

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

А.Т. Агишев

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

**Сборник лекций для студентов бакалавриата,
обучающихся по образовательной программе
«6В05306 - Физика и астрономия»**

Алматы, 2025

Лекция 2. Образование звезд. Фрагментация

Цель лекции

Показать физические основы образования звёзд из межзвёздного вещества, рассмотреть структуру и свойства межзвёздной среды, условия гравитационной неустойчивости (критерий Джинса) и процесс фрагментации коллапсирующих облаков, приводящий к формированию протозвёзд.

Основные вопросы:

1. Строение и состав межзвёздной среды.
2. Условия гравитационной неустойчивости межзвёздных облаков.
3. Критерий Джинса и его физический смысл.
4. Механизм фрагментации коллапсирующего облака.
5. Масса Джинса и переход от изотермического к адиабатическому коллапсу.
6. Временной масштаб свободного падения и завершение процесса фрагментации.

Краткие тезисы:

Межзвёздная среда (ISM) состоит из газа и пыли. Газ (в основном H и He) имеет низкую плотность ~ 1 атом см^{-3} и температуру около 1000 K. Пыль — микрочастицы углерода и силикатов с ледяными оболочками, температура 10–100 K. Плотные молекулярные облака ($T \approx 10\text{--}200$ K, $\rho \approx 10^4$ атомов см^{-3}) — основные области звездообразования.

Открытие межзвёздного вещества было сделано по неподвижным линиям поглощения (Хартманн, 1904) в спектрах двойных звёзд. Тёмные участки Млечного Пути — области, где пыль поглощает свет звёзд.

Гравитационный коллапс начинается, когда масса облака превышает критическую массу Джинса:

$$M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

При этом изотермическое сжатие ведёт к уменьшению M_J и разделению облака на фрагменты.

Фрагментация — процесс деления коллапсирующего облака на более мелкие сгустки, каждый из которых может стать протозвездой. Она продолжается, пока коллапс остаётся изотермическим (тепло эффективно излучается).

При достижении высокой плотности вещество становится оптически толстым, излучение затрудняется, и процесс становится **адиабатическим**. Для монокатомного идеального газа показатель адиабаты:

$$\gamma = c_v / c_p = 3/5$$

Температура растёт при сжатии, масса Джинса увеличивается, и фрагментация прекращается

Временной масштаб свободного падения:

$$t_{ff} \sim (G\rho)^{-1/2}.$$

характеризует время, за которое облако схлопывается под действием гравитации.

Условие окончания изотермического коллапса: когда энергия, излучаемая фрагментом, становится меньше гравитационной энергии, и излучение перестаёт компенсировать нагрев.

Типичные параметры межзвёздных облаков:

$$\rho_0 = 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}, T = 100 \text{ K}, \mu = 1$$

При этих значениях $M_J \approx 10^5 M_\odot$, что значительно превышает массу звезды — следовательно, облако должно разбиваться на фрагменты, чтобы образовались звёзды нормальных масс.

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) Каково наблюдательное доказательство существования межзвёздного вещества?
- 2) Из чего состоят межзвёздные облака и каковы их типичные параметры?
- 3) В чём состоит физический смысл критерия Джинса?
- 4) Почему изотермический коллапс ведёт к фрагментации?
- 5) Что происходит при переходе от изотермического к адиабатическому режиму?
- 6) Как изменяется масса Джинса в ходе коллапса?
- 7) Каков характерный временной масштаб свободного падения?
- 8) Почему фрагментация прекращается при достижении оптической толщины?

Рекомендуемый список литературных источников:

- 1) Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A. (2012). *Stellar structure and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>
- 2) Шварцшильд, М. (2009). *Строение и эволюция звезд* (Пер. с англ., 4-е изд.). URSS.
- 3) Hansen, C. J., Kawaler, S. D., & Trimble, V. (2004). *Stellar interiors: Physical principles, structure, and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b97471>

Лекция 2. Образование звезд. Фрагментация

2.1 Межзвёздная среда

Существование **межзвёздного вещества** было доказано в начале XX века на основе наблюдений за двойной звездой δ Ориона. Из-за движения двух компонентов в этой системе спектральные линии звёзд смещались вперёд и назад по длине волны (эффект Доплера) в соответствии с их орбитальным движением. Измерения спектральных линий δ Ориона показали спектральную линию поглощения кальция, которая не следовала смещениям других спектральных линий. В 1904 году Хартманн справедливо заключил, что эта линия поглощения должна быть вызвана веществом, находящимся **между δ Ориона и Землёй**.

Другим указанием на наличие вещества между звёздами являются тёмные области в диске Млечного Пути. Изначально учёные полагали, что эти области, где видимых звёзд гораздо меньше, представляют собой области, бедные звёздами. На самом деле такие тёмные области являются скоплениями пыли, которые блокируют звёздный свет на этих участках. В направлении таких тёмных облаков видны только те звёзды, которые находятся на переднем крае облака, что объясняет, почему в этих направлениях мы видим меньше звёзд. Таким образом, межзвёздная пыль имеет типичную температуру между **10 и 100 К**.

Кроме межзвёздной пыли, в космосе повсеместно присутствует **межзвёздный газ**. Он наблюдается в виде очень узких линий поглощения в спектрах звёзд. Газ имеет тот же химический состав, что и у молодых звёзд: в основном это водород. Средняя плотность этого газа чрезвычайно мала — примерно **1 атом на см^3** . Температура составляет порядка **1000 К**. Поэтому межзвёздный газ в основном состоит из нейтральных атомов, прежде всего водорода. В окрестностях горячих звёзд газ ионизируется под действием ультрафиолетового излучения и может нагреваться до **10 000 К**, так как нейтральные атомы водорода способны поглощать ультрафиолетовые фотоны. Фотоны с энергией $E > 13.6 \text{ eV}$ ионизируют атом водорода, затрачивая энергию $E - 13.6 \text{ eV}$ на передачу электрону кинетической энергии. Эта кинетическая энергия затем распределяется по газу в виде **внутренней энергии** за счёт столкновений с другими электронами и протонами.

Межзвёздная материя распределена в пространстве неравномерно, но локализована в диске Млечного Пути, особенно в спиральных рукавах. В этих регионах происходят локальные концентрации вещества — так называемые **межзвёздные облака**. Эти облака имеют диаметр в несколько парсек, температуру между 10 и 200 К и плотность примерно до **10 000 атомов на см^3** . Межзвёздные облака имеют температуру ниже, чем разреженный газ, поскольку излучение, которое нагревает вещество, не может проникать глубоко внутрь облака. В плотных межзвёздных облаках могут существовать молекулы, главным образом H_2 , а также в гораздо меньших количествах — более сложные молекулы, такие как CH_3OH (Метанол) и H_2CO (Формальдегид). Такие облака называются **молекулярными облаками**.

Из детальных исследований свойств поглощения межзвёздной пыли известно, что она состоит из микроскопических частиц углерода и силикатов диаметром порядка **1 мкм**, заключённых в тонкую оболочку из льда (H_2O). Масса межзвёздного облака находится в диапазоне от **100 до $10^5 M_\odot$** , но частицы пыли составляют лишь малую часть ($\sim 1\%$) этой массы. Оставшиеся **99%** состоят из газа в форме нейтральных атомов водорода H , молекул водорода H_2 и атомов гелия He .

Звёзды образуются из вещества молекулярных облаков. Это происходит тогда, когда такое облако становится гравитационно неустойчивым и коллапсирует. Облака непрозрачны для визуального излучения, что означает, что процесс формирования молодых звёзд не очень хорошо известен. В последние годы использование инфракрасных и миллиметровых инструментов значительно расширило наши знания о процессе звездообразования.

2.2 Фрагментация

Как из газового облака, которое гравитационно коллапсирует, формируются звёзды? Предполагается, что коллапсирующее облако с массой, превышающей **массу Джинса**, будет фрагментироваться. Во время коллапса образуются фрагменты, которые становятся неустойчивыми и начинают сжиматься быстрее, чем первоначальное облако. Если этот процесс действительно происходит, это означает, что из облака могут конденсироваться меньшие субмассы (**clumps**).

Как отмечалось ранее, коллапс вначале происходит **изотермически**. Следовательно, масса Джинса уменьшается пропорционально $\rho^{-1/2}$ во время сжатия. Иными словами, масса Джинса становится меньше исходной массы облака в момент начала коллапса. Когда масса Джинса становится меньше половины начальной массы облака, облако делится на два сегмента, и каждый сжимается самостоятельно. Такая фрагментация будет продолжаться до тех пор, пока коллапс идёт изотермически. Критерий Джинса был выведен при предположении, что среда находится в равновесии, поэтому теория не совсем применима к облаку, которое уже сжимается. Однако, пока выполняется условие для временных масштабов, полученные результаты сохраняют силу.

Какими будут конечные продукты процесса фрагментации? Детальный ответ на этот вопрос, основанный на уравнениях гидродинамики и термодинамики, выходит за рамки данного курса. Мы ограничимся рассуждением, основанным на временных масштабах: в какой момент временной масштаб термальной адаптации (равновесия) становится сопоставим с временным масштабом свободного падения? В этот момент коллапс больше не может быть изотермическим и будет протекать **адиабатически**. Для моноатомного идеального газа мы имеем показатель адиабаты

$$\nabla_{ad} = 2/5,$$

так что температура изменяется как

$$T \sim \rho^{2/5}.$$

Так как давление $P \sim \rho T$, температура изменяется как

$$T \sim \rho^{2/3}.$$

Таким образом, масса Джинса пропорциональна

$$M_J \sim T^{3/2} \rho^{-1/2} \sim \rho^{1/2}.$$

Следовательно, масса Джинса **возрастает** во время адиабатического коллапса. В результате существующие фрагменты перестанут дробиться дальше.

2.3 Характеристический временной масштаб для свободного падения фрагмента:

$$t_{ff} \sim (G\rho)^{-1/2}.$$

Полная энергия, которая должна быть излучена для поддержания постоянной температуры, того же порядка, что и гравитационная потенциальная энергия:

$$E_g \approx \frac{GM^2}{R},$$

где M и R — масса и «радиус» фрагмента. Энергия на единицу массы порядка:

$$A \equiv \frac{GM^2}{R} (G\rho)^{1/2} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \frac{G^{3/2} M^{5/2}}{R^{5/2}}.$$

Теперь предположим, что материя находится в равновесии, что является хорошим приближением на конце процесса фрагментации, так как вещество становится оптически толстым. Фрагмент больше не может излучать как абсолютно чёрное тело при той же температуре. Энергия, излучаемая фрагментом в единицу времени, задаётся выражением

$$B = 4\pi f \sigma T^4 R^2,$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана, а f — параметр прозрачности (от 0 до 1), учитывающий, что излучение слабее, чем у абсолютно чёрного тела. Условие для изотермического коллапса:

$$A < B,$$

и переход к адиабатическому коллапсу произойдёт, когда

$$A \approx B.$$

Это условие выполняется, если

$$M^5 = \frac{64\pi^3}{3} \sigma^2 f^2 \rho^2 T^8 R^9 / G^3 \quad (1).$$

Фрагментация прекращается тогда, когда масса Джинса становится равной массе, данной в уравнении (1).

Мы можем оценить массу Джинса следующим образом:

$$\begin{aligned} M_J &= \frac{4\pi}{3} \rho_0 \lambda_J^3 \\ &= \frac{4\pi}{3} \rho_0 \left(\frac{\pi}{G \rho_0} \right)^{3/2} \left(\frac{RT}{\mu} \right)^{3/2} \\ &= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{RT}{G \mu} \right)^{3/2} T^{3/2} \rho_0^{-1/2} \\ &\approx 1 \text{ до } 5 \\ &\times 10^5 M_\odot \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{3/2} \left(\frac{\rho_0}{10^{-24} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \mu^{-3/2}. \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь использовано соотношение

$$a^2 = RT/\mu.$$

Типичные значения для межзвёздных облаков, состоящих из нейтрального водорода:

- $\rho_0 = 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$,
- $T = 100 \text{ K}$,
- $\mu = 1$.

С этими значениями масса Джинса $M_J \approx 1 \text{ до } 5 \times 10^5 M_\odot$. Это означает, что только для масс, значительно превышающих звёздные массы, облако может коллапсировать в соответствии с критерием Джинса.

Подставляя M в уравнение (1) и используя выражения

$$M_J \propto \left(\frac{3M_J}{4\pi\rho} \right)^{1/3},$$

и уравнение (2), получаем окончательное выражение для массы Джинса.