КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

А.Т. Агишев

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

**Сборник лекций для студентов бакалавриата,
обучающихся по образовательной программе
«6B05306 - Физика и астрономия»**

Алматы, 2025

Лекция 9. Эволюция звезд с массами более 15 солнечных масс

9.1 Пример звезды η Carinae (η Киля).

Звёзды, рождённые с массой выше примерно $15M_{\odot}$ эволюционируют иначе, чем менее массивные звёзды. Это связано с тем, что они подвержены звёздному ветру с самого рождения. Их постоянный отток горячего звёздного газа влияет на весь их жизненный цикл — от рождения до взрыва в виде сверхновой.

Пример такой звезды показан на рисунке 9.1: ясно, что мы не можем правильно описывать эволюцию этой звезды, если не будем учитывать потерю массы. Базовое предположение о сохранении массы неприменимо для таких звёзд.

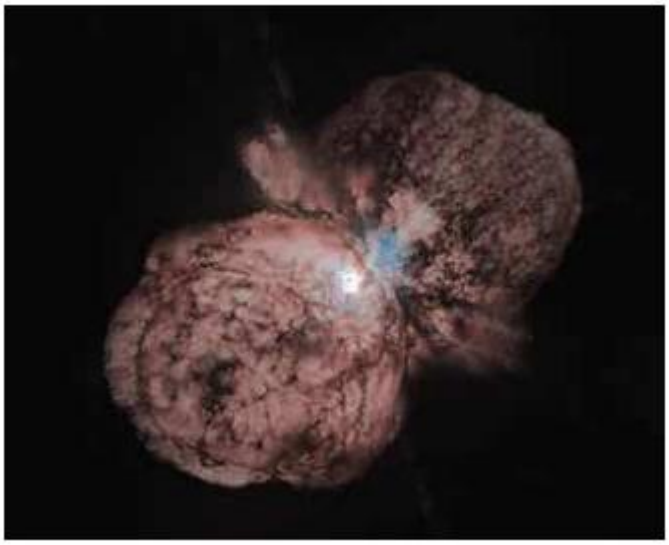

Рисунок 9.1. Изображение, полученное космическим телескопом Хаббл, показывает **сверхмассивную голубую переменную звезду η Carinae**.

Эта звезда является наглядным примером массивной звезды с очень интенсивным звёздным ветром и гигантскими выбросами массы. На изображении видны огромные газовые оболочки, выброшенные звездой в результате прошлых эпизодов потери массы. η Carinae показывает, насколько важно учитывать потерю массы в эволюции массивных звёзд:

- её оболочка расширяется с высокими скоростями,
- светимость близка к пределу Эддингтона,
- излучение и мощные потоки звёздного ветра определяют её дальнейшую судьбу, включая переход в стадию сверхновой.

Таким образом, η Carinae иллюстрирует процессы образование спектральных линий в условиях расширяющейся атмосферы, значительную

потерю массы и образование эмиссионных линий (например, Hα) в плотных областях звёздного ветра.

9.2 Спектры горячих массивных звёзд с потерей массы

Открытие расширения атмосферы и потери массы массивными звёздами через звёздный ветер в основном связано с запуском в 1979 году спутника **International Ultraviolet Explorer**, который интенсивно наблюдал такие звёзды. До того, как стали доступны ультрафиолетовые спектры (UV), считалось, что сохранение массы является неплохим приближением на стадии главной последовательности. Однако по спектральным линиям в ультрафиолетовой области спектра этих звёзд стало очевидно, что у них есть быстро расширяющаяся атмосфера, и они постоянно теряют массу уже во время горения водорода в ядре.

Непрерывное излучение в звёздном ветре горячих звёзд определяется процессами рассеяния, так как плотности ветра обычно низкие. Более конкретно, это связано с рассеянием фотонов свободными электронами, которое не зависит от длины волны. Такое рассеяние фотонов на резонансных линиях ионов, движущихся в ветре, происходит эффективно. Спектральные линии, формирующиеся в звёздном ветре, можно легко отличить от линий, формирующихся в фотосфере, так как они имеют гораздо **более широкие профили и большие смещения относительно положения в покое**. В общем случае форма профиля линий зависит от эффективности процессов рождения, рассеяния и разрушения фотонов. Поэтому спектральные линии могут проявляться как линии поглощения, линии излучения или как их комбинация.

Когда ион в звёздном ветре сталкивается с электроном и улавливает его, этот электрон может рекомбинировать. Наиболее вероятный процесс рекомбинации — это рекомбинация на основной уровень данного иона. Однако ион также может рекомбинировать на возбуждённое состояние и затем последовательно опуститься по энергетическим уровням, испуская серию фотонов. В этом случае каждое новое возбуждение сопровождается испусканием фотона. Этот процесс, следовательно, производит значительное количество фотонов в звёздном ветре. Линии, принадлежащие специфическим электронным переходам, которые с высокой вероятностью питаются коллизионной рекомбинацией, сопровождаемой радиационным повторным возбуждением, могут таким образом показывать избыточное излучение: эти спектральные линии наблюдаются в **эмиссии**.

Процесс рождения фотонов ответственен за излучение в линии Hα и инфракрасные линии излучения в ветре горячих звёзд. Создание фотонов требует гораздо большей плотности вещества, чем рассеяние фотонов. Поэтому оно происходит только в наиболее плотных областях звёздного ветра, недалеко от фотосферы звезды. Разрушение фотонов практически не происходит в звёздном ветре. Большинство ионов находится в основном состоянии. После радиационного возбуждения время жизни для радиационного повторного возбуждения очень короткое. Кроме того, плотность частиц в звёздном ветре очень низкая. Следовательно, ион не

сможет испытать коллизионное возбуждение вовремя. Поглощённый фотон, следовательно, испытает рассеяние фотона и не будет уничтожен разрушением фотона.

Когда спектральная линия состоит одновременно из компоненты поглощения и компоненты излучения, она называется **профиль P Cygni**, так как впервые была наблюдена у сверхгиганта **P Cygni**. Большинство профилей P Cygni формируется резонансным рассеянием. Примеры профилей P Cygni показаны на рисунке 9.1 для звёзд ζ Pup и τ Sco. Сравнивая эти спектральные линии с линиями звёзд без существенной потери массы (см. рисунки 9.2 и 9.3), становится очевидно, что профили линий на рисунке 9.1 выглядят иначе.

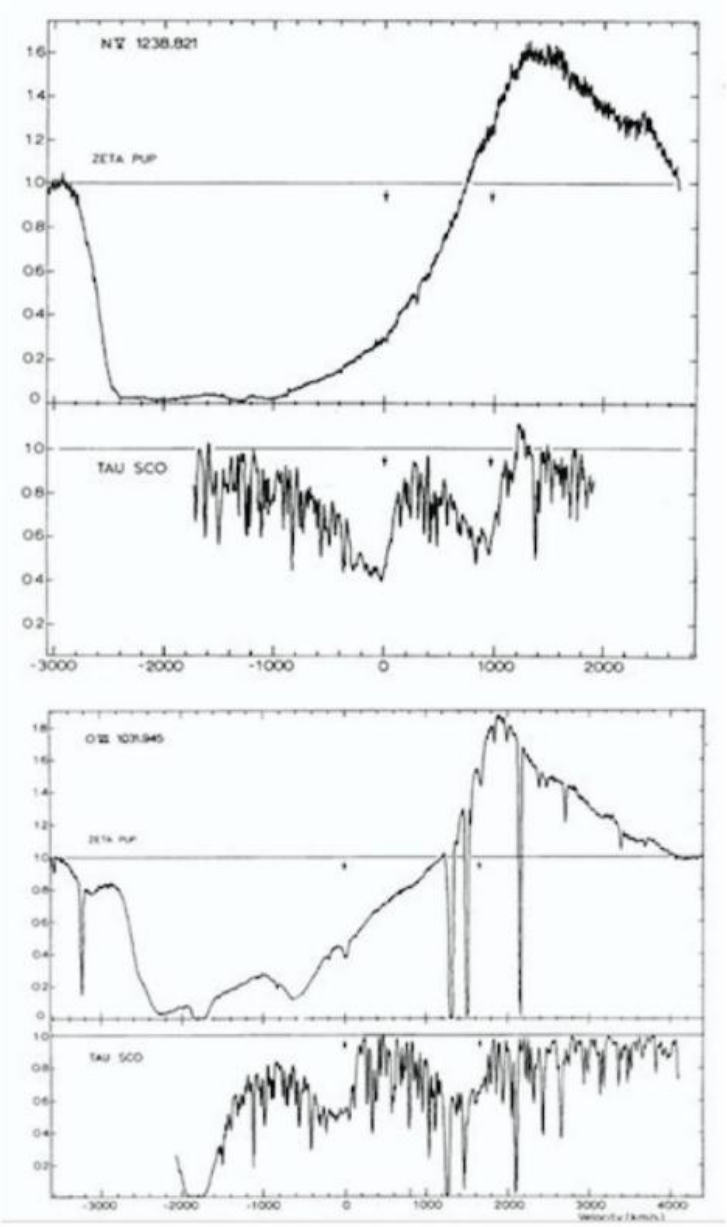

Рисунок 9.1. Наблюдаемые профили P Cygni для дублета N V (верхние панели) и дублета O VI (нижние панели) в ультрафиолетовом спектре массивных звёзд ζ Pup (сверхгигант спектрального класса O4) и τ Sco (карлик спектрального класса B0).

Остальные длины волн указаны стрелками. В случае ζ Pup линии дублета сливаются в один сильный профиль P Cygni. Для τ Sco они наблюдаются раздельно. Спектр τ Sco также демонстрирует множество узких фотосферных линий поглощения. Профили обеих звёзд достигают больших отрицательных скоростей, что указывает на истечение вещества в направлении к наблюдателю.

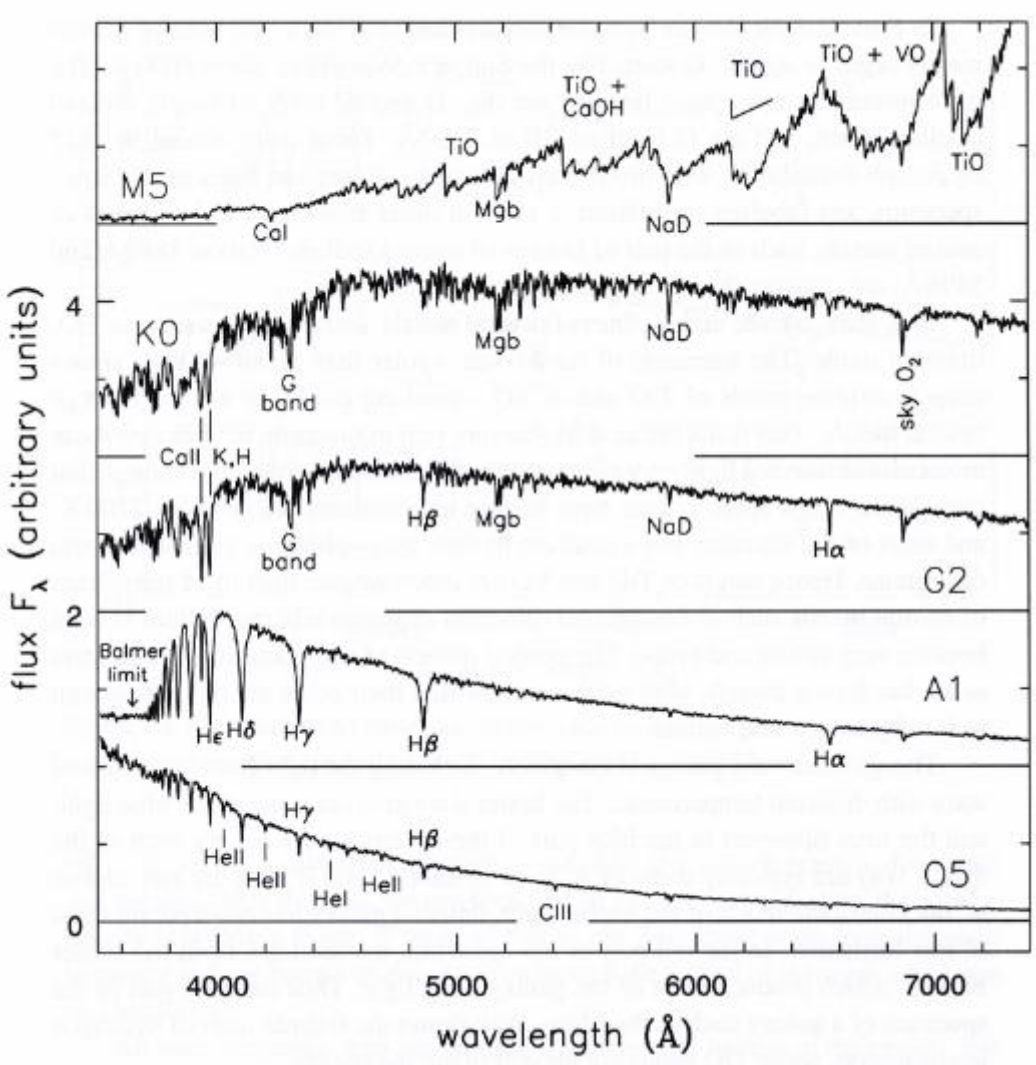

Рисунок 9.2. Оптические спектры звёзд главной последовательности с приблизительно одинаковым химическим составом, но с возрастающей эффективной температурой сверху вниз.

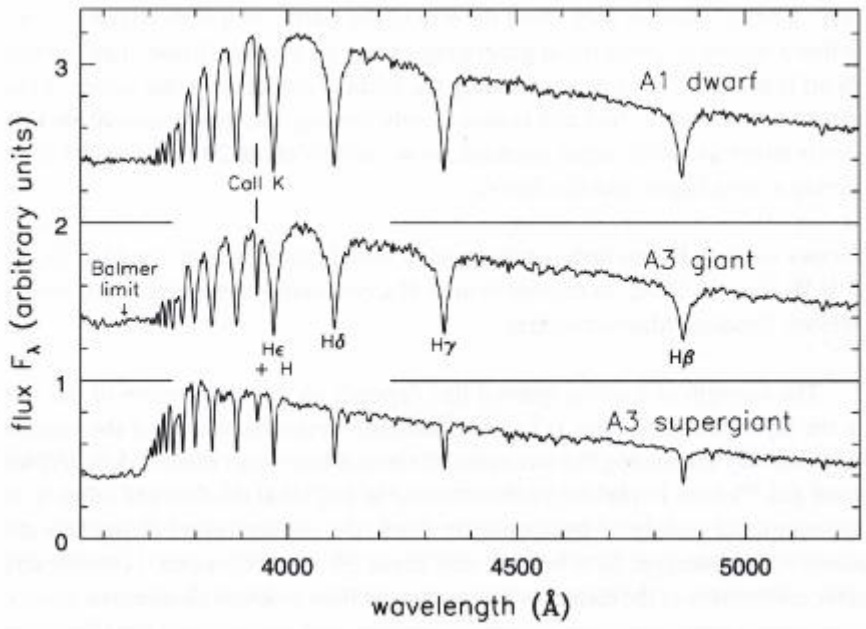

Рисунок 9.3. Оптические спектры трёх звёзд спектрального типа A, но относящихся к разным классам светимости.

Формирование и интерпретацию профиля P Cygni можно качественно объяснить следующим образом. Рассмотрим простую модель сферического звёздного ветра, в котором скорость увеличивается с расстоянием от звезды (см. левую панель рисунка 9.4). Наблюдатель выделяет четыре области, которые вносят вклад в формирование спектральной линии:

1. **Звезда**, излучающая непрерывное излучение с возможной фотосферной компонентой поглощения на длине волны λ_0 спектральной линии.

2. **Цилиндр F**, находящийся перед диском звезды. Газ в области F движется к наблюдателю со скоростью в диапазоне от $v \approx 0$ до v_∞.

3. **Цилиндр O** расположен позади звезды и закрыт ею. Газ в области O движется от наблюдателя, однако излучение из этой области не достигает наблюдателя.

4. **Области H** окружают звезду, и наблюдатель воспринял бы их как «гало» вокруг звезды, если бы звёздный ветер можно было пространственно разрешить. Газ в области H имеет как отрицательные, так и положительные компоненты скорости по отношению к наблюдателю.

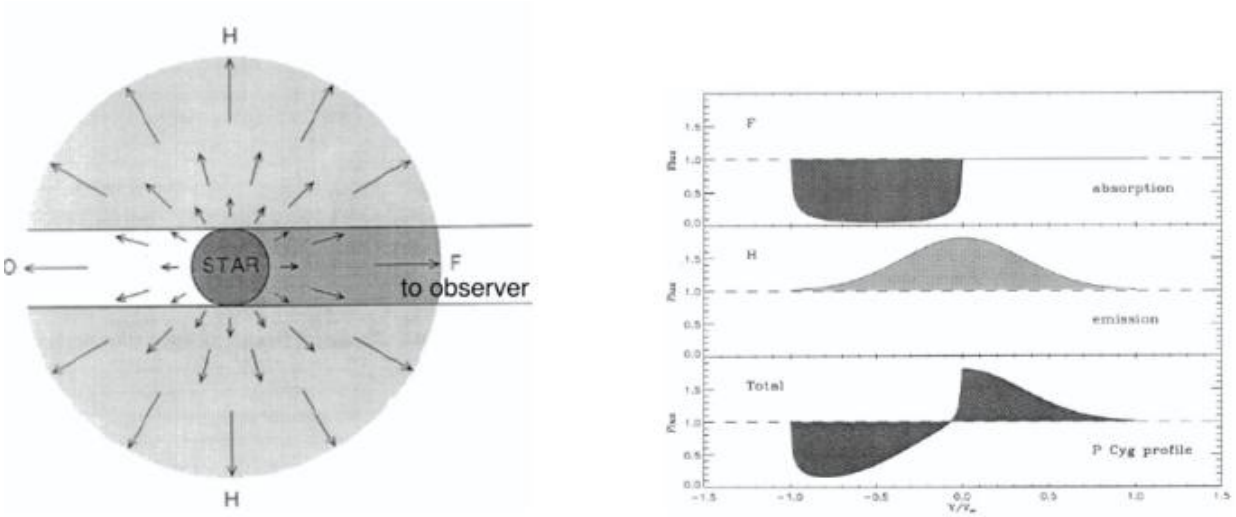

Рисунок 9.4. Левая панель: геометрия сферически-симметричного звёздного ветра с увеличивающейся скоростью по направлению наружу. Наблюдатель различает четыре области: **STAR**, **F**, **O**, **H**. Правая панель: вклад от звезды (непрерывный поток), поглощение в области F и излучение в области H. Профиль P Cygni охватывает интервал скоростей [−v∞,v∞] и представляет собой сумму этих трёх вкладов.

На правой панели рисунка 9.4 показаны вклады от четырёх различных областей в формирование спектральной линии. Область **STAR** даёт непрерывное излучение с фотосферной линией поглощения. Область **F**, находящаяся перед звездой, рассеивает фотоны, покидающие звезду, и, следовательно, часть из них исчезает из линии зрения. Эти фотоны достигли бы наблюдателя, если бы не существовало звёздного ветра. Удаление фотонов ускоренными частицами ветра приводит к синим смещённым коэффициентам поглощения с доплеровским сдвигом между −v∞ и 0 км/с.

Для оптически тонкой материи коэффициент поглощения не достигает потока, равного нулю, так как в линии зрения также происходит рассеяние в направлении наблюдателя из области F. Для оптически толстой линии поток может быть полностью заблокирован для наблюдателя. **Гало H** рассеивает излучение, идущее от фотосферы звезды, во всех направлениях. Часть этого излучения движется в сторону наблюдателя. Эта часть индуцирует эмиссионную компоненту с доплеровским смещением между −v∞ и +v∞, при этом основной вклад приходится на скорость, центрированную около 0 км/с. Итоговый результат всех этих вкладов, получается при их суммировании.

Профили P Cygni для резонансных линий наблюдаются в ультрафиолетовой части спектра горячих звёзд. Поэтому заключение о наличии истечения вещества посредством звёздного ветра пришлось отложить до тех пор, пока эта часть электромагнитного спектра не могла быть зарегистрирована, что требовало космической миссии. Обнаружение профилей P Cygni позволяет сразу определить максимальную скорость, имеющую место в звёздном ветре, которая обозначается как v∞.

Список литературы:

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