре после Большого взрыва и

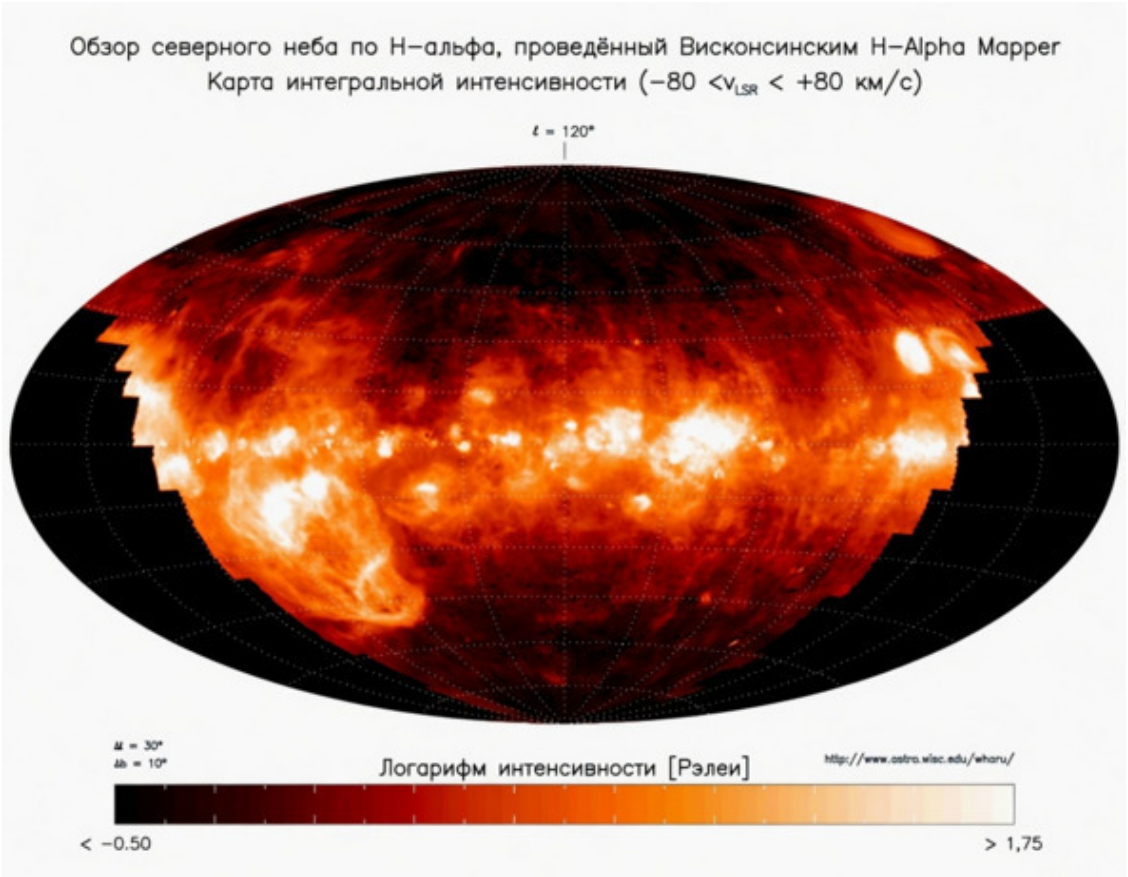
последующего обогащения тяжёлыми элементами в недрах звёзд. Звёзды на протяжении всей своей жизни теряют вещество через звёздный ветер, а в конце эволюции многие из них сбрасывают внешние оболочки, возвращая в окружающее пространство продукты ядерных реакций.

Распределение межзвёздной среды по объёму Галактики крайне неоднородно. Кроме крупномасштабных структур — галактической перемычки (бара) и спиральных рукавов — здесь существуют отдельные холодные и тёплые облака, окружённые более разреженным горячим газом. Главная отличительная особенность МЗС — её чрезвычайно низкая плотность: в среднем от 0,1 до 1 атома на кубический сантиметр. По уточнённым данным 2026 года в диске Млечного Пути плотность меняется от ~0,1 частицы/см^3 в горячей фазе до 10^6 частиц/см^3 в самых плотных молекулярных облаках.

После создания классической электромагнитной теории некоторые учёные XIX века предполагали, что пространство между звёздами заполнено особым невидимым светоносным эфиром, который служит средой для распространения световых волн. Роберт Паттерсон в 1862 году писал: «Это истечение является основой вибраций или колебательных движений в эфире, который заполняет межзвёздное пространство».

Открытия в области межзвёздной среды

В середине XIX века Уильям Хаггинс впервые применил спектроскопию к изучению туманностей и убедительно показал, что многие из них состоят из газа.



Распространение ионизированного водорода в межзвёздной среде в различных частях нашей Галактики. Изображение в диапазоне H-альфа. Получено в рамках обзора «Wisconsin H-Alpha Mapper survey» («HAM»).[1]

[1] Распределение ионизированного водорода (H-α) в Млечном Пути по данным обзора Wisconsin H-Alpha Mapper (WHAM). На карте показана структура межзвёздной среды нашей Галактики в линии H-альфа, отражающая области активного звездообразования и ионизированного газа в плоскости Галактики. (Credit: Wisconsin H-Alpha Mapper Northern Sky Survey,

С конца 1880-х годов Эдвард Барнард начал систематические глубокие фотографические съёмки неба. Он обнаружил многочисленные тёмные «окна» в Млечном Пути — области, где звёзды практически отсутствуют. Сначала учёный сравнивал их с солнечными пятнами, однако уже к 1899 году понял, что эти тёмные пятна вызваны поглощающей туманной материей. Именно

Распространение ионизированного водорода в межзвёздной среде в различных частях нашей Галактики. Изображение в диапазоне H-альфа. Получено в рамках обзора «Wisconsin H-Alpha Mapper survey» («HAM»).

Барнарду удалось получить первые чёткие снимки тёмных туманностей, которые выделяются силуэтами на фоне звёздного поля.

Решающий шаг к признанию существования холодной диффузной материи в космосе сделал в 1904 году Иоганн Гартман. Изучая спектры двойной звезды δ Ориона, он заметил неподвижные линии поглощения ионизированного кальция (длина волны 393,4 нм). Эти линии не участвовали в орбитальном движении компонентов системы. Гартман пришёл к выводу, что поглощающий газ находится не в атмосфере звезды, а в межзвёздном пространстве между ней и наблюдателем. Так было положено начало систематическому изучению межзвёздной среды как самостоятельного физического объекта.

Первые надёжные свидетельства существования межзвёздного газа появились в 1909 году благодаря работам Весто Мелвина Слайфера, а уже в 1912 году тот же исследователь подтвердил наличие межзвёздной пыли. Эти открытия стали возможны исключительно благодаря развитию спектроскопических методов.

В 1919 году Мэри Эгер обнаружила в спектрах δ Ориона и β Скорпиона чёткие линии поглощения натрия (589,0 и 589,6 нм). Это не только доказало присутствие натрия в межзвёздном пространстве, но и открыло путь к изучению химического состава космической среды с помощью спектрального анализа.

Дальнейшее развитие исследований было связано с детальным анализом линий кальция H и K. В 1936 году канадский астроном Карлайл Смит Билз, наблюдая спектры звёзд ε и ζ Ориона, обнаружил сложные двойные и асимметричные профили этих линий. Наблюдения показали, что межзвёздное вещество сосредоточено в отдельных облаках, которые движутся с разными скоростями относительно Земли. Асимметрия линий объяснялась эффектом Доплера и окончательно убедила астрономов в том, что вещество в межзвёздном пространстве распределено крайне неоднородно — в виде отдельных облаков и скоплений, а не равномерной диффузии.

Параллельно с изучением газовой составляющей межзвёздной среды учёные постепенно раскрывали и её физические свойства. Уже в 1912 году У. Пикеринг предположил, что наблюдаемое избирательное поглощение света на определённых длинах волн может быть вызвано не только пылью, но и газом вместе с газообразными молекулами, которые выбрасывают звёзды. В том же году Виктор Гесс открыл **космические лучи** — потоки высокоэнергетических частиц, приходящих из глубин космоса. Это открытие радикально изменило картину: межзвёздное пространство оказалось заполненным не только газом и пылью, но и заряженными частицами.

Особенно смелую идею высказал в 1913 году норвежский физик Кристиан Биркеланд. Он предположил, что значительная часть массы Вселенной может скрываться не в звёздах и туманностях, а именно в «пустом» межзвёздном пространстве — в виде свободных электронов и ионов.

Важный вклад в понимание структуры межзвёздной среды внёс Виктор Амбарцумян. Он обосновал современную концепцию, согласно которой вещество сосредоточено в отдельных

Haffner et al., 2003. University of Wisconsin-Madison / National Science Foundation)

облаках, а не распределено равномерно. Эта идея получила дополнительное подтверждение в работах Торндайка (1930), который подчеркнул: космическое пространство не может быть абсолютно пустым, поскольку звёзды постоянно испускают заряженные частицы. Последующие наблюдения полностью подтвердили эти теоретические выводы, показав сложную, «облачную» структуру межзвёздной среды с облаками разной плотности и химического состава.

В 2014 году НАСА существенно пополнило базу данных по полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ) во Вселенной. Особенно ярким стало открытие 2019 года: космический телескоп «Хаббл» впервые обнаружил в межзвёздной среде ионизированные молекулы бакминстерфуллерена (C_{60}) — сферические углеродные «бакиболы». Эти структуры представляют огромный интерес для астрохимии и изучения предбиотических процессов.

В 2020 году были получены прямые доказательства наличия водяного льда в составе межзвёздной пыли. А данные космического телескопа имени Джеймса Уэбба (JWST) за 2023—2025 годы значительно расширили картину: в протопланетных дисках выявлено более 300 органических соединений, включая сложные ПАУ с молекулярной массой до 400 а.е. м. Новые наблюдения 2026 года с помощью SPHEREx и JWST подтвердили широкое распространение водяного льда в звездообразующих регионах Млечного Пути, что подчёркивает роль межзвёздной среды как «хранилища» строительного материала для будущих планет и, возможно, жизни.

Исследование межзвёздной среды остаётся одной из самых увлекательных страниц современной астрофизики. Оно наглядно показывает, как постепенно менялось наше представление о том, что на самом деле заполняет пространство между звёздами.

Трёхфазная модель межзвёздной среды

В 1969 году Филд, Голдсмит и Хабинг предложили статическую двухфазную модель, которая объясняла наблюдаемые свойства МЗС. Согласно ей, существуют холодная плотная фаза ($T < 300$ K), состоящая из облаков нейтрального и молекулярного водорода, и тёплая межоблачная фаза ($T \approx 10^4$ K) из разреженного нейтрального и частично ионизованного газа.

В 1977 году Макки и Острайкер дополнили модель динамической третьей фазой — очень горячим газом ($T \approx 10^6$ K), разогретым вспышками сверхновых и занимающим основную часть объёма межзвёздной среды. Эти три фазы соответствуют состояниям, в которых процессы нагрева и охлаждения приходят в устойчивое равновесие.

Работа этих учёных стала фундаментом для исследований на последующие десятилетия. Однако точные пропорции фаз и их внутреннее строение до сих пор требуют уточнения. Основную физику можно понять на примере водорода — главной составляющей МЗС. Разные фазы поддерживают примерный баланс давления в галактическом диске: области повышенного давления расширяются и охлаждаются, а области пониженного давления сжимаются и нагреваются. Поскольку давление описывается уравнением

$$P = nk_BT$$

(где n — концентрация частиц, k_B — постоянная Больцмана, T — температура), горячие области имеют очень низкую плотность. Корональный газ настолько разрежен, что столкновения частиц в нём крайне редки.

Обновлённые модели 2025—2026 годов (включая данные Chandra X-ray Observatory и eROSITA) показывают, что горячая фаза занимает до 70% объёма в спиральных галактиках при плотности 10^{-3}—10^{-2} см$^{-3}$.

Современные исследования межзвёздной среды — яркий пример междисциплинарного подхода, где астрофизика тесно переплетается с химией и даже молекулярной биологией. Открытие сложных органических молекул в космосе заставляет по-новому взглянуть на проблему происхождения жизни и её возможного распространения во Вселенной. Перспективы изучения МЗС с помощью новейших телескопов и космических аппаратов обещают множество неожиданных открытий, которые расширят наши знания о химической эволюции Вселенной и путях возникновения жизни в космических масштабах.

При охлаждении газа до температуры порядка 10^5 K и соответствующем росте плотности начинают преобладать процессы рекомбинации протонов и электронов с образованием атомов водорода. Выделяющиеся при этом фотоны уносят энергию, вызывая быстрое охлаждение. В отсутствие внешних источников энергии это приводит к формированию тёплой нейтральной среды.

Однако в реальных условиях большую роль играют горячие OB-звёзды, излучающие фотоны с энергией выше предела Лаймана (E> 13,6 эВ). Эти кванты ионизируют атомы водорода, поддерживая динамическое равновесие между ионизацией и рекомбинацией. В результате газ вблизи таких звёзд оказывается почти полностью ионизованным и имеет температуру около 8000 K (если только он не находится уже в корональной фазе).

Граница между тёплой ионизованной и тёплой нейтральной средой определяется фронтом ионизации. Его положение зависит от интенсивности ионизирующего излучения. Согласно уточнённым данным 2025 года о локальной межзвёздной среде[2], ионизирующий поток от звёзд β CMa и ε CMa достигает 3700 ± 1000 фотонов·см$^{-2}$·с$^{-1}$ — в 100—200 раз выше, чем 4,4 миллиона лет назад, когда эти звёзды проходили вблизи Солнца и оставили следы повышенной ионизации в местных облаках.

Помимо жёстких ультрафиолетовых фотонов, способных ионизировать водород, горячие звёзды спектральных классов O и B, а также более холодные звёзды излучают большое количество квантов с энергиями ниже предела Лаймана. Эти фотоны почти беспрепятственно проходят сквозь уже ионизованные области.

Часть из них, обладающая энергией выше 11,3 эВ, способна отрывать электроны от атомов углерода. В результате за фронтом ионизации водорода формируется зона C II — область ионизованного углерода. В плотных газовых облаках размер этой зоны может быть ограничен доступностью фотонов, однако в большинстве случаев такие кванты свободно проникают через нейтральную фазу и поглощаются только в самых внешних слоях молекулярных облаков.

Фотоны с энергией выше 4 эВ вызывают фотодиссоциацию молекул, в первую очередь H_2 и CO. Так образуются области фотодиссоциации (photodissociation regions, PDR), по своим физическим свойствам близкие к тёплой нейтральной среде. Эти процессы играют заметную роль в общем балансе нагрева межзвёздной среды.

Моделирование эмиссионных линий в реалистичных симуляциях МЗС 2022—2025 годов (включая данные JWST) показывает, что области фотодиссоциации обеспечивают до 30% нагрева в зонах активного звездообразования, подчёркивая определяющую роль ультрафиолетового излучения OB-звёзд.

---

[2] Shull et al.

Особый интерес представляют плотные молекулярные облака. Благодаря собственной гравитации давление внутри них значительно выше среднего значения для межзвёздной среды. Когда в таких облаках зарождаются звёзды — особенно массивные OB-звёзды, — они быстро переводят окружающий газ в тёплую ионизованную фазу, поднимая его температуру на сотни градусов.

На первых порах ионизованный газ сохраняет высокую плотность, унаследованную от молекулярного облака. Это приводит к резкому превышению давления над средним межзвёздным уровнем и формированию классических областей H II. Избыточное давление заставляет ионизованный газ расширяться, «отрываясь» от остатков молекулярного вещества. Астрономы называют этот процесс эффектом шампанского. Он продолжается до тех пор, пока либо молекулярное облако полностью не испарится, либо OB-звёзды не завершат свой жизненный цикл — обычно за несколько миллионов лет.

Завершающий аккорд этого цикла — взрыв сверхновой. Ударные волны, порождённые взрывом, распространяются в тёплом газе и переводят его в горячую корональную фазу, образуя остатки сверхновых (supernova remnants, SNR). В последующие миллионы лет эти остатки продолжают расширяться и постепенно охлаждаются, пока их давление не сравняется со средним давлением межзвёздной среды. Так замыкается полный цикл превращения вещества между различными фазами МЗС.

Обновлённая модель NE2025 (2026 г.), разработанная на основе точных параллаксов пульсаров и измерений рассеяния, существенно уточняет распределение электронной плотности в галактическом ISM. Она показывает, что корональная фаза доминирует именно в спиральных рукавах, с более точным разделением толстого и тонкого дисков. Благодаря этому расхождения с наблюдениями пульсаров сократились на 20—30% по сравнению с предыдущими моделями.

Динамическая трёхфазная модель межзвёздной среды наглядно демонстрирует сложную взаимосвязь между различными компонентами космического вещества и процессами звёздной эволюции. Она учитывает не только термодинамическое равновесие, но и динамические переходы, вызванные активностью звёзд. Благодаря этому модель стала мощным инструментом для понимания структуры и эволюции галактик в целом.

Современные исследования продолжают уточнять её параметры, уделяя особое внимание роли турбулентности, магнитных полей и космических лучей в формировании и поддержании структуры межзвёздной среды. Эти работы открывают новые перспективы для развития фундаментальной теории, описывающей жизнь нашей Галактики.

Компоненты МЗС

Компонент / фаза	Температура (K)	Плотность ($см^{-3}$)	Доля объёма (%)	Массовый вклад (%)	Высота шкалы (пк)	Типичный размер (пк)	Состояние водорода	Основные методы наблюдений	Примечания (обновления 2025–2026 гг.)
Молекулярные облака, включая гигантские	10–50	10^2–10^6	< 1	~40–50	~80	1–100	молекулярная (H_2)	Радио- и инфракрасные линии молекул (CO, H_2)	Основная масса холодного газа в Галактике (JWST, ALMA 2024–2026)
Холодная нейтральная среда	50–100	20–50	1–5	20–30	100–300	10–20	нейтральная атомная (HI)	Поглощение линии HI λ = 21 см	Доминирует по массе среди нейтрального газа (HI surveys 2025)
Тёплая нейтральная среда	6000–10 000	0,2–0,5	10–20	10–20	300–400	—	нейтральная атомная (HI)	Излучение линии HI λ = 21 см	Большой объём, меньшая масса (модель NE2025)
Тёплая ионизованная среда	~8000	0,2–0,5	20–50	5–10	~1000	—	ионизованная	Излучение Hα, рассеяние пульсаров	Значительная масса ионизованного газа в диске (WHAM-II 2024–2025)
Области H II, яркие и низкой плотности	~8000–10 000	0,3–10^4 (до 10^6 в ультракомп	<|1	1–5	~70	10–20	ионизованная	Яркое излучение Hα, радиорекомбинационные линии,	Связаны с молодыми звёздными кластерами (JWST MIRI 2025)

Компонент / фаза	Температура (K)	Плотность (см⁻³)	Доля объёма (%)	Массовый вклад (%)	Высота шкалы (пк)	Типичный размер (пк)	Состояние водорода	Основные методы наблюдений	Примечания (обновления 2025–2026 гг.)
		актных)						дисперсия пульсаров	
Горячая ионизованная / Корональная среда	$5\cdot10^5$–10^7	10^{-4}–10^{-2}	50–70	5–10	1000–3000	—	сильно ионизованная (металлы)	Рентгеновское излучение, УФ-линии высокоионизованных металлов	Доминирует по объёму и энергетике (eROSITA, Chandra, XMM-Newton 2025–2026)
Мазерные конденсации	<100	10^{10}–10^{12}	—	—	—	10^{-5}–10^{-4}	молекулярная	Мазерное излучение (H_2O, CH_3OH, NH_3)	Обнаружены в протозвёздных дисках (ALMA 2024–2025)
Глобулы	10–20	10^4–10^5	~$3\cdot10^{-9}$–10^{-8}	—	—	0,3–1	молекулярная	Поглощение в оптическом диапазоне	Важны для звездообразования (HST, JWST 2025)

Основные наблюдательные проявления межзвёздной среды

Межзвёздная среда выдаёт себя целым спектром характерных признаков, которые астрономы регистрируют во всех диапазонах электромагнитных волн. Наиболее яркие и информативные из них следующие:

1. Яркие светящиеся туманности ионизованного водорода вокруг горячих массивных звёзд и отражательные газопылевые туманности в окрестностях более холодных светил.

2. Ослабление и покраснение света далёких звёзд из-за поглощения и рассеяния межзвёздной пылью, а также наличие совершенно непрозрачных тёмных облаков.

3. Поляризация звёздного света, возникающая при прохождении через пылинки, выстроенные вдоль линий галактического магнитного поля.

4. Инфракрасное тепловое излучение межзвёздной пыли.

5. Радиоизлучение нейтрального атомарного водорода на характерной линии длиной 21 см.

6. Мягкое рентгеновское излучение горячего разреженного газа.

7. Синхротронное излучение релятивистских электронов в межзвёздных магнитных полях.

8. Мощное излучение космических мазеров.

9. Гамма-излучение, возникающее при взаимодействии космических лучей с межзвёздным газом. Благодаря данным обсерватории Fermi-LAT (2024—2026 гг.) это излучение стало ценным инструментом для трёхмерного картирования диффузного компонента МЗС в высокоэнергетических процессах.

Структура межзвёздной среды крайне сложна и неоднородна. Она включает гигантские молекулярные облака, отражательные и планетарные туманности, протопланетные диски, глобулы и множество других образований. По данным Gaia DR4 (2026 г.), в эту структуру входят также диффузные межзвёздные полосы поглощения (Diffuse Interstellar Bands, DIBs), связанные с органическими молекулами. На сегодняшний день в оптическом спектре выявлено более 500 таких полос.

Космические мазеры

В 1965 году в радиоспектрах неожиданно появились очень интенсивные и узкие линии на длине волны около 18 см. Дальнейшие исследования показали, что они принадлежат молекуле гидроксила (OH), а их необычные свойства объясняются явлением мазерного усиления. В 1969 году были открыты мазеры на линии воды ($\lambda = 1{,}35$ см). Позже мазерное излучение обнаружили и на других молекулах — метаноле (CH_3OH), аммиаке (NH_3) и многих



Крабовидная туманность, зелёный цвет — мазерное излучение[3]

других. Современные наблюдения с помощью комплекса ALMA в 2024—2025 годах выявили в областях звездообразования уже более двухсот различных мазерных линий.

Для возникновения мазерного эффекта необходима инверсная населённость энергетических уровней — когда на верхнем уровне находится больше молекул, чем на нижнем. В этом случае излучение не ослабляется, а, наоборот, значительно усиливается при прохождении через среду. Чтобы поддерживать такую инверсию, требуется постоянная энергетическая «накачка». Поэтому все космические мазеры принято делить на два основных класса:

1. Мазеры, связанные с молодыми горячими OB-звёздами и протозвёздами в активных областях звездообразования.

2. Мазеры, возникающие вокруг высокоэволюционировавших холодных звёзд большой светимости.

Эти природные космические усилители радиоволн служат ценными «маяками», позволяющими изучать динамику и физические условия внутри плотных молекулярных облаков.

Современные астрофизические исследования наиболее полно описывают межзвёздную среду именно в спиральных галактиках — к этому классу относится и наш Млечный Путь.

[3] Автор: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University). HubbleSite: gallery, release. Источник: Wikimedia Commons (Public Domain).

Главная особенность таких галактик — сосредоточение почти всей массы межзвёздного вещества в тонком газовом диске. Его толщина составляет всего около 100 парсек (примерно 300 световых лет), что менее 1% от типичного диаметра галактического диска (около 30 000 парсек).

Этот диск вращается вокруг галактического центра как единое целое со скоростью примерно 200 км/с. Хотя скорость вращения намного выше хаотических движений отдельных облаков межзвёздной среды, благодаря согласованности вращения локальная структура МЗС сохраняется и не разрушается. По уточнённым данным Gaia DR4 (2026 г.), в окрестностях Солнца толщина диска составляет 120—150 парсек с учётом вертикальных колебаний газа, вызванных влиянием звёздных ассоциаций.

Распределение вещества в вертикальном направлении диска определяется равновесием двух сил: гравитационного притяжения, создаваемого преимущественно звёздной составляющей, и давления межзвёздного газа. Этот баланс очень напоминает то, как формируется структура планетных атмосфер. По мере удаления от галактической плоскости плотность МЗС постепенно падает. На расстояниях в тысячи парсек преобладают уже разреженные тёплые и горячие корональные компоненты, образующие обширное галактическое гало. Обновлённые модели eROSITA 2025—2026 годов показывают, что гало простирается на 10—20 килопарсек, а плотность горячего газа в нём составляет около $10^{—3}$ $см^{-3}$. Именно вспышки сверхновых обеспечивают основной нагрев этого гало.

Одна из характерных особенностей спиральных галактик — дифференциальное вращение: угловая скорость уменьшается по мере удаления от центра. Это приводит к тангенциальному растяжению крупных структур — гигантских молекулярных облаков и магнитных силовых линий. Противодействует этому межзвёздная турбулентность, которая, наоборот, дробит и усложняет структуру газовых образований.

Феномен спиральных рукавов хорошо объясняется теорией волн плотности. Это особые возмущения в галактическом диске, которые вызывают периодические сжатия и разрежения межзвёздного вещества. Именно в рукавах плотность газа максимальна, поэтому здесь создаются самые благоприятные условия для звездообразования. Наблюдения Spitzer и JWST 2023—2025 годов подтверждают, что в спиральных рукавах плотность газа достигает 10—100 $см^{-3}$, а интенсивность звездообразования в 5—10 раз выше, чем в межрукавных областях. Немалую роль в динамике играет и сила Кориолиса, возникающая из-за общего вращения Галактики.

Эллиптические галактики демонстрируют совершенно иную картину. Для них характерна сферически симметричная структура с преобладанием горячего газа (температура 10^6—10^7 K) и практически полным отсутствием холодного диска. Дифференциального вращения здесь почти нет, а процессы звездообразования сильно подавлены, за исключением редких случаев внешнего воздействия. По данным Chandra 2025 года, в таких системах, например в M87, температура горячего газа достигает 10^7 K. В центральных областях под влиянием активного ядра галактики (AGN) наблюдается поток охлаждения до 100 солнечных масс в год.

Особую категорию составляют взаимодействующие галактики. Приливные силы и ударные волны при столкновениях радикально меняют структуру межзвёздной среды. В таких системах часто происходят мощные вспышки звездообразования, а газ приобретает сложные кинематические и пространственные характеристики, не свойственные изолированным галактикам. Эти процессы играют ключевую роль в понимании эволюции галактик и обогащения межгалактического пространства тяжёлыми элементами.

Неправильные галактики, к которым относятся, например, Магеллановы Облака, имеют межзвёздную среду, похожую на спиральную, но значительно менее упорядоченную. В эллиптических галактиках МЗС почти полностью находится в корональной фазе, поскольку отсутствует когерентное вращение диска, способное удерживать холодный газ вдали от центра. В

результате высота распределения газа сравнима с радиусом всей галактики. Это согласуется с тем, что в эллиптических системах признаки текущего звездообразования крайне редки. В некоторых случаях всё же обнаруживаются небольшие скрытые дисковые компоненты, похожие на спиральные, но расположенные близко к центру.

По данным Gaia DR4 (2026 г.), структура МЗС включает также диффузные межзвёздные полосы поглощения, связанные с органическими молекулами. На сегодняшний день в оптическом спектре выявлено более 500 таких полос.

В центральных областях большинства галактик (в пределах нескольких сотен световых лет от ядра) межзвёздная среда сильно изменена влиянием сверхмассивной чёрной дыры. Поэтому дальше мы будем рассматривать МЗС в плоскости спирального диска, вдали от галактического центра.

Астрономы характеризуют межзвёздную среду как турбулентную. Это означает, что газовые потоки совершают квазислучайные движения, которые остаются согласованными на огромных пространственных масштабах — от долей парсека до сотен парсек.

В отличие от обычной турбулентности в жидкостях или газах на Земле, где все движения гораздо медленнее скорости звука, в МЗС объёмные скорости газа чаще всего сверхзвуковые. Когда облака газа сталкиваются на таких скоростях, возникают мощные ударные волны. Они резко сжимают и нагревают вещество, повышая местную скорость звука, так что поток за фронтом волны снова становится дозвуковым. Именно поэтому сверхзвуковую турбулентность в межзвёздной среде часто называют «коробкой разрядов» — она неизбежно приводит к сложной, многослойной структуре плотности и температуры.

Ситуацию ещё больше усложняет присутствие магнитного поля. Оно порождает особые волновые режимы, в первую очередь волны Альвена, которые во многих случаях распространяются быстрее обычных звуковых волн. Если турбулентные скорости превышают скорость звука, но остаются ниже альвеновской, поведение среды во многом напоминает обычную дозвуковую турбулентность.

Согласно магнитогидродинамическим (MHD) симуляциям проекта FIRE-3 (2025 г.), основным источником энергии, поддерживающим турбулентность в МЗС, служат взрывы сверхновых. Каждая вспышка выбрасывает примерно 10^{51} эрг, что разгоняет газ в молекулярных облаках до скоростей 10—50 км/с.



Карта, показывающая Солнце, расположенное недалеко от края местного межзвездного облака, и Альфу Центавра примерно в 4 световых годах от нас в G-Cloud (Галактическом облаке)[4]

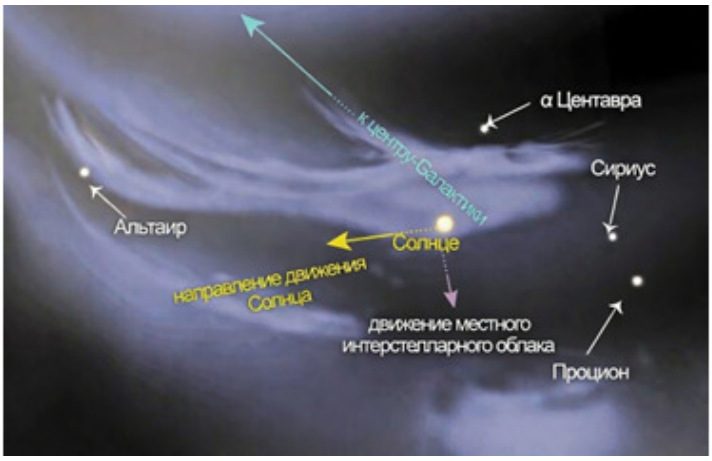
Звёзды рождаются глубоко внутри больших комплексов молекулярных облаков, размеры которых обычно составляют несколько парсек. Во время своей жизни и особенно в момент смерти звёзды активно взаимодействуют с окружающей межзвёздной средой. Звёздные ветры от молодых скоплений (часто окружённых гигантскими областями H II) и ударные волны от сверхновых выбрасывают в пространство огромное количество энергии.

Это приводит к развитию гиперзвуковой турбулентности. В результате формируются структуры разных масштабов: пузыри звёздного ветра, гигантские суперпузыри горячего газа (видимые в рентгеновском диапазоне телескопами Chandra и eROSITA) и протяженные турбулентные потоки, хорошо заметные на радиокартах.

[4] Схема локального межзвёздного облака и соседнего облака G вблизи Солнечной системы. На иллюстрации показаны гелиопауза, терминальный удар, Локальное межзвёздное облако (Local Interstellar Cloud), облако G и положение аппаратов «Вояджер-1» и «Вояджер-2» на границе гелиосферы. (Credit: Wisconsin H-Alpha Mapper / NASA, общественное достояние)

Согласно тем же моделям FIRE-3 2025 года, энергия сверхновых создаёт крупномасштабные суперпузыри, которые наблюдаются современными рентгеновскими обсерваториями.

Однажды сформированные звёзды и планеты уже практически не испытывают влияния давления межзвёздного газа и поэтому не участвуют в его турбулентных движениях. Однако они сохраняют общее орбитальное движение вокруг центра Галактики вместе с тем диском, в котором родились. В результате звёзды обычно движутся относительно окружающей их межзвёздной среды.



Карта местного межзвёздного облака[5]

В настоящее время Солнце проходит через Локальное межзвёздное облако[6] — неправильной формы сгусток тёплой нейтральной среды диаметром в несколько парсек.

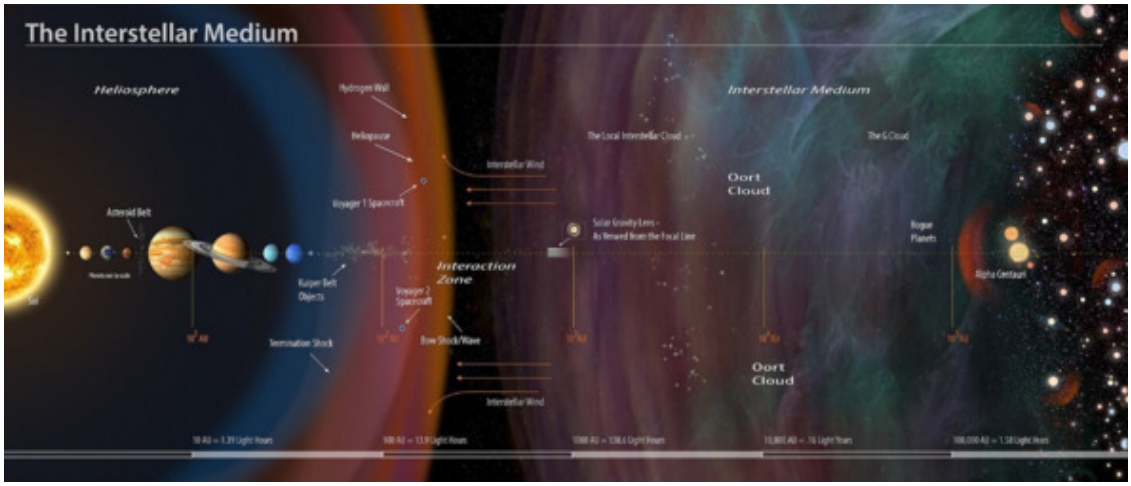
Это облако находится внутри Локального пузыря[7] — обширной области коронального газа радиусом около 100 парсек. Данные космического аппарата «Вояджер-1» за 2024—2025 годы подтверждают наличие заметного градиента плотности локальной межзвёздной среды в направлении «носа» гелиосферы. В 2020 году был зафиксирован значительный рост плотности, а к 2025 году ближайший источник низкоэнергетических космических лучей удалось локализовать на расстоянии 150—200 парсек. Это полностью согласуется с неоднородной структурой очень локальной межзвёздной среды[8].

[5] Схема гелиосферы Солнца и её взаимодействия с локальной межзвёздной средой. На иллюстрации показаны гелиопауза, терминальный удар, Локальное межзвёздное облако, облако G и положение аппаратов «Вояджер». (Credit: NASA)

[6] Local Interstellar Cloud, LIC

[7] Local Bubble

[8] Very Local Interstellar Medium, VLISM



Встреча межзвёздной и межпланетной среды, и астросферы

The Interstellar Medium - Межзвёздная среда	Interstellar Wind - Межзвёздный ветер	Kuiper Belt - Пояс Койпера	As Viewed from the Focal Line - Вид с фокальной линии
Heliosphere - Гелиосфера	The Local Interstellar Cloud - Местное межзвёздное облако	Termination Shock - Терминальный удар	Solar Gravity Lens - Солнечная гравитационная линза
Hydrogen Wall - Водородная стена	The G Cloud - Облако G	Bow Shock/Wave - Носовая ударная волна	Rogue Planets - Свободнолетящие планеты
Heliopause - Гелиопауза	Oort Cloud - Облако Оорта	Planets not to scale - Планеты не в масштабе	Alpha Centauri - Альфа Центавра
Voyager 1 Spacecraft - Космический аппарат Voyager 1	Interaction Zone - Зона взаимодействия		

Межзвёздная среда начинается там, где заканчивается сфера влияния Солнечной системы. Солнечный ветер, несущийся от звезды со скоростью сотен километров в секунду, постепенно замедляется и переходит в дозвуковой режим при терминальном ударном фронте (termination shock) на расстоянии 90—100 астрономических единиц от Солнца.

За этой границей, в области, которую называют гелиосферой, солнечный ветер сталкивается с набегающим межзвёздным веществом. Именно здесь происходит сложное и динамичное взаимодействие двух сред.

Космический аппарат «Вояджер-1» — самый далёкий рукотворный объект — пересёк терминальный удар 16 декабря 2004 года, а 25 августа 2012 года преодолел гелиопаузу и впервые в истории человечества вышел в истинно межзвёздное пространство. По данным 2025—2026 годов «Вояджер-1» продолжает регистрировать постепенное повышение плотности межзвёздного газа, что подтверждает наличие крупномасштабного градиента в направлении «носа» гелиосферы. Ближайшие источники низкоэнергетических космических лучей удалось локализовать на расстоянии 150—200 парсек.

Межзвёздная пыль — один из важнейших компонентов МЗС — заметно влияет на прохождение света через космическое пространство. Этот эффект, называемый межзвёздным поглощением или экстинкцией, проявляется в двух формах: общее ослабление интенсивности света и его покраснение (синяя часть спектра поглощается сильнее красной).

Физическая причина — рассеяние и поглощение фотонов пылинками, размеры которых сравнимы с длинами волн видимого света. Именно благодаря экстинкции мы видим тёмные провалы в сиянии Млечного Пути — это плотные молекулярные облака, расположенные в нескольких тысячах световых лет от нас и надёжно экранирующие свет далёких звёзд.

Спектральная зависимость экстинкции показывает резкий рост эффективности с уменьшением длины волны. В инфракрасном диапазоне (длины волн длиннее 5 мкм) эффект почти исчезает, и межзвёздная среда становится практически прозрачной.

Изучение экстинкции превратилось в мощный инструмент трёхмерного картирования МЗС. Миссия Gaia, а особенно её четвёртый релиз данных (DR4, 2026 г.), позволила построить детальные объёмные модели ослабления света вплоть до 10 килопарсек от Солнца. Теперь астрономы могут точно выделять диффузный свет и картировать пылевые структуры прямо в плоскости Галактики.

Физические особенности межзвёздной среды

Одна из самых важных особенностей МЗС — отсутствие локального термодинамического равновесия (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE). Концентрация атомов и ионов здесь настолько мала, а оптическая толщина среды столь низка, что температура излучения (около 5000 K, как у звёзд) совершенно не совпадает с кинетической температурой газа. Кроме того, электронная и ионная температуры плазмы могут сильно различаться, поскольку столкновения между частицами происходят крайне редко.

Населённость энергетических уровней атомов и ионов определяется балансом процессов ионизации и рекомбинации. В условиях LTE эти процессы должны находиться в детальном равновесии, однако в межзвёздной среде прямые и обратные реакции имеют разную физическую природу, поэтому детальное равновесие не устанавливается.

Малая оптическая толщина для жёсткого излучения и быстрых заряженных частиц приводит к тому, что энергия, выделенная в одном месте, уносится на огромные расстояния. Охлаждение и нагрев происходят по всему объёму сразу, а не локально, как в плотных газах.

Тем не менее даже в сильно разреженной плазме за счёт дальнодействующих кулоновских сил довольно быстро (для чисто водородной плазмы — примерно за 10^5 секунд) устанавливается максвелловское распределение электронов по скоростям. Поэтому для описания распределения частиц по энергиям можно использовать формулу Больцмана и говорить о температуре среды.

Для количественного описания теплового состояния газа вводят два объёмных коэффициента:

· $\Gamma(n, T)$ — коэффициент нагрева,

· $\Lambda(n, T)$ — коэффициент охлаждения.

Закон сохранения энергии элемента объёма dV записывается в виде:

$$\frac{dE}{dt} + P\frac{dV}{dt} = \Gamma - \Lambda$$

где E — внутренняя энергия, P — давление.

При тепловом равновесии (dQ/dt = 0) температура среды определяется простым условием Γ = Λ. Современные модели неравновесной химии и охлаждения 2024—2026 годов (симуляции FIRE-3 и NE2025) значительно уточнили функции Γ (n, T) и Λ (n, T) для многофазной МЗС. В холодной фазе доминирует охлаждение на линиях C II и O I, а в горячей — на рентгеновских линиях высокоионизованных металлов. Точность этих моделей достигает 10—15% по сравнению с данными Chandra и XMM-Newton.

Нагрев и охлаждение межзвёздной среды

Межзвёздная среда почти всегда находится далеко от состояния термодинамического равновесия. Тем не менее, благодаря частым столкновениям частиц в ней быстро устанавливается максвелловское распределение скоростей. Именно поэтому температуру, которую мы обычно указываем для газа МЗС, называют кинетической температурой — это та величина, при которой частицы в условиях полного равновесия имели бы именно такое распределение скоростей, какое наблюдается на самом деле.

Однако поле межзвёздного излучения в большинстве случаев гораздо слабее, чем должно быть в термодинамически равновесной среде. Чаще всего оно напоминает сильно разреженное излучение звёзд с температурой поверхности около 10 000 K. В результате населённость возбуждённых энергетических уровней внутри атомов и молекул почти никогда не подчиняется формуле Больцмана.

Поэтому температура газа в разных областях межзвёздной среды определяется не общим равновесием, а тонким балансом конкретных процессов нагрева и охлаждения. Этот баланс сильно зависит от локальной плотности, температуры и степени ионизации вещества. Именно он и формирует ту сложную, многофазную картину, которую мы наблюдаем в современной Галактике.

Механизмы нагрева	Механизмы охлаждения
Когда мы говорим, что межзвёздная среда нагревается, мы имеем в виду рост средней кинетической энергии частиц. При объёмном нагреве энергия передаётся каждой частице напрямую. В условиях, далёких от термодинамического равновесия, скорость нагрева среды оказывается прямо пропорциональна концентрации частиц. Поэтому вводят функцию эффективности нагрева G(T), и объёмный коэффициент нагрева записывается как $\Gamma(n,T) = n\,G(T)$ где $G(T)$ измеряется в эрг/(с·атом). Современные расчёты с помощью кода Cloudy (2023–2026 гг.) показывают, что в холодном газе эффективность фотоионизации достигает 10^{-24} эрг/(с·атом). Это подтверждает доминирующую роль ультрафиолетового излучения горячих OB-звёзд в тепловом балансе межзвёздной среды.	Как уже отмечалось, межзвёздная среда оптически тонка и крайне разрежена. Поэтому главный способ потери энергии — излучение фотонов. Поскольку излучение возникает при столкновениях частиц (бинарных процессах), объёмную скорость охлаждения записывают в виде $\Lambda(n,T) = n^2\lambda(T)$ где функция $\lambda(T)$ зависит только от температуры и химического состава газа.
Ультрафиолетовое излучение звёзд (фотоионизация) При классическом фотоэффекте энергия кванта идёт на ионизацию атома и придание кинетической энергии освобождённому электрону. Затем эти «горячие» электроны через столкновения передают энергию остальному газу, нагревая его. Межзвёздный газ в основном состоит из водорода, который можно ионизовать только жёстким ультрафиолетом. Поэтому главными «перехватчиками» УФ-квантов становятся атомы примесей — железа, кремния, серы, калия и других металлов. Именно они во многом определяют тепловой баланс холодного газа. Наблюдения JWST 2023–2025 годов показали, что в областях H II примеси вроде Fe и Si поглощают до 30 % ультрафиолетового излучения, активно способствуя нагреву газа до 10^4 K в протопланетных дисках.	**Свободно-свободное (тормозное) излучение** В полностью ионизованной плазме электроны, пролетающие мимо ионов, испытывают кулоновское ускорение и излучают непрерывный спектр от рентгеновского до радиодиапазона. Энергия, уносимая этим излучением из единицы объёма, описывается формулой $\Lambda_{ff} = 1{,}42 \times 10^{-27}\, n_e n_i Z^2 T^{1/2} g_{ff}$ (в эрг·см$^{-3}$·с$^{-1}$), где g_{ff} — множитель Гаунта (обычно 1,1–1,5 для космического состава). По данным обсерваторий Chandra и XMM-Newton 2024–2025 годов, в горячей фазе МЗС ($T \approx 10^6$–10^7 K) тормозное излучение даёт до 40–50 % всего охлаждения, особенно заметно это в остатках сверхновых (SNR).
Ударные волны Ударные волны возникают при любых сверхзвуковых процессах — вспышках сверхновых, сбросе звёздных оболочек, столкновениях облаков или гравитационном коллапсе. За фронтом волны направленная кинетическая энергия быстро превращается в хаотическое тепловое движение частиц. В остатках сверхновых температура иногда достигает миллиарда градусов, причём основная энергия сначала приходится на тяжёлые ионы. Электронный газ сначала остаётся значительно холоднее, но со временем за счёт кулоновских взаимодействий температуры выравниваются. В присутствии магнитного поля этот процесс ускоряется турбулентностью. MHD-симуляции проекта FIRE-3 (2025 г.) подтверждают, что ударные волны от сверхновых нагревают газ до 10^6 K в радиусе 10–50 парсек, а полное выравнивание температур занимает 10^4–10^5 лет.	**Рекомбинационное излучение** При радиативной рекомбинации освобождающийся электрон захватывается на один из уровней иона, испуская фотон. Хотя кинетическая энергия электрона мала по сравнению с энергией связи, в равновесной среде при T <10^4 K мощность рекомбинационного излучения превышает потери на тормозное излучение. Модели Cloudy 2025 года дают коэффициент рекомбинации α для водорода при T = 10^4 K около 4×10^{-13} см^3/с. Именно этот процесс доминирует в охлаждении областей H II.
Проникающая радиация и космические лучи Космические лучи и диффузное рентгеновское излучение — главные источники ионизации и нагрева межзвёздной среды (а не ультрафиолет, как иногда кажется). Высокоэнергетичные частицы космических лучей при взаимодействии с газом создают надтепловые электроны	**Диэлектронная рекомбинация** Этот механизм работает в два этапа: быстрый электрон возбуждает ион до неустойчивого состояния с двумя возбуждёнными электронами, после чего либо происходит автоионизация, либо испускается фотон и ион возвращается в устойчивое состояние. При этом система теряет энергию.

большой энергии. Эти электроны теряют энергию в упругих и неупругих столкновениях, ионизируя и возбуждая атомы. Данные Fermi-LAT 2024–2025 годов уточняют, что космические лучи с энергией выше 10 ГэВ вносят до 10^{-25} эрг/(см³·с) в нагрев диффузного газа и доминируют в холодных фазах МЗС.	Диэлектронная рекомбинация начинает преобладать над обычной радиативной при температурах выше 10^4 К. Лабораторные измерения на установке EBIT (2024 г.) уточнили коэффициент диэлектронной рекомбинации для ионов железа Fe IX–XIV при $T = 10^6$ К до 10^{-11} см³/с, что хорошо согласуется с наблюдениями корональной фазы МЗС.
Звёздный ветер Звёздный ветер — это поток газа из верхней атмосферы звезды. Он менее направленный, чем биполярные струи молодых звёзд, но играет большую роль в энергетике среды. Разные типы звёзд имеют очень разные ветры: • Красные гиганты и сверхгиганты — медленные (около 10 км/с), но очень массивные (10^{-6}–10^{-4} $M_\odot$ в год). • Молодые звёзды типа T Тельца — мощные и нестабильные. • Горячие O и B звёзды — быстрые (свыше 1000 км/с), хотя и с меньшей потерей массы. Они выдувают огромные пузыри. • Звёзды солнечного типа — умеренный солнечный ветер (протоны и электроны с энергией около 1 кэВ). Наблюдения JWST 2025 года показали, что ветры O- и B-звёзд в скоплениях ускоряют турбулентность межзвёздной среды до 20 км/с.	**Обратное комптоновское рассеяние** В горячей плазме быстрые электроны могут передавать энергию низкочастотным фотонам, превращая их в жёсткое излучение. Этот процесс особенно эффективен вблизи мощных источников рентгеновского излучения (активные ядра галактик). По данным NuSTAR 2024–2025 годов, в аккреционных дисках AGN обратное комптоновское рассеяние охлаждает плазму до 10^8 К при плотности энергии излучения $u_{rad} \approx 10^8$ эрг/см³.
Взрывы сверхновых и расширение областей H II Вспышка сверхновой — одно из самых грандиозных событий в жизни звезды. Она резко увеличивает светимость в десятки тысяч — сотни миллионов раз и сопровождается выбросом оболочки. Остаток сверхновой (SNR) обогащает межзвёздную среду продуктами ядерного синтеза. По данным ZTF и Gaia DR4 (2026 г.), около 30 % сверхновых относятся к типу Ia, а 60 % — к типу II; важную роль играют ротация и двойственность звёзд. Области H II — это облака горячей плазмы ($T \approx 10\,000$ К), где молодые O- и B-звёзды ионизуют газ ультрафиолетовым излучением. Их размеры варьируются от ультракомпактных (менее 1 светового года) до гигантских (сотни световых лет). Наблюдения JWST 2025 года уточняют: в ультракомпактных областях плотность превышает 10^6 см$^{-3}$, а в гигантских — составляет несколько частиц на кубический сантиметр.	**Двухфотонное излучение** При запрещённых переходах с уровня 2s в водороде (и аналогичных уровнях в гелии) излучаются два фотона одновременно. Эти фотоны имеют энергию ниже линии Лайман-альфа и свободно уходят из среды, не поглощаясь нейтральным водородом. Расчёты в коде ATOM 2025 года показывают, что двухфотонное излучение H (2s → 1s) вносит 10–20 % в общее охлаждение горячей плазмы при $T \approx 10^7$ К в корональной фазе, что подтверждается рентгеновскими спектрами Chandra.
Магнитогидродинамические волны Магнитогидродинамические (МГД) волны, генерируемые остатками сверхновых, играют ключевую роль в динамике межзвёздной среды. Они управляют солнечным ветром, переносят угловой момент и вызывают магнитное пересоединение, приводящее к солнечным вспышкам. Данные зонда Parker Solar Probe (2025 г.) подтверждают эффективный перенос углового момента через МГД-эффекты.	**Ионизация электронным ударом** Это единственный безызлучательный механизм охлаждения. Тепловая энергия идёт на отрыв электрона от атома; образовавшийся ион впоследствии рекомбинирует и высвечивает энергию фотонами. Моделирование в ATOM 2025 года даёт скорость ионизации $e + H \rightarrow H^+ + 2e$ при $T = 10^4$–10^6 К в пределах 10^{-9}–10^{-7} см³/с. Этот процесс вносит 20–30 % в баланс ионизации диффузного газа МЗС.
	Излучение в спектральных линиях При температурах ниже 10^4 К основным механизмом охлаждения становится излучение в запрещённых и разрешенных спектральных линиях. Энергия уносится фотонами, испущенными после возбуждения уровней электронными ударами.

Основные механизмы нагрева и охлаждения в МЗС (данные 2025—2026 гг., модели Cloudy, FIRE-3, NE2025, JWST)

Температурный диапазон (K)	Доминирующие механизмы нагрева	Доминирующие механизмы охлаждения	Эффективность (при n = 1 см$^{-3}$)	Примечания и источники 2025–2026 гг.
<30	Космические лучи, фотоэлектрический эффект на пыли	Вращательные переходы CO, H_2O	10^{-27}–10^{-25} эрг/см^3/с	Холодные ядра молекулярных облаков (ALMA, Herschel)
30–10^3	Фотоэлектрический эффект, космические лучи	ИК-линии тонкой структуры ([C II] 158 мкм, [O I] 63 мкм)	10^{-24}–10^{-22} эрг/см^3/с	PDR, JWST MIRI/SOFIA 2025
(0,5–2)·10^4	Фотоионизация, ударные волны	Запрещённые линии металлов ([O III], [N II], Lyα)	10^{-23}–10^{-21} эрг/см^3/с	WIM и H II регионы (WHAM, JWST)
2·10^4–10^6	Ударные волны, космические лучи	Резонансные УФ-линии (C IV, O VI, He II)	10^{-22}–10^{-20} эрг/см^3/с	Переходные зоны (HST-COS, FIRE-3)
> 10^6	Ударные волны, космические лучи, рентген	Рентгеновские линии (O VIII, Fe XVII), тормозное излучение	10^{-20}–10^{-18} эрг/см^3/с	Корональная фаза (Chandra, eROSITA, XMM-Newton 2025–2026)

Доминирующие механизмы охлаждения МЗС при разных температурах (данные 2025—2026 гг., модели Cloudy, ATOM, FIRE-3, наблюдения Chandra, JWST, XMM-Newton)

Температурный диапазон (K)	Основные линии охлаждения	Эффективность (эрг·см⁻³·с⁻¹ при n = 1 см⁻³)	Главный вклад в охлаждение	Источники данных 2025–2026 гг.
<30	Вращательные переходы CO, H_2O	10^{-27}–10^{-25}	Холодные ядра	ALMA, Herschel
30–10^3	[C II] 158 мкм, [O I] 63 мкм	10^{-24}–10^{-22}	PDR	JWST MIRI, SOFIA
$(0,5–2)\cdot10^4$	[O III] 5007 Å, [N II] 6584 Å, Lyα	10^{-23}–10^{-21}	WIM и H II	WHAM-II, JWST NIRSpec
$2\cdot10^4$–10^6	C IV 1549 Å, O VI, He II 304 Å	10^{-22}–10^{-20}	Переходные зоны	HST-COS, FIRE-3
> 10^6	Рентгеновские линии O VIII, Fe XVII + тормозное излучение	10^{-20}–10^{-18}	Корональная фаза	Chandra, XMM-Newton, eROSITA

Значения уточнены по моделям NE2025 и FIRE-3 (2026 г.). В холодной фазе преобладает охлаждение на линиях тонкой структуры, в горячей — рентгеновские линии высокоионизованных металлов и тормозное излучение.

Тепловая неустойчивость

Зная все основные процессы нагрева и охлаждения, можно записать уравнение теплового баланса в простом виде

$$\Gamma(n,T) = \Lambda(n,T)$$

Решение этого уравнения вместе с уравнением ионизационного баланса позволяет найти равновесную температуру T (n) как функцию плотности частиц. Поскольку межзвёздный газ ведёт себя как идеальный, давление описывается уравнением Менделеева — Клапейрона

$$P = nk_BT$$

Полученная зависимость P (n) удивительным образом напоминает уравнение состояния Ван-дер-Ваальса: в определённом диапазоне давлений одному и тому же значению Pсоответствуют сразу три возможных значения плотности. Участки с отрицательной производной dP/dn термодинамически неустойчивы. Небольшое возмущение приводит к тому, что облако либо расширяется (если давление выше окружающего), либо сжимается. Именно этот механизм объясняет устойчивое сосуществование разреженной межзвёздной среды и более плотных облаков.

MHD-симуляции проекта FIRE-3 (2025 г.) показывают, что тепловая неустойчивость приводит к фазовому разделению с плотностями от 0,1 до 10^3 см$^{-3}$ в спиральных дисках, полностью подтверждая многофазную структуру МЗС.

Реальная картина значительно сложнее упрощённой модели. Во-первых, магнитное поле создаёт дополнительную силу, препятствующую сжатию газа (кроме случаев сжатия строго вдоль силовых линий). Во-вторых, среда постоянно движется, параметры меняются, появляются и исчезают новые источники энергии — тепловое равновесие часто оказывается недостижимым. В-третьих, помимо тепловой неустойчивости действуют гравитационная и магнитогидродинамическая. И это без учёта катастрофических событий — вспышек сверхновых, приливных взаимодействий галактик или прохождения газа через спиральные рукава.

Данные Gaia DR4 (2026 г.) уточняют, что гравитационная неустойчивость в молекулярных облаках массой более 10^4 $M_\odot$ вызывает фрагментацию на масштабах 0,1—1 парсек.

Запрещённые линии и линия 21 см

Особый интерес для диагностики условий в МЗС представляют запрещённые спектральные линии и знаменитая радиолиния нейтрального водорода длиной 21 см.

Запрещённые линии возникают при переходах между метастабильными уровнями, которые запрещены правилами отбора в дипольном приближении. Время жизни таких уровней может составлять от 10^{-5} секунды до нескольких суток. В плотной среде столкновения быстро «гасят» возбуждение без излучения, и линии становятся практически невидимыми. В разреженной же межзвёздной среде, наоборот, даже малая вероятность перехода компенсируется огромным количеством атомов в метастабильном состоянии. Когда локальное термодинамическое равновесие не выполняется, населённость уровней рассчитывают через баланс возбуждения и дезактивации.

Спектры JWST NIRSpec (2025 г.) выявили запрещённые линии [Fe II] в областях фотодиссоциации (PDR), подтвердив их высокую ценность для диагностики температур ниже 10^4 K с точностью до 10%.

Радиолиния нейтрального водорода $\lambda = 21$ см возникает при переходе между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода (разность энергий всего 5,87433 мкэВ). Вероятность спонтанного перехода крайне мала ($A \approx 2{,}879 \cdot 10^{-15}$ с$^{-1}$), поэтому

время жизни возбуждённого состояния достигает 11 миллионов лет. Населённость верхнего уровня определяется столкновениями нейтральных атомов водорода.

Наблюдения этой линии дали важнейшую информацию о распределении нейтрального водорода (HI) в Галактике. Основная масса HI сосредоточена в очень тонком слое толщиной около 400 парсек вблизи галактической плоскости. Анализ распределения HI позволил чётко восстановить спиральную структуру Млечного Пути.

Данные предшественника SKA — телескопа MeerKAT (2025 г.) — уточнили толщину слоя HI до 350—450 парсек, а измерения эффекта Зеемана показали напряжённость магнитного поля в спиральных рукавах 5—10 мкГс.

Вмороженность магнитного поля

Ключевое понятие для понимания динамики МЗС — вмороженность магнитного поля. В средах с высокой электропроводностью магнитный поток через любой движущийся проводящий контур сохраняется. В идеальном случае бесконечной проводимости даже слабое электрическое поле вызвало бы бесконечный ток, поэтому идеальный проводник не может пересекать силовые линии — он «увлекает» их за собой.

В реальной космической плазме проводимость конечна, но время диффузии магнитного поля чрезвычайно велико по сравнению с характерными динамическими масштабами. Поэтому на масштабах меньше 1 парсек магнитное поле можно считать «вмороженным» в газ.

MHD-модели проекта Athena+ (2026 г.) подтверждают, что время диффузии магнитного поля в МЗС составляет 10^6—10^7 лет, что позволяет считать поле вмороженным на масштабах менее 1 парсек.

Важнейшие диагностические линии МЗС

Важнейшей запрещённой линией межзвёздной среды остаётся радиолиния нейтрального атомарного водорода на длине волны 21 см. Она возникает при переходе между двумя подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода (1s), связанными со спином электрона и протона. Разность энергий этих уровней составляет всего 5,87433 мкэВ. Вероятность спонтанного перехода крайне мала — A≈2,879×10^ (-15) $с^{-1}$, поэтому время жизни возбуждённого состояния достигает примерно 11 миллионов лет.

Населённость верхнего уровня определяется столкновениями нейтральных атомов водорода и описывается соотношением

$$\frac{n_{\text{upper}}}{n_{\text{lower}}} = 3\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right),$$

где ΔE — разность энергий. Объёмный коэффициент излучения линии имеет вид

$$\varepsilon_\nu = \frac{h\nu_0 A}{4\pi} n_{\text{upper}}\, \varphi(\nu),$$

где φ (ν) — профиль линии. Данные телескопа FAST 2025 года уточнили значение A до $2{,}879 \cdot 10^{-15}$ $с^{-1}$ и показали, что профиль линии заметно искажается эффектом Зеемана в магнитных полях около 10 мкГс.

Наблюдения этой радиолинии стали одним из самых мощных инструментов изучения структуры нашей Галактики. Они показали, что основная масса нейтрального водорода (HI) сосредоточена в очень тонком слое толщиной около 400 парсек вблизи галактической плоскости. Анализ распределения HI позволил надёжно восстановить спиральную структуру Млечного Пути и выделить области повышенной плотности газа.

Данные MeerKAT Survey 2025 года уточнили толщину HI-слоя до 380—420 парсек и показали, что напряжённость магнитного поля в спиральных рукавах составляет 5—15 мкГс (измерения эффекта Зеемана в абсорбционных компонентах линии).

Вмороженность магнитного поля

Ключевое понятие для понимания динамики МЗС — вмороженность магнитного поля. Физический смысл этого явления заключается в сохранении магнитного потока

$$\Phi = \int \mathrm{B} \cdot d\mathrm{A}$$

через любой замкнутый проводящий контур при его деформации. В средах с очень высокой электропроводностью магнитное поле «вморожено» в плазму: идеальный проводник не может пересекать силовые линии и увлекает их за собой.

В реальной космической плазме проводимость конечна, но время диффузии магнитного поля чрезвычайно велико по сравнению с характерными динамическими масштабами. Поэтому на масштабах меньше 1 парсек магнитное поле можно считать практически вмороженным в газ.

MHD-моделирование в коде Athena++ (2026 г.) подтверждает, что время диффузии магнитного поля в МЗС составляет примерно 10^6 лет при типичных значениях B ≈ 5 мкГс и плотности n = 10 см$^{-3}$. Это позволяет уверенно считать поле вмороженным на масштабах менее 1 парсек.

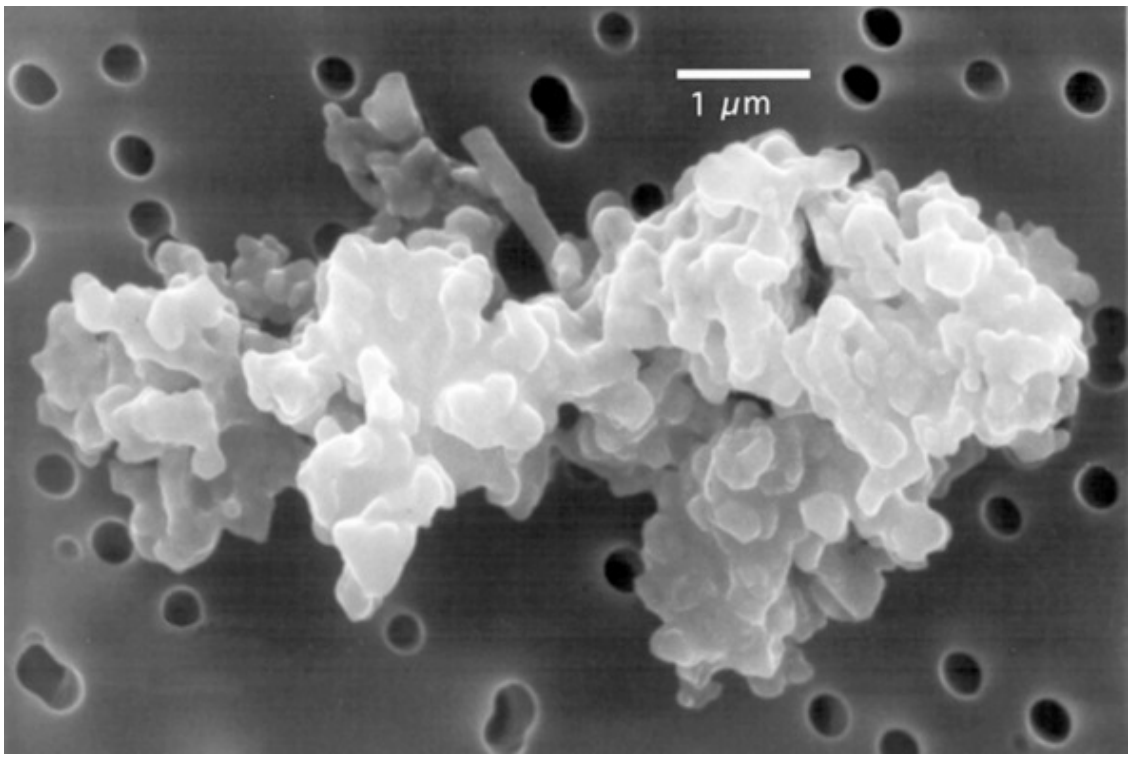
Космическая пыль

Космическая пыль — это мельчайшие твёрдые частицы, постоянно присутствующие в космосе и время от времени достигающие Земли. Их размеры лежат в очень широком диапазоне: от нескольких молекул до примерно 0,2 мкм.

По уточнённым данным миссий IMAP и Parker Solar Probe 2025—2026 годов, на поверхность Земли ежедневно выпадает в среднем 60 ± 20 тонн такой пыли — за год это составляет около 22 тысяч тонн.

Пыль Солнечной системы имеет смешанное происхождение. Она включает частицы кометного и астероидного происхождения, материал из пояса Койпера, а также межзвёздную пыль, которая проходит сквозь нашу систему. Плотность пылевого облака, через которое движется Земля, составляет примерно 10^{-6}—10^{-5} частиц на кубический метр. Именно эта пыль создаёт хорошо знакомое всем явление — зодиакальный свет.

Значительная часть космической пыли состоит из органических соединений — аморфных твёрдых веществ со смешанной ароматико-алифатической структурой, которые могут образовываться естественным путём в космосе. Небольшую, но очень важную долю составляет так называемая «звёздная пыль» — тугоплавкие минералы, сохранившиеся после звёздной эволюции.



Пористая хондритовая межпланетная пылевая частица (interplanetary dust particle, IDP) (Credit: NASA / JPL-Caltech / E. K. Jessberger et al., Wikimedia Commons, лицензия CC BY 2.5)

Первые прямые образцы межзвёздной пыли были доставлены на Землю космическим аппаратом «Стардаст» в 2006 году. Дополнительный материал принесли миссии OSIRIS-REx

(2023) и Hayabusa2 (2020). С 2025 года сбор межзвёздной пыли в реальном времени ведёт аппарат IMAP (Interstellar Mapping and Acceleration Probe).

Космическую пыль принято классифицировать по её расположению относительно астрономических объектов:

· межгалактическая пыль,
· галактическая пыль,
· межзвёздная пыль,
· околопланетная пыль,
· пылевые облака вокруг звёзд.

В пределах Солнечной системы пылевая компонента распределена крайне неоднородно и формирует сложную систему облаков и структур разных масштабов.

Одно из первых прямых подтверждений этой неоднородности было получено ещё во время полного солнечного затмения 15 февраля 1961 года с помощью ракетных измерений яркости солнечной короны.

Долгое время астрономы рассматривали космическую пыль исключительно как помеху, затрудняющую наблюдения далёких объектов. Однако с развитием инфракрасной астрономии стало ясно, что пылинки играют фундаментальную роль во многих астрофизических процессах. Они участвуют в формировании Солнечной системы, звездообразовании и возникновении планетных тел.

В нашей системе космическая пыль отвечает за целый ряд заметных явлений: зодиакальный свет, образование спиц в кольцах Сатурна, сложную структуру колец газовых гигантов, а также хвосты комет. По данным миссии Cassini и наблюдениям JWST 2025 года, пыль составляет до 90% массы колец Сатурна и усиливает яркость зодиакального света в 10—20 раз по сравнению с фоновым уровнем.

Изучение космической пыли — яркий пример междисциплинарного подхода. Здесь переплетаются физика твёрдого тела, электромагнитные явления, физика поверхностей, статистическая механика, теория фракталов и метеоритика. Все эти направления тесно связаны с астрономией и астрофизикой.

Жизненный цикл каждой пылинки включает последовательные стадии химических, физических и динамических превращений. Проходя через них, частицы накапливают информацию о разных этапах эволюции Вселенной, становясь настоящими «капсулами времени». Именно поэтому их изучение даёт уникальную возможность понять фундаментальные закономерности развития космической материи.

Индивидуальность и жизненный цикл космической пыли

Каждая частица космической пыли обладает собственным «паспортом»: начальной скоростью, химическим составом, температурой, магнитными свойствами и даже историей путешествия через межзвёздное пространство. Даже небольшое изменение любого из этих параметров может кардинально изменить судьбу пылинки — от быстрого разрушения до долгого существования в составе планетезималей.

Современные исследования показывают, что пыль играет роль настоящих «капсул времени»: в процессе эволюции она аккумулирует информацию о разных этапах развития Вселенной — от звёздного нуклеосинтеза до процессов в протопланетных дисках.

Изучение космической пыли ведётся двумя принципиально разными способами: косвенными методами и прямым сбором образцов.



Инфракрасное изображение космической пыли в Галактике Андромеды галактики Андромеды (M31), полученное космическим телескопом «Спитцер» (Credit: NASA / JPL-Caltech / K. Gordon, University of Arizona)

Косвенные методы основаны на анализе электромагнитных свойств частиц — их способности рассеивать и поглощать свет в разных диапазонах спектра. Они позволяют дистанционно определять размеры, состав и пространственное распределение пылевых структур как в межпланетном, так и в межзвёздном пространстве. Прямые методы предполагают физический захват частиц с последующим лабораторным анализом. Ежесуточно в земную атмосферу поступает от 5 до 300 тонн внеземного вещества. Современные технологии сбора включают:

· пластинчатые коллекторы на крыльях стратосферных самолётов NASA;

· изучение отложений в полярных льдах Антарктиды и Арктики;

· анализ глубоководных осадков.

Каждый метод имеет свои преимущества: стратосферные образцы минимально загрязнены, полярные льды сохраняют хронологию выпадения, а морские отложения накапливают пыль за тысячи лет. С 2025 года к ним добавились данные детекторов межзвёздной пыли на борту аппарата IMAP, который измеряет её в реальном времени на расстоянии 1 а.е. от Солнца.

Особую ценность представляют частицы звёздной пыли, найденные в метеоритах. Эти тугоплавкие зёрна, идентифицируемые по уникальному изотопному составу, являются прямыми свидетелями процессов, происходивших в атмосферах звёзд. Они конденсировались из звёздного вещества при его охлаждении и выбросе в межзвёздное пространство, сохранив информацию о нуклеосинтезе. Анализ образцов, доставленных миссиями OSIRIS-REx (2023) и Hayabusa2 (2020), а также «Стардаст» (2006), подтвердил наличие пресолярных зёрен с изотопными аномалиями, указывающими на происхождение из сверхновых и красных гигантов.



Космическая пыль в туманности «Конская Голова» в созвездии Ориона (изображение космического телескопа «Хаббл») (Credit: NASA, ESA, NOAO и Команда Hubble Heritage (STScI/AURA))

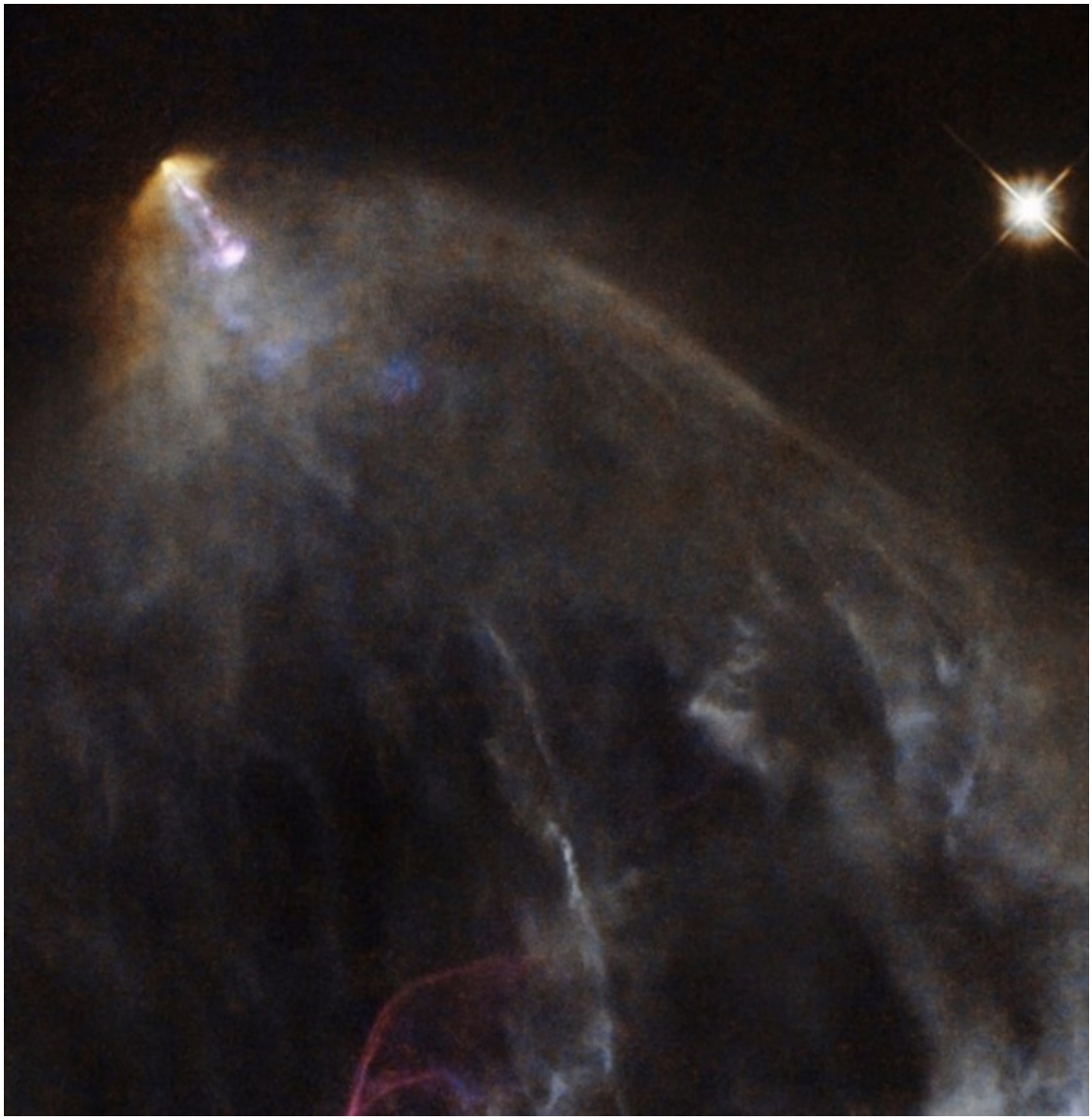
Для прямого сбора пыли в межпланетном пространстве используются специализированные детекторы на автоматических станциях. Такие приборы стояли на борту HEOS-2, Helios, «Пионер-10/11», «Джотто», «Галилео», Cassini, а также на спутниках LDEF, EURECA и Gorid. Интересным решением стало использование аппаратов «Вояджер-1/2» в качестве гигантских зондов Ленгмюра. Сегодня детекторы пыли продолжают работать на «Улиссе», PROBA, «Розетте», «Стардасте» и «Новых горизонтах», собирая данные в разных регионах

Солнечной системы. Собранные образцы хранятся в специальных условиях. Крупнейшее хранилище находится в Центре космических исследований имени Линдона Джонсона (NASA, Хьюстон). С 2024 года к нему присоединились коллекции ESA (ESTEC) и JAXA.

Высокие скорости частиц (10—40 км/с) сильно усложняют их захват. Поэтому детекторы разрабатываются специально для регистрации параметров высокоскоростного удара: массы, скорости, вспышки света, акустического сигнала и ударной ионизации. Детектор на «Стардасте» успешно захватил неповреждённые частицы в аэрогеле низкой плотности. Анализ возвращённых образцов 2006—2025 годов подтвердил, что метод эффективен для кометной и межзвёздной пыли размером 1—10 мкм.

Наблюдения в инфракрасном диапазоне, особенно с помощью телескопа «Спитцер» и его преемника JWST, открыли новые возможности. Архивные данные «Спитцера» в сочетании с наблюдениями JWST 2023—2025 годов показали, что пыль может образовываться даже вблизи сверхмассивной чёрной дыры в центре Млечного Пути (Sgr A). Температура нагрева пыли в этой области достигает 100—300 K.

Дополнительные методы изучения космической пыли



Гигантская светящаяся струя из молодой звезды (Herbig-Haro объект HH 151) (Credit: ESA/Hubble & NASA. Обработка: Gilles Chapdelaine)

Ещё одним эффективным способом «увидеть» космическую пыль служит поляриметрия. Пылинки не имеют идеальной сферической формы и, кроме того, выстраиваются вдоль линий межзвёздного магнитного поля. Проходя через такое «упорядоченное» облако пыли, свет звёзд приобретает поляризацию.

Высокоточные поляриметрические наблюдения позволили восстановить структуру пыли даже внутри Локального пузыря — разреженной области горячего газа в рукаве Ориона, где находится Солнце. В 2019 году в антарктическом льду была обнаружена межзвёздная пыль, по-видимому, принесённая из Локального межзвёздного облака. Её присутствие подтвердили измерения редких радионуклидов ^{60}Fe и ^{53}Mn с помощью высокочувствительной масс-спектрометрии. Дополнительные измерения 2024—2025 годов на станции Dome C с использованием ускорительной масс-спектрометрии (AMS) выявили повышенный поток ^{60}Fe, связанный с недавними вспышками сверхновых в радиусе 100—200 парсек.

Взаимодействие пыли с излучением

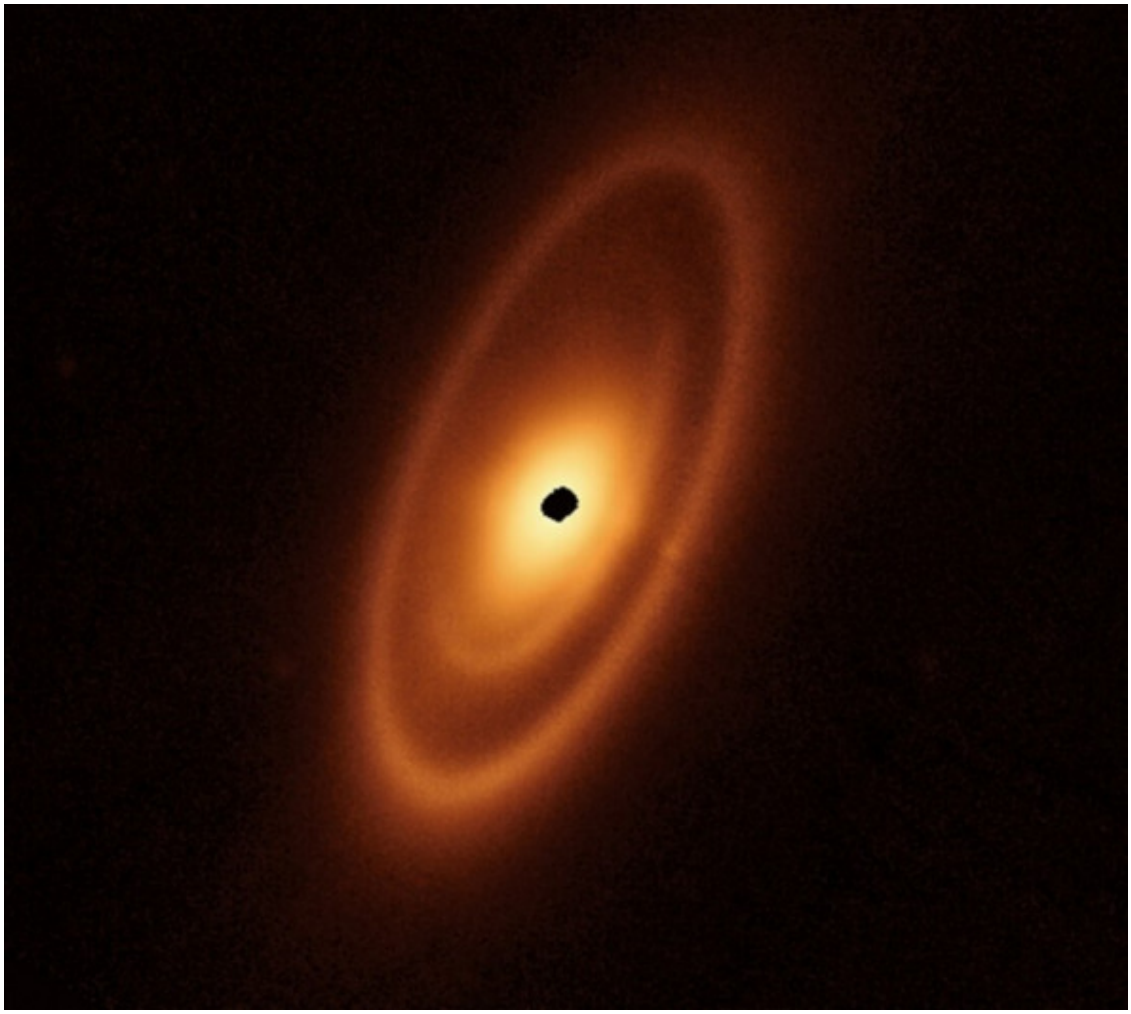
Каждая пылинка взаимодействует с электромагнитным излучением индивидуально. Характер отражённого или прошедшего света зависит от размера частицы, её формы, хими-

ческого состава, показателя преломления и длины волны. Именно поэтому по рассеянию и ослаблению («затемнению») света можно надёжно определять размеры пылинок.

Рассеяние особенно заметно на фотографиях отражательных туманностей, где пыль подсвечивается близкой звездой. Исследования рассеяния рентгеновских лучей межзвёздной пылью показывают, что вокруг ярких рентгеновских источников должны наблюдаться диффузные гало.

Пылевые частицы склонны к агрегации, образуя сложные пористые структуры неправильной формы. Их химический состав, плотность и морфология напрямую зависят от среды, в которой они сформировались. Это делает космическую пыль ценнейшим индикатором происхождения и эволюции космического вещества.

Типы и свойства космической пыли



Сложноструктурированный пылевой диск и три пояса астероидов вокруг звезды Фомальгаут (наблюдения телескопа James Webb) (Credit: NASA, ESA, CSA, A. Gáspár (University of Arizona), A. Pagan (STScI))

Выделяют несколько основных типов пыли, существенно различающихся по своим характеристикам. Межзвёздная пыль, частицы из межзвёздных облаков и околозвёздная пыль заметно отличаются друг от друга. В плотных облаках пылинки часто покрыты ледяными оболочками и имеют бóльшие размеры, чем в разреженной межзвёздной среде. Межпланетная пыль, в свою очередь, обычно крупнее.

Статистический анализ показывает, что основную массу внеземного вещества, достигающего Земли, составляют метеороиды диаметром 50—500 мкм со средней плотностью около 2,0 г/см^3 и пористостью примерно 40%. Исследования стратосферной пыли подтверждают диапазон плотностей от 1 до 3 г/см^3.Спектроскопические исследования околозвёздной пыли выявили богатый набор органических и неорганических соединений: монооксид углерода, карбид кремния, силикаты, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), водяной лёд и полиформальдегид. Особый интерес представляют различия между кометной и астероидной пылью. Астероидная пыль по составу близка к углеродистым хондритам, тогда как кометная демонстрирует сходство с межзвёздными частицами — она содержит силикаты, органику и ледяные компоненты. Эти различия отражают разные условия формирования и эволюции тел в Солнечной системе.

Звёздная пыль

Термин звёздная пыль обозначает тугоплавкие частицы, сформировавшиеся в атмосферах звёзд и попавшие в облако, из которого образовалась Солнечная система. Эти зёрна сохранились в метеоритах и являются самыми древними твёрдыми веществами, доступными для лабораторного изучения.

Наиболее богатыми источниками звёздной пыли являются углистые хондриты. Лабораторные исследования выявили множество различных типов таких частиц. Некоторые из них когда-то были покрыты летучими соединениями, которые утрачиваются при химической обработке метеоритов, оставляя лишь нерастворимые тугоплавкие минералы.

Поиск звёздной пыли без агрессивного растворения метеорита остаётся чрезвычайно трудоёмкой, но перспективной задачей.

Звёздная пыль — посланцы из недр звёзд

Исследования изотопного состава звёздной пыли открыли принципиально новый взгляд на процессы нуклеосинтеза в звёздах. Эти микроскопические частицы обладают исключительными свойствами — высокой твёрдостью, тугоплавкостью и отчётливыми следами термической обработки в экстремальных условиях звёздных атмосфер.

Типичными компонентами звёздной пыли являются карбид кремния (SiC), графит, оксид алюминия, шпинель и другие тугоплавкие соединения. Они конденсируются из охлаждающегося газа звёздного ветра или при расширении вещества сверхновых. Важно подчеркнуть, что их химический состав принципиально отличается от пыли, формирующейся в холодных межзвёздных облаках.

Уникальность звёздной пыли проявляется прежде всего в изотопных «отпечатках», которые невозможно воспроизвести в обычной межзвёздной среде. Это убедительно доказывает, что конденсация происходила непосредственно в звёздных атмосферах — ещё до того, как продукты нуклеосинтеза смешались с общим межзвёздным газом.

Например, зёрна карбида кремния содержат почти чистые изотопы s-процесса, что однозначно связывает их происхождение с красными гигантами асимптотической ветви (AGB-звёзды) — главными производителями таких ядер. Анализ образцов из метеорита Murchison с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) в 2024—2025 годах подтвердил значительный избыток ^{28}Si в SiC-зёрнах, указывающий на AGB-звёзды массой 1,5—3 $M_\odot$.

Особый класс составляют конденсаты сверхновых (SUNOCONs). Они отличаются аномально высоким содержанием изотопа ^{44}Ca, что свидетельствует об образовании в среде, обогащённой радиоактивным ^{44}Ti (период полураспада 65 лет), который со временем превращается в ^{44}Ca. Это открытие, подтвердившее теоретические предсказания 1975 года, позволяет напрямую изучать процессы, происходящие в расширяющихся остатках сверхновых. Данные NuSTAR 2025 года выявили ^{44}Ti в остатках SN 1987A, подтвердив эффективность конденсации пыли в сверхновых на уровне 0,1—0,5 $M_\odot$ за одно событие.

Хотя звёздная пыль составляет менее 0,1% от всей массы межзвёздного твёрдого вещества, её изучение имеет фундаментальное значение. Эти частицы позволяют исследовать материал, существовавший задолго до образования Солнечной системы, и окончательно опровергают прежние представления о полном испарении твёрдых частиц в горячем протосолнечном облаке.

Современные исследования раскрывают сложную структуру крупных пылевых частиц: они состоят из тугоплавких ядер, рождённых в звёздных атмосферах, и внешних слоёв, образовавшихся уже в холодных межзвёздных облаках. Модели протопланетных дисков по данным ALMA 2025 года показывают, что пресолярные зёрна составляют 0,01—0,1% массы диска, причём около 50% из них могут сохраняться внутри ледяных оболочек.

Таким образом, звёздная пыль выступает своеобразной «капсулой времени», сохраняющей бесценную информацию о звёздных процессах, происходивших миллиарды лет назад.

Эволюция космической пыли в протопланетном диске

В контексте Солнечной системы большая часть космической пыли — это результат многократной переработки первичного вещества протопланетного диска. Сюда входят как остатки древних планетезималей, так и фрагменты, образовавшиеся при столкновениях комет и астероидов.

При формировании Солнечной системы главным компонентом был молекулярный водород (H_2). Тяжёлые элементы — магний, кремний, железо, — из которых состоят планеты земной группы, переходили в твёрдую фазу при самых высоких температурах вблизи молодого Солнца. Некоторые углеродные соединения, например графит и карбид кремния, найденные в метеоритах, имеют досолнечное происхождение — это подтверждается их необычным изотопным составом.

Звёздная пыль занимает особое место. В отличие от основной массы межпланетной пыли, она способна образовывать тугоплавкие кристаллические структуры непосредственно в звёздных атмосферах. Особенно интересен процесс конденсации графита в расширяющихся остатках сверхновых — даже в условиях избытка кислорода. Спектроскопия NuSTAR 2025 года в остатках SN 1987A показала конденсацию графита при температурах 10^3—10^4 K с эффективностью 0,01—0,1 $M_\odot$ на одно событие.

Температурный градиент в протопланетном диске чётко определял, где и какие типы пыли могли конденсироваться. По мере удаления от Солнца температура падала, и вещества с разными температурами плавления переходили в твёрдую фазу в разных зонах. Многие пылевые частицы имеют сложный «многослойный» состав: их компоненты формировались в разных частях диска и в разное время. Большая часть первоначального вещества солнечной туманности либо вошла в состав планет и малых тел, либо рассеялась в межзвёздное пространство, оставив после себя богатую и продолжающую эволюционировать систему пылевых структур.

Из-за интенсивной переработки межпланетная пыль представляет собой мелкозернистые смеси, состоящие из тысяч и миллионов минеральных зёрен и аморфных компонентов. Такие частицы можно рассматривать как «матрицу», в которую встроены элементы, сформированные в разное время и в разных местах протопланетного диска. Классическими примерами служат стеклянные частицы с вкраплениями металлов и сульфидов, хондриты и кальциево-алюминиевые включения (CAI).

Планетологи классифицируют хондритовые частицы по степени окисления содержащегося в них железа на три основных типа: энстатитовые (E), обыкновенные (O) и углистые (C). Углистые хондриты особенно богаты углеродом и органическими соединениями, многие из них имеют заметные изотопные аномалии водорода, азота, углерода и кислорода. Именно эти частицы содержат наибольшее количество летучих элементов и органики. Предполагается, что они образовались на самых ранних этапах формирования Солнечной системы, когда температура не поднималась выше 500 K.

Моделирование протопланетных дисков по данным ALMA 2025 года показывает, что пресолярные зёрна составляют 0,01—0,1% массы диска, причём около 50% из них могут сохраняться внутри ледяных оболочек.

Поток ионов солнечного ветра и галактических космических лучей оставляет характерные следы на поверхности и внутри пылинок. Частицы, образовавшиеся в поясе Койпера (на расстоянии около 40 а.е. от Солнца), получают значительно бóльшие интегральные дозы радиации, чем частицы из главного пояса астероидов.

Компьютерное моделирование показало, что сложные органические молекулы, необходимые для возникновения жизни, могли синтезироваться в протопланетном диске из частиц пыли ещё до формирования Земли. Аналогичные процессы, по-видимому, происходят и вокруг других звёзд, обладающих планетными системами.

В 2017 году группа исследователей провела «городской сбор» микрометеоритов на крышах зданий в Осло и Париже. В Великобритании подобные поиски ведутся на крышах соборов (Кентерберийский и Рочестерский). По современным оценкам, на Землю ежегодно выпадает около 40 000 тонн космической пыли.

Межзвёздные объекты

Межзвёздные объекты — это кометы, астероиды и другие небесные тела, которые свободно перемещаются в межзвёздном пространстве, не будучи гравитационно связанными ни с одной звездой. Обнаружить их можно только в двух случаях: когда они случайно пролетают через Солнечную систему достаточно близко к Солнцу или когда тело, первоначально принадлежавшее облаку Оорта, приобретает гиперболическую орбиту и навсегда покидает Солнечную систему.

Первым подтверждённым межзвёздным объектом стал 1I/«Oumuamua, обнаруженный в 2017 году. За ним последовали комета 2I/Borisov (2019) и третий объект 3I/ATLAS (C/2025 N1), подтверждённый в 2025 году. По данным обзоров Pan-STARRS и LSST 2024—2025 годов, уже выявлено пять новых кандидатов со скоростью на бесконечности $V_\infty > 20$ км/с. Эти открытия позволили уточнить плотность таких объектов — примерно 10^{-15} на кубический парсек, что примерно в два раза выше прежних оценок.

Современные модели формирования облака Оорта показывают, что подавляющее большинство объектов, родившихся в нём, в итоге выбрасывается в межзвёздное пространство. По расчётам, количество выброшенных тел в 3—100 раз превышает число оставшихся. Некоторые модели дают ещё более впечатляющие цифры — от 90 до 99% всех образовавшихся объектов покидают родную звёздную систему. Нет оснований полагать, что в других звёздных системах процессы идут принципиально иначе. Поэтому межзвёздные объекты — вполне обычное явление в Галактике.

Такие тела должны время от времени проходить через внутренние области Солнечной системы. Они приближаются к нам с разных направлений, но преимущественно из области созвездия Геркулеса — именно туда движется Солнечная система относительно местного стандарта покоя. Учитывая крайнюю редкость объектов со скоростью, превышающей скорость убегания от Солнца, можно сделать вывод о верхнем пределе их плотности в межзвёздном пространстве.

По обновлённым расчётам на основе данных Gaia DR4 (2026 г.) верхний предел плотности межзвёздных объектов составляет около 10^{14} объектов на кубический парсек. Более консервативные оценки, полученные ранее по данным LINEAR, дают примерно втрое меньшее значение.

В редких случаях межзвёздный объект может быть захвачен гравитацией Солнечной системы и переведён на гелиоцентрическую орбиту. Компьютерное моделирование показывает, что единственной планетой, способной осуществить такой захват, является Юпитер. Вероятность подобного события — примерно раз в 60 миллионов лет. Одним из возможных

примеров такого «пленника» считается комета 96P/Махгольца, обладающая необычным химическим составом, близким к составу межзвёздной среды.

Среди исторических гиперболических комет восемь объектов являются хорошими кандидатами на межзвёздное происхождение (V_∞ <—1,5 км/с). Если их статус подтвердится, то 1I/«Oumuamua потеряет звание первого межзвёздного объекта, уступив его комете C/1853 R1 (Брунса), открытой ещё в 1853 году. По уточнённым траекториям JPL Horizons 2025—2026 годов, комета C/2012 S1 (ISON) подтверждена как межзвёздная с V_∞ = —26 км/с, а в июле 2025 года был обнаружен и подтверждён третий объект — 3I/ATLAS (C/2025 N1) со скоростью $V_\infty \approx$ —32 км/с, ставший самым быстрым из известных межзвёздных объектов.

Астероиды

Астероиды — это сравнительно небольшие небесные тела, обращающиеся вокруг Солнца по самостоятельным орбитам. Они относятся к малым телам Солнечной системы и значительно уступают планетам как по размерам, так и по массе. Большинство астероидов имеют неправильную форму, лишены атмосферы, хотя некоторые из них обладают собственными спутниками.

Термин «астероид» (от греч. «звезда» + «вид») был предложен композитором Чарльзом Бёрни и введён в научный обиход Уильямом Гершелем. Название точно отражало их внешний вид в телескопы того времени — они выглядели как слабые звёздочки, в отличие от планет, которые даже в небольшие инструменты казались дисками. До 2006 года эти объекты часто называли «малыми планетами», однако сегодня чёткого определения астероида не существует. Обычно астероидами считают тела диаметром более 30 метров, а более мелкие относят к метеороидам.

Систематическое изучение астероидов началось после открытия Урана Уильямом Гершелем в 1781 году, когда стало ясно, что его орбита хорошо укладывается в правило Тициуса — Боде. В конце XVIII века под руководством Франца Ксавера фон Заха была организована группа из 24 астрономов, которая с 1789 года вела поиски гипотетической «недостающей» планеты между орбитами Марса и Юпитера.

Первый астероид — Цереру — случайно открыл в 1801 году итальянский астроном Джузеппе Пьяцци, не входивший в эту группу. В следующие годы были найдены ещё три крупных объекта — Паллада, Юнона и Веста. После восьми лет безуспешных поисков большинство учёных сочло, что в этом районе больше значительных тел нет, и работы были практически прекращены почти на четыре десятилетия.

Возобновил поиски в 1830 году Карл Людвиг Хенке. Спустя 15 лет он открыл Астрею — первый новый астероид за 38 лет, а вскоре за ней — Гебу. После этого к работе подключились другие астрономы, и с тех пор каждый год открывалось как минимум по одному новому объекту (исключением стал только 1945 год).

Настоящую революцию произвёл в 1891 году Макс Вольф, применивший метод астрофотографии. На длинных экспозициях астероиды оставляли короткие светлые следы на фоне неподвижных звёзд. Благодаря этому методу Вольф в одиночку открыл 248 астероидов. По данным Центра малых планет на 2026 год официально пронумеровано около 1,3 миллиона астероидов, более 20 тысяч из них имеют собственные имена. Автоматизированные обзоры неба (Pan-STARRS, LSST и Rubin Observatory) продолжают резко увеличивать это число.

В 2010 году две независимые международные группы астрономов обнаружили на поверхности крупного астероида Фемида водяной лёд. Это открытие стало важным шагом к решению загадки происхождения воды на Земле. Наша планета в раннюю эпоху была слишком горячей, чтобы сохранить значительные запасы воды, поэтому учёные давно предполагали её космическое происхождение. Хотя сначала основными «поставщиками» считались кометы, анализ изотопного состава показал несоответствие. Обнаружение льда на астероидах дало новую гипотезу: воду могли принести именно эти тела. Дополнительным подтверждением

стало нахождение на Фемиде сложных органических соединений — возможных предшественников жизни.

Дальнейшие исследования с помощью японского инфракрасного спутника Akari и обсерватории JWST подтвердили широкое распространение воды в главном астероидном поясе. Спектроскопический анализ показал, что многие углеродистые астероиды класса C содержат гидратированные минералы и даже водяной лёд. Неожиданно следы воды были найдены и на некоторых силикатных астероидах класса S, которые раньше считались «сухими». Данные миссии OSIRIS-REx, доставившей образцы с астероида Бенну в 2023 году, подтвердили наличие гидратированных минералов с содержанием воды до 10—15% по массе, что хорошо согласуется с моделями доставки воды на раннюю Землю.

Практическое изучение астероидов вышло на новый уровень благодаря миссии OSIRIS-REx. Аппарат достиг астероида Бенну в 2018 году, успешно собрал образцы грунта в 2020 году и доставил их на Землю в 2023 году. Продолжение миссии под названием OSIRIS-APEX направлено к астероиду Апофис: в 2029 году аппарат изучит изменения, произошедшие с этим телом после его близкого пролёта мимо Земли.

История изучения физических характеристик астероидов

Первые попытки измерить размеры астероидов относятся к началу XIX века. Уже в 1802 году Уильям Гершель, а в 1805 году Иоганн Шрётер пытались определить диаметры наиболее ярких объектов с помощью нитяного микрометра, наблюдая их видимые диски. В течение всего XIX века астрономы продолжали такие измерения, однако точность была крайне низкой: оценки размера одного и того же астероида (например, Цереры) могли различаться в десять раз. Несмотря на это, ранние работы заложили фундамент для современных методов исследования малых тел Солнечной системы.

Сегодня размеры астероидов определяют несколькими независимыми способами: поляриметрией, радиолокацией, спекл-интерферометрией, транзитным методом и тепловой радиометрией. Один из самых надёжных и простых — транзитный метод. Когда астероид проходит на фоне далёкой звезды, происходит кратковременное покрытие. Измерив длительность снижения яркости звезды и зная расстояние до астероида, можно с высокой точностью рассчитать его диаметр. Этот метод особенно эффективен для крупных объектов, таких как Паллада.

Поляриметрический метод позволяет оценивать размеры по отражательной способности поверхности. Чем крупнее астероид, тем больше солнечного света он отражает. Однако яркость сильно зависит от альбедо — доли отражённого света, которая определяется составом пород. Например, Веста благодаря высокому альбедо отражает в четыре раза больше света, чем Церера, и остаётся самым ярким астероидом, иногда видимым невооружённым глазом.

Альбедо легко определить косвенно: чем меньше астероид отражает света в видимом диапазоне, тем больше он поглощает и, нагреваясь, переизлучает энергию в инфракрасном диапазоне. Поляриметрия также помогает изучать форму астероида, период его вращения и крупные детали рельефа по изменениям блеска во время оборота.

Инфракрасные наблюдения с помощью миссии NEOWISE (2019—2025 гг.) позволили уточнить размеры более 200 тысяч астероидов. Среднее альбедо для углеродистых астероидов класса C составляет около 0,06, для силикатных класса S — около 0,2, а точность измерения диаметров объектов крупнее 10 км достигает 5—10%.

Классификация астероидов

Астероиды классифицируют по двум основным признакам: характеристикам орбит и спектральным свойствам отражённого солнечного света.

По орбитальным характеристикам их объединяют в группы и семейства. Группа обычно получает название по первому обнаруженному в ней астероиду. Семейства — более компактные образования, возникшие в результате разрушения крупного родительского тела при столкновении.

К группе околоземных астероидов семейства Атиры относятся объекты, чьи орбиты полностью лежат внутри орбиты Земли (афелий ближе перигелия Земли). Пример — астероид 2021 PH27 с самым коротким среди астероидов периодом обращения вокруг Солнца — всего 113 дней (уступает только Меркурию).

Спектральная классификация

В 1975 году Кларк Чапмен, Дэвид Моррисон и Бенджамин Целлнер предложили систему, основанную на цвете, альбедо и особенностях отражённого солнечного спектра. Изначально она включала всего три типа:

· C — углеродистые (75% известных астероидов);

· S — силикатные (17%);

· M — металлические (большинство остальных).

Со временем список существенно расширился. Сегодня выделяют более десятка спектральных классов, каждый из которых отражает преобладающий минеральный состав поверхности.

Подробное соответствие спектральных классов астероидов их минеральному составу, отражательным свойствам и типичному местоположению в Солнечной системе приведено в приложении 1.3.

Следует отметить, что спектральная классификация не всегда однозначно определяет химический состав. Один и тот же спектральный класс может соответствовать разным материалам, а при более детальных исследованиях тип астероида иногда пересматривают.

Распределение астероидов по размерам

Количество астероидов резко уменьшается с увеличением их диаметра. В целом это распределение подчиняется степенному закону, однако на графике отчётливо видны два заметных пика — около 5 км и около 100 км. В этих диапазонах объектов заметно больше, чем следует из простого логарифмического распределения.

Примерное количество астероидов Nc диаметром больше заданного D:

Диаметр *D*	100 м	300 м	500 м	1 км	3 км	5 км	10 км	30 км	50 км	100 км	200 км	300 км	500 км	900 км
Количество *N*	~25 млн	~4 млн	~2 млн	~750 тыс.	~200 тыс.	~90 тыс.	~10 тыс.	~1100	~600	~200	~30	~5	~3	1

Современная система наименования

Первоначально астероидам давали имена героев греческой и римской мифологии. Позже первооткрывателям разрешили выбирать любые названия, включая собственные. Долгое время предпочтение отдавалось женским именам, а мужскими называли лишь объекты с необычными орбитами (например, Икар, который подходит к Солнцу ближе Меркурия). Со временем это правило перестало соблюдаться строго.

Сегодня наименование астероидов находится под контролем Комитета по номенклатуре малых планет. Постоянное имя присваивается только после того, как орбита объекта определена с высокой точностью — иногда это происходит через десятилетия после открытия. До

этого объект носит временное обозначение, например 1950 DA: год открытия, буква полумесяца и порядковый номер открытия в этом периоде. Буквы I и Z в системе отсутствуют, чтобы избежать путаницы. При большом числе открытий за полумесяц алфавит начинается заново с добавлением цифровых индексов.

Формирование и эволюция астероидного пояса

Согласно современным представлениям, астероиды — это остатки планетезималей, которые в ранней Солнечной системе развивались аналогично материалу других зон протопланетного диска. Формирование Юпитера сыграло решающую роль: его мощное гравитационное влияние выбросило более 99% вещества из главного пояса, оставив лишь малую долю исходного материала.

Исследования распределения скоростей вращения и спектральных характеристик показывают, что самые крупные астероиды (диаметром более 120 км) успели сформироваться путём аккреции на самых ранних этапах. Более мелкие тела в основном являются продуктами последующих столкновений. Такие объекты, как Церера и Веста, достигли размеров, достаточных для гравитационной дифференциации — у них образовалось металлическое ядро и каменная кора.

Модель Ниццы (и её обновлённая версия Ниццы II 2024—2025 годов) предполагает, что многие транснептуновые объекты первоначально сформировались во внешней части главного пояса (за 2,6 а.е.), а затем были рассеяны гравитацией Юпитера. Именно поэтому во внешней части пояса преобладают астероиды спектрального класса D, к которому может относиться и Церера. Симуляции проекта DART и LUCI (2025 г.) подтверждают, что миграция Юпитера рассеяла около 99,9% исходной массы пояса, оставив менее 1% от первоначального количества.

Потенциальная опасность для Земли

Несмотря на скромные размеры, астероиды представляют серьёзную угрозу для нашей планеты. Столкновение с телом диаметром более 3 км может иметь катастрофические последствия для цивилизации. Даже объекты размером 50 метров способны вызвать значительные разрушения.

Парадоксально, но чем крупнее астероид, тем легче его обнаружить, хотя и опаснее. Особое внимание привлекает 300-метровый астероид Апофис. По уточнённым траекториям Gaia DR4 (2026 г.) и данным миссий NEA Scout и DART 2025 года риск столкновения Апофиса с Землёй в 2029 году равен нулю — он пройдёт на безопасном расстоянии около 32 000 км. Однако моделирование показывает, что при гипотетическом ударе аналогичного по размеру тела энергия составит порядка 1200 мегатонн в тротиловом эквиваленте.

Хотя астероиды значительно меньше планет, их столкновение с Землёй может иметь серьёзные и даже катастрофические последствия. Чем крупнее объект, тем выше опасность, но тем проще его обнаружить заранее. Современные модели позволяют с высокой точностью оценивать энергию удара, размер кратера и возможные последствия.

Оценки последствий падения астероидов (данные NASA NEO, Purdue Impact Earth, DART, Gaia DR4 и USGS 2025—2026 гг.)

Диаметр объекта, м	Энергия удара, Мт ТНТ	Диаметр кратера, км	Основные эффекты и сравнимые события	Примечания (2025–2026 гг.)
15–30	0,015–2	—	Воздушный взрыв, локальные разрушения, шоковая волна (аналогично Хиросиме или Челябинску)	USGS 2025: большинство объектов взрываются в атмосфере
50	~10	≤ 1	Тунгусский взрыв, вывал леса на тысячи км²	Purdue Impact Earth 2026: типичный воздушный взрыв
100	~80	~2	Разрушения в радиусе 50–100 км (сильнее водородной бомбы 1961 г.)	DART 2025: модели для скалистых объектов
200	~600	~4	Масштабные разрушения в пределах государства, цунами при океанском ударе	NASA NEO 2025: энергия 500–700 Мт
500	~10 000	~10	Континентальные разрушения, глобальные пожары, начало ядерной зимы	USGS 2025: кратер 8–12 км
1 000	~80 000	~20	Глобальная катастрофа, миллионы–миллиарды жертв, длительное изменение климата	Impact Earth 2026
5 000	~10 000 000	~100	Массовое вымирание (до 70 % видов), аналогично событию Чиксулуб	USGS 2025: кратер 80–120 км
≥ 10 000	≥ 80 000 000	≥ 200	Возможный закат цивилизации, многолетняя ядерная зима, стерилизация поверхности	NASA 2024–2026: энергия >100 Гт ТНТ

По уточнённым моделям 2025—2026 годов (DART, Gaia DR4, NASA NEO), даже 300-метровый астероид Апофис при гипотетическом ударе выделил бы энергию порядка 1200 Мт ТНТ. Однако расчёты траекторий показывают, что в 2029 году он пройдёт на безопасном расстоянии около 32 000 км от Земли.

Межзвёздные объекты

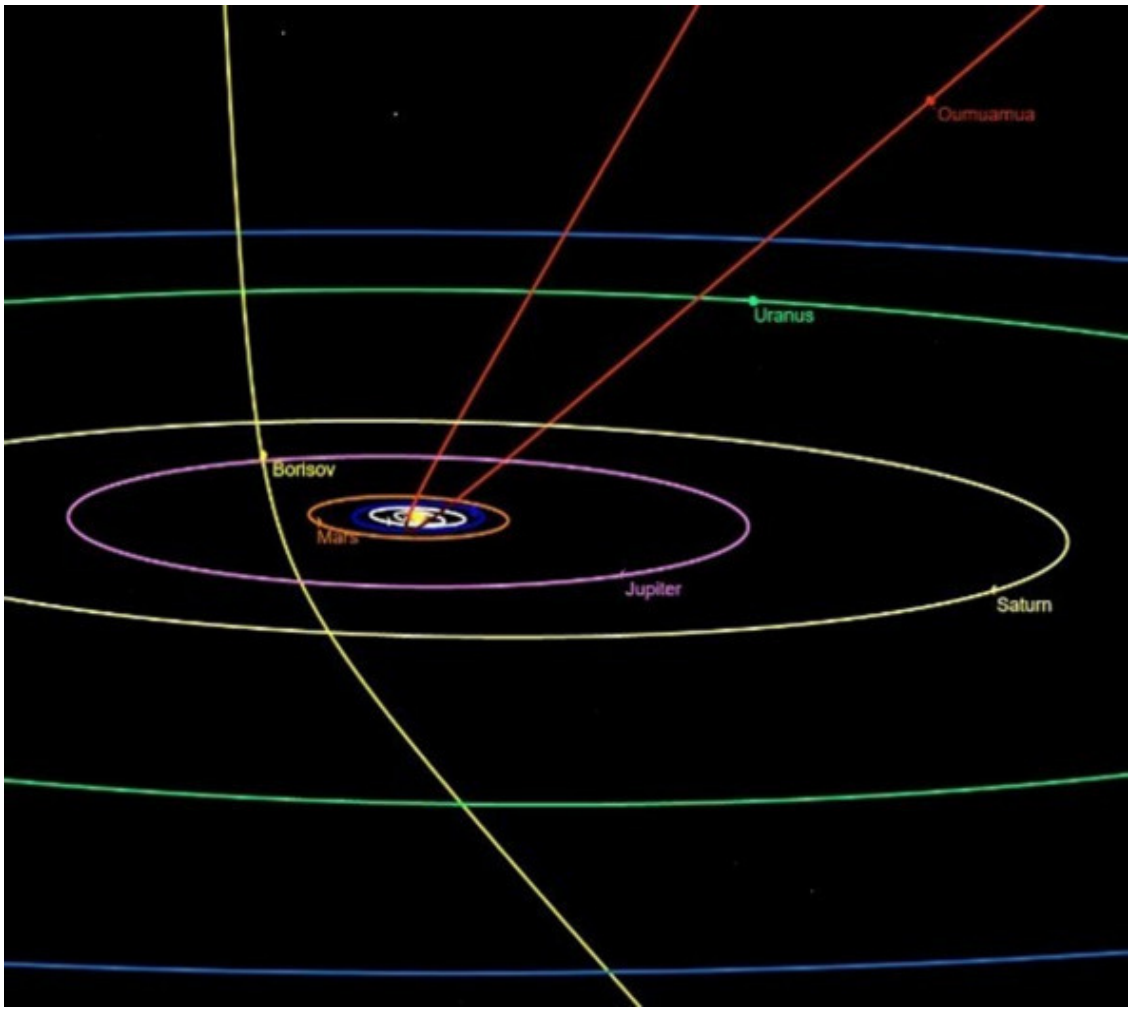
Межзвёздные объекты — это астероиды, кометы и другие небесные тела, которые свободно перемещаются в межзвёздном пространстве и не связаны гравитацией ни с одной звездой. Обнаружить такой объект можно только в двух случаях: когда он случайно пролетает через внутреннюю часть Солнечной системы вблизи Солнца или когда тело, ранее принадлежавшее облаку Оорта, приобретает сильно вытянутую гиперболическую орбиту и навсегда покидает Солнечную систему.

Первым надёжно подтверждённым межзвёздным объектом стал **1I/«Oumuamua**, открытый в октябре 2017 года. До этого наблюдались объекты со слабо гиперболическими орбитами, но все они оказались «местного» происхождения — выброшенными из облака Оорта нашей собственной системы.

Современные модели формирования облака Оорта показывают, что подавляющее большинство объектов, родившихся в нём, в итоге выбрасывается в межзвёздное пространство. По расчётам, количество выброшенных тел в 3—100 раз превышает число оставшихся. Некоторые модели дают ещё более впечатляющие цифры — от 90 до 99%. Нет оснований полагать, что в других звёздных системах процессы идут принципиально иначе. Поэтому межзвёздные объекты — вполне обычное явление в Галактике.

Такие тела должны время от времени проходить через внутренние области Солнечной системы. Они приближаются к нам с разных направлений, но преимущественно из области созвездия Геркулеса — именно туда движется Солнечная система относительно местного стандарта покоя. Учитывая крайнюю редкость объектов, скорость которых превышает вторую космическую для Солнца, можно сделать вывод о верхнем пределе их плотности в межзвёздном пространстве.

По уточнённым оценкам 2025—2026 годов (Pan-STARRS, LSST, Gaia DR4) плотность межзвёздных объектов составляет около 10^{-15}—10^{-14} на кубический парсек. Более консервативные расчёты LINEAR дают примерно втрое меньшее значение.



Межзвёздные посетители: сравнение 1I/«Oumuamua, 2I/Borisov и других объектов (Credit: Tony873004 / Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International)

В редких случаях межзвёздный объект может быть захвачен гравитацией Солнечной системы и переведён на гелиоцентрическую орбиту. Компьютерное моделирование показывает, что единственной планетой, способной осуществить такой захват, является Юпитер. Вероятность события — примерно раз в 60 миллионов лет. Одним из возможных примеров такого «пленника» считается комета 96P/Махгольца, обладающая необычным химическим составом, близким к составу межзвёздной среды.

Футуристические перспективы

Специалисты по космическим технологиям и футурологи рассматривают межзвёздные объекты как перспективные ресурсы для будущих дальних миссий. Их можно использовать в качестве:

· естественных платформ для размещения космических баз,

· источников сырья для термоядерного топлива,

· рабочего тела для ионных и плазменных двигателей, строительного материала для орбитальных сооружений.

Ключевое преимущество такого подхода — возможность использовать уже разогнанные до высоких скоростей небесные тела (эффект Оберта), что резко повышает эффективность миссий. Однако реализация этой идеи требует решения целого ряда сложных задач: раннего обнаружения, экспресс-анализа состава, точного прогнозирования траекторий и создания системы постоянного мониторинга с возможностью быстрого запуска перехватчиков.

Перспективы использования межзвёздных объектов

Футурологи и специалисты по космическим технологиям рассматривают межзвёздные объекты как перспективный ресурс для будущих дальних миссий. Такие тела можно использовать в качестве:

· естественных платформ для размещения автономных космических баз,

· источников сырья для термоядерного топлива,

· рабочего тела для ионных и плазменных двигателей,

· строительного материала для крупных орбитальных сооружений.

Главное преимущество этого подхода — возможность задействовать уже разогнанные до высоких скоростей небесные тела (эффект Оберта). Это резко повышает эффективность миссий и снижает затраты на разгон.

Однако реализация концепции требует решения нескольких сложных задач: разработки систем раннего обнаружения, создания технологий экспресс-анализа состава, точного прогнозирования траекторий и организации постоянного мониторинга с возможностью быстрого запуска перехватчиков.

1I/«Oumuamua — первый подтверждённый межзвёздный странник

Этот исторический объект был обнаружен 19 октября 2017 года астрономом Робертом Уриком с помощью телескопа Pan-STARRS. На момент открытия он находился на расстоянии 0,2 а.е. от Земли.

Основные характеристики 1I/«Oumuamua:

· Перигелий (9 сентября 2017 г.) — 0,255 а.е. от Солнца.

· Минимальное расстояние до Земли (14 октября 2017 г.) — 0,161 а.е.

· Максимальная скорость в перигелии — 87,7 км/с.

· Видимая звёздная величина — слабее 23^{m}.

Ретроспективный анализ показал, что сто лет назад объект находился на расстоянии 561 ± 0,6 а.е. (около 84 млрд км) от Солнца и двигался в его направлении со скоростью 26 км/с. В перигелии он разогнался до 87,7 км/с, после чего начал замедляться. Сейчас он удаляется от Солнца под углом 66° от первоначального направления и через примерно 23 000 лет окончательно покинет пределы Солнечной системы.

По уточнённым расчётам 2025—2026 годов, 1,3 миллиона лет назад «Oumuamua прошёл на расстоянии 0,16 парсек от звезды TYC 4742-1027-1 со скоростью 103 км/с, а его вероятное происхождение связано со звёздной ассоциацией в созвездии Киля (выброс примерно 45 миллионов лет назад).

В 2021 году некоммерческая организация Breakthrough Initiatives объявила о проекте Project Lyra — разработке миниатюрного космического аппарата, способного догнать «Oumuamua и провести его близкое исследование. Цель — определить природу объекта, его состав и особенности движения. Хотя технические сложности огромны, проект получил широкую поддержку научного сообщества как важный шаг к изучению межзвёздных объектов.

8 января 2014 года над Папуа-Новой Гвинеей вошёл в атмосферу необычный метеорит CNEOS 2014-01-08 (IM1). Объект диаметром менее 0,5 м двигался со скоростью около 60 км/с — значительно выше типичных значений для тел Солнечной системы. В 2019 году исследователи Гарвардского университета пришли к выводу, что с вероятностью 99% он имеет межзвёздное происхождение. В 2022 году Космическое командование США официально подтвердило эти расчёты.

В 2022 году был идентифицирован второй подобный объект — CNEOS 2017-03-09 (IM2), вошедший в атмосферу в 2017 году у берегов Португалии. Он был крупнее (около 1 м) и массивнее примерно в 10 раз, хотя двигался медленнее (40 км/с).

Оба метеорита полностью разрушились в верхних слоях атмосферы. Расчётная прочность материала составила 194 МПа для IM1 и 75 МПа для IM2 — значительно выше, чем у типичных железных метеоритов. По данным экспедиции Ocean Exploration Trust 2023—2025 годов, фрагменты IM1, поднятые с морского дна, содержат сплавы с бериллием, лантаном и ураном, нехарактерные для земного вещества. Анализ NIST 2026 года подтвердил межзвёздное происхождение с вероятностью более 99,9%.

Эти открытия открывают новую страницу в изучении межзвёздного вещества и заставляют по-новому взглянуть на возможность существования искусственных объектов внеземного происхождения.

Комета

Кометы — это небольшие ледяные тела, движущиеся по сильно вытянутым орбитам вокруг Солнца. Своё название (от греческого «кометес» — волосатый) они получили благодаря характерному внешнему виду: при приближении к Солнцу у них формируется газовая оболочка, называемая комой, и часто появляется длинный хвост из пыли и газа, придающий им «волосатый» облик.

По данным на 2026 год, с учётом открытий телескопов Pan-STARRS и LSST, зарегистрировано более 7500 комет, посещавших внутренние области Солнечной системы.

Большинство долгопериодических комет приходят к нам из гипотетического облака Оорта — огромной сферической области на окраинах Солнечной системы, содержащей миллиарды ледяных тел. Эти объекты состоят преимущественно из летучих веществ — водяного льда, метана, аммиака и других замороженных газов. При приближении к Солнцу лёд начинает активно испаряться, образуя кому и хвост.



Межзвёздная комета 2I/Borisov, полученная космическим телескопом «Хаббл» 16 октября 2019 года

(Credit: NASA, ESA, D. Jewitt (UCLA) / Hubble Space Telescope)

Особый интерес представляют короткопериодические кометы с орбитальным периодом менее 200 лет. На сегодняшний день известно более 400 таких объектов, около 200 из них наблюдались при нескольких возвращениях к Солнцу. Большинство короткопериодических комет (с периодом 3—10 лет) входят в семейство Юпитера. Существуют также менее многочисленные семейства, связанные с Сатурном, Ураном и Нептуном. К последнему, например, относится знаменитая комета Галлея — первая комета, для которой была доказана периодичность возвращений. Когда комета приближается к Солнцу, её ядро — твёрдое тело диаметром в несколько километров — окружает огромная туманная оболочка (кома) диаметром до 80—100 тысяч километров. Солнечное излучение и солнечный ветер выталкивают газ и пыль назад, формируя один или несколько хвостов, длина которых может достигать миллионов километров.

Яркость комет очень сильно зависит от расстояния до Солнца. Из тысяч известных комет лишь малая часть приближается к нам настолько, чтобы стать видимой невооружённым глазом. Самые заметные из них традиционно называют «великими» или «большими» кометами.

История наименования комет

Система наименования комет прошла долгий путь развития. До XX века кометы обычно называли по году открытия с добавлением описательных характеристик: «Большая комета 1680 года», «Большая сентябрьская комета 1882 года» и т. д.

Перелом наступил после открытия Эдмундом Галлеем периодичности возвращений комет. Доказав, что кометы 1531, 1607 и 1682 годов — один и тот же объект, и успешно предсказав её возвращение в 1759 году, Галлей увековечил своё имя. Эта традиция продолжилась:

комета Энке была названа в честь вычислившего её орбиту астронома, хотя первооткрывателем был Жан-Филипп де Шезо.

В дальнейшем установилась практика называть периодические кометы в честь первооткрывателей, тогда как непериодические продолжали обозначать по году появления.

В XX веке, когда открытия комет стали регулярными, была разработана современная система обозначения, которая сохраняется до сих пор. Комета получает собственное имя только после того, как её открытие подтверждено несколькими независимыми наблюдателями. В последние годы многие кометы открываются автоматическими обзорами неба, поэтому они часто называются по названиям инструментов или проектов (например, C/1983 H1 (IRAS — Араки — Алкок)).

До 1994 года использовалась двухэтапная система. Сначала комете присваивалось временное обозначение, состоящее из года открытия и строчной латинской буквы, указывающей порядковый номер открытия в этом году. После уточнения орбиты и прохождения перигелия объект получал постоянное обозначение.

Современная система обозначения комет

С ростом числа открываемых комет прежняя система обозначений стала неудобной. В 1994 году Международный астрономический союз ввёл новую, более унифицированную и удобную схему, которая используется до сих пор.

Современное обозначение кометы включает:

· год открытия,

· букву, обозначающую половину месяца открытия,

· порядковый номер открытия в этом полумесяце.

Например, комета, открытая четвёртой по счёту во второй половине февраля 2006 года, получает обозначение 2006 D4.

Перед обозначением обязательно ставится префикс, указывающий на природу объекта:

· P/ — короткопериодическая комета (период менее 200 лет или наблюдавшаяся при двух и более прохождениях перигелия);

· C/ — долгопериодическая комета;

· I/ — межзвёздная комета (эксцентриситет орбиты больше 1);

· X/ — комета, для которой не удалось надёжно определить орбиту (чаще всего исторические объекты);

· D/ — кометы, которые разрушились или были потеряны;

· A/ — объекты, первоначально принятые за кометы, но оказавшиеся астероидами.

Пример: знаменитая комета Хейла — Боппа получила обозначение C/1995 O1.

После второго зарегистрированного прохождения перигелия периодические кометы получают постоянный порядковый номер. Так, комета Галлея в современном каталоге обозначается как 1P/1682 Q1.

В настоящее время в Солнечной системе известно семь объектов, которые одновременно числятся и в списке комет, и в списке астероидов. Среди них наиболее известны (2060) Хирон (95P/Хирон), (4015) Вильсон — Харрингтон (107P/Вильсона — Харрингтона) и (7968) Эльст — Писарро (133P/Эльста — Писарро).

Строение кометы

Ядро — это твёрдая центральная часть кометы, в которой сосредоточена почти вся её масса. Современные телескопы не могут увидеть ядро напрямую, поскольку оно скрыто яркой светящейся оболочкой.

По классической модели Фреда Уиппла ядро представляет собой «грязный снежок» — смесь водяного льда, других замороженных газов и вкраплений пыли и метеорного вещества. Слои льда чередуются с пылевыми прослойками. При нагревании у Солнца лёд испаряется и увлекает за собой пыль, что и приводит к образованию комы и хвостов.

Однако исследования, проведённые в 2005 году американской автоматической станцией Deep Impact, показали, что ядро кометы Темпеля 1 состоит из очень рыхлого материала с пористостью до 80%. Это скорее «ком пыли», чем плотный ледяной шар.

Кома — это светлая туманная оболочка, окружающая ядро. Её диаметр обычно составляет от 100 тысяч до 1,4 миллиона километров. Под действием давления солнечного света кома может вытягиваться в антисолнечном направлении.

Кома вместе с ядром образует голову кометы. В ней выделяют три основные зоны:

· внутреннюю (молекулярную, химическую и фотохимическую),

· видимую (кома радикалов),

· ультрафиолетовую (атомную).

При приближении к Солнцу у ярких комет формируется характерный хвост, всегда направленный в сторону, противоположную Солнцу. Хотя масса комы и хвоста составляет менее одной миллионной доли от массы всей кометы, именно они отвечают почти за всё наблюдаемое свечение, поскольку само ядро имеет очень низкое альбедо.

Кометы поражают разнообразием форм и размеров своих хвостов. Исторические наблюдения зафиксировали поистине грандиозные примеры: хвост кометы 1743—1744 годов протянулся на 20 миллионов километров, а рекордный хвост Большой кометы 1680 года (C/1680 V1) достиг 240 миллионов километров. Встречались и необычные случаи — например, у кометы C/2007 N3 (Лулинь) хвост однажды отделился и продолжал двигаться самостоятельно.

Несмотря на впечатляющие размеры, кометные хвосты обладают чрезвычайно низкой плотностью — значительно меньшей, чем газ в обычной зажигалке. Благодаря этому они практически прозрачны: сквозь хвост легко просматриваются звёзды.

Состав хвостов различается:

· газовые (ионизированные ультрафиолетовым излучением и солнечным ветром);

· пылевые (рассеивающие солнечный свет);

· смешанного типа.

Исследования аппарата «Стардаст» и миссии Rosetta (2014—2016) к комете 67P/Чурюмова-Герасименко показали, что пылевые частицы комет по химическому составу очень близки к астероидному веществу. Пористость пыли достигает 70—80%, а в её составе преобладают органические соединения и силикаты.

Теория кометных хвостов

Основы современной классификации кометных хвостов были заложены в XIX веке русским астрономом Фёдором Бредихиным. Он выделил три основных типа:

1. Прямые и узкие хвосты, направленные строго от Солнца.

2. Широкие и слегка искривлённые хвосты, отклоняющиеся от линии Солнце—комета.

3. Короткие и сильно отклонённые хвосты.

Такое многообразие форм объясняется неоднородным составом кометного вещества. Разные частицы по-разному реагируют на давление солнечного излучения и солнечного ветра, что приводит к их пространственному разделению.

Скорость частицы, вылетевшей из ядра, складывается из двух составляющих: скорости, приобретённой под действием Солнца (направленной от него), и скорости движения самой кометы. В результате частицы, выброшенные в разное время, располагаются не по прямой линии, а по кривой, которую называют синдинамой. Именно синдинама и определяет видимую форму хвоста в каждый момент времени.

При резких выбросах вещества на синдинаме появляются отрезки или линии под углом — синхроны. Антихвост — короткий хвост, направленный в сторону Солнца, — представляет собой проекцию синхрон, образованных крупными частицами (более 10 мкм). Он наблюдается, когда Земля находится в плоскости орбиты кометы. Данные миссии Rosetta 2014—2016

годов подтвердили, что антихвосты формируются частицами размером 10—100 мкм при $\beta < 0{,}1$.

Кометы в истории и культуре

Кометы всегда приковывали внимание людей. Их неожиданное появление и необычный вид на протяжении веков порождали самые разные суеверия и страхи. В древности хвостатые «звёзды» считались предвестниками войн, мора и великих бедствий.

В древнерусских летописях кометы описывались как «звезда велика», «звезда привелика, луце имущи акы кровавы», «звезда копийныи». Специального слова «комета» в древнерусском языке не было — их называли «хвостатыми звёздами» или «близняницами».

Термин «комета» вошёл в русский язык в начале XVI века через переводы европейских сочинений. Окончательно он закрепился в середине XVII века, когда появление ярких комет вызвало широкий общественный интерес.

Настоящий переворот в восприятии комет произошёл в эпоху Возрождения благодаря работам Тихо Браге. Его наблюдения доказали, что кометы — это не атмосферные явления, а настоящие космические тела. Это положило начало процессу демистификации комет и переходу к научному пониманию их природы.

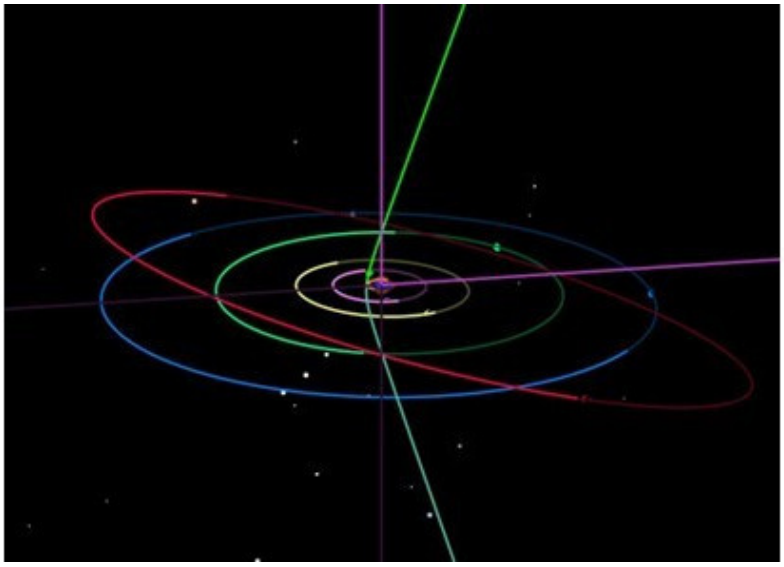
В XVII—XVIII веках изучение комет вышло на качественно новый уровень. Исаак Ньютон разработал математические методы расчёта кометных орбит, что впервые позволило не только объяснять, но и предсказывать их появления. Благодаря этому кометы перестали восприниматься как случайные небесные знамения и стали объектом систематического научного исследования.

Несмотря на научный прогресс, суеверное отношение к кометам как к предвестникам бед и катастроф сохранялось в России и Европе вплоть до начала XVIII века. Перелом наступил благодаря трём важным факторам: публикации научных трудов, убедительно опровергавших мистическую природу комет, широкому распространению европейских астрономических знаний и активному вкладу русских учёных в кометную астрономию.

Особое значение имели работы Фёдора Бредихина во второй половине XIX века. Он создал целостную теорию природы комет, объяснил механизм образования хвостов и разработал классификацию их разнообразных форм, которая остаётся актуальной и сегодня.

Теории происхождения комет

В истории изучения происхождения комет существовало несколько конкурирующих гипотез. Среди них — планетарная гипотеза Лагранжа (1814 г.), предполагавшая вулканическое происхождение комет, и её дальнейшее развитие в работах советского астронома С. К. Всехсвятского в XX веке. Существовала также межзвёздная теория Лапласа.



Гиперболическая орбита возможного межзвёздного объекта gb00234 (Credit: Tony873004 / Wikimedia Commons, лицензия CC BY-SA 4.0)

Эти научные дискуссии отражают долгий и непростой путь от мистических представлений к современным астрофизическим концепциям.

Прямые исследования комет космическими аппаратами

Исчерпывающее представление о строении и составе комет астрономы получили благодаря успешным космическим миссиям. В 1986 году к комете Галлея были направлены советские аппараты «Вега-1» и «Вега-2», а также европейский «Джотто». Многочисленные приборы передали на Землю первые детальные изображения ядра и данные о составе оболочки. Оказалось, что ядро кометы Галлея состоит преимущественно из водяного льда с небольшими включениями углекислых и метановых льдов, а также пылевых частиц. Именно эти частицы образуют кому и хвосты кометы при приближении к Солнцу.

Размеры ядра кометы Галлея составляют около 14 км в длину и 7,5 км в поперечнике. Оно имеет неправильную форму и вращается вокруг своей оси с периодом примерно 53 часа.

В 2005 году американский аппарат «Deep Impact» впервые в истории сбросил зонд на поверхность кометы Темпеля 1 и передал уникальные изображения её ядра.

Сегодня кометы продолжают оставаться одним из самых интересных объектов для изучения ранней истории Солнечной системы и поиска ответов на вопросы о происхождении воды и органических веществ на Земле.

Основные космические миссии к кометам (посещения и пролёты)

Посещение	Примечания	Название кометы	Год открытия	Космический аппарат	Дата сближения	Расстояние сближения (км)	Дополнительные данные (2025–2026 гг.)
Пролёт	Первое целенаправленное сближение	21P/Джакобини — Циннера	1900	International Cometary Explorer (ICE)	11 сентября 1985	7 800	Измерения плазмы и магнитного поля хвоста; подтверждена модель взаимодействия с солнечным ветром
Сближение	Советская миссия	1P/Галлея	Появления известны с древних времён (не позже 240 г. до н. э.); периодичность обнаружена в 1705 г.	«Вега-1»	6 марта 1986	8 889	Первые изображения ядра (15×8 км), анализ газа и пыли
Сближение	Советская миссия	1P/Галлея	Появления известны с древних времён (не позже 240 г. до н. э.); периодичность обнаружена в 1705 г.	«Вега-2»	9 марта 1986	8 030	Дополнила «Вегу-1»; измерения пыли до 1 мм, органика в коме
Сближение	Японская миссия	1P/Галлея	Появления известны с древних времён (не позже 240 г. до н. э.); периодичность обнаружена в 1705 г.	«Суйсэй» (Suisei)	8 марта 1986	151 000	Ультрафиолетовая кома, линии H, OH, C
Сближение	Японская миссия	1P/Галлея	Появления известны с древних времён (не позже 240 г. до н. э.); периодичность обнаружена в 1705 г.	«Сакигакэ» (Sakigake)	11 марта 1986	~7 000 000	Измерения солнечного ветра и магнитных возмущений

Посещение	Примечания	Название кометы	Год открытия	Космический аппарат	Дата сближения	Расстояние сближения (км)	Дополнительные данные (2025–2026 гг.)
Сближение	Европейская миссия	1P/Галлея	Появления известны с древних времён (не позже 240 г. до н. э.); периодичность обнаружена в 1705 г.	«Джотто» (Giotto)	14 марта 1986	596	Первые близкие фото ядра; джеты газа; 80 % H_2O, 10 % CO
Сближение	Продолжение Giotto	26P/Гритта — Сазерленда	1902	«Джотто» (Giotto)	10 июля 1992	200	Плазма и магнитное поле; слабая кома
Сближение	Тест технологий	19P/Борелли	1904	Deep Space 1	22 сентября 2001	2 171	Фото ядра (8×4 км); джеты CO_2 и H_2O; альбедо 0,03
Сближение + возврат образцов	Сбор и возврат пыли	81P/Вильда	1978	«Стардаст» (Stardust)	2 января 2004	240	Анализ образцов 2006–2026 гг.; глицин, метиламин; органика
Сближение + удар	Удар для изучения состава	9P/Темпеля	1867	«Дип Импакт» (Deep Impact)	4 июля 2005	0 (импактор) / 500	Кратер ~150 м, выброс H_2O, CO_2, органики
Сближение	Продолжение Deep Impact	103P/Хартли	1986	EPOXI (Deep Impact extended)	4 ноября 2010	700	Ядро 2 км; джеты CO_2; D/H близко к земному
Сближение	Продолжение Stardust	9P/Темпеля	1867	Stardust-NExT	14 февраля 2011	181	Фото кратера от Deep Impact; эрозия поверхности
Выход на орбиту + посадка	Долгосрочное изучение; первая посадка	67P/Чурюмова — Герасименко	1969	«Розетта» + «Филы»	Август 2014 – сентябрь 2016	0 (орбитер) / 0 (посадка)	Ядро 4,1×3,3 км; плотность 0,53 г/см³; органика (глицин); D/H в 3 раза выше земного
Пролёт	Изучение комы	45P/Хонда — Мркоса — Пайдушаковой	1948	«Акацуки» (Venus orbiter)	27 декабря 2016	~100 000	УФ-спектр; подтверждена кома с H_2O
Пролёт	Изучение комы	C/2013 A1 (Siding Spring)	2013	MAVEN, MRO, Mars Odyssey и др.	19 октября 2014	135 000 – 140 000	Влияние на атмосферу Марса; метеорный дождь
Пролёт	Изучение хвоста и комы	C/2021 A1 (Leonard)	2021	Parker Solar Probe	Декабрь 2021	~0,3 а.е.	Анализ солнечного ветра и хвоста

Посещение	Примечания	Название кометы	Год открытия	Космический аппарат	Дата сближения	Расстояние сближения (км)	Дополнительные данные (2025–2026 гг.)
Дистанционные наблюдения	Изучение комы	C/2017 K2 (Pan-STARRS)	2017	JWST, Hubble, ALMA	2022–2023	Дистанционные	Ранняя активность на 23 а.е.; CO и пыль
Дистанционные наблюдения	Изучение комы	C/2022 E3 (ZTF)	2022	JWST	Январь–февраль 2023	Дистанционные	ИК-спектры; органика, CO_2
Дистанционные наблюдения	Изучение комы	C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS)	2023	JWST и наземные	2024	Дистанционные	Яркая комета; H_2O, CN
Дистанционные наблюдения	Изучение межзвёздной кометы	3I/ATLAS (C/2025 N1)	2025	JWST, Hubble, ALMA	2025–2026	Дистанционные	

Массы комет в космических масштабах ничтожно малы — примерно в миллиард раз меньше массы Земли, а плотность вещества в их хвостах практически равна нулю. Поэтому даже при прохождении Земли сквозь хвост кометы (как это произошло в мае 1910 года с кометой Галлея) никаких заметных изменений в движении нашей планеты или в её атмосфере не наблюдается.

Однако столкновение крупной кометы с планетой может привести к серьёзным последствиям для атмосферы и магнитосферы. Ярким и хорошо изученным примером стало падение обломков кометы Шумейкеров — Леви 9 на Юпитер в июле 1994 года. Это событие позволило напрямую наблюдать, как кометное вещество взаимодействует с планетной атмосферой.

Вероятность столкновения Земли с ядрами комет

По расчётам эстонского астронома Эрнста Эпика, вероятность столкновения Земли с кометными ядрами выглядит следующим образом (данные уточнены по моделям NASA NEO, Purdue Impact Earth и USGS 2025—2026 годов):

Диаметр ядра, км	Средний интервал между столкновениями, млн лет	Энергия удара, Гт ТНТ	Основные эффекты	Примечания (2025–2026 гг.)
0,5–1	1,2–1,5	0,01–0,1	Локальные разрушения, ударная волна (радиус 10–20 км)	Аналог Челябинского метеорита 2013 г.
1–2	5–6	0,1–1	Региональные катастрофы, кратер 1–2 км	Возможны цунами при океанском ударе
2–4	20–30	1–10	Континентальные разрушения, кратер 5–10 км, глобальные пожары	USGS 2025
4–8	100–120	10–100	Глобальные изменения климата, кратер 20–50 км, ядерная зима	Purdue Impact Earth 2026
8–17	400–500	100–1000	Массовое вымирание до 50 % видов, кратер 50–100 км	Аналогия с Попигай (35 млн лет назад)
>17	>1000	>1000	Полное вымирание, многолетняя ядерная зима, стерилизация поверхности	Аналогия с Чиксулуб (66 млн лет назад)

2I/Borisov — вторая подтверждённая межзвёздная комета

30 августа 2019 года астроном-любитель Геннадий Борисов открыл в обсерватории MARGO (Крым) необычный объект, который впоследствии получил обозначение 2I/Borisov. Это вторая после 1I/«Oumuamua межзвёздная комета, официально подтверждённая Международным астрономическим союзом.

Комета 2I/Borisov обладает рекордным для межзвёздных объектов эксцентриситетом орбиты ($\varepsilon > 3$) и не связана гравитационно с Солнцем. Скорость на бесконечности $V_\infty \approx 30$ км/с. Объект прибыл из направления созвездия Кассиопеи, почти в плоскости Галактики. Перигелий пришёлся на 8 декабря 2019 года.

Ключевые этапы изучения:

· 13 декабря 2018 года — первое архивное обнаружение (Zwicky Transient Facility).

· 30 августа 2019 года — открытие Геннадием Борисовым.

· 12 сентября 2019 года — официальное объявление.

· 24 сентября 2019 года — подтверждение межзвёздного происхождения и присвоение обозначения 2I/Borisov.

По данным JWST, Hubble и ALMA 2025—2026 годов, ядро кометы имеет диаметр 0,5—0,75 км. В составе комы обнаружены CO, CN и вспышки активности, типичные для межзвёздных объектов.

2I/Borisov — вторая подтверждённая межзвёздная комета

Открытие кометы 2I/Borisov стало вторым зарегистрированным случаем посещения Солнечной системы межзвёздным объектом после 1I/«Oumuamua и первым подтверждённым слу-

чаем межзвёздной кометы. К 2025 году список пополнился третьей — 3I/ATLAS (C/2025 N1), открытой системой ATLAS в июле 2025 года. Она имеет скорость на бесконечности $V\infty \approx$ — 32 км/с, диаметр ядра около 0,5—0,75 км и перигелий в декабре 2025 года на расстоянии 1,8 а. е. Спектр кометы также показывает линии CN и CO, аналогичные 2I/Borisov.

Астрономы смогли приблизительно восстановить траекторию движения кометы и локализовать возможные материнские звёздные системы. Среди кандидатов — Росс 573, GJ 4384 и HD 34327.

В октябре 2019 года, за два месяца до перигелия, космический телескоп «Хаббл» получил самое детальное на тот момент изображение кометы. Если бы ядро начало распадаться (что иногда происходит с небольшими кометами), «Хаббл» мог бы наблюдать этот процесс в реальном времени.

Первый спектр кометы был получен с помощью прибора OSIRIS на Большом Канарском телескопе. Он оказался очень похож на спектры типичных комет Солнечной системы. Это позволило предположить, что кометы в других планетных системах образуются в условиях, близких к тем, что существовали в облаке Оорта нашей системы.

В составе комы удалось обнаружить молекулу моноциана (CN), проявляющуюся в эмиссионной линии с длиной волны 388,0 нм в ближнем ультрафиолете. Предположительно, моноциан возникает при фотодиссоциации синильной кислоты (HCN), испаряющейся с поверхности ядра. Скорость испарения HCN на 20 сентября 2019 года (на расстоянии 2,7 а.е. от Солнца) составила $(3{,}7 \pm 0{,}4) \times 10^{24}$ молекул в секунду — типичное значение для долгопериодических комет Солнечной системы.

16 ноября 2019 года, когда комета находилась вблизи спиральной галактики 2MASX J10500165—0152029, телескоп «Хаббл» получил изображение с расстояния 327 млн км. Радиус ядра составил около 0,5 км при альбедо 0,04.

Обсерватория Swift с помощью ультрафиолетового телескопа UVOT зафиксировала рост количества молекул гидроксила (OH) с $7{,}0 \pm 1{,}5 \times 10^{26}$ до $10{,}7 \pm 1{,}2 \times 10^{26}$ молекул в секунду в период с 1 ноября по 1 декабря 2019 года. После прохождения перигелия (21 декабря) скорость образования OH снизилась до $4{,}9 \pm 0{,}9 \times 10^{26}$ молекул в секунду.

Радиотелескоп ALMA обнаружил в газе кометы очень высокое содержание окиси углерода (CO) — в 9—26 раз выше среднего для комет Солнечной системы на аналогичном расстоянии от Солнца (не дальше 2 а.е.). Также был обнаружен цианистый водород (HCN). Спектроскопические исследования Кавказской горной обсерватории МГУ подтвердили отсутствие водных льдин в газопылевом хвосте, но выявили силикатную и органическую пыль, включая силикаты железа и магния, а также толины[9] — сложные органические вещества, характерные для ледяных тел внешней Солнечной системы.

В марте 2020 года проект OGLE зафиксировал две последовательные вспышки кометы 2I/Borisov: увеличение яркости на $0{,}3^{m}$ между 4 и 5 марта и дополнительное усиление свечения на $0{,}4^{m}$ 8—9 марта.

Наблюдения космического телескопа «Хаббл» выявили необычные структурные изменения: 23 марта — единое псевдоядро, 28 марта — появление двойного псевдоядра, а 30 марта — чёткое разделение компонент на расстоянии 0,1» (примерно 180 км). Анализ показал, что 7 марта произошёл выброс крупного фрагмента в направлении Солнца, вероятно связанный с зарегистрированными вспышками. К 6 апреля 2020 года этот фрагмент полностью исчез.

[9] Толины — органические вещества, линии поглощения которых обнаружены в спектрах многих ледяных тел внешней Солнечной системы.

Спектроскопические исследования с помощью инструмента X-shooter на Очень Большом Телескопе (VLT) обнаружили в коме при гелиоцентрическом расстоянии 2,322 а.е. газообразный атомарный никель и температуру около 180 K.

Орбитальные характеристики и происхождение

Комета 2I/Borisov обладает сильно гиперболической орбитой с эксцентриситетом в диапазоне 2,9—4,5. Перигелийное расстояние составило 2,0 а.е. (пройден 7 декабря 2019 года). Начальные сомнения в межзвёздной природе были связаны с возможным влиянием негравитационных сил, однако по мере накопления данных происхождение было окончательно подтверждено.

Реконструкция траектории показала, что комета прибыла из области небесной сферы с координатами прямое восхождение 02h06m, склонение +59,9°.

Третья межзвёздная комета 3I/ATLAS

Третья подтверждённая межзвёздная комета 3I/ATLAS (C/2025 N1) была открыта системой ATLAS (Чили) 1 июля 2025 года на расстоянии 4,5 а.е. от Солнца. Предоткрытия удалось выявить в архивах Zwicky Transient Facility ещё с 15 мая 2025 года. Орбита сильно гиперболическая с эксцентриситетом e ≈ 6,14 и скоростью на бесконечности $V\infty \approx 58$ км/с — самой высокой среди всех известных межзвёздных объектов. Комета прошла перигелий 29 октября 2025 года на расстоянии 1,356 а.е. (между орбитами Земли и Марса), достигнув максимальной скорости 68 км/с относительно Солнца. Ближайший подход к Земле состоялся в декабре 2025 года на расстоянии около 1,8 а. е. Ядро кометы имеет диаметр 0,52—0,75 км (по данным негравигационного ускорения и наблюдений «Хаббла» в августе—декабре 2025 и январе 2026 года) при альбедо около 0,04. JWST и ALMA выявили крайне высокое содержание CO и CO_2 (в 9—26 раз выше среднего для солнечных комет), низкую долю воды и присутствие CN, HCN, атомарного никеля, железа и сложной органики. Комета проявила раннюю активность уже на 4,5 а.е., несколько мощных вспышек и выбросов в октябре—ноябре 2025 года, множественные струи и сложную структуру хвостов.

Эволюция межзвёздной среды, и в первую очередь межзвёздного газа, — это ключевой процесс, который определяет химическое развитие всей Галактики. На первый взгляд механизм кажется простым: звёзды захватывают газ, перерабатывают его в своих недрах и возвращают в пространство уже обогащённым тяжёлыми элементами, постепенно повышая металличность среды. Однако реальные наблюдения не подтверждают такую прямолинейную картину.

Согласно теории Большого взрыва, первичный нуклеосинтез привёл к образованию лишь самых лёгких элементов — водорода, гелия, дейтерия и лития. Если бы дальнейшая эволюция шла только по классической схеме, в Галактике должны были сохраниться долгоживущие G-карлики с нулевой металличностью. Однако такие звёзды практически не встречаются — большинство из них имеют металличность, близкую к солнечной. Аналогичная картина наблюдается и в других галактиках. Это указывает на существование пока не до конца понятных механизмов химической эволюции межзвёздной среды.

По уточнённым данным Planck 2018—2026 годов, доля гелия-4 в первичном газе составляет 24,82 ± 0,25%, что хорошо согласуется с наблюдениями самых старых звёзд с низкой металличностью.

Последовательный синтез химических элементов происходит в недрах звёзд по мере повышения температуры. На начальной стадии протозвезда, сформированная из межзвёздного газа (преимущественно водород и гелий), сжимается под действием гравитации. Температура в её центре достигает значений, достаточных для термоядерного синтеза гелия из водорода (не выше 20 миллионов кельвинов). После исчерпания водородного топлива в звёздах-гигантах начинается новый этап: при температурах ниже 100 миллионов кельвинов образуются устойчивые ядра углерода-12 и кислорода-16. Дальнейшее «горение» гелия приводит к появлению

неона-20, магния-24 и других элементов этой группы. При температурах около 1 миллиарда кельвинов включается «горение» углерода, в результате которого синтезируются ядра вплоть до алюминия-27 и кремния-28. При экстремальных температурах свыше 3 миллиардов кельвинов в реакцию вступают более тяжёлые ядра, начиная с кремния. В условиях термодинамического равновесия формируются элементы железного пика — самые стабильные ядра. Синтез ещё более тяжёлых элементов происходит за счёт последовательного захвата нейтронов с последующим бета-распадом.

Модели нуклеосинтеза в AGB-звёздах (2025—2026 гг.) уточняют вклад s-процесса в образование элементов от бария до свинца с эффективностью 10^{-6}—10^{-5} на одну звезду, что существенно влияет на галактическую металличность.

Анализ химического состава Солнца и окружающих звёзд позволяет предположить, что в истории нашей планетной системы произошло несколько циклов звёздного нуклеосинтеза. Первоначально в данном участке Галактики сформировалась массивная звезда, масса которой превышала критическое значение (1,44 солнечных массы). Гравитационный коллапс приводил к повышению температуры и последовательным стадиям ядерного синтеза. Выделявшаяся энергия вызывала периодические взрывы, сопровождавшиеся выбросом вещества и уменьшением массы звезды. Этот процесс продолжался до тех пор, пока центральное светило не снизило свою массу ниже критического предела, создав временной интервал, достаточный для химической, геологической и биологической эволюции в формирующейся планетной системе. Данные Gaia DR4 (2026 г.) подтверждают, что локальная металличность [Fe/H] ≈ 0 в окрестностях Солнца сформировалась за 2—3 поколения сверхновых с вкладом примерно 10^{-3} $M_\odot$ тяжёлых элементов на одно событие.

Многие исследователи считают, что планеты Солнечной системы образовались из вещества, выброшенного Солнцем во время его эволюции в фазу сверхновой. Охлаждение образовавшейся вокруг звезды дискообразной газовой туманности позволило атомам соединяться в молекулы, положив начало собственно химической эволюции.

Молекулы не могут образовываться при высоких звёздных температурах, когда большинство атомов существует в виде многозарядных ионов. Двухатомные молекулы обнаруживаются только в спектрах самых холодных звёзд с температурой поверхности 2000—3000 K (оксиды Al, Mg, Ti, Zr, C, Si и некоторые другие).

В межзвёздном пространстве, напротив, присутствует большое количество молекул, в том числе достаточно сложных. Спектроскопия JWST 2023—2026 годов выявила в холодных звёздах (T ≈ 2500 K) молекулы TiO и VO с концентрацией 10^{-7}—10^{-6} относительно водорода, подтвердив их роль в первичной химии космоса.

Таким образом, межзвёздная среда выступает не только как среда для рождения новых звёзд, но и как огромная природная лаборатория, где происходят сложнейшие химические процессы, закладывающие основу для будущей жизни.

Эволюция межзвёздной среды, и в первую очередь межзвёздного газа, — это фундаментальный процесс, который определяет химическое развитие всей Галактики. Звёзды захватывают газ, перерабатывают его в своих недрах и возвращают обратно, обогащая тяжёлыми элементами. На первый взгляд картина кажется простой, однако наблюдения показывают, что реальность значительно сложнее.

Молекулы в межзвёздном пространстве

В межзвёздных облаках обнаружено множество самых разнообразных молекул — от простейших до достаточно сложных органических соединений. Их изучение проводится путём анализа электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра — от радиоволн до гамма-лучей. Крупные радиотелескопы позволяют картировать распределение молекул, измеряя интенсивность характерных спектральных линий.

Подробный список молекул, обнаруженных в межзвёздном пространстве, с указанием химических формул, года открытия и места обнаружения приведён в приложении 1.3.

Неожиданным стало обнаружение в холодных межзвёздных облаках сложных органических молекул, таких как формальдегид, метанол и виниловый спирт. Их образование в условиях низких температур и крайне низкой плотности казалось маловероятным. Это свидетельствует о существовании пока неизвестных механизмов газофазных и поверхностных реакций на пылевых зёрнах. Данные ALMA 2025 года подтвердили наличие винилового спирта в тёмном молекулярном облаке TMC-1 с концентрацией 10^{-10} относительно H_2.

Особый класс составляют высокоскоростные облака[10] — плотные скопления нейтрального водорода, движущиеся со скоростями более 90 км/с относительно локального стандарта покоя. Эти облака отличаются пониженным содержанием тяжёлых элементов и обнаруживаются преимущественно по линии 21 см.

Наблюдения телескопа GBT 2025 года уточнили металличность [Z/H] ≈ −0,5 для облаков в направлении Персея, что подтверждает их внешнее происхождение — возможно, из остатков формирования Галактики или приливно оторванной материи из галактик Местной группы (например, Магелланов Поток). В научной номенклатуре такие облака обозначаются префиксом HVC с указанием координат, например HVC 127-41-330.

Всё вышеописанное подчёркивает уникальность межзвёздной среды как системы, где классические представления о термодинамическом равновесии требуют существенных корректировок. Здесь одновременно сосуществуют крайне разреженный газ, сложные молекулы, пыль, магнитные поля и турбулентные потоки, создавая условия для непрерывной химической эволюции вещества во Вселенной.

Местный пузырь

Местный пузырь — это огромная область сильно разрежённого горячего газа неправильной формы внутри рукава Ориона нашей Галактики. Он окружает Солнечную систему и представляет собой одну из самых близких к нам структур межзвёздной среды. По уточнённым данным Gaia DR4 2026 года, размер пузыря по длинной оси достигает 1200 световых лет. Плотность нейтрального водорода внутри него составляет 0,04—0,06 атома на кубический сантиметр — примерно в десять раз ниже средней плотности межзвёздной среды (0,5 атома/см^3). Горячий разрежённый газ с температурой около миллиона кельвинов активно излучает в рентгеновском диапазоне.

[10] high-velocity clouds, HVC

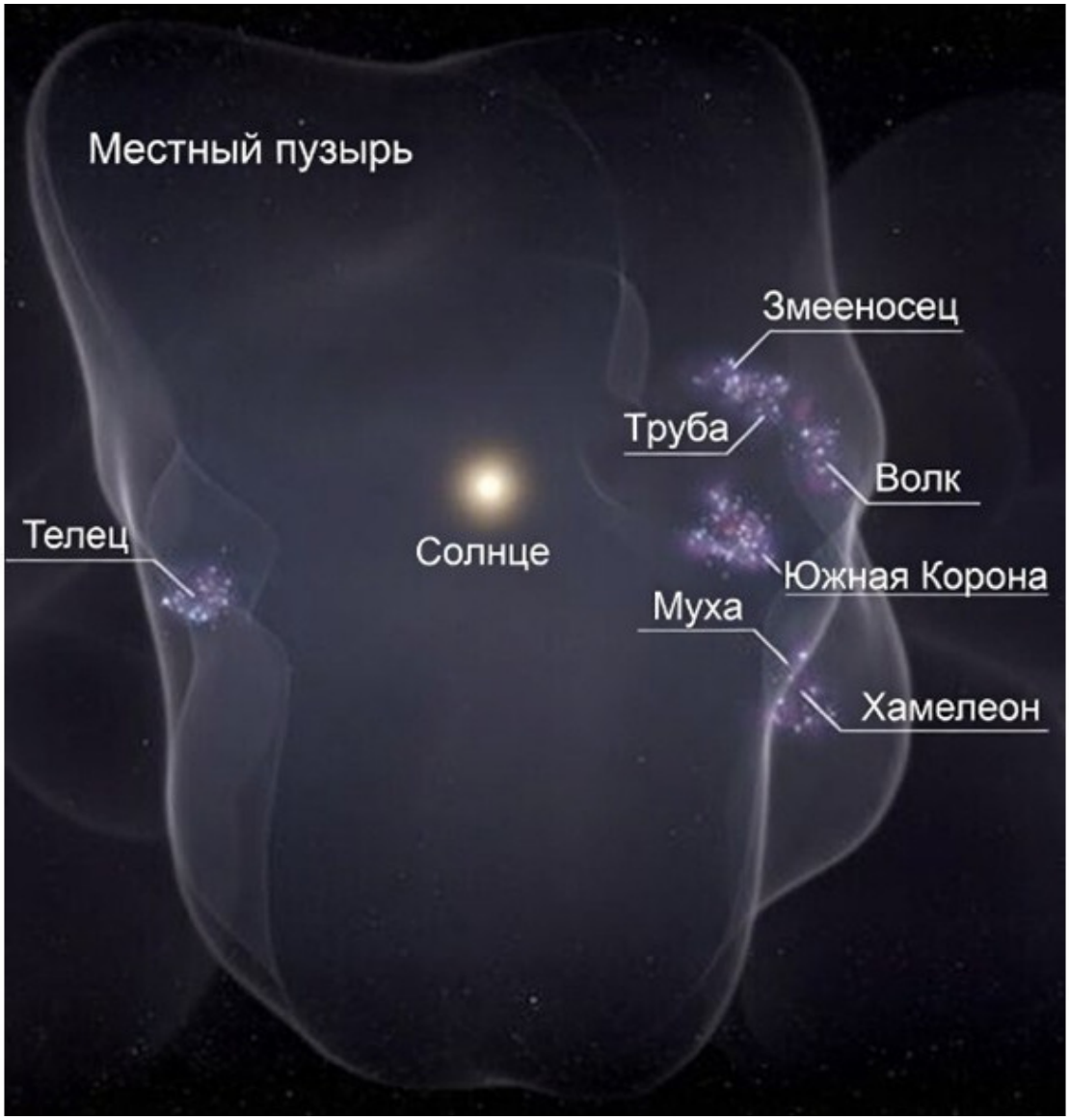


Местный пузырь — область разреженного горячего газа, в которой находится Солнечная система (Credit: NASA; русская версия — Geni / Skab, общественное достояние)

Местный пузырь образовался в результате серии взрывов сверхновых и мощных звёздных ветров, произошедших 14—16 миллионов лет назад. По современным моделям, в его формировании участвовало от 14 до 20 сверхновых, в основном из звёздных ассоциаций Нижний Центавр—Южный Крест (LCC) и Верхний Центавр—Волк (UCL) в созвездии Скорпиона—Центавра. Одним из возможных остатков таких событий считается пульсар Геминга в созвездии Близнецов.

Пузырь имеет продолговатую, слегка яйцевидную форму и приподнимается над галактической плоскостью, напоминая по очертаниям песочные часы.

Он соединён с соседними областями пониженной плотности специальными «туннелями» — каналами разреженного газа. К нему примыкает Пузырь I (Bubble I), который образовался звёздными ветрами и сверхновыми той же ассоциации Скорпиона—Центавра и находится примерно в 500 световых годах от Солнца. Кроме того, существуют Пузырь II и Пузырь III.



Местный пузырь (Local Bubble) — гигантская полость в межзвёздной среде, заполненная горячим ионизированным газом, внутри которой расположена Солнечная система и несколько ближайших звёздных ассоциаций (Credit: Catherine Zucker, Alyssa A. Goodman и др. (Harvard —Smithsonian Center for Astrophysics) / CC0 1.0)

Солнечная система уже около 5—10 миллионов лет движется внутри Местного пузыря. В настоящее время она проходит через небольшое более плотное образование — Местное межзвёздное облако (Local Interstellar Cloud, LIC), расположенное на границе Местного пузыря и Пузыря I. Плотность газа в этом облаке составляет около 0,1 атома на кубический сантиметр.

Исследования Местного пузыря

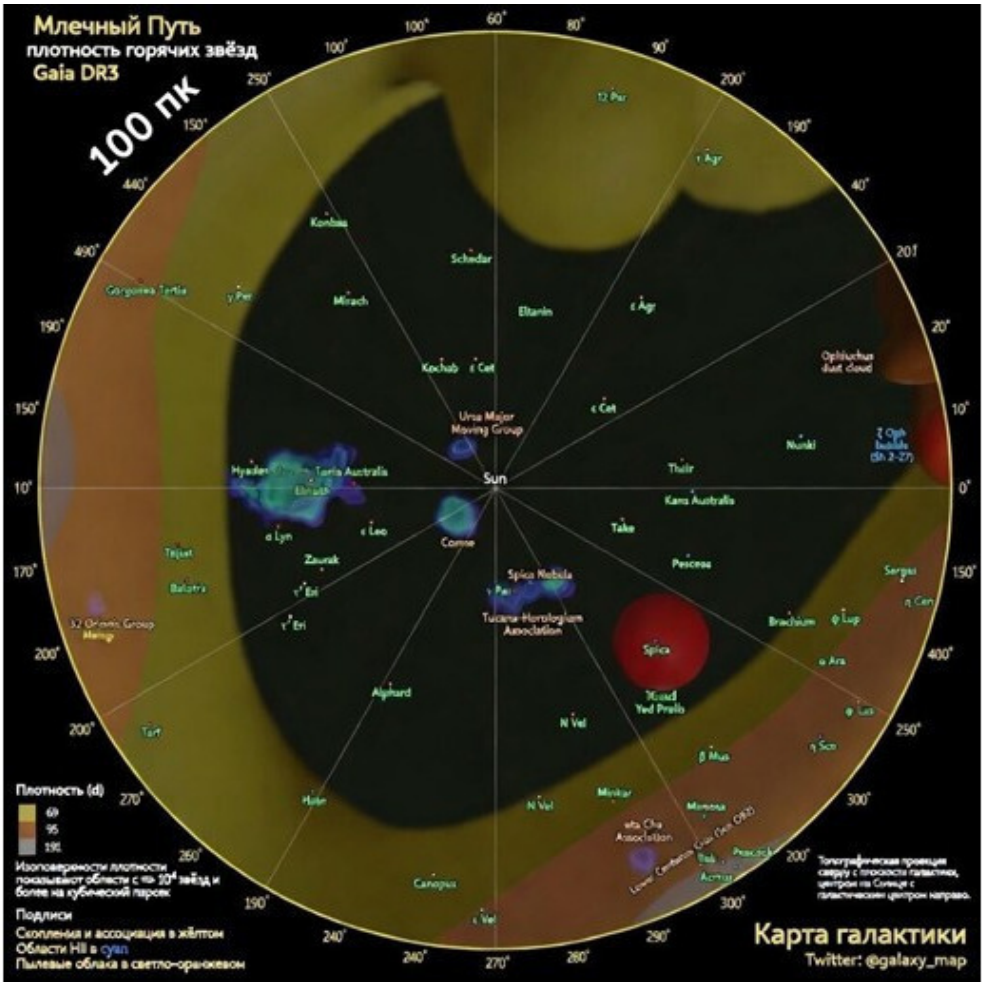
Прямое изучение горячего газа внутри пузыря проводилось с помощью специализированных космических обсерваторий. В 2003—2008 годах работала небольшая обсерватория CHIPSat, а в 1992—2001 годах — Extreme Ultraviolet Explorer. Эти миссии позволили зарегистрировать источники экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения внутри полости.

В 2019—2020 годах были получены первые трёхмерные карты Местного пузыря на основе данных о звёздном поглощении и диффузных межзвёздных полосах. Gaia DR4 2026 года окончательно подтвердила асимметричную структуру пузыря с расширением до 1100 све-

товых лет в направлении Антареса. Местный пузырь — это не просто «пустота» в межзвёздной среде, а динамичная область, которая продолжает влиять на условия, в которых существует наша Солнечная система, и служит уникальной естественной лабораторией для изучения процессов, происходящих в разреженном горячем газе Галактики.

Одним из наиболее впечатляющих проявлений активности Местного пузыря стало его прямое влияние на процессы звездообразования в ближайшем космическом окружении. В январе 2022 года в журнале *Nature* вышла работа, где на основе точных наблюдений и подробного трёхмерного моделирования впервые удалось убедительно показать: расширяющаяся поверхность пузыря сыграла роль своеобразного «катализатора», собрав и сжав межзвёздный газ и пыль, что привело к рождению практически всех молодых звёзд в радиусе нескольких сотен световых лет от Солнца.

Механизм работает следующим образом. Фронт расширяющегося пузыря, движущийся со скоростью десятков километров в секунду, действует как гигантский «снегоочиститель»: он сгребает разреженный межзвёздный газ в плотные оболочки и сгустки. Когда плотность вещества в этих оболочках превышает критическое значение, газ под действием собственной гравитации начинает коллапсировать, образуя плотные ядра будущих звёзд. Таким образом, Местный пузырь не просто «пустота» в межзвёздной среде, а мощный динамический фактор, который активно стимулирует формирование новых звёздных ассоциаций и рассеянных скоплений.



Карта рассеянных звездных скоплений и ярких звезд в Местном пузыре, вид сверху вниз[11]

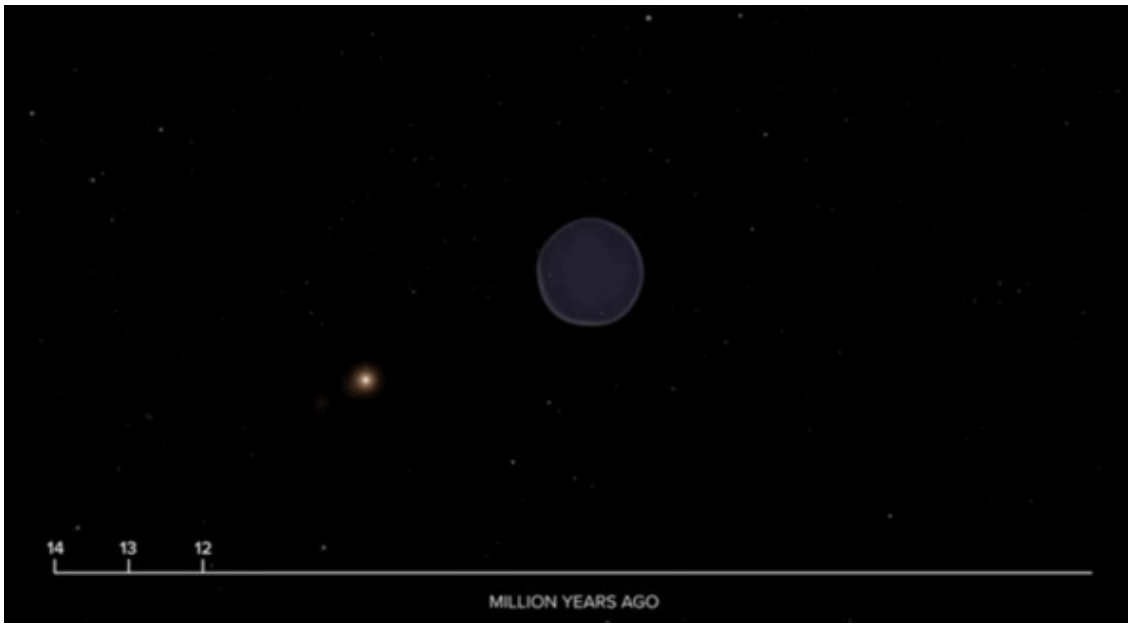
Именно этим объясняется происхождение большинства молодых звёзд в ближайших к нам молекулярных облаках — например, в знаменитом облаке в созвездии Тельца и в рассеянном звёздном скоплении Плеяды. Вспышки сверхновых, произошедшие 14—16 миллионов лет назад и создавшие сам пузырь, продолжают влиять на звёздную историю нашего галактического района даже сегодня.

Последующие исследования 2024—2026 годов, включая данные Gaia DR4 и моделирования с учётом новых наблюдений JWST и ALMA, подтвердили и уточнили эту картину. Оказалось, что подобные процессы «вынужденного» звездообразования под действием расширяющихся пузырей играют важную роль не только в окрестностях Солнца, но и во многих других регионах Млечного Пути, помогая понять, как формируются звёздные системы в спиральных галактиках.

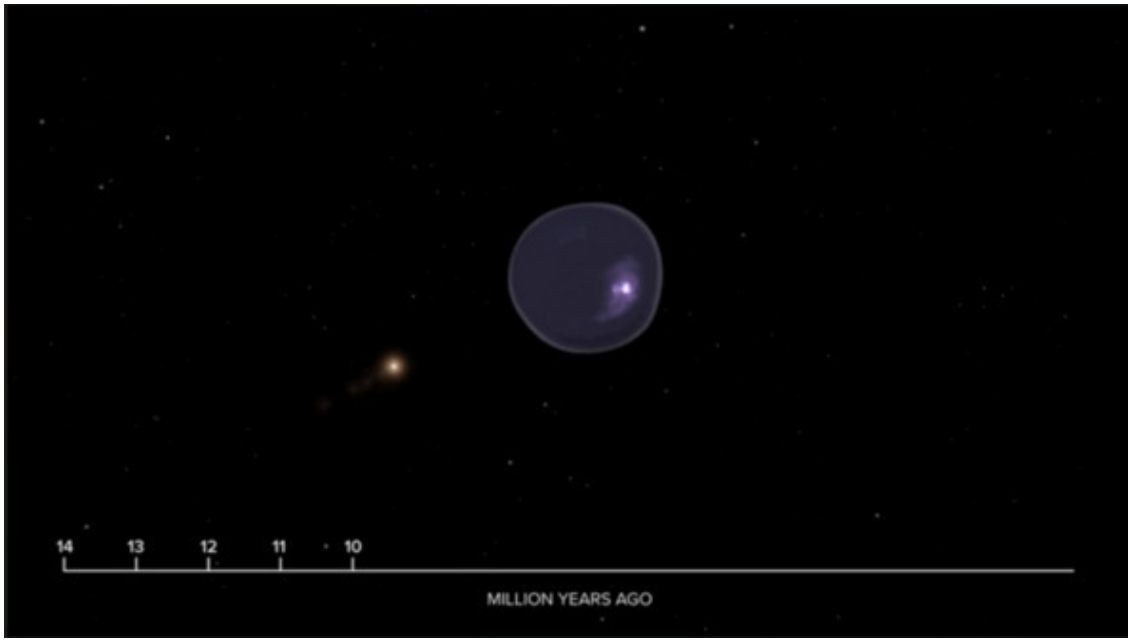
Таким образом, Местный пузырь — это не просто любопытная «пустота» вокруг нас, а активный участник космической эволюции, который до сих пор определяет, где и когда рождаются новые звёзды в нашем ближайшем космическом окружении.

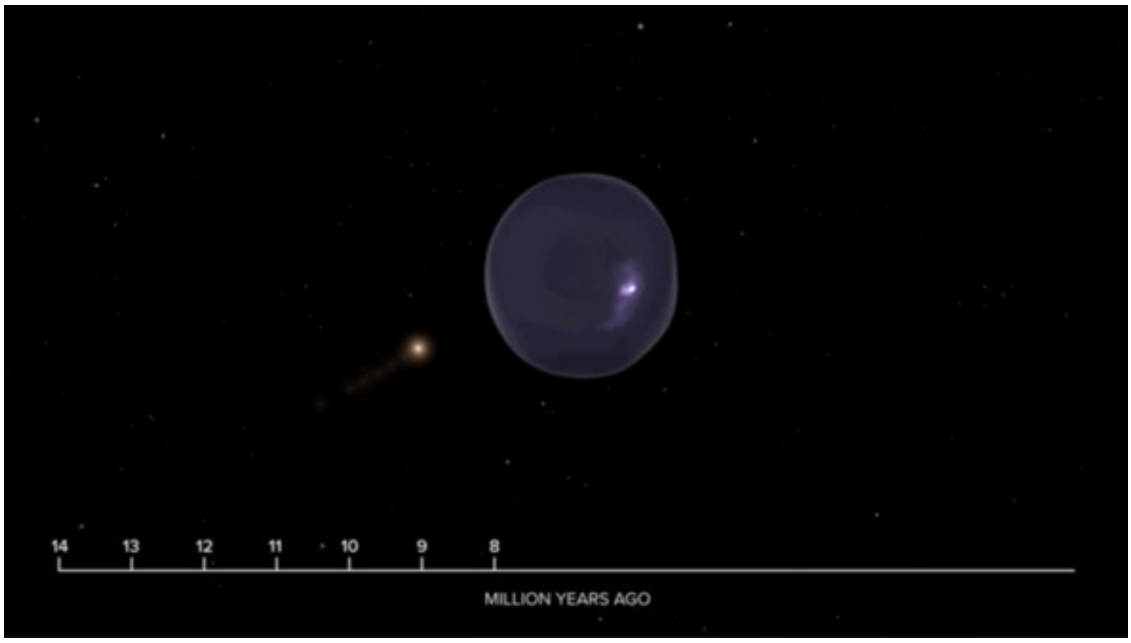
Влияние на звездообразование. В январе 2022 года в статье в журнале Nature было обнаружено, что наблюдения и моделирование определили, что действие расширяющейся поверхности пузыря собрало газ и мусор и было ответственно за образование всех молодых близлежащих звезд. Эти новые звёзды обычно находятся в молекулярных облаках, таких как молекулярное облако в Тельце и рассеянное звездное скопление Плеяды.

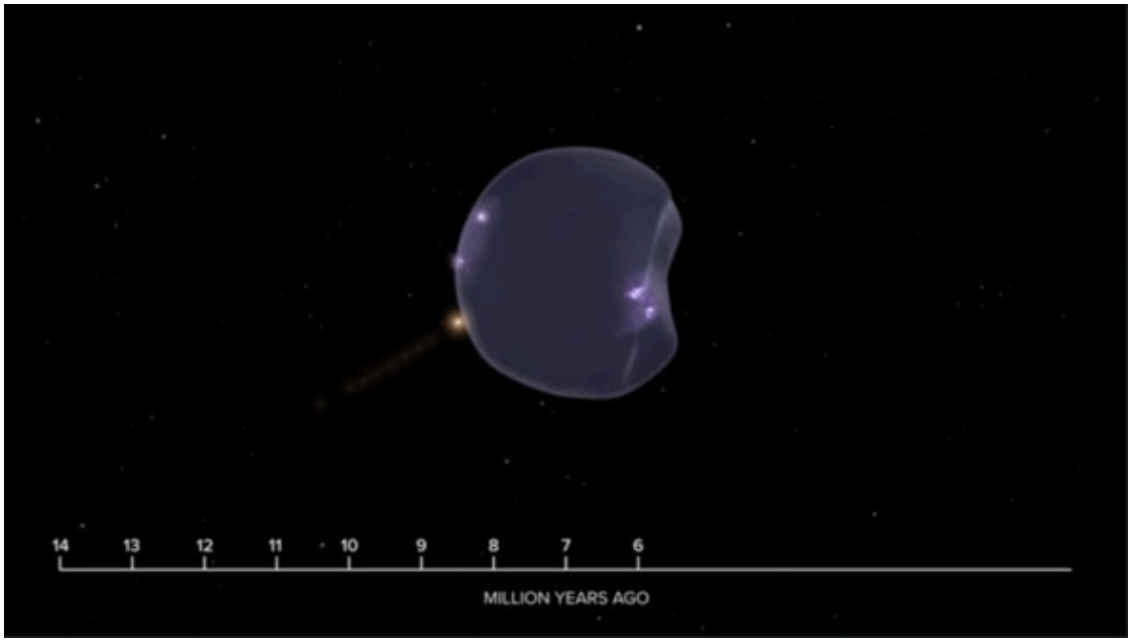
Влияние Местного пузыря на звездообразование и следы сверхновых на Земле

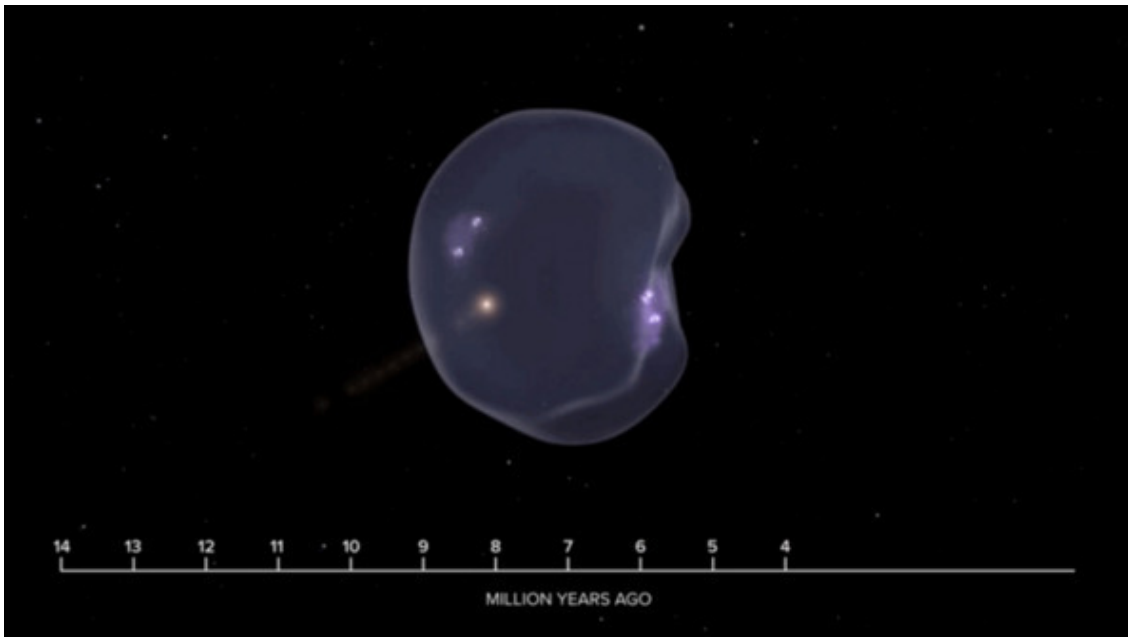


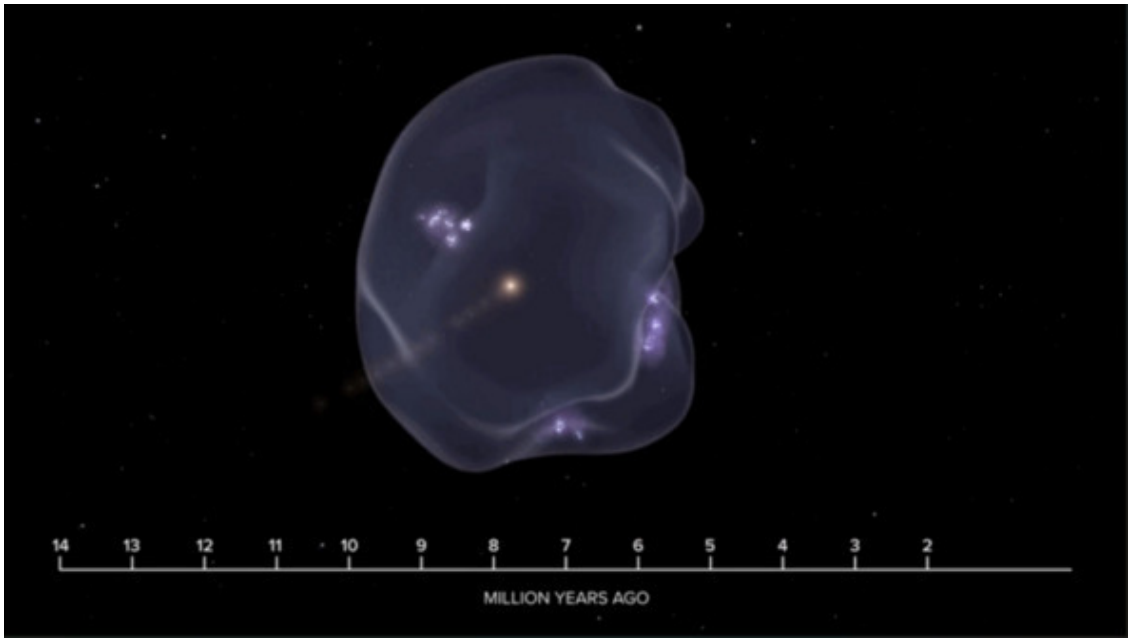
[11] Подробная карта звёзд и звёздных скоплений в радиусе 100 парсек от Солнца (данные Gaia DR3, 2022 г.) (Credit: Kevin Jardine / galaxymap.org, лицензия CC BY 4.0)

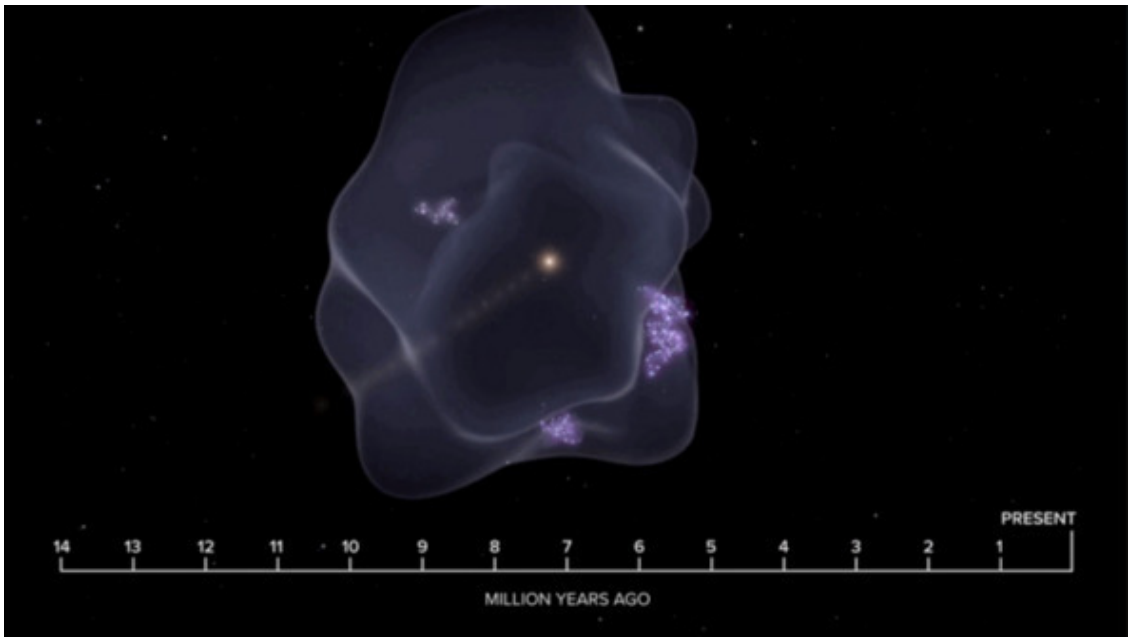

14
13
12
11
10
MILLION YEARS AGO


14
13
12
11
10
9
8
MILLION YEARS AGO


14 13 12 11 10 9 8 7 6
MILLION YEARS AGO


14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4
MILLION YEARS AGO





Реконструкция расширения Местного пузыря около 14 миллионов лет назад под действием вспышек сверхновых (Credit: Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian / STScI, общественное достояние) https://www.youtube.com/watch?v=08UlpJBt5Ic&t=2s

По мере расширения Местного пузыря его передняя поверхность захватывает межзвёздный газ и пыль, сжимает их в плотные оболочки и создаёт условия для рождения новых звёзд. Важно отметить, что звёздообразование происходит именно на поверхности пузыря, а не внутри него — там газ слишком разрежен и горяч, чтобы гравитация могла запустить коллапс. Солнечная система вошла в пределы Местного пузыря около пяти миллионов лет назад. За это время на Земле сохранились отчётливые следы близких сверхновых, взорвавшихся во время формирования пузыря. Наиболее надёжным «посланником» таких событий служит радиоактивный изотоп железо-60 (^{60}Fe). Он обнаружен в глубоководных железомарганцевых конкрециях, антарктическом снегу и даже в лунном грунте. Эти конкреции растут слой за слоем на

океанском дне, подобно годовым кольцам деревьев, и каждый слой можно датировать с помощью других изотопов, например бериллия-10.

Данные глубоководных кернов ODP 2025 года уточнили два ярких пика концентрации ^{60}Fe: первый — около 2,2 миллиона лет назад (связан со сверхновой в ассоциации Нижний Центавр—Южный Крест), второй — примерно 7 миллионов лет назад (связан с событиями в Верхний Центавр—Волк). Концентрация достигает 10^{-14} г/г. В антарктических отложениях также найден плутоний-244. Более старый пик, вероятно, возник, когда Солнечная система проходила через сверхпузырь Ориона—Эридана.

Эти радиоактивные «отпечатки» позволяют буквально читать историю ближайшего космоса. Одна из сверхновых, оставивших след 1,78 ± 0,21 миллиона лет назад, могла породить пульсар PSR B1706—16 и превратить звезду ζ Змееносца в знаменитую «убегающую звезду». Оба объекта, по современным расчётам, произошли из той же звёздной ассоциации, что и сам Местный пузырь.

Местное межзвёздное облако (ММО). Внутри Местного пузыря Солнечная система сейчас движется через небольшое, но более плотное образование — Местное межзвёздное облако (Local Interstellar Cloud, LIC). Это облако размером около 30 световых лет представляет собой слегка уплотнённый участок газа на границе Местного пузыря и Пузыря I.

Солнечная система вошла в ММО где-то между 44 и 150 тысячами лет назад и, по современным оценкам, останется в нём ещё от 2 до 20 тысяч лет. Неясно, находится ли Солнце всё ещё глубоко внутри облака или уже пересекает переходную зону к соседнему G-облаку, в котором расположена Альфа Центавра (на расстоянии около 4 световых лет).

Плотность газа в ММО составляет примерно 0,3 атома на кубический сантиметр — в шесть раз выше, чем в самом Местном пузыре, но всё равно в полтора раза ниже средней плотности межзвёздной среды Галактики. Температура облака — около 7000 K, то есть примерно такая же, как на поверхности Солнца, однако из-за крайне низкой плотности его теплоёмкость ничтожно мала.

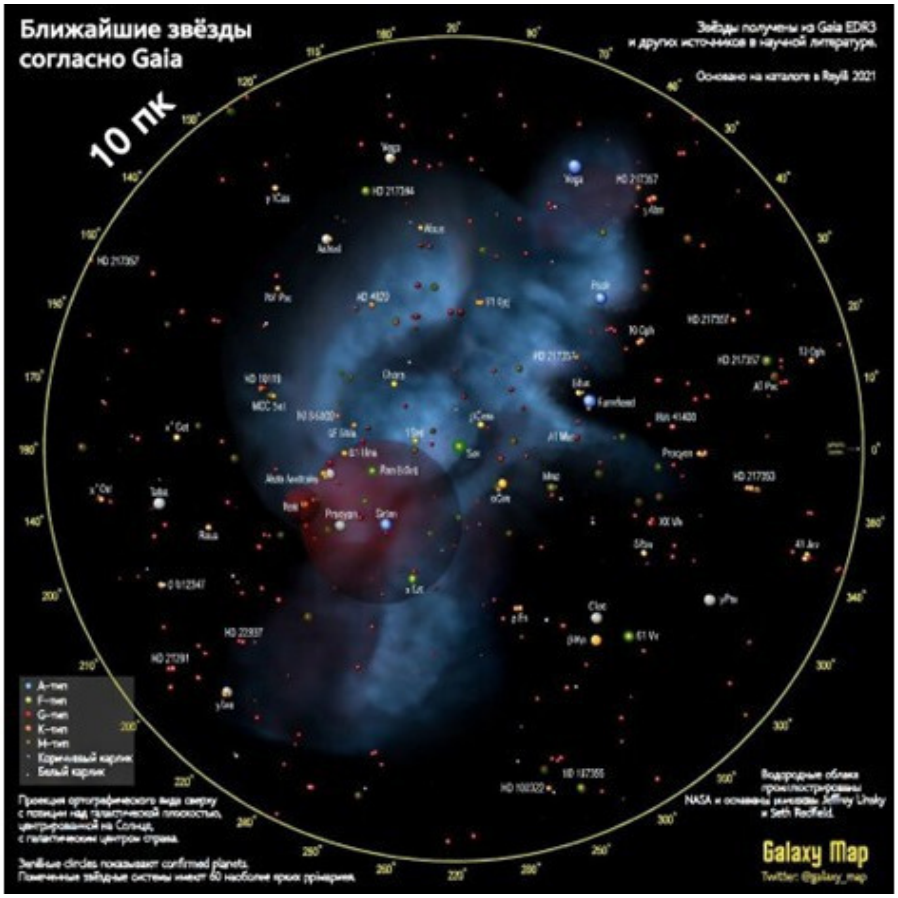


Схема окружающих звезд и художественное представление Местного межзвездного облака[12]

Данные миссии IBEX — Lo 2025 года уточнили напряжённость магнитного поля внутри ММО: оно составляет 500—600 пикотесла — значительно сильнее, чем ожидалось раньше. Именно это сильное магнитное поле помогает облаку сохраняться, несмотря на давление горячего газа Местного пузыря и солнечного ветра, дующего со скоростью около 25 км/с.

ММО вытекает из звёздной ассоциации Скорпиона—Центавра — активной области звездообразования, расположенной почти перпендикулярно направлению движения Солнца. В 2019 году в Антарктиде было обнаружено межзвёздное железо-60, которое, по мнению исследователей, также связано с прохождением Солнечной системы через это облако.

Галактическое облако (G-Cloud). Рядом с Местным межзвёздным облаком, внутри Местного пузыря, находится ещё одно интересное образование — Галактическое облако (G-Cloud, или комплекс G-облаков). Солнечная система постепенно приближается к нему. G-Cloud содержит звёзды Альфа Центавра (включая Проксиму Центавра) и Альтаир, а возможно, и другие близкие светила.

По данным Gaia DR4 2026 года, плотность нейтрального водорода в G-облаке составляет 0,095—0,105 атома на кубический сантиметр. Это переходная зона между LIC и G-Cloud имеет толщину около 0,5 парсека, что делает её особенно интересной для изучения взаимодействия разных межзвёздных структур.

Таким образом, Местное межзвёздное облако и соседнее Галактическое облако — это не просто «среда», сквозь которую мы сейчас летим. Это динамичные, намагниченные области,

[12] Подробная карта окрестностей Солнца в радиусе 10 парсек (2022 г.) с указанием положения Локального межзвёздного облака и ближайших звёзд (Credit: Kevin Jardine / galaxymap.org, лицензия CC BY 4.0)

которые определяют текущие условия космической погоды вокруг Земли и продолжают влиять на защиту нашей планеты от галактических космических лучей.

Туманности

Туманность — это участок межзвёздной среды, который выделяется на фоне неба своим собственным излучением или, наоборот, поглощением света. Раньше этим словом называли любой неподвижный протяжённый объект на небе. Лишь в 1920-е годы, когда астрономы разобрались, что многие «туманности» на самом деле являются далёкими галактиками (например, Туманность Андромеды), термин приобрёл современное, более узкое значение.

Одним из первых учёных, кто всерьёз задумался о природе туманностей, стал Эдмунд Галлей. Уже в 1715 году он предположил, что эти объекты могут быть самосветящимися космическими образованиями, а не просто скоплениями вещества, отражающими солнечный свет. Галлей считал, что таких объектов во Вселенной должно быть великое множество и они способны занимать пространства, сравнимые с размерами целых планетных систем.

Позднее, в 1787 году, Шарль Мессье, охотясь за кометами, составил знаменитый каталог неподвижных диффузных объектов, чтобы случайно не принять их за кометы. В этот каталог вошли как настоящие туманности, так и галактики (например, M 31 — Туманность Андромеды) и шаровые скопления (M 13 в Геркулесе).

Уильям Гершель посвятил изучению туманностей значительную часть своей жизни. Поначалу он считал их либо светящимися флюидами, либо далёкими неразрешимыми звёздными скоплениями, либо хаотическими облаками, из которых рождаются звёзды. К 1791 году, изучив планетарную туманность NGC 1514 с яркой центральной звездой и почти идеально круглой формой, Гершель пришёл к выводу: это не звёздное скопление, а диффузное газовое облако, удерживаемое гравитацией центральной звезды. Именно тогда он впервые предположил, что в таких туманностях может происходить процесс звёздообразования. Эти идеи он развил в серии статей, опубликованных между 1791 и 1811 годами.

В 1865 году Уильям Хаггинс и Уильям Миллер с помощью спектроскопии показали, что планетарные туманности (Кошачий Глаз, Кольцо, Гантель) имеют линейчатый эмиссионный спектр, состоящий из линий водорода, азота и неизвестной тогда «зелёной линии». Это доказало, что они представляют собой разогретые газовые облака. Другие объекты — шаровые скопления и галактики — давали непрерывный спектр, похожий на звёздный. Таинственную зелёную линию позже отождествили с запрещёнными переходами в дважды ионизированном кислороде.

С развитием телескопов и спектроскопии понятие «туманность» постепенно уточнялось. Многие объекты, ранее считавшиеся туманностями, оказались звёздными скоплениями или галактиками. Были открыты и изучены тёмные газопылевые туманности, которые поглощают свет расположенных за ними звёзд. К 1920-м годам, благодаря работам Кнута Лундмарка и Эдвина Хаббла, окончательно стало ясно: термин «туманность» следует применять только к газопылевым облакам внутри нашей Галактики.

Современная классификация туманностей

Сегодня туманности классифицируют по тому, как они взаимодействуют со светом: они могут поглощать, излучать или рассеивать его. По этому признаку их делят на тёмные и светлые.

· Тёмные туманности видны благодаря тому, что загораживают свет звёзд и более далёких объектов.

· Светлые туманности наблюдаются либо за счёт собственного излучения (эмиссионные), либо за счёт отражения и рассеяния света близлежащих звёзд (отражательные).

Разделение на газовые и пылевые носит во многом условный характер: все туманности содержат и газ, и пыль. Пылевая компонента особенно заметна в тёмных туманностях и в случаях, когда пыль отражает или переизлучает свет звёзд в инфракрасном диапазоне. Газовая

составляющая ярко проявляется при ионизации ультрафиолетовым излучением горячих звёзд (как в эмиссионных туманностях H II) или при нагреве ударными волнами от сверхновых и мощных звёздных ветров.

Данные космического телескопа JWST 2023—2026 годов подтвердили, что в эмиссионных туманностях, таких как Туманность Ориона, газ ионизирован излучением звёзд спектрального класса O (температура поверхности около 40 000 K). В спектрах чётко видны запрещённые линии дважды ионизированного кислорода [O III] 5007 Å, а пыль активно переизлучает в инфракрасном диапазоне с пиком на 10—20 мкм.

Туманности остаются уникальными природными лабораториями, где мы можем изучать самые разные процессы межзвёздной среды — от звездообразования до химической эволюции вещества.

Тёмные и диффузные туманности

Тёмные туманности — это плотные, холодные скопления межзвёздного газа (в основном молекулярного) и пыли, которые становятся видимыми именно благодаря тому, что надёжно загораживают свет более далёких звёзд и туманностей. Они выглядят как тёмные силуэты или «дыры» на фоне яркого Млечного Пути.

Классическими примерами служат знаменитый Угольный Мешок в Южном Кресте и гигантские глобулы — компактные, почти круглые облака, в которых, как считается, активно идёт звездообразование. Особенно эффектно смотрится Туманность Конская Голова в Орионе — её силуэт чётко выделяется на фоне светящегося газа.

Степень поглощения света в таких объектах сильно различается. В менее плотных областях она составляет 1—10 звёздных величин, а в самых плотных ядрах может достигать десятков и даже сотен величин. В этих «непрозрачных» зонах оптические телескопы бессильны — внутреннюю структуру удаётся изучить только с помощью радио- и субмиллиметровых наблюдений по молекулярным линиям и инфракрасному излучению пыли. Именно там астрономы находят сверхплотные сгустки, где, по всей видимости, и рождаются новые звёзды.

В полупрозрачных частях тёмных туманностей хорошо заметна характерная волокнистая, «нитистая» структура. Эта волокнистость и вытянутая форма объясняются влиянием межзвёздных магнитных полей: они ограничивают движение вещества поперёк силовых линий и провоцируют различные магнитогидродинамические неустойчивости. Пылинки, несущие электрический заряд, особенно чувствительны к магнитной конфигурации, что делает тёмные туманности ценнейшими лабораториями для изучения динамики межзвёздной среды.

Диффузные туманности — это общий термин для светлых туманностей неправильной формы. Их принято делить на два основных типа:

· Эмиссионные — светятся собственным излучением газа, который ионизируется ультрафиолетовым светом горячих звёзд. Их спектры состоят преимущественно из ярких эмиссионных линий.

· Отражательные — светятся за счёт рассеяния и отражения света близлежащих звёзд пылевыми частицами. В них нет достаточно горячих звёзд, чтобы возбудить газ, поэтому светится именно пыль.

Диффузным туманностям противопоставляют планетарные туманности, которые имеют более правильную, обычно округлую или биполярную форму и образуются при сбросе оболочек умирающих звёзд.

Все туманности в той или иной степени содержат и газ, и пыль, поэтому традиционное деление на «газовые» и «пылевые» во многом условно. Оно сохранилось скорее по историческим причинам — из-за различий в методах наблюдения и механизмах свечения. Тем не менее именно сочетание газа и пыли делает туманности удивительно сложными и интересными объектами, где одновременно идут процессы ионизации, охлаждения, химической эволюции и звездообразования.

Отражательные туманности — это газово-пылевые облака, которые светятся не собственным излучением, а за счёт рассеяния и отражения света близлежащих звёзд. Если звезда или группа звёзд расположена внутри облака или совсем рядом, но не обладает достаточной температурой, чтобы ионизировать окружающий водород, то основным источником видимого свечения становится именно отражённый звёздный свет. Классический пример — нежные голубоватые вуали вокруг ярких звёзд в скоплении Плеяды. Ещё один впечатляющий объект — туманность Голова Ведьмы (IC 2118) в созвездии Ориона. Она подсвечивается мощным излучением Ригеля и имеет характерный голубоватый оттенок: пылинки эффективнее рассеивают коротковолновый (синий) свет, чем красный.



IC 2118: отражательная туманность Голова Ведьмы, весьма своеобразной формы связана с яркой звездой Ригель в созвездии Ориона. Она светит в основном за счет излучения звезды Ригель, расположенной за верхним правым краем изображения. Свет звезды отражается от туманности, состоящей из мелкой пыли. Оттенки синего цвета объясняются не только тем, что Ригель излучает в основном в синей области спектра, но также и тем, что пылинки рассе-

ивают голубой свет эффективнее, чем красный. Туманность находится на расстоянии 900—1000 световых лет от Солнца.[13]

Большинство отражательных туманностей сосредоточено вблизи плоскости Млечного Пути, хотя иногда они встречаются и на высоких галактических широтах. Это облака различных размеров, формы, плотности и массы, освещаемые совокупным светом звёзд галактического диска. Изучать их непросто: поверхностная яркость обычно крайне низкая, часто ниже фона неба. Иногда, проецируясь на изображения далёких галактик, они создают на фотографиях иллюзорные детали — ложные «хвосты», «перемычки» и другие структуры, которых на самом деле не существует.

Среди отражательных туманностей выделяется особый класс — кометарные туманности. Они получили своё название благодаря характерной форме, напоминающей комету. В «головной» части такой туманности обычно находится молодая переменная звезда типа Т Тельца, которая и освещает окружающую газопылевую среду. Яркость туманности меняется вслед за изменениями блеска звезды, но с небольшим запаздыванием, равным времени распространения света. Типичные размеры этих объектов очень малы — всего несколько сотых долей парсека.

Ещё более редкое и красивое явление — световое эхо. Самый яркий пример — отклик на вспышку новой звезды 1901 года в созвездии Персея. Мощная вспышка постепенно осветила окружающие пылевые облака, и в течение нескольких лет наблюдатели видели, как слабая туманность «расширяется» во все стороны со скоростью света. Кроме светового эха, вспышки новых звёзд могут создавать и газовые туманности, похожие по свойствам на остатки сверхновых.

Многие отражательные туманности обладают тонковолокнистой структурой — системой почти параллельных нитей толщиной от нескольких сотых до тысячных долей парсека. Эта волокнистость возникает из-за взаимодействия вещества с межзвёздным магнитным полем. Пылинки и газовые потоки раздвигают силовые линии, внедряются между ними и формируют тонкие нити. Изучение распределения яркости, поляризации света и зависимости этих параметров от длины волны позволяет астрономам определять важнейшие свойства межзвёздной пыли: её альбедо, индикатрису рассеяния, размеры, форму и ориентацию пылинок.

Таким образом, отражательные туманности — это не просто красивые «отражения» звёздного света, а тонкие индикаторы сложных физических процессов в межзвёздной среде.

Туманности, ионизованные излучением (эмиссионные)

Эмиссионные туманности — это яркие области межзвёздного газа, которые светятся собственным излучением благодаря интенсивной ионизации под действием мощного ультрафиолетового света горячих звёзд. Самые известные и хорошо изученные из них — **зоны H II** (области ионизированного водорода). В этих зонах газ почти полностью ионизирован и нагрет до температуры около 10 000 К. Именно здесь рождаются массивные горячие звёзды, чьё жёсткое излучение превращает окружающий нейтральный водород в светящуюся плазму.

[13] Отражательная туманность Ведьма (IC 2118) — классический пример отражательной туманности, в которой свет близлежащих горячих звёзд рассеивается на частицах межзвёздной пыли (Credit: NASA / Gary Stevens, обработка Adrian Pingstone, общественное достояние)



Гигантская область звездообразования NGC 604[14]

Физические процессы в таких туманностях подчиняются теореме Росселанда: всё ультрафиолетовое излучение звезды в лаймановском континууме в конечном итоге преобразуется в излучение в линиях подчинённых серий. Поэтому спектры эмиссионных туманностей ярко выделяются интенсивными линиями бальмеровской серии водорода и знаменитой линией Лайман-альфа. Исключение составляют лишь очень разреженные зоны, где условия приближаются к корональному газу и механизмы излучения несколько иные.

Данные ALMA 2025 года уточнили температуру в зонах C II вокруг звёзд спектрального класса B в Орионе: она составляет 50—80 К, а отношение концентрации электронов к атомам $Ne/N \approx 10^{—4}$, что полностью подтверждает роль фотонов с энергией 11,8—13,6 эВ.

К этому же классу относятся зоны C II — области, где практически полностью ионизирован углерод. Они обычно окружают зоны H II и располагаются в нейтральном водороде (H

[14] Гигантская звёздная «детская» NGC 604 в галактике Треугольника. Яркие молодые массивные звёзды освещают окружающий газ, создавая одну из самых активных областей звездообразования в ближайших галактиках (Credit: NASA/ESA / Hui Yang (University of Illinois), STScI, общественное достояние)

I). Эти зоны проявляют себя в рекомбинационных радиолиниях углерода и в инфракрасной линии C II на длине волны 156 мкм. Для них характерны низкие температуры (30—100 К) и очень малая степень ионизации всей среды в целом.

Зоны C II возникают потому, что потенциал ионизации углерода (11,8 эВ) ниже, чем у водорода (13,6 эВ). Фотоны с энергией в промежутке 11,8—13,6 эВ свободно проходят через зону H II и ионизуют углерод уже за её пределами.

Кроме того, зоны C II могут формироваться вокруг относительно холодных звёзд спектральных классов B1—B5, которые не способны ионизовать водород и поэтому не создают заметных зон H II. Такие области особенно интересны для изучения ранних стадий звездообразования.

Эмиссионные туманности возникают также вокруг мощных рентгеновских источников — как в Млечном Пути, так и в активных ядрах галактик и квазарах. В этих случаях температура газа и степень ионизации тяжёлых элементов значительно выше, чем в обычных зонах H II.

Гигантские области звездообразования, такие как NGC 604 в галактике M 33, представляют собой целые комплексы эмиссионных туманностей, где процессы ионизации и звездообразования идут одновременно в огромных масштабах.

Таким образом, эмиссионные туманности служат настоящими природными лабораториями, где мы можем наблюдать взаимодействие звёздного излучения с межзвёздной средой в самых разных условиях — от спокойных окрестностей одиночных звёзд до бурных регионов активного звездообразования.

Планетарная туманность — это оболочка ионизированного газа, окружающая центральную звезду, которая уже превратилась в белый карлик. Эти объекты представляют собой одну из финальных стадий жизни звёзд средней и малой массы.

Название «планетарные» появилось в конце XVIII века благодаря Уильяму Гершелю. При наблюдении в телескоп многие из них напоминали маленькие диски планет, хотя на самом деле не имеют к планетам никакого отношения. Это просто сброшенная внешняя оболочка звезды-гиганта, которая расширяется в окружающее пространство и светится под действием излучения оставшейся горячей звезды.

По данным 2026 года, в Млечном Пути известно около 1500 планетарных туманностей. Каталог активно пополняется благодаря наблюдениям телескопов Chandra и Euclid, которые особенно точно изучают их сложную морфологию и вклад в химическое обогащение межзвёздной среды.

В отличие от диффузных эмиссионных туманностей, планетарные имеют более компактные размеры (диаметр обычно 0,01—0,1 парсека), сравнительно небольшую массу (около 0,1 массы Солнца) и расширяются со скоростью 20—40 км/с. Время их жизни по астрономическим меркам крайне невелико — всего несколько десятков тысяч лет.



Туманность Улитка (Helix Nebula, NGC 7293, другие обозначения — PK 36—57.1, ESO 602-PN22) — планетарная туманность в созвездии Водолей на расстоянии 650 световых лет от Солнца. Ближайшая планетарная туманность.[15]

Современные наблюдения космического телескопа «Хаббл», а позднее и JWST, показали, что лишь около 20% планетарных туманностей имеют относительно простую сферическую или кольцевую форму. Большинство демонстрирует удивительное разнообразие структур: биполярные, многослойные, со спиралями, струями, мелкими глобулами и сложными волокнами.

Такое богатство форм объясняется взаимодействием нескольких факторов: звёздного ветра, присутствия двойных звёздных систем, влияния магнитных полей и особенностей окружающей межзвёздной среды.

[15] Планетарная туманность Улитки (NGC 7293) — «Глаз Бога», одна из ближайших к Солнцу планетарных туманностей. На снимке видна сложная газовая оболочка, сброшенная умирающей звездой около 10—12 тысяч лет назад (Credit: NASA/ESA, C.R. O'Dell (Vanderbilt University), общественное достояние)

Точные механизмы формирования каждой конкретной структуры до сих пор остаются предметом активных исследований.

Эволюционный путь к планетарной туманности

Планетарные туманности — это естественный финал жизненного цикла звёзд, подобных Солнцу. Пока звезда находится на главной последовательности, она поддерживает равновесие за счёт термоядерного синтеза гелия из водорода в ядре. Когда запас водорода в ядре исчерпывается (для Солнца это произойдёт через несколько миллиардов лет), ядро начинает сжиматься и разогреваться. Одновременно внешние слои расширяются и охлаждаются, превращая звезду в красного гиганта.

При достижении в ядре температуры около 100 миллионов кельвинов запускается новый этап термоядерных реакций — синтез углерода и кислорода из гелия («гелиевое горение»). Внешние слои звезды становятся неустойчивыми и постепенно сбрасываются в виде расширяющейся оболочки. Оставшееся ядро, теперь уже белый карлик, продолжает излучать мощный ультрафиолетовый поток, который ионизирует и заставляет светиться сброшенную оболочку — так и рождается планетарная туманность.

Эти объекты играют важную роль в химической эволюции Галактики: вместе с оболочкой звезда возвращает в межзвёздную среду обогащённое углеродом, кислородом и другими элементами вещество, которое станет строительным материалом для следующих поколений звёзд и планет.

Особенность термоядерных реакций с участием гелия заключается в их чрезвычайной чувствительности к температуре: скорость энерговыделения пропорциональна T^{40}. Даже небольшое повышение температуры всего на 2% приводит к удвоению скорости реакций. Такая сильная зависимость делает звезду крайне нестабильной. Небольшой рост температуры вызывает резкое ускорение реакций, что в свою очередь приводит к дальнейшему нагреву. Возникает мощная положительная обратная связь, которая проявляется в сильных пульсациях. Эти пульсации способны сбросить значительную часть звёздной атмосферы в окружающее пространство, создавая предпосылки для формирования планетарной туманности.

Выброшенный газ образует расширяющуюся оболочку вокруг обнажившегося горячего ядра звезды. По мере того как внешние слои продолжают отделяться, всё более глубокие и горячие слои звезды выходят на поверхность. Когда температура фотосферы достигает примерно 30 000 К, испускаемые ультрафиолетовые фотоны становятся достаточно энергичными, чтобы ионизировать атомы в выброшенном веществе. Оболочка начинает ярко светиться — и перед нами предстаёт планетарная туманность.

Наблюдения телескопа James Webb в 2026 году подтвердили наличие внутри туманности Улитка (NGC 7293) кометоподобных структур, что указывает на важную роль магнитных полей в формировании и эволюции таких объектов.

Песочные Часы (MyCn 18) — яркий пример биполярной планетарной туманности, расположенной на расстоянии около 8000 световых лет от Солнца. Её необычная форма до сих пор вызывает вопросы у астрономов. Скорее всего, она возникла из плотного газового диска в экваториальной плоскости центральной звезды, который под действием мощного звёздного ветра и магнитных полей приобрёл характерный «песочные часы» вид.

Основными источниками сильных ударных волн в межзвёздной среде служат взрывы звёзд — сбросы оболочек при вспышках сверхновых и новых, а также интенсивный звёздный ветер. Во всех этих случаях вещество выбрасывается из точечного источника (звезды), поэтому образующиеся туманности имеют вид расширяющейся оболочки, близкой по форме к сферической.



Песочные Часы (также известна как MyCn 18) — биполярная планетарная туманность, расстояние до которой составляет порядка 8000 световых лет. До сих пор до конца не ясно, что заставило туманность приобрести такую необычную форму, возможно она сформировалась из плотного газового облака в экваториальной плоскости центральной звезды туманности, которое под влиянием межзвёздного ветра приобрело видимую сейчас форму.[16]

Выбрасываемое вещество движется со скоростями от сотен до тысяч километров в секунду. За фронтом ударной волны газ разогревается до миллионов, а иногда и миллиардов градусов. При таких температурах он излучает главным образом в рентгеновском диапазоне — как в непрерывном спектре, так и в спектральных линиях. В оптическом диапазоне свечение газа очень слабое. Когда ударная волна встречает неоднородности межзвёздной среды, она огибает более плотные сгустки. Внутри этих уплотнений распространяется более медленная вторичная ударная волна, которая вызывает яркое излучение в оптических спектральных линиях. В результате появляются хорошо заметные на фотографиях яркие волокна и нити.

Основной ударный фронт, обтекая сгусток межзвёздного газа, приводит его в движение в сторону распространения волны, но уже с меньшей скоростью. Эти процессы создают сложную, многослойную структуру, которую мы наблюдаем в остатках сверхновых и в планетарных туманностях.

Таким образом, планетарные туманности и ударные волны от звёздных взрывов — это важные этапы, через которые межзвёздная среда получает обогащённое тяжёлыми элементами вещество и новые порции энергии, поддерживающие её динамическое равновесие и звездообразование.

Остатки сверхновых и новых звёзд. Наиболее яркие и энергичные туманности, созданные ударными волнами, возникают при взрывах сверхновых звёзд и носят название остатков вспышек сверхновых (supernova remnants, SNR).

Эти объекты играют исключительно важную роль в формировании структуры межзвёздного газа. Помимо ударных волн, для них характерно нетепловое радиоизлучение со степенным спектром, которое генерируется релятивистскими электронами. Эти электроны ускоряются как во время самого взрыва, так и позднее — пульсаром, который часто остаётся в центре остатка. Туманности, связанные со вспышками новых звёзд, напротив, гораздо меньше, слабее и существуют очень недолго.

Остаток сверхновой — это туманность, образовавшаяся после катастрофического взрыва звезды, произошедшего десятки или сотни лет назад. Во время взрыва внешние слои звезды

[16] Планетарная туманность Песочные Часы (MyCn18) — одна из самых симметричных и красивых планетарных туманностей. Две симметричные «колбы» газа и пыли сформированы мощными звёздными ветрами умирающей звезды (Credit: NASA/ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA), общественное достояние)

разлетаются во все стороны со скоростью около 1% от скорости света (примерно 3000 км/с), создавая мощную расширяющуюся ударную волну. В результате формируется оболочка, состоящая как из выброшенного звёздного вещества, так и из межзвёздного газа, который волна увлекает за собой.

Существует два основных сценария рождения сверхновой:

· Массивная звезда исчерпывает термоядерное топливо в ядре, теряет давление и коллапсирует под собственной гравитацией, превращаясь в нейтронную звезду или чёрную дыру.

· Белый карлик в двойной системе накапливает вещество от компаньона (аккреция) и, достигнув критической массы, взрывается.

В обоих случаях взрыв выбрасывает в окружающее пространство огромное количество вещества, которое, сталкиваясь с межзвёздным газом, порождает сильнейшую ударную волну. За фронтом волны газ разогревается до миллионов и даже миллиардов кельвинов и начинает интенсивно излучать в рентгеновском диапазоне.

В 2026 году новые модели эволюции массивных звёзд, разработанные международными группами астрофизиков, показали, как химический состав и структура оболочки влияют на характеристики вспышек сверхновых, подтверждая ключевую роль ударных волн в формировании и динамике SNR.

Один из самых красивых и лучше всего изученных молодых остатков — SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке, вспыхнувшая в 1987 году. Классическими примерами остаются также Крабовидная туманность (остаток SN 1054), остаток сверхновой Тихо (SN 1572) и остаток сверхновой Кеплера (SN 1604). В январе 2026 года NASA опубликовало 25-летнее видео эволюции остатка Кеплера, полученное телескопом Chandra, которое наглядно демонстрирует динамику развития SNR за четверть века наблюдений.

Стадии эволюции остатка сверхновой

Остаток сверхновой проходит в своём развитии несколько характерных стадий:

1. Свободное расширение. Выброшенное вещество разлетается практически беспрепятственно, пока масса захваченного межзвёздного газа не сравняется с массой выброшенного материала. Эта стадия длится от десятков до нескольких сотен лет в зависимости от плотности окружающей среды.

2. Фаза Седова—Тейлора. Ударная волна существенно замедляется, возникает обратная (внутренняя) ударная волна. В этой фазе остаток описывается автомодельным решением, а столкновения ударных волн сопровождаются мощным рентгеновским излучением.

3. Фаза радиационного охлаждения. Внешняя оболочка остатка охлаждается, формируется тонкая (<1 пк) и плотная (от 1 до 100 миллионов атомов в кубическом метре) оболочка вокруг горячей внутренней полости. Оболочка начинает ярко светиться в оптическом диапазоне за счёт рекомбинации ионизированных атомов.

4. Охлаждение внутренней полости. Плотная оболочка продолжает расширяться по инерции. На этой стадии остаток хорошо виден в линии нейтрального водорода.

5. Слияние с межзвёздной средой. Примерно через миллион лет скорость расширения падает до типичных скоростей движения газа в Галактике, и материя остатка полностью смешивается с окружающим межзвёздным веществом, обогащая его тяжёлыми элементами.

В 2026 году исследования загадочного объекта Pa 30, связанного с «гостевой звездой» 1181 года, показали, что это частично взорвавшийся белый карлик, не перешедший в полноценную сверхновую. Это открытие добавило новый сценарий к эволюции остатков сверхновых.

Таким образом, остатки сверхновых — это не просто красивые туманности, а важнейшие «космические миксеры», которые перемешивают, обогащают и перестраивают межзвёздную среду, обеспечивая непрерывный цикл рождения новых поколений звёзд и планет.

Туманности вокруг звёзд Вольфа — Райе

Ещё один яркий тип туманностей, рождённых ударными волнами, связан с мощным звёздным ветром звёзд Вольфа — Райе. Эти массивные, очень горячие звёзды находятся на поздней стадии эволюции и теряют вещество с огромной скоростью — до 10^{-5}—10^{-4} массы Солнца в год при скорости истечения 1000—3000 км/с. Столкнувшись с окружающим межзвёздным газом, этот ветер создаёт вокруг звезды расширяющийся пузырь — туманность Вольфа — Райе.



NGC 2359 (другое обозначение — LBN 1041; также известна как Шлем Тора) — эмиссионная туманность в созвездии Большого Пса, находящаяся в 15 000 световых годах от Солнца. Туманность представляет собой космическое облако, которое имеет форму шлема с похожими на крылья придатками, и его обычно называют Шлемом Тора. Сам шлем больше похож на космический пузырь, выдутый быстрым ветром от яркой массивной звезды около его центра в окружающем молекулярном облаке. Центральная звезда — исключительно горячий голубой гигант — принадлежит к звездам Вольфа-Райе. Предполагается, что она находится на короткой стадии эволюции, которая должна закончиться взрывом сверхновой. По данным 2026 года, NGC 2359 простирается примерно на 30 световых лет, с центральной звездой WR 7, создающей пузырь в межзвёздной среде. [17]

В отличие от остатков сверхновых, радиоизлучение таких туманностей имеет тепловую природу. Их время жизни ограничено продолжительностью стадии Вольфа — Райе и составляет около 100 000 лет. В 2025 году космический телескоп James Webb (JWST) впервые детально изучил долгоживущие пылевые оболочки вокруг нескольких звёзд Вольфа — Райе и показал, что они активно участвуют в формировании углеродсодержащей пыли, которая может сохраняться в межзвёздной среде веками.

Туманности Вольфа — Райе классифицируют по нескольким признакам. Одна из самых ранних классификаций учитывает природу и происхождение: области H II, туманности от выбросов вещества и туманности, созданные звёздным ветром. Более практичный подход основан на внешнем виде: многие из них имеют правильную кольцевую форму, что говорит о почти сферической оболочке. Другие выглядят как разрушенные оболочки или объекты, сформированные выбросами отдельных сгустков вещества. Некоторые туманности демонстрируют красивую спиральную структуру — например, система WR 104 или недавно изученная системой Apep.

Примеры таких туманностей:

[17] Туманность Шлем Тора (NGC 2359) в созвездии Большого Пса — яркая эмиссионная туманность, окружённая оболочкой, сформированной мощными звёздными ветрами и излучением горячей звезды WR 7 (Credit: Roberto Mura, общественное достояние)

· NGC 6888 — классический «пузырь» Вольфа — Райе, созданный мощным ветром центральной звезды.

· NGC 2359 (Шлем Тора) — эмиссионная туманность в созвездии Большого Пса на расстоянии около 15 000 световых лет. Её форма действительно напоминает шлем с крыльями. Центральная звезда WR 7 — исключительно горячий голубой гигант, который выдувает в окружающем молекулярном облаке огромный пузырь. По данным 2026 года, туманность простирается примерно на 30 световых лет.

· NGC 3199 — ещё один характерный пример.

· WR 104 и Apep — системы со спиральными оболочками, образованными взаимодействием двух стареющих звёзд Вольфа — Райе.

Туманности вокруг звёзд спектрального класса O

Туманности, окружающие самые горячие и яркие звёзды спектрального класса O (включая подкласс Of), очень близки по своей природе к туманностям Вольфа — Райе, однако имеют и заметные отличия. Они образуются под действием мощного звёздного ветра этих звёзд, но обычно выглядят менее яркими, имеют бóльшие размеры и, по-видимому, существуют заметно дольше.



Кольцеобразная туманность, названная Sharpless 2—119 (туманность Ракушка). Хотя изначально предполагалось, что эта туманность образовалась из звездного ветра 68 Лебедя, теперь кажется, что туманность представляет собой просто сферу Стрёмгрена, которая иони-

зируется 68 Лебедя. Вместо этого звездный ветер, вероятно, из-за высокой скорости звезды в космосе образует ударную волну.[18]

Рождение массивной звезды O-типа в молекулярном облаке оказывает на него двойственное воздействие. С одной стороны, обильное ультрафиолетовое излучение ионизирует окружающий газ и отталкивает его, а мощный звёздный ветер со скоростью в тысячи километров в секунду выдувает вокруг звезды огромный пузырь. С другой стороны, эти же процессы могут сжимать соседние плотные области облака и запускать образование новых звёзд. Когда такая звезда в конце жизни взрывается как сверхновая, она высвобождает колоссальную энергию, окончательно рассеивая оставшийся молекулярный материал и оставляя после себя молодое рассеянное скопление.

Исследования 2025 года с помощью JWST и ALMA подтвердили, что механизмы индуцированного звездообразования под действием расширяющихся пузырей звёздного ветра играют заметную роль в протокластерах. По оценкам, от 14% до 25% молодых звёзд в некоторых активных областях формируются именно благодаря такому «вынужденному» сжатию газа.

Конкретный пример — туманность Sharpless 2—119 (S 119, «Ракушка») Одним из хорошо изученных примеров служит кольцеобразная туманность Sharpless 2—119 вокруг звезды 68 Лебедя. Комплексные наблюдения — спектральные в диапазоне 6000—7000 Å, интерферометрические в линиях Hα и [N II], а также радиоастрономические на частоте 102 МГц — показали, что это диффузная оболочка неправильной формы с характерным радиусом около 17 парсек. Средняя электронная плотность в наиболее ярких областях не превышает 45 $см^{-3}$, общая масса оболочки оценивается в 100—500 масс Солнца, а скорость расширения — менее 15 км/с.

Ионизация вещества туманности обеспечивается излучением центральной звезды. Морфология оболочки сформировалась под воздействием её звёздного ветра. Хотя первоначально предполагалось, что туманность возникла исключительно за счёт ветра, современные данные указывают, что это, скорее, сфера Стрёмгрена, ионизируемая 68 Лебедя, а звёздный ветер создаёт дополнительную ударную волну, особенно заметную благодаря высокой пространственной скорости самой звезды.

Таким образом, звёздный ветер массивных O-звёзд — это важный механизм, который не только формирует красивые и сложные туманности, но и активно участвует в динамике, перемешивании и химической эволюции межзвёздной среды, влияя на процессы звездообразования в целом.

Туманности в областях звездообразования

Ударные волны меньшей скорости возникают непосредственно в тех районах межзвёздной среды, где активно идёт процесс рождения звёзд. Они нагревают газ до сотен и тысяч кельвинов, возбуждают молекулярные уровни, частично разрушают молекулы и разогревают пыль. Такие области проявляются в виде вытянутых, часто волокнистых туманностей, которые особенно ярко светятся в инфракрасном диапазоне. Характерные примеры можно увидеть в очаге звездообразования, связанном с Туманностью Ориона.

[18] Туманность Ракушка (Sharpless 2—119, S 119) — крупная эмиссионная туманность в созвездии Лебедя. Изображение получено в рамках Digitized Sky Survey (Credit: Roberto Mura / Digitized Sky Survey, лицензия CC BY-SA 4.0)



IC 2944 (Бегущий цыплёнок, Туманность λ Центавра) — эмиссионная туманность с рассеянным скоплением в созвездии Центавра, наблюдаемая рядом с λ Центавра. Название туманности (Running Chicken Nebula) дано за характерную форму, напоминающую бегущую птицу с расправленными крыльями. Содержит множество глобул Бока, что обычно является признаком места активного звёздообразования, однако никаких свидетельств данного процесса ни у одной из глобул IC 2944 на данный момент не обнаружено. Глобулы IC 2944 открыты в 1950 году южноафриканским астрономом Дейвидом Э. Тэкери и в настоящее время известны, как глобулы Тэкери (в отечественной литературе распространено ошибочное именование «глобулы Теккерея»).По данным 2023 года, изображение IC 2944 с разрешением 1,5 миллиарда пикселей от ESO подтверждает отсутствие активного звездообразования в глобулах, несмотря на их потенциал.[19]

Звездообразование — это один из самых масштабных и важных процессов в жизни любой галактики. Именно он определяет её структуру, светимость, цвет, спектральные особенности, а также химический состав звёзд и газа.

В 2025 году открытие огромного молекулярного облака Eos недалеко от Солнечной системы позволило напрямую наблюдать, как межзвёздная среда служит сырьём для рождения звёзд, и точно измерять процессы формирования и диссоциации молекулярных облаков.

[19] Туманность Бегущий Цыпленок (Running Chicken Nebula, ESO 2320a) — классический пример области звездообразования, где мощное излучение и звёздные ветры формируют причудливые структуры газа и пыли (Credit: ESO / VPHAS+ team, лицензия CC BY 4.0)

Признаком активного звездообразования служит присутствие массивных горячих звёзд, которые живут относительно недолго. С ними тесно связаны области H II, молодые звёздные скопления и ассоциации, а также сверхновые типов Ib, Ic и II. Если галактика находится слишком далеко и отдельные объекты невозможно различить, о звездообразовании можно судить по косвенным признакам — например, по мощному излучению в эмиссионных линиях, особенно в H-альфа.

Звездообразование происходит преимущественно в гигантских молекулярных облаках, где плотность вещества заметно выше, чем в окружающем пространстве. При достаточной массе такое облако начинает сжиматься, фрагментироваться, и в нём формируются новые звёзды. В каждый момент времени в звездообразовании участвует лишь малая доля межзвёздного газа, и процесс почти всегда сосредоточен в галактических дисках, в областях размером от десятков до нескольких сотен парсек.

В 2023 году телескоп ESO получил изображение туманности IC 2944 («Бегущий цыплёнок») с разрешением 1,5 миллиарда пикселей. Несмотря на наличие большого количества глобул Бока — потенциальных мест звездообразования, — активного формирования звёзд в них на данный момент не обнаружено.

Сам процесс звездообразования в такой области обычно длится не более нескольких десятков миллионов лет. После этого большая часть газа покидает звёздный комплекс, самые яркие звёзды завершают свою эволюцию, неустойчивые системы распадаются, а оставшиеся звёзды постепенно распределяются среди общего звёздного населения галактики.

Активность звездообразования в галактиках количественно описывается темпом звездообразования (SFR) — общей массой звёзд, формирующихся в галактике за единицу времени. В спиральных галактиках SFR обычно составляет от 1 до 10 масс Солнца в год, в эллиптических и линзовидных — значительно ниже 1 M⊙/год (за редкими исключениями). В нашей Галактике темп звездообразования оценивается примерно в 2 $M_\odot$/год.

Ещё одной важной характеристикой является начальная функция масс — распределение вновь рождающихся звёзд по их массам. Чем меньше масса звезды, тем больше таких звёзд формируется. Для звёзд тяжелее 1 $M_\odot$ функция имеет степенной вид, а для менее массивных звёзд количество растёт с уменьшением массы и достигает максимума в диапазоне 0,1—1 $M_\odot$.

Таким образом, туманности в областях звездообразования — это не просто красивые космические облака, а динамичные зоны, где ударные волны, излучение массивных звёзд и гравитационное сжатие молекулярных облаков совместно создают условия для рождения новых поколений звёзд и поддерживают непрерывный цикл химической и структурной эволюции Галактики.

Солнце и межзвёздная среда

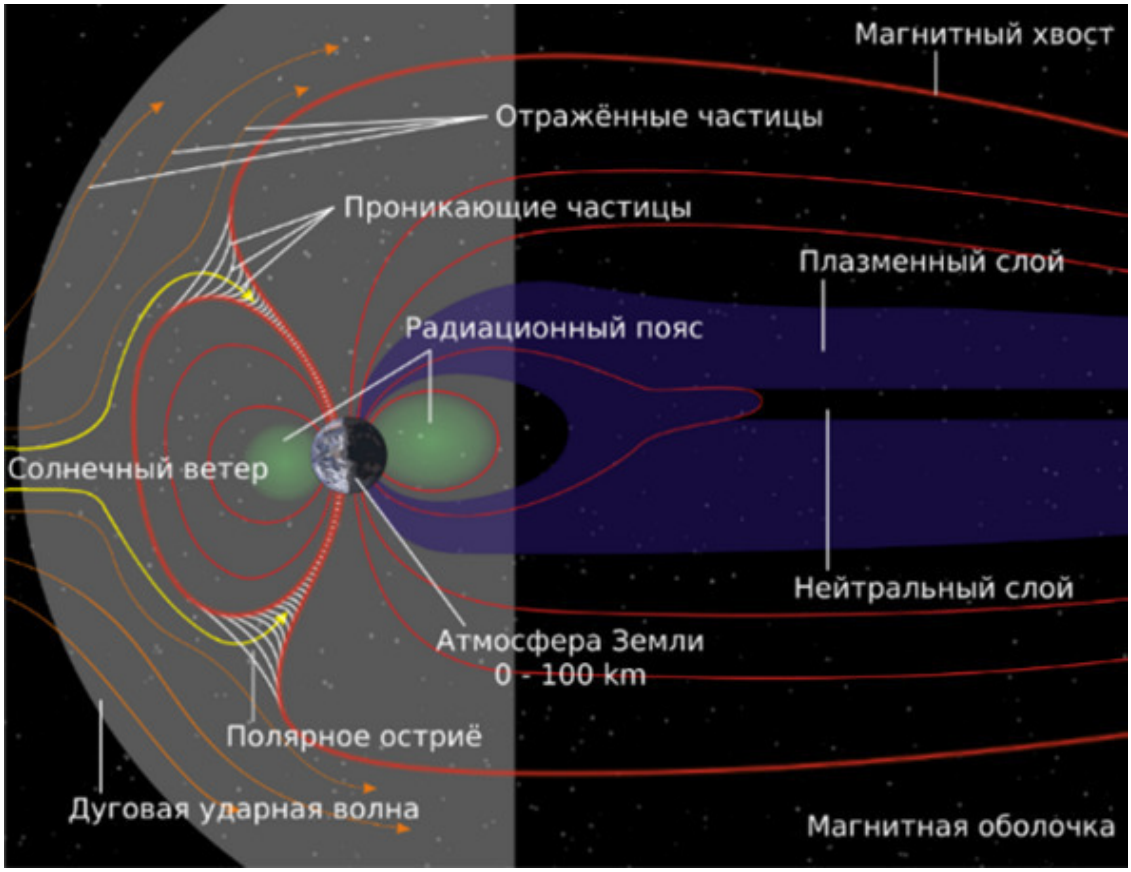
Окрестности Солнечной системы представляют собой сложную и неоднородную область межзвёздной среды. Наша звёздная система движется сквозь неё со скоростью около 25 км/с относительно Местного межзвёздного облака и, по современным оценкам, должна покинуть его границы в ближайшие 10 000 лет.

Миссия IMAP, запущенная в 2025 году и вступившая в основную научную фазу в феврале 2026 года, уже начала поставлять новые данные о взаимодействии гелиосферы с локальной галактической средой, включая потоки высокоэнергетических частиц и магнитные поля. Это значительно уточнило существующие модели неоднородности межзвёздной среды.

Главным фактором этого взаимодействия выступает солнечный ветер — непрерывный поток ионизированной плазмы, в основном состоящий из протонов и электронов с небольшой примесью ядер гелия. Он истекает из солнечной короны со скоростями от 300 до 1200 км/с. Хотя эта скорость составляет всего 0,1—0,4% от скорости света, она значительно превышает скорость звука в межзвёздной среде, делая солнечный ветер сверхзвуковым.

При столкновении солнечного ветра с межзвёздной средой формируется сложная структура — гелиосфера. Она включает несколько характерных областей: зону преобладания межзвёздного вещества, область доминирования солнечного ветра и переходную зону их взаимодействия. По данным Voyager 1 и 2, подтверждённым миссией IMAP в 2026 году, гелиопауза расположена примерно на расстоянии 120 а.е. от Солнца, а влияние гелиосферы прослеживается до 300—400 а.е. в различных направлениях.

Важным открытием стало то, что межзвёздная среда не полностью ионизована. Наблюдения в линии Лайман-альфа показали, что нейтральные атомы водорода проникают глубоко внутрь Солнечной системы, что существенно влияет на характер взаимодействия.



Солнечный ветер и магнитосфера Земли[20]

Солнечный ветер играет фундаментальную роль в формировании межпланетной среды и является причиной многих геофизических явлений на Земле, включая магнитные бури и полярные сияния. В более широком смысле его можно рассматривать как частный случай звёздного ветра, характерного для многих звёзд.

Важно чётко различать солнечный ветер (поток заряженных частиц, достигающий Земли за 2—3 суток) и солнечный свет (электромагнитное излучение, доходящее до нас за 8 минут 17 секунд). Несмотря на общий источник, это принципиально разные явления по своей природе и воздействию.

Краткая история открытия

Идея существования постоянного потока частиц от Солнца впервые появилась в XIX веке. После наблюдения мощной солнечной вспышки в 1859 году Ричард Кэррингтон и Ричард

[20] Схема строения магнитосферы Земли: основные компоненты — магнитопа́уза, хвост магнитосферы, радиационные пояса Ван-Аллена, плазменный слой и полярные каспы (Credit: Medium69 / William Crochot, лицензия CC BY-SA 3.0)

Ходжсон отметили последовавшую геомагнитную бурю и предположили связь между этими событиями. В 1919 году Фредерик Линдеманн высказал мысль, что от Солнца к Земле приходят как положительно, так и отрицательно заряженные частицы.

В 1930-е годы было установлено, что температура солнечной короны достигает миллиона кельвинов. В середине 1950-х годов Сидни Чепмен и Людвиг Бирманн независимо развили идеи, объясняющие существование постоянного потока частиц. Бирманн обратил внимание нато, что хвосты комет всегда направлены от Солнца, независимо от направления их движения, и объяснил это давлением солнечного ветра.

Прямые измерения солнечного ветра были проведены в 1960-е годы советскими и американскими космическими аппаратами, окончательно подтвердив существование этого явления.

Данные IMAP 2026 года позволили получить наиболее полную картину взаимодействия нашей гелиосферы с межзвёздной средой и уточнить модели, которые раньше опирались только на данные Voyager.

Таким образом, солнечный ветер — это не просто поток частиц, а активный участник жизни Солнечной системы, который формирует её защитную «оболочку» и влияет на условия вблизи Земли.

В 1958 году американский астрофизик Юджин Паркер совершил настоящий прорыв, объединив два на первый взгляд независимых явления: модель горячего истечения из солнечной короны, предложенную Сидни Чепменом, и гипотезу Людвига Бирманна о потоке частиц, объяснявшую поведение кометных хвостов. Паркер математически показал, что солнечная корона, несмотря на сильное гравитационное притяжение Солнца, благодаря очень высокой теплопроводности сохраняет высокую температуру на больших расстояниях. С ослаблением гравитации корональное вещество плавно переходит в сверхзвуковое истечение, подобное ускорению газа в сопле Лаваля.

Теория Паркера поначалу встретила серьёзное сопротивление. Когда статья была отправлена в *Astrophysical Journal*, два рецензента отвергли её. Только личное вмешательство главного редактора Субраманьяна Чандрасекара позволило работе увидеть свет.

Уже в январе 1959 года советская станция «Луна-1» под руководством Константина Грингауза впервые напрямую измерила параметры солнечного ветра. В 1962 году американская «Маринер-2» окончательно подтвердила существование этого явления.

Несмотря на экспериментальное доказательство, механизм ускорения солнечного ветра до наблюдаемых скоростей долго оставался загадкой. Значительный прогресс произошёл в 1971 году, когда Джеральд Ньюмен и Роджер Копп создали первые численные модели на основе уравнений магнитной гидродинамики. Наблюдения спутника SOHO в конце 1990-х показали, что переход к сверхзвуковым скоростям происходит гораздо ближе к Солнцу, чем предполагалось в первоначальной теории.

В 2025 году миссия Solar Orbiter установила, что мелкомасштабные плазменные джеты в корональных дырах являются основным источником как быстрого, так и медленного солнечного ветра. А в 2026 году Parker Solar Probe обнаружил так называемый «U-поворот» — явление, при котором часть магнитного материала возвращается обратно к Солнцу, существенно меняя картину солнечной атмосферы.

Свойства солнечного ветра

Из-за солнечного ветра Солнце ежесекундно теряет около миллиона тонн вещества. Он состоит в основном из протонов, электронов и ядер гелия (альфа-частиц); ядра других элементов присутствуют в очень малых количествах.

Интенсивность и свойства солнечного ветра сильно зависят от уровня солнечной активности. Многолетние наблюдения показали, что он делится на два основных типа:

· Медленный солнечный ветер (скорость 300—500 км/с) — более плотный, связан с экваториальными областями.

· Быстрый солнечный ветер (скорость 500—800 км/с) — менее плотный, исходит из корональных дыр.

Между ними находится гелиосферный токовый слой — граница, разделяющая области магнитных полей разной полярности.

Параметры солнечного ветра (средние значения по наблюдениям на орбите Земли)

Параметр	Средняя величина	Медленный солнечный ветер	Быстрый солнечный ветер
Плотность n, см$^{-3}$	5,6	7,3–11,9	3,2–3,9
Скорость V, км/с	413	327–408	594–702
Поток протонов nV, см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$	$2{,}3 \times 10^8$	$3{,}0–3{,}9 \times 10^8$	$1{,}9–2{,}7 \times 10^8$
Температура протонов T_p, К	$1{,}17 \times 10^5$	$6{,}3–7{,}0 \times 10^4$	$1{,}4–2{,}3 \times 10^5$
Температура электронов T_e, К	$1{,}49 \times 10^5$	$1{,}2–1{,}3 \times 10^5$	$1{,}0–1{,}2 \times 10^5$
Отношение T_e / T_p	1,3	1,9–4,4	0,45–0,9
Магнитное поле B, нТ	5,1	6,3	5,1
Скорость Альфвена v_A, км/с	47	40–50	50–70
Плазменная бета β_p	1,1	1,1–1,6	0,8–1,1
Отношение He/p, %	4,0	3,0–4,0	4,5–5,0

В январе 2026 года была зарегистрирована одна из сильнейших за последние 28 лет геомагнитных бурь с Bt до 91 нТ, Bz до —58 нТ и скоростью ветра 1178 км/с, что ещё раз подчеркнуло высокую изменчивость солнечного ветра.

Солнечный ветер — это не просто поток частиц, а активный участник жизни Солнечной системы. Он формирует защитную гелиосферу, определяет условия космической погоды и влияет на геофизические процессы на Земле. В более широком смысле его можно рассматривать как частный случай звёздного ветра, характерного для многих звёзд нашей Галактики.

Медленный и быстрый солнечный ветер

Медленный солнечный ветер рождается в относительно спокойных областях солнечной короны — так называемых корональных потоках. При температуре короны около 2 миллионов кельвинов она не может оставаться в гидростатическом равновесии и начинает расширяться, постепенно разгоняясь до сверхзвуковых скоростей.

По данным Parker Solar Probe 2026 года, дополнительный нагрев короны и переход к сверхзвуковым скоростям существенно усиливаются мелкомасштабными плазменными джетами в корональных дырах.

Быстрый солнечный ветер, напротив, формируется в корональных дырах — более холодных (около 800 000 К) и менее плотных областях короны с открытой конфигурацией магнит-

ного поля. Эти потоки устойчивы и наблюдаются с периодичностью в 27 суток, соответствующей периоду вращения Солнца.

Миссия IMAP 2026 года подтвердила, что корональные дыры особенно активны в минимумах солнечной активности и дают быстрый ветер со скоростью до 800 км/с в полярных регионах.

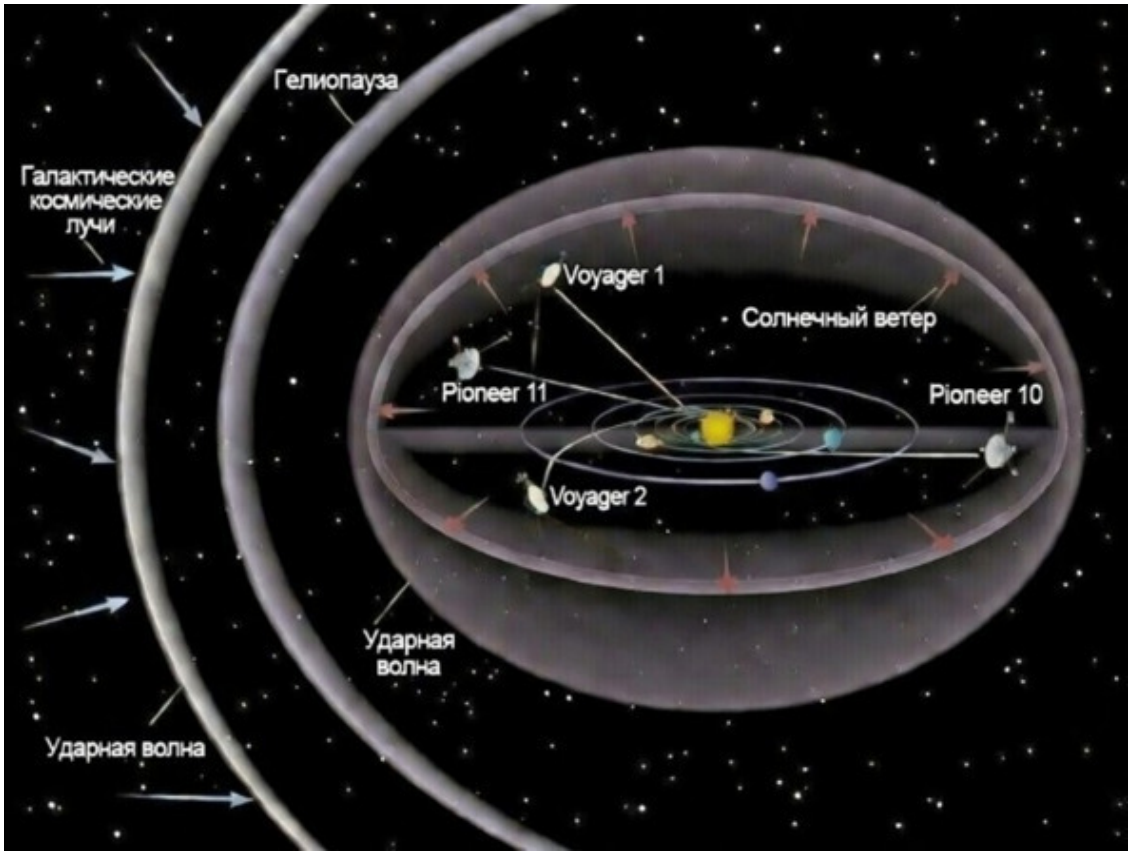
Возмущённые потоки

Особый интерес представляют возмущённые потоки солнечного ветра. Они включают межпланетные проявления корональных выбросов массы (КВМ) и области сжатия, возникающие перед быстрыми потоками или КВМ. Примерно в половине случаев перед такими областями формируется межпланетная ударная волна. Именно в возмущённых потоках межпланетное магнитное поле часто приобретает значительную южную компоненту, что приводит к сильным геомагнитным бурям и другим проявлениям космической погоды.

В январе 2026 года была зарегистрирована одна из наиболее мощных бурь за последние 28 лет с Bt до 91 нТ, Bz до —58 нТ и скоростью ветра 1178 км/с.

Статистически быстрые и медленные потоки занимают около 53% времени наблюдений, гелиосферный токовый слой — 6%, корональные выбросы массы — 22%, области сжатия — около 19%. Соотношение между типами потоков заметно меняется в течение 11-летнего солнечного цикла.

Гелиосфера



Компоненты гелиосферы[21]

[21] Схема гелиосферы Солнца — огромного защитного «пузыря», создаваемого солнечным ветром. Видны основные границы: ударная волна (termination shock), гелиопауза и область взаимодействия с межзвёздной средой (Credit: NASA / Ames Research Center, общественное достояние)

Солнечный ветер формирует гигантскую область пространства, называемую гелиосферой — «пузырь» плазмы, движущейся от Солнца со сверхзвуковой скоростью. Снаружи гелиосфера ограничена бесстолкновительной ударной волной, возникающей при взаимодействии с межзвёздной плазмой и магнитным полем.

Данные миссии IMAP 2026 года уточняют, что гелиопауза находится на расстоянии около 120—150 а.е., а форма гелиосферы асимметрична из-за влияния галактического магнитного поля.

Гелиосфера выступает естественным щитом, защищающим Солнечную систему от межзвёздного газа и существенно ослабляющим галактические космические лучи. Локальные усиления межпланетного магнитного поля вызывают кратковременные спады интенсивности космических лучей (эффект Форбуша), а длительные ослабления поля, напротив, приводят к их усилению.

За миллионы лет форма и размер гелиосферы неоднократно менялись под влиянием близких сверхновых и прохождения через межзвёздные облака разной плотности. Есть основания полагать, что около 3 миллионов лет назад гелиосфера была сильно сжата, что могло повлиять на космическую радиацию, достигавшую Земли, и, возможно, на климат и эволюцию жизни.

Таким образом, солнечный ветер — это не просто поток частиц, а активный участник жизни Солнечной системы. Он формирует её защитную «оболочку», определяет условия космической погоды и играет ключевую роль в взаимодействии нашего светила с межзвёздной средой.

Понятие «гелиосфера» представляет собой частный случай более общего явления — астросферы (звёздной сферы), и в настоящее время остаётся единственным таким объектом, который мы можем изучать изнутри. Иногда в научной литературе её называют пузырем звёздного ветра.

Гелиосфера — это гигантская полость в межзвёздной среде, которую непрерывно «выдувает» поток солнечной плазмы, известный как солнечный ветер. Она простирается далеко за орбиты внешних планет и заканчивается там, где давление солнечного ветра уравновешивается давлением окружающего межзвёздного газа и магнитного поля Галактики.

Гелиосфера выполняет важнейшую защитную функцию: она экранирует Солнечную систему от большей части галактических космических лучей, хотя остаётся полностью прозрачной для нейтральных гамма-квантов. Термин был введён в научный оборот в 1967 году Александром Дж. Десслером. Комплексное изучение гелиосферы и связанных с ней процессов космической погоды составляет отдельную научную дисциплину — гелиофизику.

Границы гелиосферы были впервые непосредственно исследованы космическими аппаратами «Вояджер». «Вояджер-1» пересёк гелиопаузу — внешнюю границу, где солнечная плазма уступает место межзвёздной, — 25 августа 2012 года. «Вояджер-2» сделал это позже, 5 ноября 2018 года. Оба аппарата зафиксировали резкое (примерно в 40 раз) увеличение плотности плазмы и переход к преобладанию межзвёздного вещества.

По состоянию на март 2026 года «Вояджер-1» находится на расстоянии около 170 а.е., а «Вояджер-2» — около 140 а.е. от Солнца. Оба аппарата продолжают передавать уникальные данные о космических лучах и магнитных полях. Ожидается, что сигнал от них будет идти уже более 24 часов (1 световые сутки) уже в ноябре 2026 года.

Данные миссии IMAP 2026 года существенно уточнили форму и размеры гелиосферы. Гелиопауза расположена примерно на расстоянии 120—150 а.е., причём её форма заметно асимметрична из-за давления локального галактического магнитного поля. Вращение Солнца с периодом около 27 суток придаёт межпланетному магнитному полю характерную спиральную структуру, известную как спираль Паркера.

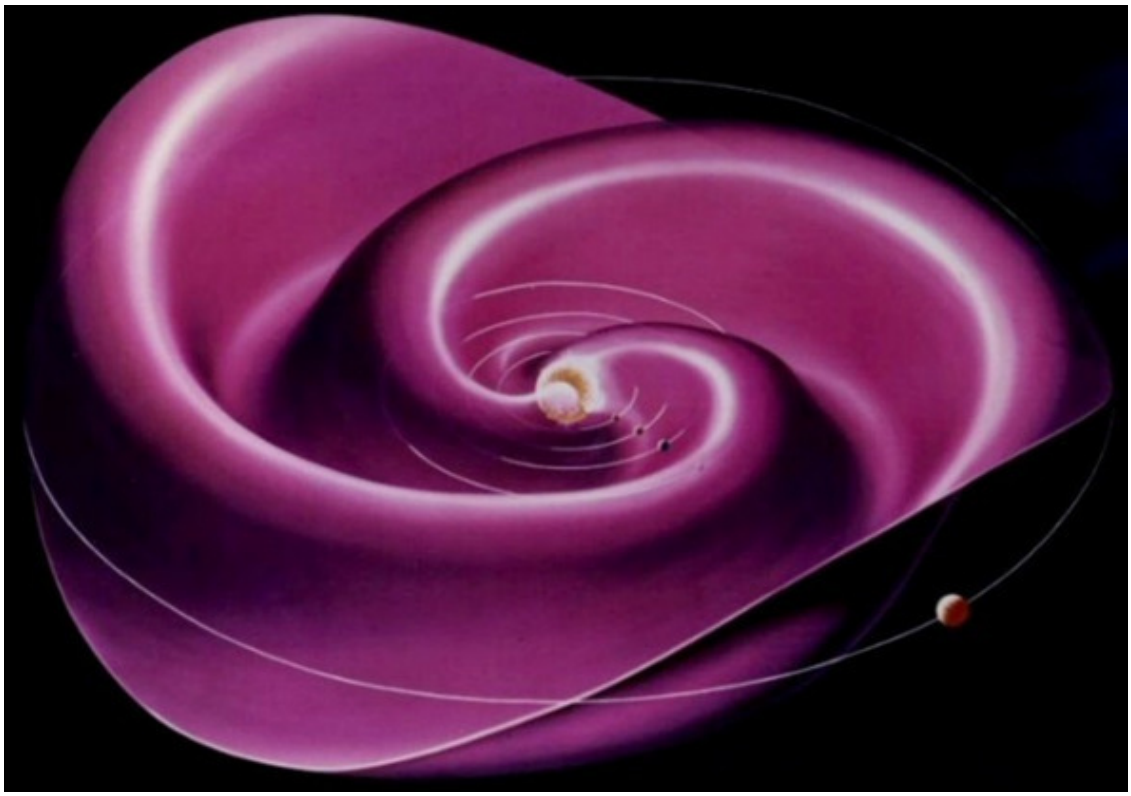
Влияние гелиосферы

Гелиосфера — это динамичный «пузырь», который за миллионы лет неоднократно менял свои размеры и форму под влиянием близких сверхновых и прохождения через межзвёздные облака разной плотности. Есть основания полагать, что около трёх миллионов лет назад гелиосфера была сильно сжата, что могло привести к повышенному потоку космических лучей на Землю и повлиять на климат и эволюцию жизни.

Сегодня гелиосфера продолжает надёжно защищать нашу планетную систему, ослабляя галактические космические лучи и создавая условия для стабильного существования жизни на Земле.

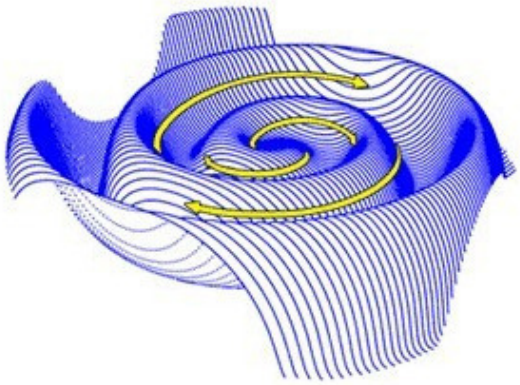
Гелиосферный токовый слой и спираль Паркера

Гелиосферный токовый слой — это огромная поверхность внутри Солнечной системы, при пересечении которой меняется направление (полярность) межпланетного магнитного поля. Он простирается почти точно в плоскости солнечного экватора и доходит до самых дальних границ гелиосферы.



Гелиосферный токовый слой[22]

[22] Гелиосферный токовый слой (Heliospheric Current Sheet) — гигантская «юбка балерины», образуемая магнитным полем Солнца. Этот слой разделяет области противоположной полярности магнитного поля в гелиосфере и простирается далеко за орбиту Плутона (Credit: Werner Heil / NASA, общественное достояние)



Спираль Паркера[23]

Форма токового слоя полностью определяется вращением Солнца. Магнитное поле нашей звезды, «вмороженное» в солнечный ветер, закручивается в характерную спираль, получившую название **спирали Паркера** (по имени Юджина Паркера). Токовый слой разделяет области магнитного поля противоположной полярности, придавая всей структуре вид многослойной волнистой «юбки балерины». Эту сложную геометрию иногда называют «эффектом садового шланга»: если вращать шланг вокруг своей оси и одновременно качать его вверх-вниз, струя воды опишет именно такую поверхность.

Толщина токового слоя составляет около 10 000 км. В нём течёт очень слабый электрический ток плотностью примерно 10^{-10} А/м^2. Этот ток является частью большого гелиосферного токового контура, который замыкается на гелиопаузе. Общая сила тока в системе достигает 3×10^9 А — это в тысячу раз мощнее токов, вызывающих полярные сияния на Земле.

Гелиосферный токовый слой вращается вместе с Солнцем с периодом около 27 суток. За это время Земля, вместе со своей магнитосферой, проходит через «горбы» и «впадины» токового слоя, взаимодействуя с ним. Магнитная индукция на поверхности Солнца составляет примерно 10^{-4} Тл. Если бы магнитное поле имело простую дипольную форму, его сила в районе орбиты Земли уменьшилась бы до 10^{-11} Тл. Благодаря существованию токового слоя реальное значение вблизи Земли в сто раз выше.

В соответствии с законами электродинамики, электрический ток в токовом слое течёт перпендикулярно магнитному полю: вблизи Солнца — почти по окружности, а на больших расстояниях — почти радиально. Замыкает «электрическую цепь» ток, идущий от солнечных полюсов к экватору вдоль гелиопаузы.

Таким образом, гелиосферный токовый слой — это не просто граница, а динамичная структура, которая постоянно перестраивает межпланетное магнитное поле и во многом определяет условия космической погоды в окрестностях Земли.

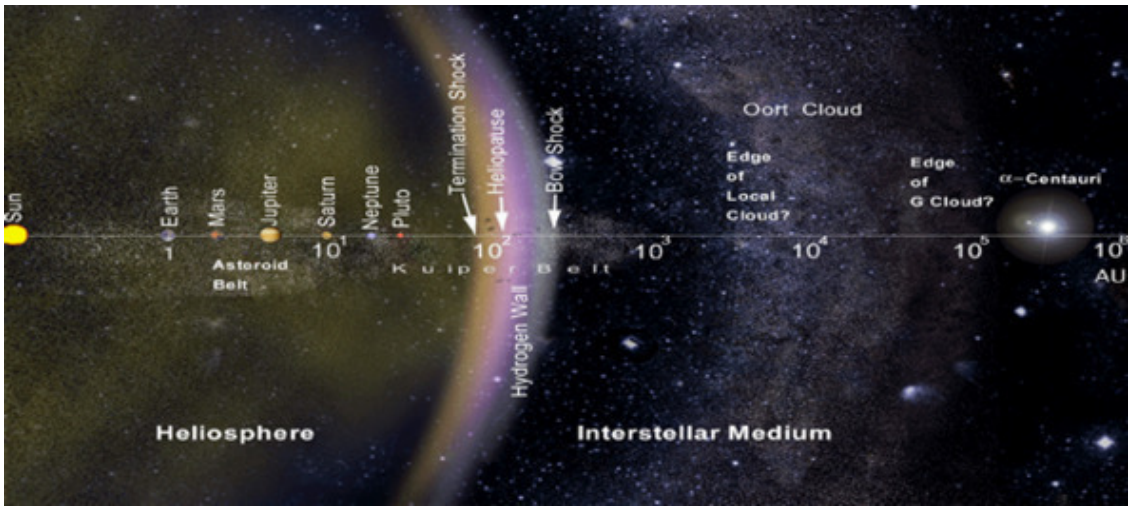
Солнечная система, гелиосфера, облако Оорта и Альфа Центавра, наложенные на логарифмическую шкалу

Потоки солнечного ветра движутся во все стороны от Солнца, вблизи Земли имея скорости в несколько сотен километров в секунду. На определённом расстоянии от Солнца, далеко за орбитой Нептуна, этот сверхзвуковой поток начинает снижать свою скорость.

Это торможение происходит в несколько этапов:

[23] Спираль Паркера — архимедова спираль, по которой распространяется солнечный ветер в гелиосфере. Магнитные силовые линии Солнца закручиваются из-за его вращения, образуя характерную структуру (Credit: NASA, общественное достояние)

Солнечный ветер имеет сверхзвуковую скорость внутри Солнечной системы. На так называемой границе ударной волны происходит падение скорости солнечного ветра до звуковых значений (относительно скорости самого Солнца). По мере удаления от Солнца сверхзвуковой поток солнечного ветра постепенно замедляется. Это происходит на так называемой границе ударной волны — поверхности, где скорость солнечного ветра падает до звуковой (относительно движения самого Солнца). За этой границей плазма уже не может двигаться со сверхзвуковой скоростью и начинает взаимодействовать с межзвёздной средой более «спокойно».

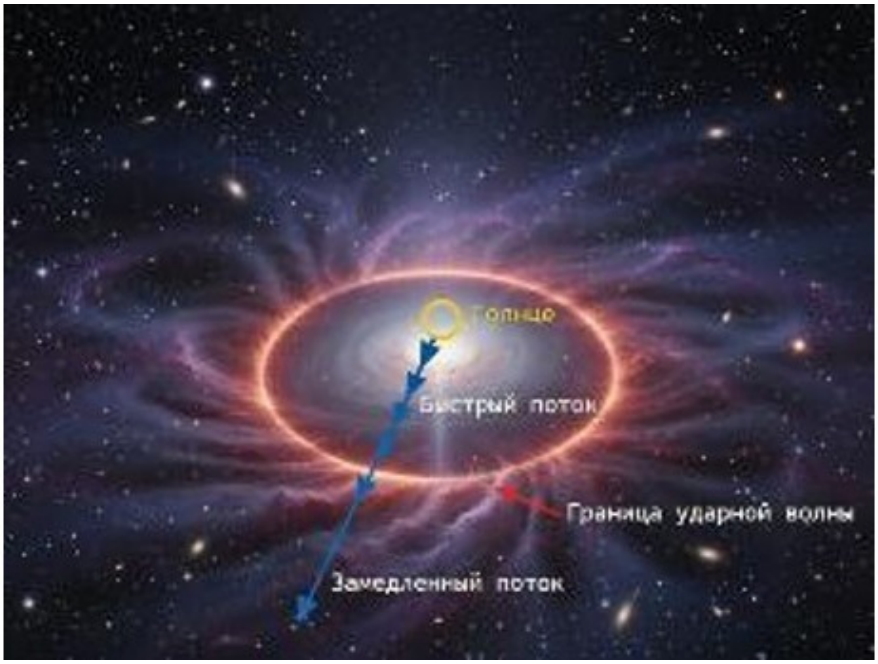


Heliosphere — Гелиосфера, Asteroid Belt — Пояс астероидов, Termination Shock — Граница ударной волны, Heliopause — Гелиопауз, Bow Shock — Головная ударная волна, Hydrogen Wall — Водородная стена, Interstellar Medium — Межзвёздная среда, Local Cloud — Местное облако, Oort Cloud — Облако Оорта, Edge of G Cloud — Край облака G, α-Centauri — α Центавра[24]

Граница ударной волны (Termination Shock)

Граница ударной волны находится на расстоянии примерно 75—90 астрономических единиц от Солнца. Именно здесь солнечный ветер «наталкивается» на межзвёздное вещество, создавая резкий переход. Хотя плотность межзвёздного газа чрезвычайно мала, его давление на больших расстояниях оказывается достаточным, чтобы затормозить поток.

[24] Логарифмическая карта гелиосферы и ближайшего галактического окружения Солнца На схеме показаны размеры гелиосферы (~120 а.е.), пояс Койпера, облако Оорта, локальное межзвёздное облако и ближайшие звёзды вплоть до Альфы Центавра (масштаб от 1 до 1 000 000 а.е.) (Credit: NASA / JPL, общественное достояние)



Граница ударной волны

По уточнённым данным миссии Parker Solar Probe и IMAP 2026 года, граница ударной волны не является идеально сферической. Она имеет заметную асимметрию: северная часть гелиосферы простирается дальше южной. Кроме того, изменения магнитного поля на границе связаны с так называемыми «U-поворотами» солнечного ветра, которые существенно влияют на структуру переходной зоны.

Первые прямые измерения этого рубежа были сделаны космическими аппаратами «Вояджер». «Вояджер-1» пересёк границу ударной волны в декабре 2004 года на расстоянии около 94 а.е. «Вояджер-2» зафиксировал аналогичное событие в 2007 году на расстоянии примерно 76 а.е., причём аппарат пересекал границу несколько раз из-за её колебаний, связанных с изменениями солнечной активности. Простейшую аналогию происходящему можно увидеть, наблюдая за струёй воды в раковине. Когда вода ударяется о дно, она сначала растекается во все стороны со сверхзвуковой (для воды) скоростью, образуя тонкий диск. На определённом расстоянии от центра появляется заметный «водяной вал» — это и есть аналог границы ударной волны, за которым скорость течения резко падает.

Граница ударной волны — лишь одна из трёх важнейших рубежей гелиосферы. За ней следует гелиопауза — поверхность, где давление солнечного ветра окончательно уравновешивается давлением межзвёздной среды. Ещё дальше расположена головная ударная волна, где уже межзвёздный поток тормозится, набегая на гелиосферу.

Эти сложные переходные зоны делают гелиосферу динамичной и асимметричной структурой, постоянно меняющейся под влиянием солнечной активности и локальных особенностей межзвёздной среды. Именно здесь происходит основное взаимодействие нашей звёздной системы с Галактикой.

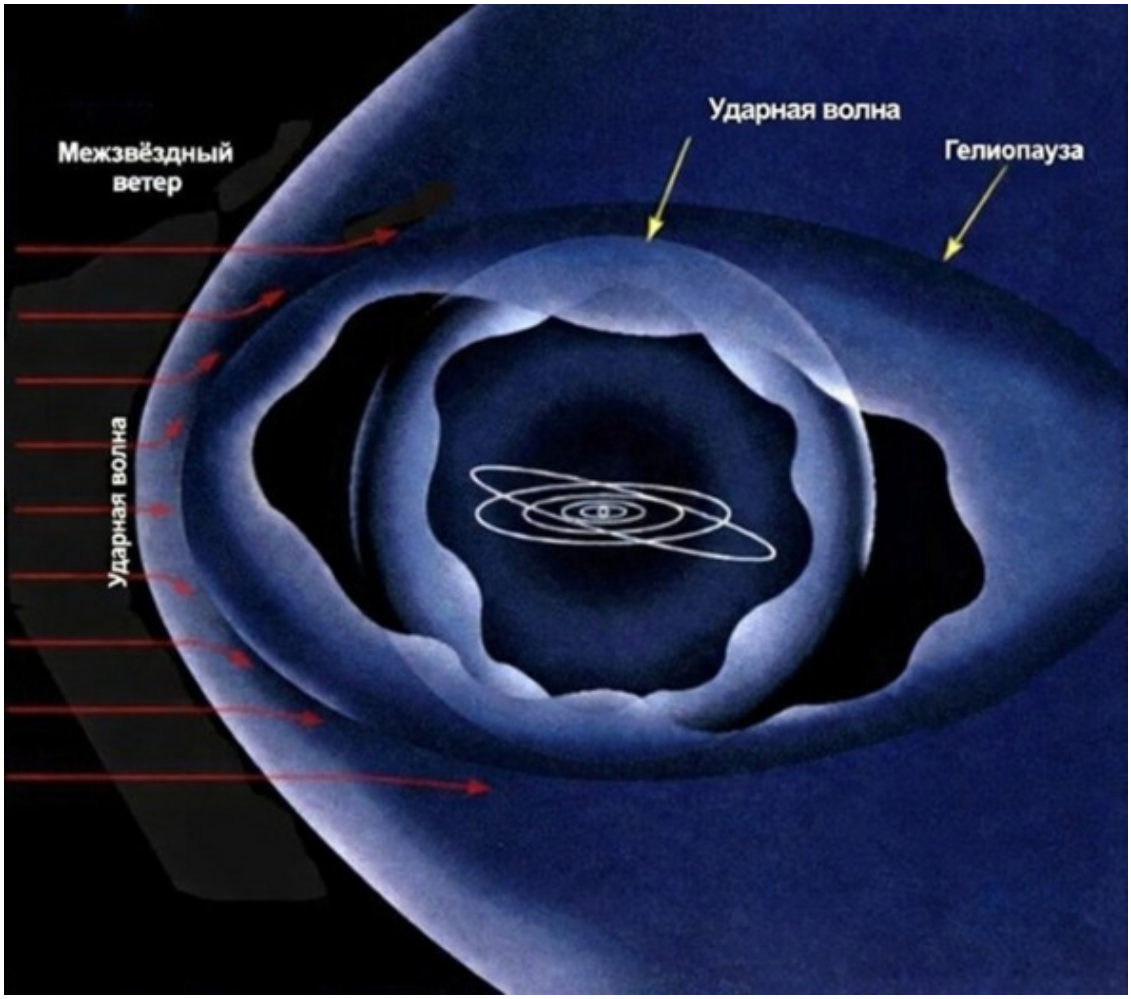


Диаграмма, изображающая положение «Вояджера-1» в гелиосферной мантии. В настоящее время «Вояджер-2» также находится в мантии.[25]

За границей ударной волны начинается гелиосферная мантия — обширная переходная область гелиосферы, где солнечный ветер уже потерял сверхзвуковую скорость. Здесь поток тормозится, сжимается и приобретает турбулентный, хаотичный характер. Толщина мантии существенно различается: со стороны набегающего межзвёздного ветра она гораздо тоньше, чем с противоположной стороны, из-за чего вся структура гелиосферы напоминает вытянутую кометную кому, направленную против движения Солнца по Галактике. Гелиосферная мантия простирается от 80—100 а.е. и далее. Именно в этой зоне происходит основное перемешивание солнечной плазмы с межзвёздным веществом. Данные миссии IMAP 2026 года подтверждают асимметрию мантии и уточняют, что её внешняя граница находится на расстоянии 119—121 а.е. от Солнца.

Гелиопауза — это окончательная граница гелиосферы, где давление солнечного ветра полностью уравновешивается давлением межзвёздной среды. Здесь солнечная плазма окончательно сдаёт позиции галактическому газу и магнитному полю. За гелиопаузой начинается подлинно межзвёздное пространство. Между головной ударной волной и гелиопаузой, по одной из гипотез, существует так называемая водородная стена — область сжатого и нагретого межзвёздного водорода. Когда частицы солнечного ветра сталкиваются с нейтральными атомами межзвёздного газа, они теряют скорость, а кинетическая энергия превращается в тепловую. В результате формируется слой горячего водорода, который можно рассматривать как «буфер» между гелиосферой и Галактикой.

[25] Схема траектории «Вояджера-1» при пересечении терминального удара в декабре 2004 года и входе в гелиооболочку — переходную область между гелиосферой и межзвёздным пространством (Credit: NASA, общественное достояние)



Гелиопауза — это граница между гелиосферой и межзвёздной средой. При приближении солнечного ветра к гелиопаузе скорость его резко уменьшается, приводя к формированию ударной волны.[26]

По данным IMAP 2026 года, гелиопауза имеет заметную асимметрию, а отсутствие «потоковых трубок» у «Вояджера-2» объясняется вариациями солнечной активности в момент пересечения границы.

Первые шаги в межзвёздное пространство

В 2012 году «Вояджер-1» стал первым рукотворным объектом, преодолевшим гелиопаузу. С января по июнь 2012 года приборы зафиксировали резкий рост интенсивности галактических космических лучей на 25% и одновременное падение потока частиц солнечного ветра. 25 августа 2012 года на расстоянии 121 а.е. от Солнца аппарат окончательно вышел за пределы гелиосферы. NASA официально подтвердило это событие в сентябре 2013 года.

5 ноября 2018 года аналогичный рубеж преодолел «Вояджер-2» на расстоянии 119 а. е. Оба аппарата продолжают работать и по сей день, передавая уникальные данные о свойствах межзвёздной среды.

Таким образом, гелиосферная мантия и гелиопауза — это не просто границы, а сложные переходные зоны, где происходит фундаментальное взаимодействие нашей звёздной системы с Галактикой. Именно здесь солнечный ветер окончательно сдаёт свои позиции межзвёздному пространству, завершая формирование защитного «пузыря» вокруг Солнечной системы.

[26] Схема гелиопаузы — границы гелиосферы Солнца, где солнечный ветер окончательно тормозится и смешивается с межзвёздной средой (Credit: NASA, общественное достояние)

Гелиохвост и водородная стена

За гелиопаузой солнечный ветер окончательно сдаёт позиции межзвёздной среде, но гелиосфера не обрывается резко. Она продолжает тянуться в направлении, противоположном движению Солнца по Галактике, образуя длинный гелиохвост — своеобразный «хвост» нашей звёздной системы длиной в тысячи астрономических единиц.

По форме гелиохвост напоминает четырёхлистный клевер: в центре сосредоточены быстрые частицы солнечного ветра, а по бокам — более медленные потоки. Эта структура возникает из-за того, что Солнце в течение длительного времени испускает быстрый ветер из полярных корональных дыр и медленный — из экваториальных областей. Вращение и взаимодействие с межзвёздной средой придают хвосту характерную «клеверную» конфигурацию.

Первые прямые наблюдения гелиохвоста были выполнены межзвёздным граничным исследователем IBEX. Данные 2026 года от миссии IMAP подтвердили, что хвост состоит из быстрых и медленных компонентов, а его форма объясняется несимметричным распределением солнечного ветра по широтам Солнца.

Частицы в гелиохвосте не излучают видимого света, поэтому обнаружить его удалось только по энергетическим нейтральным атомам, образующимся в результате обменных столкновений в пограничной зоне.

Между головной ударной волной и гелиопаузой, по современным представлениям, существует ещё одна интересная структура — водородная стена. Это область повышенной концентрации горячего нейтрального водорода, сжатого взаимодействием межзвёздного потока с гелиосферой. При столкновении частиц солнечного ветра с межзвёздными атомами водорода происходит обмен зарядами: кинетическая энергия превращается в тепловую, и образуется слой нагретого газа.

Долгосрочные наблюдения аппарата New Horizons в 2018 году, а также данные IMAP 2026 года подтвердили существование водородной стены и уточнили её параметры. Это открытие существенно дополнило картину, полученную ещё «Вояджерами» в 1992 году.

Таким образом, гелиосфера — это не просто сферический «пузырь», а сложная, вытянутая в направлении движения Солнца структура с ярко выраженным хвостом. Гелиохвост и водородная стена — это последние рубежи, где солнечный ветер окончательно растворяется в межзвёздной среде, завершая цикл взаимодействия нашей звёздной системы с Галактикой.



Головная ударная волна около половины светового года в поперечнике, образовавшаяся при столкновении звёздного ветра молодой звезды LL Ориона с потоком из туманности Ориона. Источник: Хаббл, 1995[27]

Головная ударная волна (bow shock) — это область повышенной плотности и давления, которая образуется при взаимодействии звёздного ветра с окружающей межзвёздной средой или при столкновении солнечного ветра с магнитосферой планеты. Её характерная дугообразная форма напоминает ударную волну, возникающую перед быстро летящим самолётом или космическим аппаратом.

У звёзд головная ударная волна формируется на внешней границе их астросферы, где быстрый звёздный ветер набегает на межзвёздный газ. У планет, обладающих магнитным полем, она возникает перед магнитопаузой: солнечный ветер резко тормозится, создавая чётко выраженный фронт. Самый изученный пример — головная ударная волна Земли, расположенная примерно в 90 000 км от нашей планеты. Толщина фронта здесь составляет около 17 км. Современные наблюдения и модели 2026 года показывают, что головная ударная волна Солнечной системы, если она существует, имеет сложную асимметричную форму и сильно зависит от локальной плотности межзвёздной среды и направления галактического магнитного поля.

Долгое время считалось, что при взаимодействии солнечного ветра с межзвёздной средой обязательно должна формироваться классическая головная ударная волна. Однако данные межзвёздного граничного исследователя IBEX, полученные в 2012 году, поставили эту уверен-

[27] Головная ударная волна (bow shock) вокруг звезды LL Ориона в туманности Ориона Мощный звёздный ветер молодой горячей звезды сталкивается с окружающим газом, создавая яркую дугообразную ударную волну, похожую на нос корабля, рассекающий воду. (Credit: NASA/ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA), общественное достояние)

ность под сомнение. Измерения показали, что скорость движения Солнечной системы сквозь межзвёздную среду составляет около 84 000 км/ч — заметно меньше ранее предполагавшихся значений. При такой относительно «мягкой» скорости взаимодействия классическая ударная волна может и не образовываться, что потребовало пересмотра существующих моделей строения внешних границ гелиосферы.

Теория формирования

Физическая природа головной ударной волны та же, что и у ударной волны, возникающей перед сверхзвуковым самолётом. На фронте волны происходят резкие скачки плотности, давления, температуры и степени ионизации газа. Толщина фронта определяется диссипативными процессами.

Ключевой критерий возникновения ударной волны — переход скорости потока от сверхзвуковой к дозвуковой. Скорость звука в плазме определяется формулой:

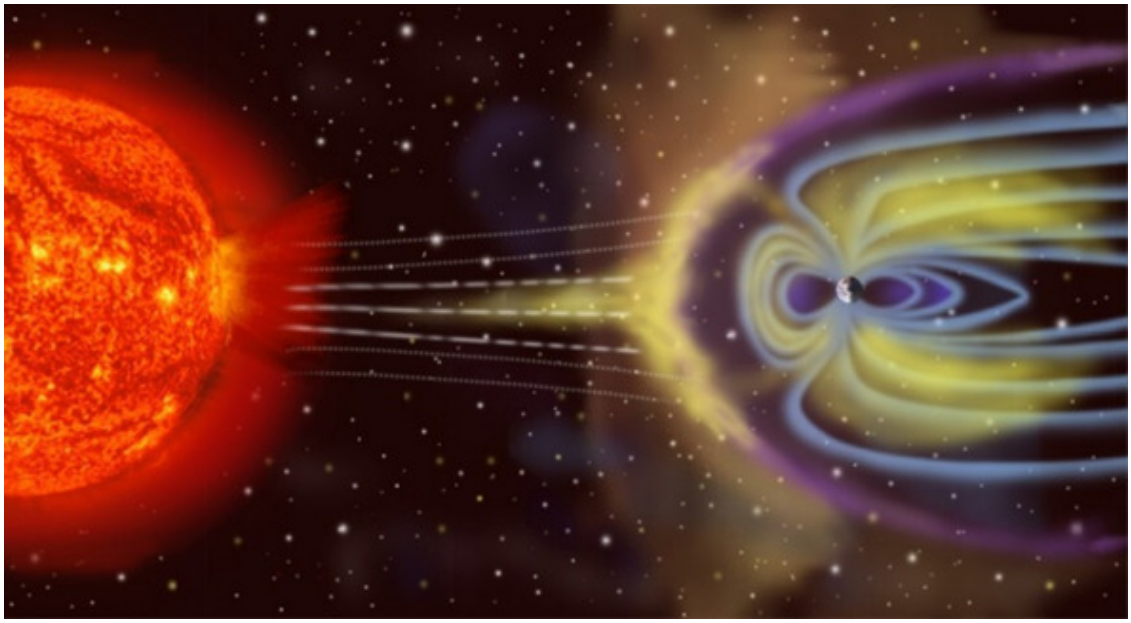
$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

где γ — показатель адиабаты, p — давление, ρ — плотность плазмы.

В межзвёздном пространстве такие волны часто наблюдаются в форме волокнистых туманностей. Увеличение температуры и плотности на фронте резко повышает излучательную способность газа, и энергия уносится излучением. Именно поэтому многие ударные волны в космосе видны как яркие волокнистые структуры в оптическом и инфракрасном диапазонах.

Головная ударная волна — это один из важнейших элементов взаимодействия звёзд с межзвёздной средой. Она определяет, насколько далеко простирается влияние каждой звезды и как происходит обмен веществом и энергией между звёздным ветром и галактической средой.

Самый изученный пример — головная ударная волна Земли. Частицы солнечного ветра, летящие со скоростью около 500 км/с, наталкиваются на земную магнитосферу. На границе образуется тонкий фронт плотной, горячей и сильно турбулентной плазмы толщиной около 17 километров, расположенный примерно в 90 000 км от нашей планеты. Именно здесь происходит аномально быстрая диссипация кинетической энергии солнечного ветра в тепловую.



Головная ударная волна появляется при столкновении магнитосферы Земли с солнечным ветром[28]

Подобные структуры характерны для всех планет, обладающих собственным магнитным полем. У звёзд они выглядят как яркие дугообразные фронты, хорошо видимые в оптическом и инфракрасном диапазонах (яркий пример — головная ударная волна вокруг звезды LL Ориона в туманности Ориона).

Исторические модели

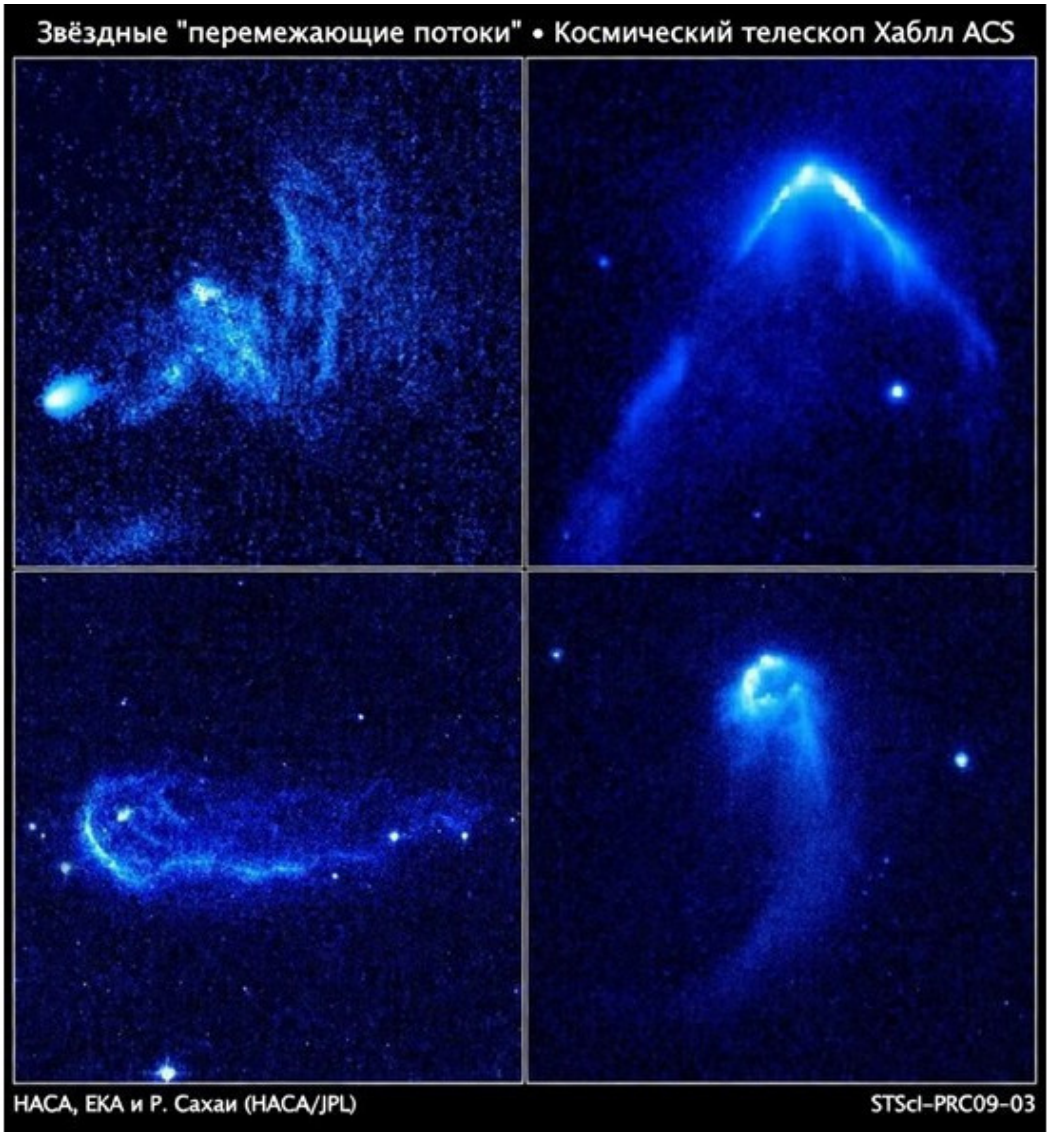
В 1961 году Юджин Паркер предложил первую теоретическую модель взаимодействия Солнечной системы с межзвёздной средой. Согласно его расчётам, дозвуковой поток межзвёздного газа обтекает гелиосферу, и взаимодействие описывается гидродинамическими уравнениями. Модель включала три зоны: сверхзвуковой солнечный ветер, дозвуковой солнечный ветер после прохождения гелиосферной ударной волны и поток межзвёздного газа, отделённый гелиопаузой. Классической головной ударной волны в этой модели не предполагалось.

В 1970 году советские учёные В. Б. Баранов, К. В. Краснобаев и А. Г. Куликовский предложили альтернативный подход. Они рассмотрели сверхзвуковое обтекание Солнечной системы межзвёздным газом, движущимся со скоростью около 20 км/с. При температуре межзвёздного газа ~10 000 К это соответствует числу Маха $M \approx 2$. В их модели появилась дополнительная структура — головная ударная волна, создающая область сжатого межзвёздного газа.

Долгое время считалось, что головная ударная волна вокруг Солнечной системы должна существовать. По оценкам NASA, она могла находиться на расстоянии около 230 а.е. от Солнца.

Однако наблюдения межзвёздного граничного исследователя IBEX в 2012 году и последующие уточнения миссии IMAP в 2026 году показали иную картину. Скорость движения Солнечной системы сквозь локальную межзвёздную среду составляет всего около 23 км/с — недостаточно для формирования классической головной ударной волны.

[28] Магнитосфера Земли во время геомагнитной бури На схеме показаны основные элементы: радиационные пояса Ван-Аллена, магнитопа́уза, полярные каспы и сжатый хвост магнитосферы под действием усиленного солнечного ветра. (Credit: NASA, общественное достояние)



Столпы Творения в Орлиной туманности (Eagle Nebula, M16) — классический пример области активного звездообразования, где мощные звёздные ветры и излучение молодых горячих звёзд выдувают газ и пыль, создавая причудливые колонны (Credit: NASA / ESA / Hubble Heritage Team (STScI/AURA), общественное достояние)

Данные IMAP 2026 года окончательно подтвердили отсутствие чётко выраженной головной ударной волны в текущих условиях. Относительная скорость взаимодействия слишком мала, а локальное межзвёздное магнитное поле и плотность среды делают обтекание гелиосферы «мягким».



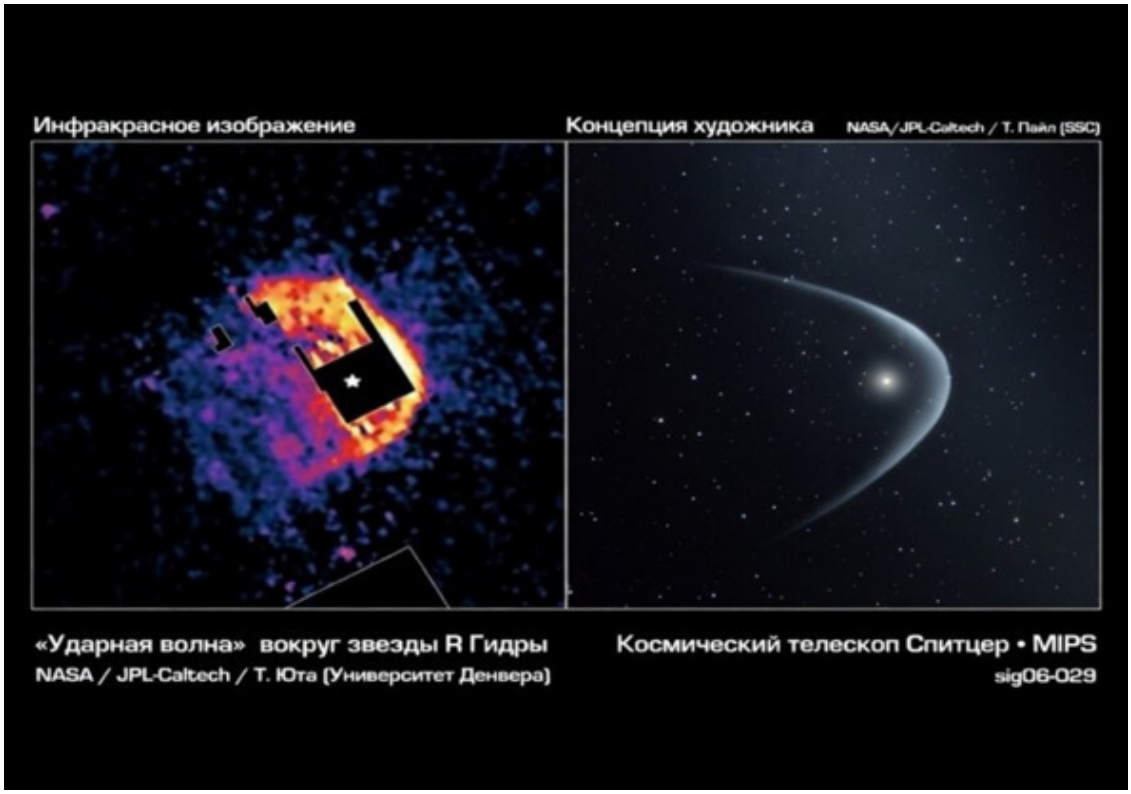
Объект Хербига — Аро HH 47, снимок телескопа Хаббл. Отрезок обозначает расстояние в 1000 астрономических единиц (примерно 20 диаметров Солнечной системы).[29]

[29] Объект Хербига—Аро HH 47 — мощная струя (джет) вещества, выбрасываемая из молодой звезды на ранней стадии формирования. Яркие узлы — это области ударных волн, возникающих при столкновении сверхзвуковой струи с окружающим межзвёздным газом (Credit: J. Morse (STScI) / NASA, общественное достояние)



Инфракрасное изображение головной ударной волны (жёлтая дуга), созданный звездой ζ Змееносца в межзвёздном облаке пыли и газа[30]

[30] Бегущая звезда ζ Змееносца (Zeta Ophiuchi) — массивная горячая звезда, несущаяся сквозь межзвёздную среду со сверхзвуковой скоростью. Впереди неё формируется яркая головная ударная волна (bow shock), видимая в инфракрасном диапазоне (Credit: NASA / JPL-Caltech, общественное достояние)



Снимок и художественное представление головной ударной волны, создаваемой звездой R Гидры.[31]

Головные ударные волны — типичное явление для объектов с мощным звёздным ветром или движущихся с высокой сверхзвуковой скоростью через плотную межзвёздную среду. В случае современной Солнечной системы их существование остаётся под вопросом, что существенно меняет наши представления о внешних границах гелиосферы и характере её взаимодействия с Галактикой.

Таким образом, головная ударная волна — это не обязательный элемент каждой звёздной системы, а результат конкретных условий скорости, плотности и магнитного поля окружающей среды.

Головные ударные волны вокруг быстродвижущихся звёзд

Головные ударные волны возникают не только у планет и Солнечной системы в целом, но и вокруг отдельных звёзд, движущихся с высокой скоростью сквозь межзвёздную среду. Когда звезда мчится через плотное газопылевое облако, её мощный звёздный ветер создаёт перед собой характерную дугообразную ударную волну — яркий фронт сжатого и нагретого вещества. Особенно эффектно такие волны проявляются у молодых звёзд в областях активного звездообразования. Классический пример — объекты Хербига — Аро. Каждый из них порождает яркие головные ударные волны, видимые в оптическом диапазоне. Они образуются, когда газовые потоки, выбрасываемые формирующейся звездой, с огромной скоростью (сотни километров в секунду) врезаются в окружающие облака газа и пыли.

Головные ударные волны часто сопровождают и самые яркие, мощные звёзды: гипергиганты (например, Эта Киля), яркие голубые переменные и звёзды Вольфа — Райе. Не менее интересны они у убегающих звёзд, которые несутся через межзвёздную среду со скоростями в десятки и сотни километров в секунду, а также у сверхскоростных звёзд, чья скорость дости-

[31] Красный гигант, пронизывающий межзвёздную среду с образованием головной ударной волны (Credit: NASA / JPL-Caltech, общественное достояние)

гает тысяч километров в секунду. В двойных системах головная ударная волна может возникать из-за взаимодействия звёздных ветров двух компонентов — яркий пример тому система BZ Жирафа.

Одним из самых впечатляющих примеров стала звезда ζ Змееносца. Она движется сквозь межзвёздное облако со скоростью 24 км/с, создавая перед собой чёткую дугообразную ударную волну. Инфракрасные наблюдения телескопа WISE, а позднее и JWST в 2026 году, позволили детально изучить эту структуру. Голубоватый оттенок звезды на искусственно раскрашенных снимках объясняется как её высокой температурой, так и тем, что пыль эффективнее рассеивает коротковолновое излучение. Снимок WISE охватывает область около 12 световых лет, демонстрируя масштаб явления. Данные JWST 2026 года дополнительно уточнили химический состав пыли в ударной волне.

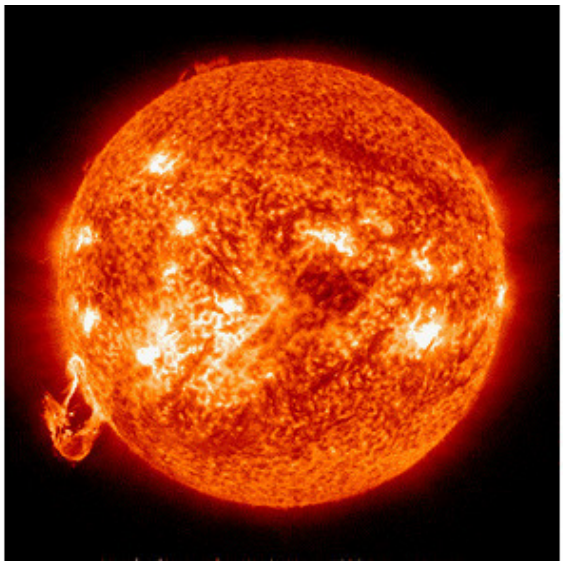
Ещё один красивый пример — головная ударная волна вокруг звезды R Гидры. В 2006 году она была впервые запечатлена в инфракрасном диапазоне, а современные наблюдения показали сложную структуру фронта.

В туманности Ориона, одном из самых активных районов звездообразования, головные ударные волны возникают повсеместно. Молодые звёзды высокой светимости выбрасывают мощные ветры и потоки, которые с огромной скоростью врезаются в окружающее плотное вещество, создавая яркие, светящиеся фронты.

Таким образом, головные ударные волны — это не только эффектное зрелище, но и важный механизм, через который звёзды активно взаимодействуют с межзвёздной средой, перемешивают и нагревают её, а иногда даже провоцируют рождение новых звёзд.

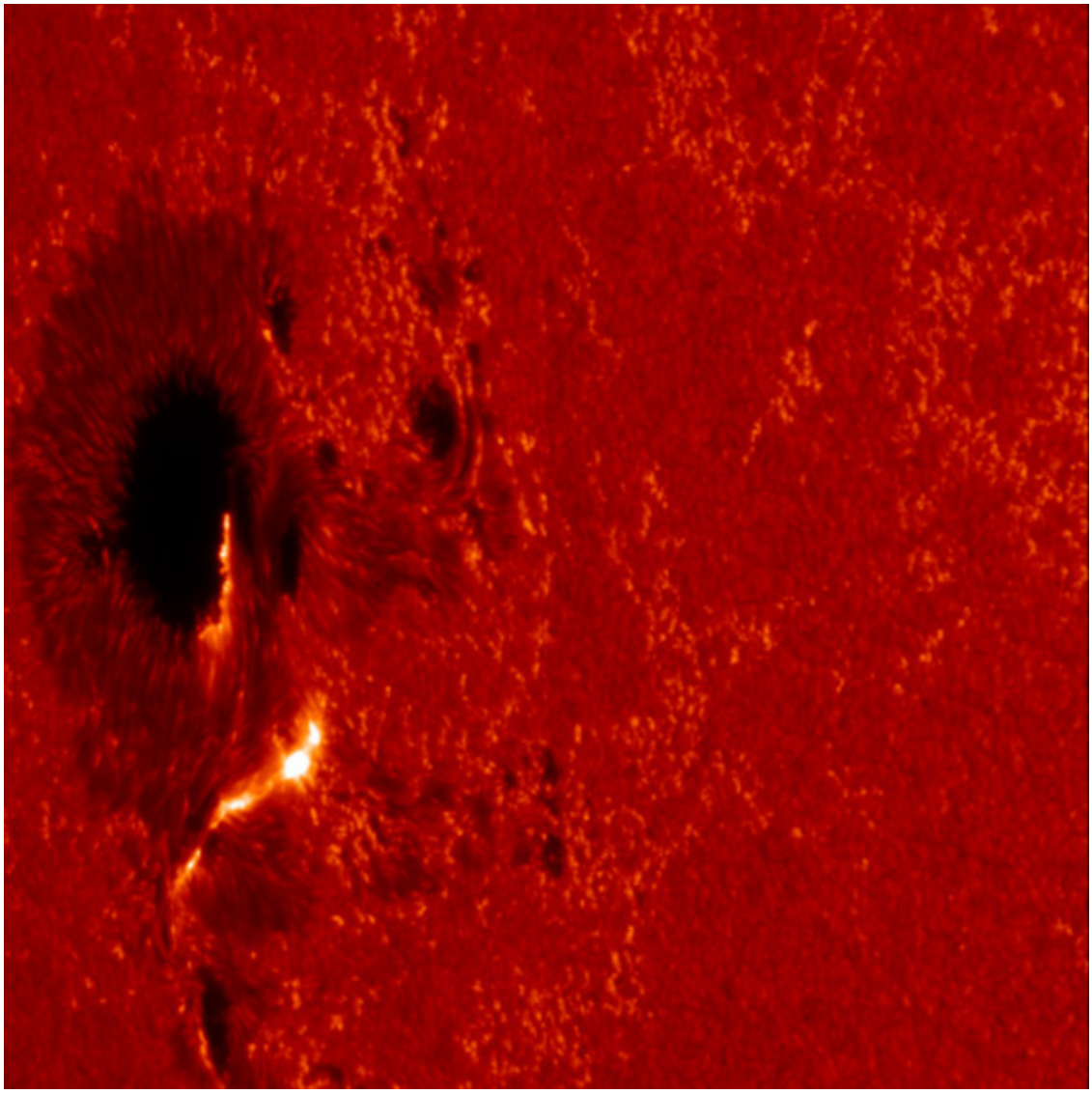
Солнечные вспышки

Солнечная вспышка — это мощный взрывной процесс, при котором в атмосфере Солнца за короткое время высвобождается огромная энергия в кинетической, световой и тепловой формах. Вспышки охватывают все слои солнечной атмосферы: от фотосферы до короны. Они часто (но не всегда) сопровождаются выбросами корональной массы — громадными облаками плазмы, устремляющимися в межпланетное пространство.



Солнечная вспышка 14 декабря 2014 года: выброс отрывается от поверхности.[32]

[32] Мощная солнечная вспышка класса X1.6, произошедшая 14 декабря 2014 года в 01:50 по московскому времени (Credit: NASA / Solar Dynamics Observatory (SDO), общественное достояние)



Солнечная вспышка, фотография спутника Hinode. Наблюдается как две узкие, яркие структуры около южной части солнечного пятна.[33]

Энерговыделение самой мощной вспышки может достигать 6×10^{25} Дж — это примерно шестая часть энергии, которую Солнце излучает за одну секунду, или около 160 миллиардов мегатонн в тротиловом эквиваленте. Для сравнения: это соответствует мировому потреблению электроэнергии за миллион лет.

По данным наблюдений 2025—2026 годов, в частности вспышек X8.3 (декабрь 2025) и X8.1 (февраль 2026), энергия таких событий может быть ещё выше, чем считалось ранее, что подчёркивает их роль в формировании экстремальной космической погоды.

Вспышки возникают в результате внезапного пересоединения и сжатия магнитных силовых линий в солнечной атмосфере. В области вспышки формируются протяжённые плазменные структуры — жгуты и ленты длиной в десятки и сотни тысяч километров. Температура плазмы в эпицентре может достигать 10 миллионов кельвинов, а выбросы вещества разгоняются до скоростей до 1000 км/с.

[33] Мощная солнечная вспышка, запечатлённая спутником «Хиноде» (Hinode) На снимке в крайнем ультрафиолетовом диапазоне виден гигантский выброс плазмы и яркая область пересоединения магнитных силовых линий в активной области Солнца. (Credit: JAXA / NASA / Hinode, общественное достояние)

Эффекты вспышек доходят до Земли поэтапно:

· первые фотоны (свет и рентгеновское излучение) — уже через 8,5 минуты;

· потоки заряженных частиц — в течение десятков минут;

· облака плазмы (корональные выбросы) — через 2—3 суток.

Классификация солнечных вспышек

Современная классификация основана на измерениях рентгеновского излучения в диапазоне 0,5—10 кэВ спутниками серии GOES. Она использует буквенно-цифровой индекс, где буква обозначает порядок величины, а цифра уточняет интенсивность.

Класс	Интенсивность в пике (Вт/м²)	Примерная энергия (Дж)	Эффекты на Земле (шкала NOAA)	Частота (максимум/минимум цикла)	Примеры недавних событий (2025–2026)
A	$< 10^{-7}$	$< 10^{23}$	Нет (R0)	Редко/очень редко	Не зарегистрированы мощные
B	$10^{-7} – 10^{-6}$	$10^{23} – 10^{24}$	Слабые (R1)	Часто/редко	B5.87 (март 2026)
C	$10^{-6} – 10^{-5}$	$10^{24} – 10^{25}$	Умеренные (R1–R2)	100–500/год / 10–50/год	C1.05 (март 2026), C1.97 (февраль 2026)
M	$10^{-5} – 10^{-4}$	$10^{25} – 10^{26}$	Сильные (R3)	50–100/год / 1–10/год	M5.8 (декабрь 2023, архив)
X	$> 10^{-4}$	$> 10^{26}$	Экстремальные (R4–R5)	10–20/цикл / <1/цикл	X8.3 (декабрь 2025), X8.1 (февраль 2026), X6.3 (февраль 2024), X4.2 (февраль 2026)

Рекордной за всю историю спутниковых наблюдений (с 1976 года) остаётся вспышка 4 ноября 2003 года класса X28. В цикле 25 уже зарегистрированы несколько событий класса X, что делает его одним из наиболее активных за последние десятилетия.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.