

## Teoretična astrofizika

### Druga domača naloga

Simon Bukovšek, 28211067

Škofja Loka, 8. januar 2024

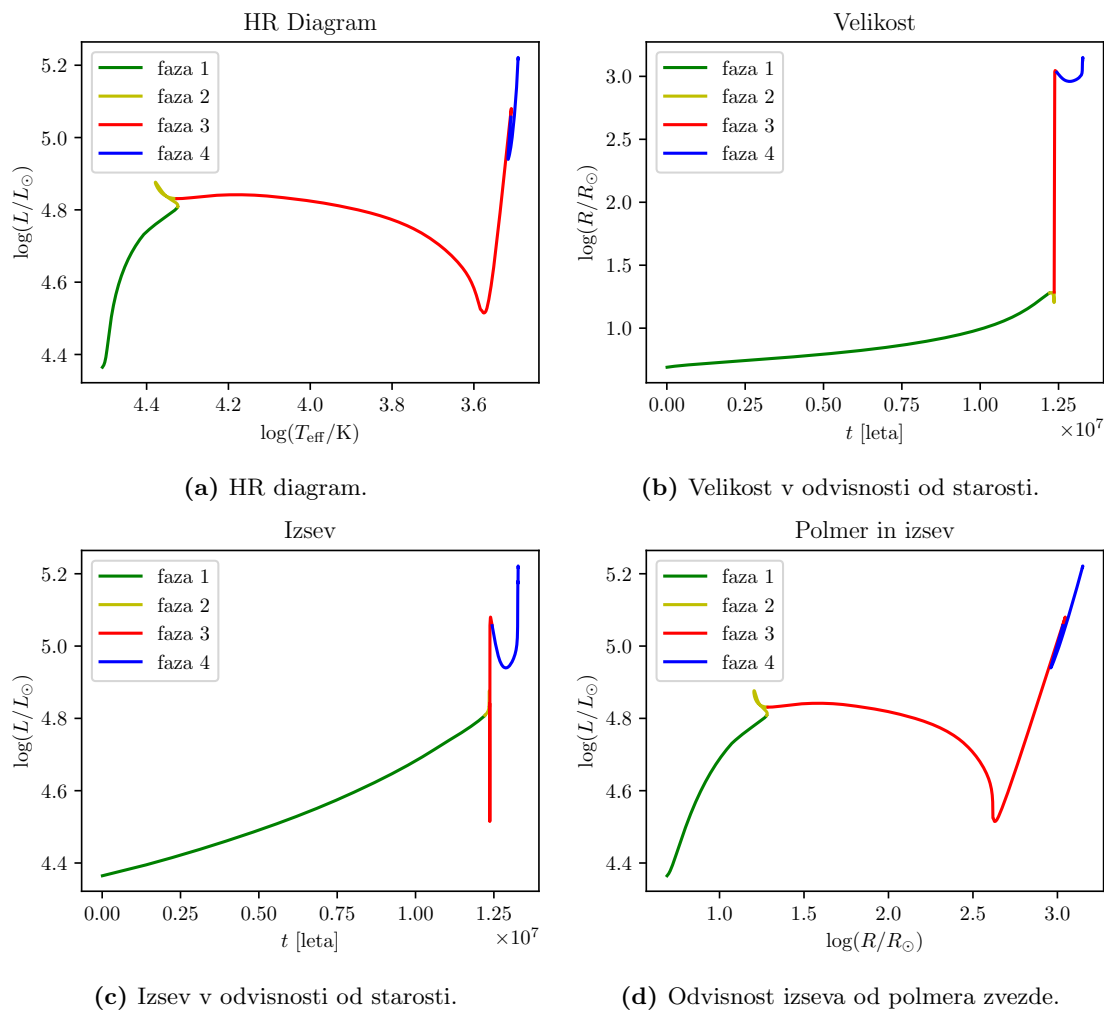
**Profesor:** doc. dr. Dunja Fabjan  
**Asistent:** asist. dr. Gregor Traven

*Uporaba orodij MESA in TULIPS za modeliranje zvezd*

## 1 Uvod

V tej nalogi bom uporabil podatke iz programja MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) za zvezdo z maso  $M = 10M_{\odot}$ . Njen razvoj in ključne dogodke bom predstavil s pomočjo Python knjižnice TULIPS (A Tool for Understanding the Lives, Interiors, and Physics of Stars).

## 2 Pregled življenja zvezde

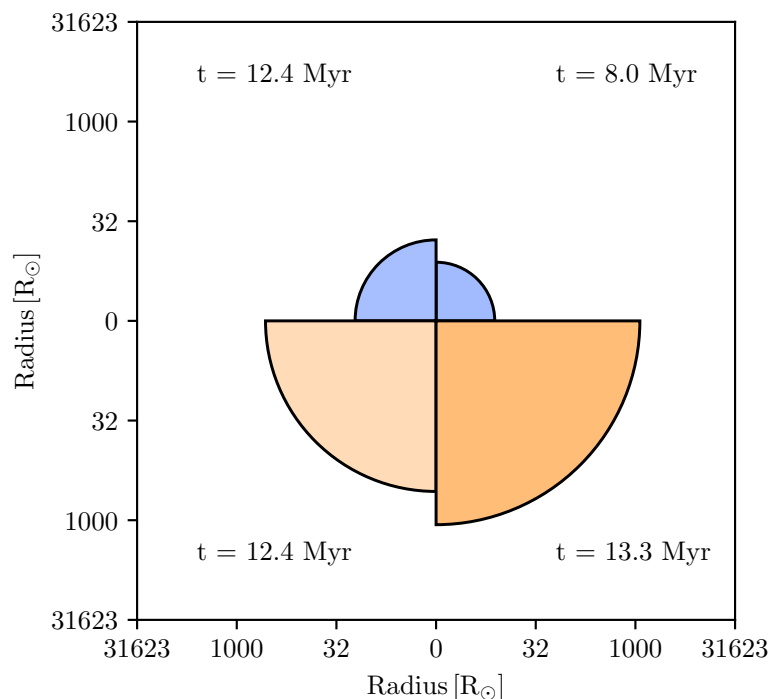


**Slika 1:** Prikazi razvoja zvezde. Na vseh štirih slikah so z različnimi barvami prikazane štiri faze, ki so razložene v besedilu.

Najprej bom predstavil tri prikaze, ki zajemajo celotno življenje zvezde. Najbolj tipičen prikaz je HR diagram (Slika 1a), ki prikazuje odvisnost logaritma izseva od logaritma temperature. Na njem se lepo vidijo štiri faze razvoja, ki so sledeče:

1. gorenje vodika v jedru,
2. prižig vodika v lupini,
3. gorenje vodika v lupini in helijev blišč,
4. gorenje helija in težjih elementov.

Slabost HR diagrama je, da ne prikazuje časovne odvisnosti, zato sem narisal še dva grafa, ki prikazujeta odvisnost velikosti in izseva od starosti zvezde (Slika 1b in 1c). Na prikazu polmera lahko vidimo, da se slednji na glavni veji ne spreminja kaj dosti, v času gorenja helija v plašču pa se poveča za skoraj red velikosti (rdeča navpična črta). V fazi gorenja težjih elementov (modra) pa se spet ne spreminja veliko. Zelo podobna zgodba je z izsevom, le da se v času na glavni veji nekoliko bolj poveča, nato pa s prižigom vodika v plašču strmo pade. Kot zanimivost sem dodal še odvisnost med polmerom in izsevom (Slika 1d), ki je zelo podobna odvisnosti med polmerom in temperaturo na HR diagramu.



**Slika 2:** Velikosti in barve zvezde v različnih fazah razvoja. Prva faza je v prvem kvadrantu, druga v drugem, tretja v tretjem in četrta v četrtem.

Sedaj se sprehodimo skozi življenje zvezde. V vsakem poglavju bomo opisali posamezno fazo in jo pospremili s primernimi prikazi iz knjižnice TULIPS. Prvi prikaz je že na Sliki 2, kjer imamo prikazano velikost in barvo zvezde za vse štiri faze.

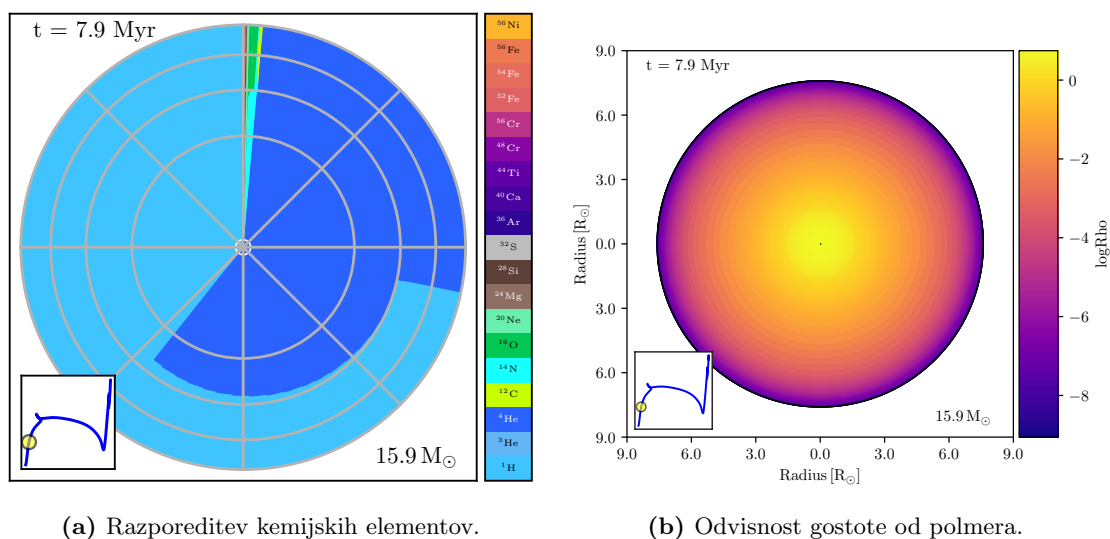
### 3 Gorenje vodika v jedru (glavna veja)

V prvi fazi v se jedru zvezde porablja vodik in se počasi zliva v helij. Ker je zvezda precej masivna, sveti z svetlo modro barvo (prvi kvadrant na Sliki 2).

V tej fazi se delež vodika v jedru manjša in ga nadomešča helij. Slika 3a prikazuje deleže elementov po masi za zvezdo, ki je približno na polovici življenja na glavni veji. V zunanjih plasteh je približno 70 % vodika in 30 % helija, v jedru pa je delež vodika že manjši od 50 %. Vidimo tudi nekaj sledov težjih elementov, predvsem blizu roba. Na Sliki 3b je prikazana odvisnost gostote od polmera. Pričakovano je v središču gostota največja, proti zunanjim plastem pa pada zelo enakomerno in brez nepričakovanih skokov. V tej fazi se tako polmer kot izsev konstantno povečujeta.

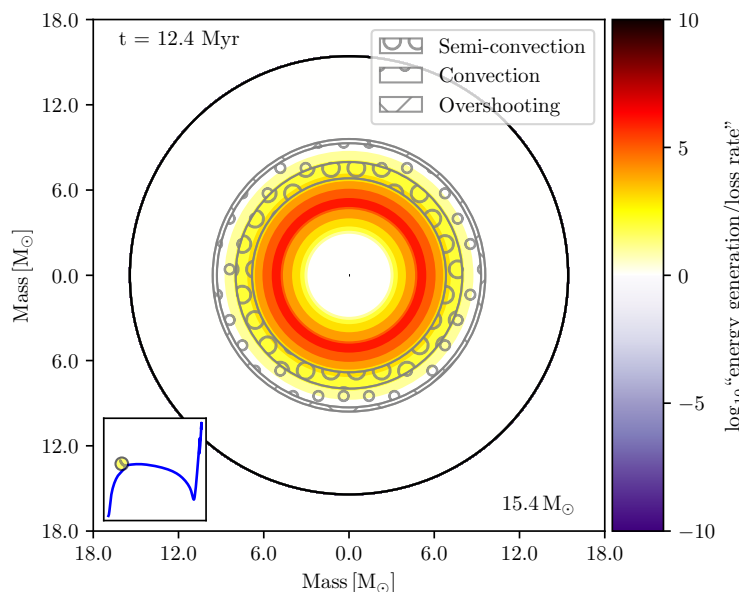
### 4 Prižig vodika v lupini

V tej fazi se na zunanji ne zgodi nič pretirano opaznega. Kot lahko vidimo v drugem kvadrantu Slike 2, se je zvezda glede na velikost ob rojstvu nekoliko povečala, barva (in temperatura) pa je



Slika 3: Prikazi glavne veje.

ostala približno enaka. Dogajanje v jedru pa kaže na popolnoma drugačno zgodbo. Ves vodik se je že porabil, zato se je fuzija začela odvijati v plašču. To se krasno vidi na Sliki 4 – v središču ni praktično nič proizvodnje v okolici pa je.

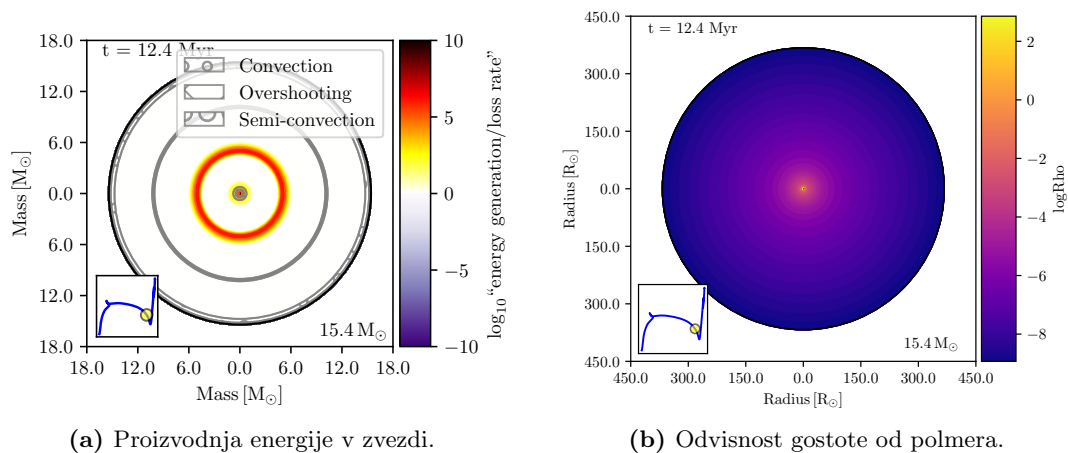


Slika 4: Proizvodnja energije v zvezdi ter načini mešanja snovi. Ker je v jedru zmanjkalo vodika, se je prižig vodika začel v lupini.

## 5 Helijev blišč in gorenje vodika v lupini

V tretji fazi se začne zvezda odmikati od glavne veje na HR diagramu, izsev in polmer se nekajkrat povečata, saj se vodik zliva tudi v območjih okoli jedra. Pritisk v jedru postane tako velik, da se tam začne zlivati tudi helij. Na Sliki 5a lahko vidimo, da se nadaljuje proizvodnja energije

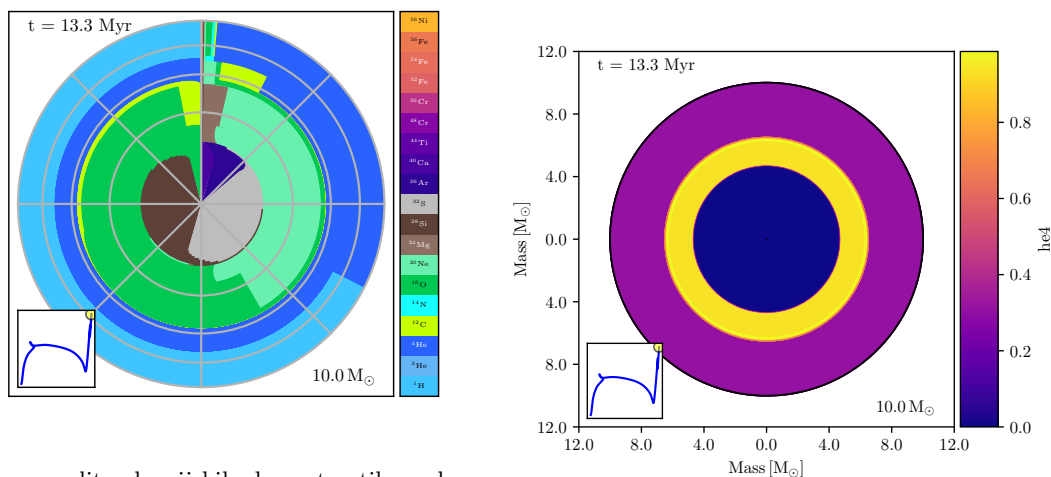
v plašču, hkrati pa tudi v središču jedra (posledica gorenja helija). Na Sliki 5b je prikazana odvisnost gostote od polmera. V tej fazi se je jedro zelo skrčilo in zgostilo.



Slika 5: Prikazi zvezde po vžigu helija v jedru.

## 6 Gorenje težjih elementov

V zadnji fazi se začnejo v jedru zvezde zlivati težji elementi. V jedru se pritisk večja, spajajo se vedno težji elementi, lažji pa se premikajo proti lupini. Tako dobimo tipično čebulno strukturo, ki je prikazana na Sliki 6a. Elementi so prišli le do kalcija, saj zvezda ni dovolj težka, da bi lahko ustvarila še težje elemente. Na Sliki 6b je prikazan delež helija v zvezdi. V čisto zunanjih plasteh ga je začetnih 30 %, v središču pa ga praktično več ni, saj se je ves že zлил v težje elemente. V srednji plasti je njegov delež zelo visok. To je na tistem območju, kjer je bil celoten vodik že porabljen.



Slika 6: Prikazi zvezde tik pred supernovo.

## 7 Zaključek

V tej nalogi sem se spoznal z orodjem TULIPS. Zelo sem hvaležen dobro napisani dokumentaciji in zglednim primerom. Kljub temu sem imel nemalo težav, predvsem pri prikazu elementov. Zaradi nenavadne napake sem se moral poglobiti globoko v črevesje izvorne kode. Napaka je bila v tem, da so deleže elementov spremenili v `float32`, preden so jih narisali na graf. Pri pretvorbi zaradi zaokrožanja vsota vseh deležev ni bila več ena, zato `matplotlib` ni znal narisati tortnega diagrama. V izvorni kodi so to napako rešili tako, da so morebiten ostanek odšteli od deleža zadnjega elementa v seznamu. To je železo, ki ga v večino primerih ni popolnoma nič. Ko odštejemo zelo majhni zaokroževalno napako od vrednosti nič, dobimo zelo majhno *negativno* vrednost, ki popolnoma onemogoči risanje tortnega diagrama. Ko sem popravil izvorno kodo, da je vse deleže delil z njihovo vsoto, je program začel približno delovati. Še vedno so ostajali nenavadni beli krožci na diagramu, ki so izginili, če sem dovolj povečal število kolobarjev. Če bi imel več časa, bi se najbrž bolj poglobil v vse možnosti, ki jih orodje TULIPS ponuja, in nekoliko bolj dovršil poročilo.