

# МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

## 4.1. Основные составляющие и проявления

Важнейшей составляющей частью Галактики помимо звездных компонент является межзвездная среда (МЗС). Межзвездный газ (в основном, водород) в нашей Галактике составляет несколько процентов от массы видимого вещества, но его роль крайне велика. Доля газа в общей массе галактики является ее важнейшей характеристикой и определяет активность процесса звездообразования. В спиральных и неправильных галактиках в холодных массивных газопылевых комплексах создаются подходящие условия для развития гравитационной (джинсовской) неустойчивости и происходит рождение звезд. В процессе своей эволюции звезды теряют массу в виде звездного ветра. В конце эволюции при образовании компактных остатков происходит сброс оболочки звезды (в виде планетарной туманности для звезд умеренных масс, остатка сверхновой для звезд массивнее 10 масс Солнца). Таким образом, происходит постоянный круговорот газ–звезды–газ, при котором полная масса газа постепенно уменьшается, т. к. часть барионов остается в виде компактных остатков (белых карликов, нейтронных звезд, черных дыр), а часть — выбрасывается из галактики в межгалактическое пространство. Кроме газа к компонентам межзвездной среды также относят межзвездную пыль (около 1% от массы газа), межзвездные магнитные поля и космические лучи, а также невидимую темную материю, которая проявляет себя в галактических масштабах через гравитационное взаимодействие.

Перечислим основные наблюдательные проявления межзвездной среды:

- 1) Наличие светящихся туманностей ионизованного водорода (НИ) вокруг горячих звезд и отражательных газо-пылевых туманностей в окрестностях более холодных звезд.
- 2) Ослабление света звезд (межзвездное поглощение) в непрерывном спектре и отдельных линиях, а также покраснение света (селективное поглощение пылью); наличие непрозрачных («темных») туманностей.
- 3) Поляризация света на пылинках межзвездной среды, ориентированных вдоль крупномасштабного магнитного поля Галактики.
- 4) Инфракрасное излучение межзвездной пыли.
- 5) Мягкое рентгеновское излучение горячего разреженного газа, нагретого ударными волнами, возникающими при вспышках сверхновых и при истечении мощного звездного ветра от молодых массивных ОВ-звезд (т. н. корональный газ).
- 6) Радиоизлучение нейтрального водорода (НІ) на длине волны 21 см и различных молекул в линиях сантиметрового и миллиметрового диапазона.
- 7) Излучение космических мазеров, «работающих» на молекулах  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ , метанола и др., возникающих преимущественно в холодных плотных областях звездообразования.
- 8) Синхротронное излучение релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях.

Межзвездная среда была открыта в 1904 г. Гартманом, который обнаружил неподвижные линии поглощения в спектрах двойных звезд, наблюдавшихся с целью проверки эффекта Доплера (зная орбитальный период обращения, можно определить скорость движения компонентов и таким образом предвычислить амплитуду смещения линий поглощения в спектрах движущихся звезд). К 1938 г. были отождествлены линии многих межзвездных молекул —  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{NH}$ . Естественно, присутствие этих молекул не отражает истинного химического состава межзвездной среды — тяжелые

элементы (Fe, Si, C и т. д.) входят в состав твердых межзвездных пылинок, а самые распространенные элементы — невозбужденный нейтральный и молекулярный водород и гелий — не наблюдаются в оптическом диапазоне. В 1965 г. был открыт первый космический мазер на молекуле OH ( $\lambda = 18$  см). В 1973 г. с борта специализированного УФ-спутника «Коперник» ( $\lambda < 3000 \text{ \AA}$ ) было открыто большое количество линий всевозможных межзвездных молекул, среди которых особенно важной является линия  $\text{H}_2$  1108Å, наблюдаемая в поглощении.

Пространственное распределение межзвездной среды характеризуется сложной структурой, включающей отдельные компактные образования, холодные и теплые облака, окруженные более горячим газом. Основные составляющие МЗС и их физическое состояние просуммированы в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Основные состояния газовой межзвездной среды

Фаза	$T, \text{ K}$	$n, \text{ см}^{-3}$	Масса облаков, $M_{\odot}$	Размер, пк	Доля занимаемого объема†
Корональный газ	$\approx 5 \cdot 10^5$	$\sim 0.003$	—	—	$\sim 0.3$
Зоны НИ низкой плотности	$\approx 10^4$	$\sim 0.3$	—	—	$\sim 0.1$
Межоблачная среда	$\approx 10^4$	$\sim 0.1$	—	—	$\sim 0.4$
Облака НИ	$\approx 80$	$\sim 10$	$\sim 100$	$\sim 10$	$\sim 0.01$
Молекулярные облака	$\approx 10$	$\sim 10^3$	$\sim 300$	$\sim 1$	$\sim 10^{-5}$
Глобулы	$\approx 10$	$\sim 10^4$	$\sim 20$	$\sim 0.3$	$\sim 3 \cdot 10^{-9}$
Яркие области НИ	$\approx 10^4$	$\sim 30$	$\sim 300$	$\sim 10$	$\sim 10^{-4}$
Гигантские молекулярные облака	$\sim 20$	$\sim 300$	$\sim 3 \cdot 10^5$	$\sim 40$	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$
Мазерные конденсации	$\lesssim 100$	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^5$	$\sim 10^{-5}$	

† Вблизи плоскости Галактики

Основная особенность МЗС — ее крайне низкая плотность. Типичные величины концентрации атомов —  $0.1$ – $1000$  в  $\text{см}^3$ , и при характерных скоростях около  $10$  км/с время столкновения между отдельными частицами достигает десятков тысяч лет. Это время на много порядков превышает характерные времена жизни атомов

в возбужденных состояниях (на разрешенных уровнях — порядка  $10^{-8}$  с). Следовательно, поглощенный атомом фотон успеваеt вновь излучиться, так что вероятность истинного поглощения неионизирующих квантов атомами МЗС (когда энергия поглощенного фотона переходит в кинетическую энергию хаотического движения частиц) при каждом событии крайне мала.

Линия поглощения обычно становится различимой на фоне непрерывного спектра (континуума) при оптических толщинах в центре линии  $\tau_{\lambda_0} \gtrsim 0.1$ . Сечение поглощения атомов  $\sigma(\lambda)$  связано с оптической толщиной соотношением  $\tau_\lambda = \int \sigma(\lambda)n ds = \sigma(\lambda)N$ , где  $N = \int n ds$  — число атомов на луче зрения. Расчет показывает, что в оптическом диапазоне сечение поглощения в наиболее сильных линиях  $\sigma(\lambda_0)$  достигает  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  см<sup>2</sup>, что намного больше сечения ионизации<sup>1</sup>.

По линиям поглощения МЗС, наблюдаемых в спектрах звезд, можно определять примеси с крайне малой концентрацией. Например, считая, что свет прошел в МЗС расстояние 300 пк  $\sim 10^{21}$  см (характерное расстояние до ярких звезд), находим, что по межзвездным линиям поглощения можно узнать о присутствии среды с концентрацией атомов  $n \sim 10^{-8}$ – $10^{-10}$  см<sup>-3</sup>, то есть 1 атом в объеме  $10^2$ – $10^4$  м<sup>3</sup>!

**Отсутствие локального термодинамического равновесия.** Прозрачность областей МЗС для излучения определяет важнейшее физическое свойство межзвездной плазмы — отсутствие *локального термодинамического равновесия* (ЛТР). Напомним, что в условиях *термодинамического равновесия* все прямые и обратные процессы идут с одинаковыми скоростями (соблюдается т. н. принцип детального баланса) и существует только одно значение температуры, которое определяет физическое состояние среды. В межзвездной среде концентрация атомов мала, оптические толщины малы, и ЛТР не выполняется. Это приводит к двум важным следствиям:

1) Температура излучения, пронизывающего МЗС (в основном, излучение от звезд), не соответствует температуре среды. При этом

---

<sup>1</sup>Сечение фотоионизации атома по порядку величины равно квадрату размера боровской орбиты, с которой возбуждается электрон, а сечение поглощения в центре линии при связанно–связанных переходах порядка квадрата длины волны поглощаемого кванта. Длина волны излучения при связанно–связанных переходах по порядку величины в  $1/\alpha \approx 137$  раз больше радиуса боровской орбиты (см. подробнее в Приложении).

электронная и ионная температуры плазмы могут сильно отличаться друг от друга в нестационарных процессах, поскольку обмен энергиями между этими частицами при их столкновениях происходит очень медленно.

2) Распределение числа атомов и ионов по населенностям уровней определяется балансом процессов ионизации и рекомбинации, однако в отличие от ЛТР, не выполняется принцип детального баланса. Например, в *корональном приближении* (предел низкой плотности частиц, название происходит от физического состояния плазмы в солнечной короне) ионизация атомов производится электронным ударом, а снятие возбуждения — спонтанными переходами с излучением. В областях ионизованного водорода и в квазарах газ ионизован жестким УФ-излучением центрального источника, и населенность уровней определяется процессами излучательной рекомбинации. В подобных случаях прямые и обратные элементарные процессы имеют разную природу, поэтому условия далеки от равновесных.

Однако, несмотря на отсутствие ЛТР, даже в очень разреженной космической плазме быстро устанавливается максвелловское распределение электронов по скоростям, соответствующее температуре среды<sup>2</sup>. Поэтому при ударном возбуждении атомов для распределения частиц по энергиям можно пользоваться формулой Больцмана и законом Максвелла.

## 4.2. Пропускание света межзвездной средой

Межзвездная среда заполнена разреженным ионизованным и нейтральным газом и пылевой средой. Электромагнитное излучение при распространении в такой среде испытывает поглощение и рассеяние, что в значительной степени сказывается на возможностях наблюдений удаленных астрономических источников.

Рассмотрим, какими процессами обусловлено поглощение излучения различных длин волн — от радиоволн до гамма-квантов.

---

<sup>2</sup>В полностью ионизованной плазме время установления изотропного максвелловского распределения для электронной и ионной компонент равны, соответственно,  $\tau_{e,i} \sim \sqrt{m_{e,i}}(kT)^{3/2}/(\ln(\Lambda_{e,i})Z_i^2 e^4 n_i)$ , где  $e$ ,  $m_e$  — заряд электрона и его масса,  $Z_i$ ,  $m_i$  — атомный номер иона и его масса,  $\ln(\Lambda_{e,i}) \sim 2 - 20$  — кулоновский логарифм, учитывающий дальнедействие кулоновских сил. Например, для чисто водородной плазмы ( $Z_i = 1$ ) с параметрами  $n = 1 \text{ см}^{-3}$ ,  $kT = 1 \text{ эВ}$  ( $T \sim 10^4 \text{ К}$ ) находим  $\tau_e \sim 10^5 \text{ с}$ .