

# Моделирование зоны ионизации около горячих звезд

Бородина Ольга

22 января 2020

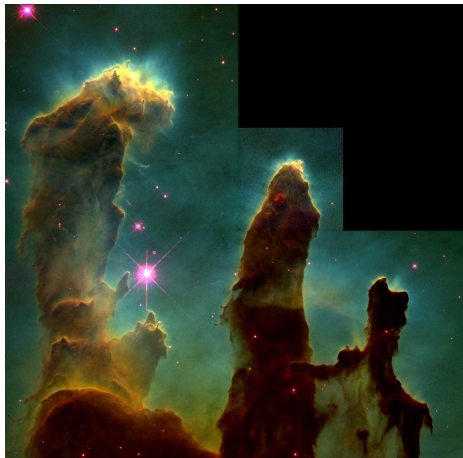
# Горячие звезды

## Гарвардская классификация

- O
- B
- A
- F
- G
- K
- M



# Зона HII



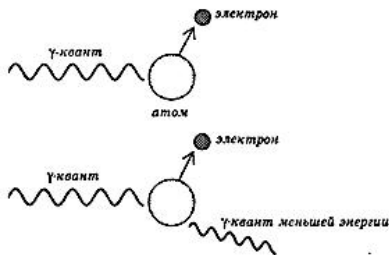
«Столпы Творения» в туманности Орёл



Эмиссионная туманность N 180B в БМО

# Механизм образования зоны HII

- Горячие звезды излучают много в УФ
- Фотоны с  $E > E_{ion}$  высвобождают электрон
- Размер области ионизации будет зависеть от:
  - Интенсивности звезды
  - Плотности газа



# Задача

- ① Изучить зависимость радиуса зоны ионизации вокруг звезд от их класса и концентрации окружающего газа
  - в окрестности звезды только водород
  - звезда – АЧТ
- ② Сравнить полученный результат с теоретическим
- ③ Показать, как изменяется радиус зоны ионизации, при усложнении модели
  - учет пыли, гелия, отличие спектра звезды от планковского

# Основные уравнения

Связь концентраций частиц:

$$n(H^+) = n_{ion} = n_e \quad n(H^+) + n(H) = n_H$$

Оптическая толщина  $\tau_\nu$  на расстоянии  $r_i$ :

$$\tau_\nu(r_i) = \int_{R_{inner}}^{r_i} n(H, R') \sigma_i(\nu) dR'$$

Средняя интенсивность на расстоянии  $r_i$ :

$$J_\nu(r_i) = \frac{1}{4} B_\nu(T^*) \left( \frac{R^*}{r_i} \right)^2 \exp(-\tau_\nu(r_i))$$

Уравнение ионизационного баланса:

$$n(H) \int_{\nu_{ion}}^{\infty} \frac{4\pi J_\nu}{h\nu} \sigma_i(\nu) d\nu = n(e) n(H^+) \alpha_B$$

# Спектр

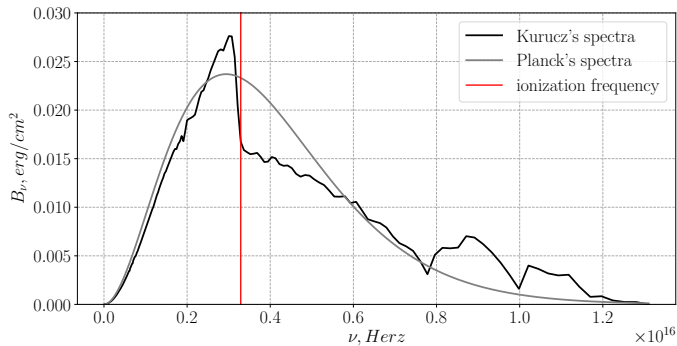


Рис.: Спектр звезды с температурой 50.000К

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT^*}) - 1}$$

# Алгоритм

- 1 Двумерная сетка
  - равномерная по радиусу
  - адаптивная по частоте
- 2 Считаем ионизационный интеграл:

$$PHI = \int_{\nu_{ion}}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} \sigma_i(\nu) d\nu$$

- 3 Вычисляем  $\xi = PHI/n_e\alpha_B$  и затем концентрации:

$$n(H) = n_H/(1 + \xi) \quad n(H^+) = n_H\xi/(1 + \xi)$$

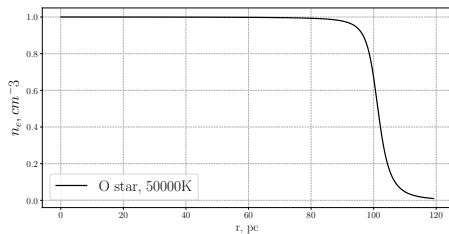
- 4 Подсчитываем  $n_{e_{new}} = \sqrt{n_{ion}n_e}$

- 5 Вычисляем оптическую толщину и среднюю интенсивность.





# Результаты



$$R_S = \left( \frac{3 \cdot 10^{18}}{4 \cdot 6.3} \frac{f(T^*)}{n^2} \right)^{1/3} \text{ пк}$$

$$R_S = 87 \text{ пк}$$

**Рис.:** Концентрация электронов в зависимости от расстояния от звезды

# Результаты

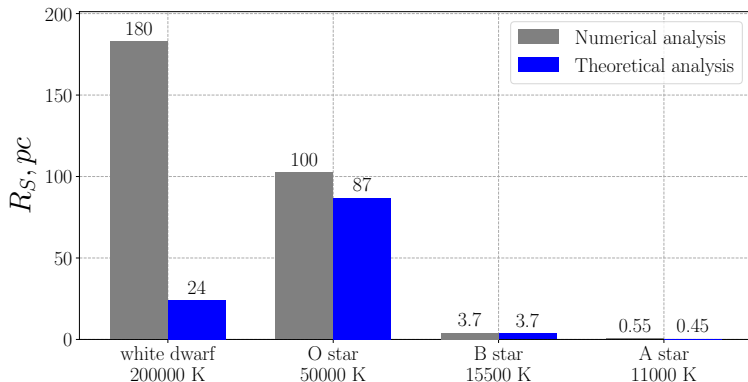


Рис.: Размер зоны ионизации для звезд разных классов

Теоретические размеры зон ионизации – В.В. Соболев "Курс теоретической астрофизики"

# Результаты

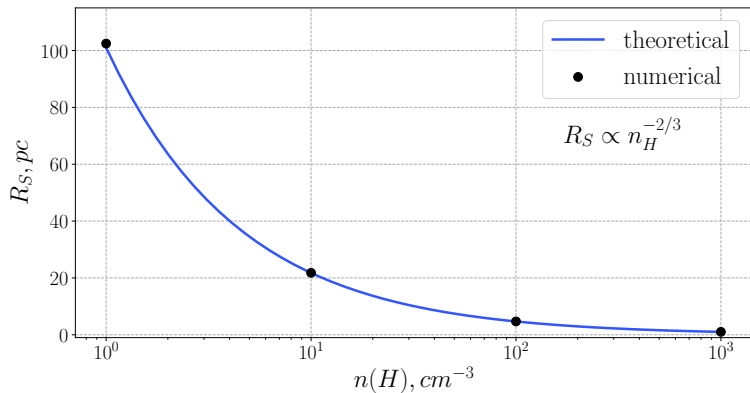


Рис.: Размер зоны ионизации для разных плотностей межзвездной среды

# Усложнения модели

- ❶ Использование реального спектра звезды <sup>1</sup>
- ❷ Учет гелия
- ❸ Учет пыли <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kurucz, R. L., «Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars», 1979

<sup>2</sup> Laor A., Drain B. T., «Spectroscopic constraints on the properties of dust in active galactic nuclei», 1993

## Уравнения для усложнения модели

$$n(\text{He}) \int_{\nu_{ion}^{\text{He}}}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} \sigma_i^{\text{He}}(\nu) d\nu = n(e)n(\text{He}^+) \alpha_B^{\text{He}^+} \quad (1)$$

$$n(\text{He}^+) \int_{\nu_{ion}^{\text{He}^+}}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} \sigma_i^{\text{He}^+}(\nu) d\nu = n(e)n(\text{He}^{++}) \alpha_B^{\text{He}^{++}} \quad (2)$$

$$n_e = n(\text{H}^+) + n(\text{He}^+) + 2n(\text{He}^{++}) \quad (3)$$

$$n(\text{H}^+) + n(\text{H}) = 0.9n(R) \quad (4)$$

$$n(\text{He}^{++}) + n(\text{He}^+) + n(\text{He}) = 0.9n(R) \quad (5)$$

$$\alpha(\nu, r) = n(\text{H})\sigma(\nu) + n_d(r)\sigma_d(\nu) \quad (6)$$

# Результаты

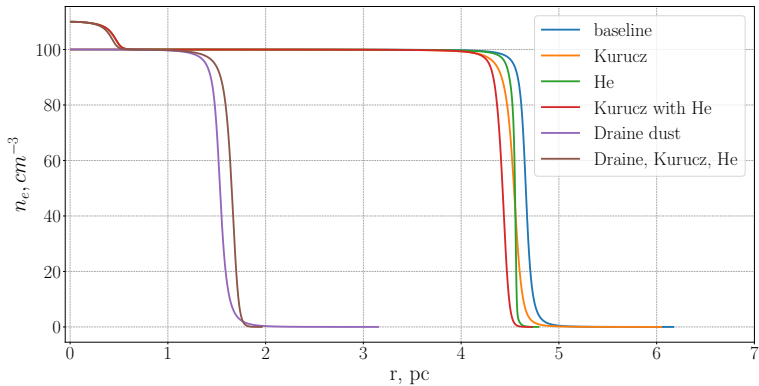


Рис.: Размер зоны ионизации для разных моделей звезд

# Результаты

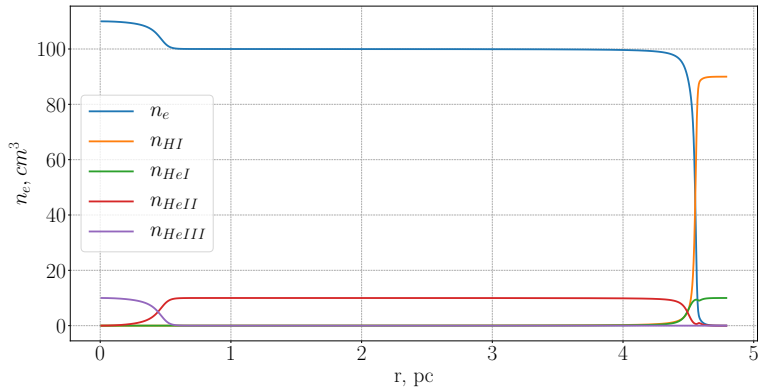


Рис.: График зависимости концентрации водорода и гелия от расстояния от звезды



[https://github.com/olgaborodina/ionisation\\_region](https://github.com/olgaborodina/ionisation_region)