

Hertzsprung-Russellov diagram zvezdnih kopic

Rok Vogrinčič,¹ Samo Ilc¹

¹ Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Izvelek

V članku rišemo Hertzsprung-Russellov (HR) diagram odprte zvezdne kopice M45 (Plejade). Pri tem uporabljamo podatke, ki jih je zbral vesoljski teleskop Gaia (izdaja EDR3). Podatki so prosto dostopni v podatkovni bazi Gaia Archive. V članku skušamo z uporabo vedno strožjih in vedno bolj specifičnih filtrov iz baze podatkov izbrati zvezde, ki resnično pripadajo izbrani kopici. Za poizvedbo v bazi podatkov uporabljamo programski jezik ADQL, za obdelavo in risanje pa programski jezik Python. HR-diagram izluščenih podatkov nam pove, da je M45 mlada zvezdna kopica, ki vsebuje zvezde z absolutnimi magnitudami v razponu med 0 in 15 mag ter barve med 0 in 3,5 mag. Na HR-diagramu najdemo te zvezde večinoma na glavni veji.

Ključne besede: HR-diagram, zvezdne kopice, magnitude, Gaia, ADQL

Hertzsprung-Russell Diagram of Star Clusters

Abstract

The article contains a drawing of the Hertzsprung-Russell (HR) diagram of the open star cluster M45 (Pleiad). It is based on the data collected by the Gaia space telescope (EDR3 edition). The data are freely accessible in the Gaia Archive database. The aim of the article is to pick the stars from the database that truly belong to the selected cluster by using increasingly stricter and increasingly specific filters. The ADQL programming language was used for the database search, while the Python programming language was used for processing and drawing. The HR diagram of extracted data tells us that M45 is a young star cluster which contains stars with absolute magnitudes ranging from 0 to 15 mag., and colours from 0 to 3.5 mag. In the HR diagram these stars are mostly located on the main sequence.

Keywords: HR diagram, star clusters, magnitudes, Gaia, ADQL

Uvod

Hertzsprung-Russellov (HR) diagram je dobil ime po dveh astronomih iz 20. stoletja, Ejnarju Hertzsprungu ter Henryju Norrisu Russllu, ki sta približno istočasno in neodvisno odkrila povezavo med izsevom zvezde in njeno površinsko (efektivno) temperaturo. Zvezde z različno efektivno temperaturo imajo različno barvo, glede na to pa jih delimo na sedem spektralnih razredov. Barvo zvezde v astronomiji podajamo z barvnim indeksom (B-V), ki predstavlja razliko med izmerjenima magnitudama zvezd skozi modri (B) in zeleni (V) filter [1, 2]. Magnituda je mera za svetlost objekta (zvezde). Nižja ko je magnituda, svetlejša je zvezda. To merilo prihaja iz antike, kjer so zvezde glede na svetlost razporedili v šest razredov magnitud, najsvetlejše v prvi razred. Magnitude merimo na logaritemski skali, kjer sprememba za eno magnitudo pomeni približno 2,5-kratno spremembo svetlosti objekta. Astronomi uporabljajo dve različni definiciji magnitude, to sta navidezna in absolutna magnituda. Navidezna magnituda predstavlja svetlost objekta, ki ga vidimo na nebu. Ta svetlost je odvisna od izseva izvora, njegove oddaljenosti in ekstinkcije (slabljenja) svetlobe na poti do Zemlje. Absolutna magnituda pa nam pove, kolikšna bi bila navidezna magnituda objekta, če bi ga postavili na razdaljo 10 pc (pc oziroma parsek meri približno 3,26 svetlobnega leta). Absolutno magnitudo izračunamo po tej enačbi:

Astronomi uporabljajo dve različni definiciji magnitude, to sta navidezna in absolutna magnituda.

$$M = m - 5(\log_{10} d - 1) \quad (1)$$

kjer je m navidezna magnituda zvezde, d pa razdalja do zvezde v enotah pc. Razdalja do zvezde d je povezana s paralakso zvezde p po tej enačbi:

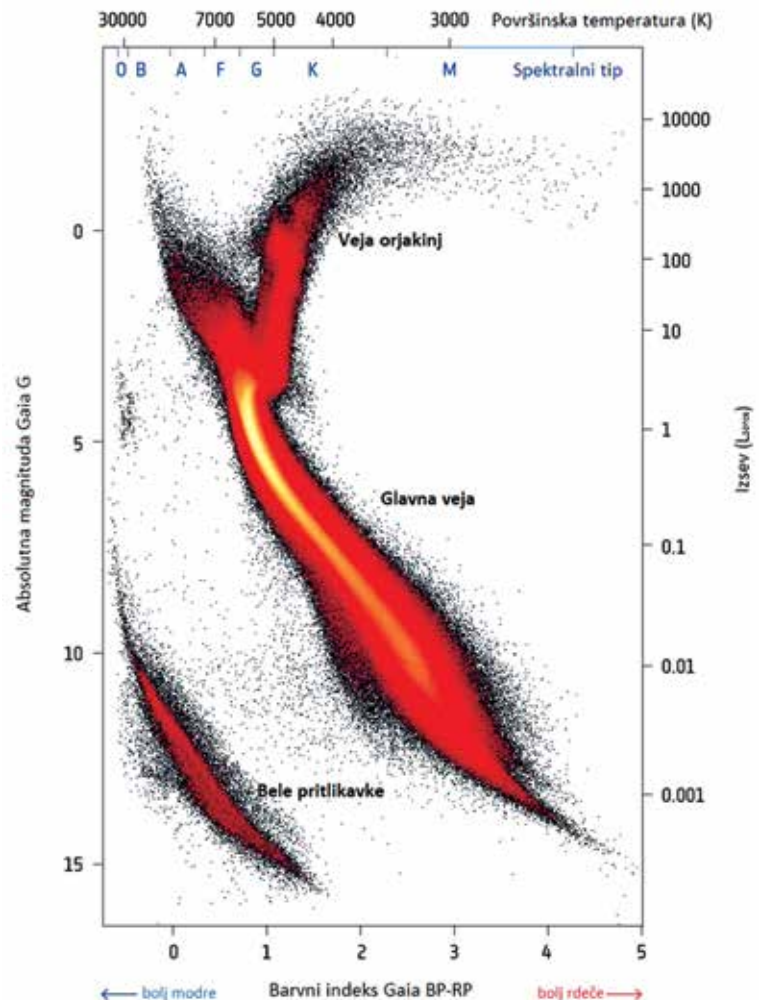
$$d(\text{pc}) = \frac{1000}{p(\text{mas})}, \quad (2)$$

kjer p predstavlja kot paralakse zvezde, ki ga podajamo v enotah »mas« (mili ločne sekunde oziroma po angleško *milli arc seconds*) [1, 3]. Navidezno in absolutno magnitudo si lahko bolje predstavljamo z analogijo uličnih svetilk. Imejmo tri svetilke, prvo z močjo 50 W, drugo z močjo 100 W in tretjo z močjo 150 W. V tem vrstnem redu jih postavimo na razdalje 100 m, 200 m in 300 m. Izmerjena gostota svetlobnega toka je v tem vrstnem redu naslednja: 0,4 mW/m², 0,2 mW/m² in 0,13 mW/m². Prva svetilka je torej navidezno najsvetlejša, vendar to še ne pomeni, da je najmočnejša (ima največji izsev). Če pa vse tri svetilke postavimo na isto razdaljo, bo tretja svetilka najsvetlejša in to nam hkrati pove, da je tudi najmočnejša. Temu bi potem ustrezala definicija absolutne magnitude.

Meritev svetlosti zvezde nam pove, kolikšna sta absolutna magnituda (izsev) zvezde in njen barvni indeks (efektivna temperatura). Za izračun absolutne magnitude pravzaprav potrebujemo še razdaljo do zvezde, za barvni indeks pa moramo, kot že rečeno, meriti razliko med izmerjenima magnitudama zvezde skozi dva različna filtra. To lahko storimo za katerokoli opazovano zvezdo. HR-diagram ustvarimo tako, da na abscisno os nanašamo barvni indeks, na ordinatno os pa absolutno magnitudo. Ko v diagram vnesemo dovolj zvezd, opazimo, da zvezde po diagramu niso razporejene enakomerno, temveč zasedajo nekaj območij, glej sliko 1. Večina zvezd leži na diagonalnem pasu, ki se imenuje glavna veja. To vejo zasedajo zvezde, ki v svojih središčih zlivajo jedra vodika v jedra helija. Lahko rečemo, da so na glavni veji zvezde v srednjih letih svojega življenja. Tudi naše Sonce spada na to vejo. Ko zvezde porabijo zalogo vodika v jedru, se začnejo počasi seliti proti veji orjakinj (nad glavno vejo). Ko te zvezde končajo svoje življenje, nekatere od njih končajo kot bele pritlikavke. To so pravzaprav ostanki nekoč aktivnih zvezdnih jeder, ki nimajo več goriva za nadaljnje zlivanje. Te zvezde najdemo pod glavno vejo. Razporeditev zvezd na glavni veji je odvisna samo od

Slika 1: Slika prikazuje HR-diagram več kot štirih milijonov zvezd znotraj razdalje 5000 svetlobnih let od Sonca. Podatki o svetlosti, barvi in oddaljenosti zvezd so vzeti iz druge različice kataloga Gaia (Gaia DR2). Slika je povzeta iz [6] ter prevedena v slovenščino. Vodoravna os prikazuje izmerjeni barvni indeks (površinsko temperaturo), v primeru misije Gaia je to BP-RP; navpična os prikazuje absolutno magnitudo (izsev), v primeru misije Gaia je to Gaia G. Na diagramu se dobro razločijo vsaj tri velike veje, na katerih se nahajajo zvezde glede na svetlost in barvo. Največja je glavna veja, na kateri leži tudi Sonce, nad njo se nahaja veja orjakinj, kamor se zvezde premaknejo, ko porabijo zalogo vodika v jedru. Spodaj levo pa je območje belih pritlikavk, ki so pravzaprav ostanki nekoč aktivnih zvezdnih jeder. V njih ni več jedrskih reakcij [1, 4].

HR-diagram ustvarimo tako, da na abscisno os nanašamo barvni indeks, na ordinatno os pa absolutno magnitudo.



njihove mase, zvezde z večjo maso se nahajajo levo zgoraj, tiste z manjšo maso pa desno spodaj. Glavna veja je na obeh straneh zaključena, to pomeni, da obstajata zgornja in spodnja meja za maso zvezde na glavni veji. Spodnja meja znaša približno 0,08 mase Sonca. To je najmanjša masa zvezde, pri kateri se lahko vodik že zliva v helij. Zgornja meja pa je ocenjena na okoli 155 mas Sonca. To so mase najmasivnejših doslej odkritih zvezd [1, 4].

V tem članku se bomo osredotočili na razsute zvezdne kopice. To so skupine, ki štejejo po nekaj deset do nekaj sto mladih zvezd. V naši Galaksiji jih najdemo več tisoč, tipične velikosti (premer) pa se gibajo med 3 in 4 pc. Eden dobrih pokazateljev, ali zvezda pripada neki zvezdni kopici, je sicer razdalja (oz. paralaksa), a ker v resnici ne poznamo razdalje do središča kopice ali njene prave velikosti, preproste omejitve glede na oddaljenost ne moremo podati. Zvezde v teh kopicah so nastale skoraj sočasno, po navadi iz istega oblaka plina, zato je njihovo lastno gibanje (angl. *proper motion*) precej podobno. Če torej zvezdam uspemo izmeriti njihovo lastno gibanje ter paralakso, lahko ugotovimo, ali neka zvezda pripada zvezdni kopici ali ne [1, 5].

Gaia in ADQL

V tem članku pokažemo, kako s pomočjo podatkov misije Gaia ustvarimo HR-diagram poljubne zvezdne kopice. Gaia, vesoljska misija Evropske vesoljske agencije (ESA), je od leta 2013 pa do danes opazovala več kot 1,8 milijarde izvorov v naši Galaksiji, vsakega vsaj enkrat. Njen katalog predstavlja največjo zbirko opazovanih objektov. Ob koncu leta 2020 je bila izdana že tretja izdaja podatkov (Gaia EDR3) s še boljšimi ocenami položajev objektov na nebu, njihovega lastnega gibanja in oddaljenosti od nas [7]. Vsi ti podatki so javno dostopni, za njihovo poizvedbo (angl. *query*) pa uporabljamo variacije jezika SQL, ki je specializiran za to bazo podatkov, to je ADQL (angl. *Astronomical Data Query Language*).

Vsak vir ima svojo edinstveno oznako in vsaj nekaj dobro določenih parametrov, tako da je podatkov v katalogu izredno veliko. Pri poizvedbi moramo zato določiti kriterije, ki jim morajo izmerjeni parametri vira ustrezati. S tem se znebimo nepotrebnih podatkov pri izpisu in tako zmanjšamo velikost izhodne datoteke ter čas procesiranja.

Do podatkovne baze Gaia lahko dostopamo na več načinov. Najpreprostejši je dostop prek spletne strani <https://gea.esac.esa.int/archive> (arhiv Gaia). Za osnovno iskanje kliknemo zavihek **Search**. To nas prestavi na spletno stran, kjer lahko delamo poizvedbe. Čeprav je mogoče operirati tudi z osnovnimi poizvedbami, prek grafičnega vmesnika, se bomo obrnili na napredno iskanje **Advanced (ADQL)**.

Vsaka poizvedba se začne z ukazom **SELECT**, za njim pa dodamo imena zelenih parametrov zvezd (npr. `parallax`, `parallax_over_error` itd.). To je torej ukaz, ki pove, katere parametre hočemo izluščiti, če so ti na voljo. Če hočemo imeti čisto vse parametre, lahko uporabimo znak `*`. Parametre, ki so na voljo, lahko najdete v literaturi [8]. Po določitvi zelenih parametrov se z obveznim ukazom **FROM** določi, katero bazo podatkov želimo upravljati (npr. `gaiadr1.gaia_source`, `gaiadr2.gaia_source`, `gaiadr3.gaia_source`). Osnovna poizvedba je videti tako:

```
SELECT *  
FROM gaiadr3.gaia_source
```

S to poizvedbo pridobimo celotno bazo podatkov, kar vzame preveč prostora, spomina in računskega časa. Ravno zato se lahko z dodatnimi ukazi rešimo podatkov, ki jih ne potrebujemo pri svojem delu. Za ukazom **SELECT** in pred zelenimi parametri lahko uporabnik vnese ukaz **TOP**, ki naj mu sledi želena število rezultatov. S tem uporabnik določi maksimalno število vrnjenih rezultatov – ko poizvedba pride do tega števila, se konča.

```
SELECT TOP 100 *  
FROM gaiadr3.gaia_source
```

S tako poizvedbo dobimo prvih sto virov iz kataloga `gaiadr3.gaia_source`. Lahko pa z ukazom **ORDER BY** te vire uredimo glede na zeleni parameter. Tako ukaz **TOP** vzame le tiste vire, ki so na začetku tabele. Ukaz **ORDER BY** opremimo še s parametrom, po katerem želimo sortirati, temu pa naj sledi še **ASC/DESC**, kjer nam **ASC** uredi tabelo tako, da vrednosti

Gaia, vesoljska misija Evropske vesoljske agencije (ESA), je od leta 2013 pa do danes opazovala več kot 1,8 milijarde izvorov v naši Galaksiji, vsakega vsaj enkrat.

naraščajo, **DESC** pa tako, da padajo. Ta ukaz je vedno zadnja vrstica poizvedbe! Primer take poizvedbe je naslednji:

```
SELECT TOP 100 *
FROM gaiaedr3.gaia_source
ORDER BY parallax ASC
```

Ta poizvedba vire uredi glede na njihovo izmerjeno paralakso, začenši z najmanjšo (oz. največjo, če uporabimo **DESC**). Če to poizvedbo dejansko izvedemo in pogledamo tabelo, bomo opazili nekaj čudnega. Če uporabimo **ASC**, je izmerjena paralaksa negativna, če uporabimo **DESC**, opazimo, da ni podatka za izmerjeno paralakso (ta ni bila določena). V nobenem od obeh primerov nam taki podatki ne pomagajo. S pomočjo ukaza **WHERE** se lahko takim problemom izognemo. S tem ukazom izberemo tiste vire, ki ustrezajo pogojem. Te zapišemo za ukazom **WHERE**. Izberemo lahko več pogojev, ki jih ločimo z ukazi **AND** ali **OR**. Uporabljajo se lahko osnovni matematični izrazi, kot so **+**, **-**, *****, **/**, **<**, **>**, **=** itd. V želenih pogojih se lahko prosto uporabljajo vse vrednosti parametrov zvezde, tudi če niso bili izbrani z ukazom **SELECT**. Tako lahko oba prej opisana problema odpravimo:

```
SELECT TOP 100 *
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE parallax > 0
AND parallax IS NOT NULL
ORDER BY parallax ASC
```

Prvi pogoj zahteva, da je vrednost paralakse pozitivna. Drugi pogoj zahteva, da ima vir določen parameter paralakse (**IS NULL** bi zahteval vire brez paralakse). V resnici bi bil za ta specifični primer dovolj le prvi pogoj. Če vir nima določene vrednosti parametra, ki je uporabljen v enem od pogojev, ta vir avtomatično ne izpolnjuje pogoja in je izločen.

Preden nadaljujemo, se ustavimo še pri rezultatu svoje poizvedbe, to je tabela. Izpis in ogled tabele sta mogoča na isti spletni strani, kjer poteka poizvedba, lahko pa se tabela tudi prenese na lokalni računalnik v več različnih formatih. Kateri format si izberemo, v resnici ni tako pomembno, pomembnejše se je zavedati, katere podatke v tabeli sploh hočemo. Kot vemo, se z večanjem velikosti tabele večja tudi njena zahteva po prostoru na trdem disku. Prav tako se ogromne tabele dalj časa odpirajo in porabijo veliko več računalniškega spomina kot manjše tabele. Zato je priporočljivo, da so tabele čim manjše in da vanje damo le tisto, kar za obdelavo podatkov zares potrebujemo.

Recimo, da nas zanimajo razdalje do najbližjih opazovanih zvezd in njihovih navideznih magnitud. Za določitev razdalje do zvezde potrebujemo paralakso (izbrali bomo parameter **parallax**), navidezno magnitudo pa že imamo v bazi (v primeru Gaie je ta merjena v treh barvah, izbrali bomo **G**-filter oziroma parameter **phot_g_mean_mag**). Ne smemo pozabiti, da se z večanjem paralakse manjša razdalja, kar pomeni, da hočemo vire z največjimi paralaksami!

```
SELECT TOP 100 parallax, phot_g_mean_mag
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE parallax > 0
AND parallax IS NOT NULL
ORDER BY parallax DESC
```

Ta poizvedba nam vrne tabelo s stotimi vrsticami in dvema stolpcema. En stolpec ima zapisane paralakse, drugi pa navidezne magnitudo virov v **G**-filtru. Velikost tabele je bistveno manjša, kot če bi hoteli vedeti vse njene parametre. Omenili smo že, da hočemo določiti razdaljo do zvezde, kar lahko naredimo kar znotraj poizvedbe. Povezavo med paralakso in razdaljo opisuje enačba (2), v poizvedbo pa jo vključimo na spodnji način:

```
SELECT TOP 100 1000/parallax AS dist, phot_g_mean_mag
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE parallax > 0
AND parallax IS NOT NULL
ORDER BY parallax DESC
```

Kateri format si izberemo, v resnici ni tako pomembno, pomembnejše se je zavedati, katere podatke v tabeli sploh hočemo.

Parametru **1000/parallax** smo nadeli novo ime **dist** (izhaja iz okrajšave angleške besede za oddaljenost, to je distance), ki se bo zapisalo v tabelo. ADQL nam torej dovoli uporabljati sestavljene izraze, kar je pametno izkoristiti.

Podatke v katalogu lahko omejimo tudi geometrijsko. S pomočjo funkcije **CIRCLE()** lahko iščemo vire v krogu okoli določenega središča. Njena praktična uporaba je prikazana spodaj:

```
SELECT *
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS',ra,dec),CIRCLE('ICRS',raC,decC, R))
```

Ta sintaksa potrebuje malo več razlage. Funkcija **CONTAINS()** pregleda, ali se vir **POINT()** (ki ima koordinate objekta, to sta rektascenzija **ra** in deklinacija **dec**) nahaja znotraj kroga, ki ga opiše funkcija **CIRCLE()**. **CIRCLE()** ima središče v koordinatah **raC** in **decC** in radij **R** (v enotah kotnih stopinj). Rektascenzija in deklinacija skupaj tvorita lego objekta na nebu. Ti koordinati izhajata iz ekvatorialnega koordinatnega sistema, kjer se rektascenzija praviloma meri v enotah ur, minut in sekund ter raste od pomladišča proti vzhodu, deklinacija pa se meri v enotah kotnih stopinj, kotnih minut in kotnih sekund in ima pozitivne vrednosti za objekte severno od nebesnega ekvatorja ter negativne vrednosti za objekte južno od nebesnega ekvatorja. Če se vir nahaja znotraj tega kroga, funkcija **CONTAINS()** vrne vrednost **1**. **CONTAINS()** vrne vrednost **0**, če je vir zunaj tega kroga. Podoben zapis imamo, če nas zanima območje znotraj nekega pravokotnika, za kar uporabimo funkcijo **BOX()**:

```
SELECT *
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS',ra,dec),BOX('ICRS',raC,decC, a, b))
```

Tukaj sta *a* in *b* dolžini stranic v enotah kotnih stopinj.

Izdelava HR-diagrama zvezdne kopice

V tem poglavju je prikazan primer izdelave HR-diagrama razsute zvezdne kopice M45 (Plejade oziroma Gostosevci), ki se nahaja v ozvezdju Bika. Pri tem uporabljamo podatke iz arhiva Gaia. Z uporabo vedno strožjih in vedno bolj specifičnih filtrov iz baze podatkov poskušamo najti zvezde, ki resnično pripadajo izbrani kopici. V nadaljevanju bodo predstavljene nekatere točke iz vaje pri predmetu Astronomija 1, ki so jo študenti drugega letnika fizike izvajali na daljavo. Nekateri deli so za mlajše bralce poenostavljeni.

1. S pomočjo geometrične funkcije **CIRCLE()** napiši poizvedbo ADQL, ki izlušči vire znotraj tega območja. Pomisli, katere podatke potrebuješ za izris HR-diagrama, ter ga nariši.

V spletnem arhivu Gaia s pomočjo funkcije **CIRCLE()** napišemo poizvedbo ADQL, ki izbere vire znotraj kroga, katerega središčne koordinate najdemo v arhivu Simbad [9]. Iščemo torej rektascenzijo, deklinacijo, kotni polmer in paralakso objekta M45. Te znašajo v tem zaporedju: $56,75^\circ$, $+24,12^\circ$, $1,5^\circ$ ter $7,364$ mas. Za izris HR-diagrama potrebujemo absolutno magnitudo zvezd, ki jo izračunamo iz paralakse (**parallax**) in navidezne magnitude (**phot_g_mean_mag**) po enačbi (1), ter barvni indeks (**bp_rp**), ki ga najdemo kot enega izmed parametrov kataloga Gaia.

```
SELECT bp_rp, 5 + phot_g_mean_mag - 5*LOG10(1000/(parallax)) AS mag, 1000/parallax AS
dist, phot_g_mean_mag
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE 1= CONTAINS (POINT('ICRS', ra, dec), CIRCLE('ICRS', 56.75, 24.12, 1.5))
AND parallax > 0
AND phot_g_mean_mag IS NOT NULL
AND bp_rp IS NOT NULL
ORDER BY phot_g_mean_mag ASC
```

* Poizvedbo je ustvaril Marko Urbanč, študent fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

Iz generirane tabele ustvarimo HR-diagram. Shranimo jo lahko v formatu **.fits** (angl. *Flexible Image Transport System*). Za risanje lahko uporabljamo različna programska orodja. Eno takih

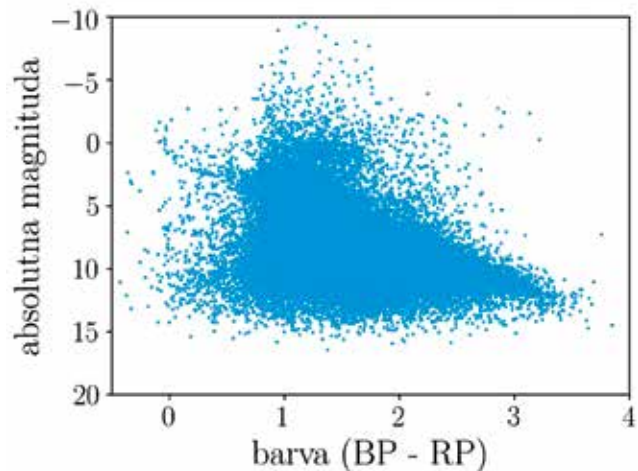
V tem poglavju je prikazan primer izdelave HR-diagrama razsute zvezdne kopice M45 (Plejade oziroma Gostosevci), ki se nahaja v ozvezdju Bika.

je programski jezik Python, v katerem z uporabo ustreznih knjižnic rišemo dvo- ali trirazsežne grafe. To naredimo s knjižnico `matplotlib.pyplot`. V nadaljevanju je izrezek programske kode, s katero narišemo HR-diagram:

```
#V tej datoteki je opisano, kako se odpre .fits datoteko v pythonu in narise HR-diagram
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt #knjiznica za risanje
from astropy.io import fits #knjiznica za odpiranje .fits in dostop do tabele
# Odpremo .fits datoteko in njeno tabelo
hdul = fits.open('M45.fits')
data = hdul[1].data
# Dostop do stolpcev, ki imajo svoje ime
mag = data['mag'] #absolutna magnituda
bp_rp = data['bp_rp'] #barvni indeks
dist = data['dist'] #oddaljenost
phot_g_mean_mag = data['phot_g_mean_mag'] #navidezna magnituda
#Risemo diagram
plt.scatter(bp_rp, mag, s=2, c='blue') # Funkcija, ki narise tocke glede na njene koordinate.
#Možnost s določi velikost pike, možnost c pa barvo pike
#Poimenovanje osi
plt.xlabel('barva (BP - RP)')
plt.ylabel('absolutna magnituda')
#y-os obrnemo, tako so bolj pozitivne vrednosti nižje na grafu
plt.gca().invert_yaxis()
#Določanje meja pri izrisu grafa
plt.xlim([-0.5, 4])
plt.ylim([20, -10])
plt.show() #Funkcija, ki prikazuje, kaj smo do zdaj narisali na graf
plt.savefig() #S tem ukazom lahko shranimo sliko. Pri tem pazimo, da nismo prej zagnali plt.
show(), saj nam lahko izbrise, kar je bilo do tukaj narisano
```

Slika 2: HR-diagram zvezdne kopice M45, izrisan iz zgornje poizvedbe v podatkovni bazi Gaia. Pri poizvedbi smo iskali zvezde, katerih paralaksa je večja od 0, iskanje zvezd pa smo omejili na krog s polmerom $1,5^\circ$ okoli središča kopice.

Avtorica slike je Katarina Lodrant, študentka fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.



Dobljeni HR-diagram je prikazan na sliki 2 zgoraj. Opazimo, da smo zajeli veliko preveč zvezd – poizvedba je vrnila 43.010 rezultatov. V nadaljevanju vaje skušamo iz teh izluščiti zvezde, ki dejansko pripadajo izbrani kopici.

2. Nariši diagram lastnega gibanja (angl. *proper motion*) ekvatorialnih koordinat pm_{dec} v odvisnosti od pm_{ra} . Imeni sta okrajšavi za lastno gibanje deklinacije (angl. *proper motion declination*) in lastno gibanje rektascenzije (angl. *proper motion right ascension*). Naredi novo poizvedbo, v kateri zahtevaš te podatke, in poišči najgostejše območje na tem grafu. Okoli tega območja izriši krog in okvirno določi njegovo središče in polmer ter to predstavi na skupnem grafu.

V tem primeru moramo, po zgledu prejšnje naloge, poiskati še parametra pm_{ra} in pm_{dec} . To dobimo z majhno spremembo v prvi vrstici poizvedbe ADQL:

```
SELECT bp_rp, 5 + phot_g_mean_mag - 5*LOG10(1000/(parallax)) AS mag, 1000/parallax AS
dist, phot_g_mean_mag, pmra, pmdec
```

Generirano tabelo ponovno shranimo v formatu **.fits** ter v zgornji kodi Pythona zgolj dodamo nove stolpce in na mesto HR-diagrama rišemo graf lastnega gibanja.

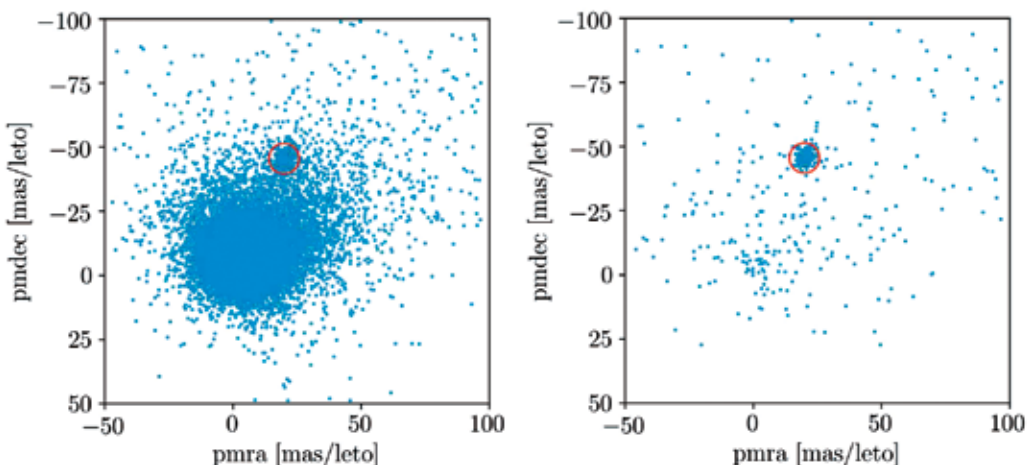
```
pmdec = data['pmdec'] #lastno gibanje deklinacije
pmra = data['pmra'] #lastno gibanje rektascenzije
plt.scatter(pmra, pmdec, s=2, c='blue') # Funkcija, ki narise tocke glede na njene koordina-
te. Moznost s doloci velikost pike, moznost c pa barvo pike
#Poimenovanje osi
plt.xlabel('pmra [mas/leto]')
plt.ylabel('pmdec [mas/leto]')
#y-os obrnemo, tako so bolj pozitivne vrednosti nizje na grafu
plt.gca().invert_yaxis()
#Dolocanje meja pri izrisu grafa
plt.xlim([-50, 100])
plt.ylim([50, -100])
plt.show() #Funkcija, ki prikaze, kaj smo do zdaj narisali na graf
plt.savefig() #S tem ukazom lahko shranimo sliko. Pri tem pazimo, da nismo prej zagnali plt.
show(), saj nam lahko izbrise, kar je bilo do tukaj narisano
```

Pri poizvedbi lahko paralakso omejimo na 7 mas, tako že od začetka zmanjšamo število virov. Brez te omejitve je virov, kljub uporabi funkcije CIRCLE(), bistveno preveč. To se lepo vidi na sliki 1. Vseeno moramo paziti, da je paralaksa primerno manjša od paralakse kopice M45, sicer bomo porezali območje, ki nas pravzaprav zanima. To omejitev spremenimo v poizvedbi ADQL s spremembo vrstice za paralakso v:

```
AND parallax > 7
```

Rišemo grafa lastnega gibanja pri omejitvi: paralaksa > 0 mas in paralaksa > 7 mas, glej sliko 3. Na sliki 3 levo opazimo osrednji večji skupek zvezd s podobnimi hitrostmi in manjši skupek, ki leži desno zgoraj, obkrožen z rdečo. Da so zvezde kopice M45 zares tiste iz manjšega skupka, rišemo enak graf še za podatke, ki jih dobimo z izbrano dodatno omejitvijo, da naj bo paralaksa večja od 7 (paralaksa kopice znaša 7,36 mas), glej sliko 3 desno. Tako identificiramo območje lastnega gibanja zvezd, ki pripadajo kopici. Koordinate območja dobimo z izračunom mediane vseh vrednosti na grafu 3 desno. Središče rdečega kroga je pri koordinatah: $pmra_0 = 19,99$ mas/leto, $pmdec_0 = -45,45$ mas/leto. Izračunamo tudi polmer rdečega kroga. To storimo tako, da zajamemo 70 % točk, ki so najbližje ocenjenemu središču. To nam da polmer kroga $r = 4$ mas/leto.

Pri poizvedbi lahko paralakso omejimo na 7 mas, tako že od začetka zmanjšamo število virov.



Slika 3: Grafa lastnega gibanja ekvatorialnih koordinat pri dveh različnih omejitvah vrednosti paralakse (levo: paralaksa > 0 mas, desno: paralaksa > 7 mas). Z rdečo so obkrožene zvezde, ki po lastnem gibanju pripadajo zvezdni kopici M45.

Avtorica slike je Katarina Lodrant, študentka fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

3. S pomočjo funkcije `CIRCLE()` izloči vse vire zunaj kroga, ki si ga določil v prejšnji nalogi. Iz preostalih zvezd nariši nov HR-diagram.

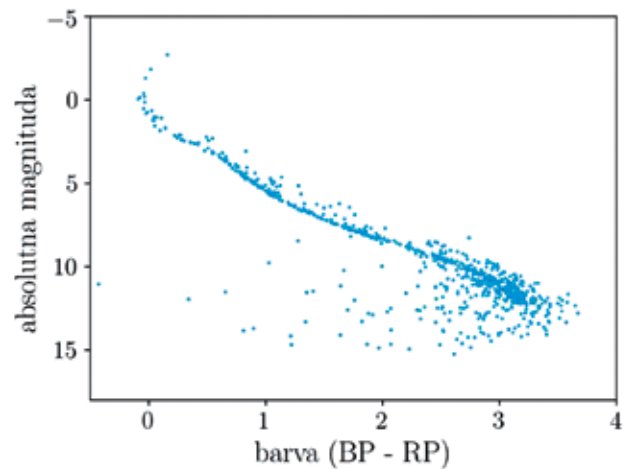
Z izračunanimi vrednostmi ustvarimo novo poizvedbo v podatkovni bazi ter izrišemo nov HR-diagram, glej sliko 4. Število zvezd smo ustrezno zmanjšali – poizvedba jih vrne 787, glavna veja na HR-diagramu je videti jasnejša.

```
SELECT bp_rp , 5 + phot_g_mean_mag - 5* LOG10(1000/parallax) AS mag, 1000/parallax
AS dist, phot_g_mean_mag, pmdec, pmra
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS', ra, dec), CIRCLE('ICRS', 56.75, 24.12, 1.5))
AND 1=CONTAINS(POINT(pmra, pmdec), CIRCLE(19.99, -45.45, 4))
AND parallax > 7
AND phot_g_mean_mag IS NOT NULL
AND bp_rp IS NOT NULL
ORDER BY phot_g_mean_mag ASC
```

* Poizvedbo je ustvaril Marko Urbanč, študent fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

Slika 4: HR-diagram zvezdne kopice M45 iz druge poizvedbe v podatkovni bazi Gaia ADQL. Za izbiro zvezd smo uporabili omejitve po lastnem gibanju ekvatorialnih koordinat, PMRA in PMDEC.

Avtorica slike je Katarina Lodranc, študentka fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.



4. Podatek `parallax_over_error` nam pove razmerje med izmerjeno paralakso in njeno napako oz. obratno vrednost relativne napake paralakse. S pomočjo napake paralakse lahko izračunamo tudi relativno napako oddaljenosti:

$$d_{rel} = \frac{\Omega_{rel}}{1 - \Omega_{rel}}. \quad (3)$$

V podatkih boste morda opazili zvezde, ki so očitno preveč oddaljene od kopice. Narišite diagram oddaljenosti (ali paralakse) v odvisnosti od njene napake. Količina mora biti omejitev relativne napake, da izboljšamo svojo selekcijo? Ocenite tudi medsebojne oddaljenosti zvezd v kopici s pomočjo pridobljenih razdalj ter ekvatorialnih koordinat, s katerimi lahko izračunamo pozicijo zvezde v prostoru:

$$\begin{aligned} x &= d \cos(\alpha) \cos(\delta) \\ y &= d \sin(\alpha) \cos(\delta) \end{aligned} \quad (4)$$

$z = d \sin(\delta)$ kjer je Zemlja v središču koordinatnega sistema,

α je rektascenzija, δ je deklinacija. Medsebojne razdalje med dvema zvezdama računaj po naslednji formuli:

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (5)$$

Najprej naredimo poizvedbo, s katero izračunamo relativno napako oddaljenosti in izvedemo transformacijo po enačbi (4).


```

SELECT bp_rp, 5 + phot_g_mean_mag - 5*LOG10(1000/parallax) AS mag,
1000/parallax AS dist, parallax, (parallax/parallax_over_error) AS p_error,
((parallax/parallax_over_error)/(1 -(parallax/parallax_over_error))) AS d_error, pmra, pmdec,
ra, dec,
(1000/parallax)*COS(ra)*COS(dec) as x,
(1000/parallax)*SIN(ra)*COS(dec) as y,
(1000/parallax)*SIN(dec) as z
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE 1=CONTAINS (POINT('ICRS', ra, dec), CIRCLE('ICRS', 56.75, 24.12, 1.5))
AND 1= CONTAINS(POINT(pmra, pmdec), CIRCLE(20, -45.5, 2))
AND parallax > 0
AND (parallax/parallax_over_error) < 0.6
AND phot_g_mean_mag IS NOT NULL
AND bp_rp IS NOT NULL
ORDER BY phot_g_mean_mag ASC

```

* Poizvedbo je ustvaril Marko Urbanč, študent fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

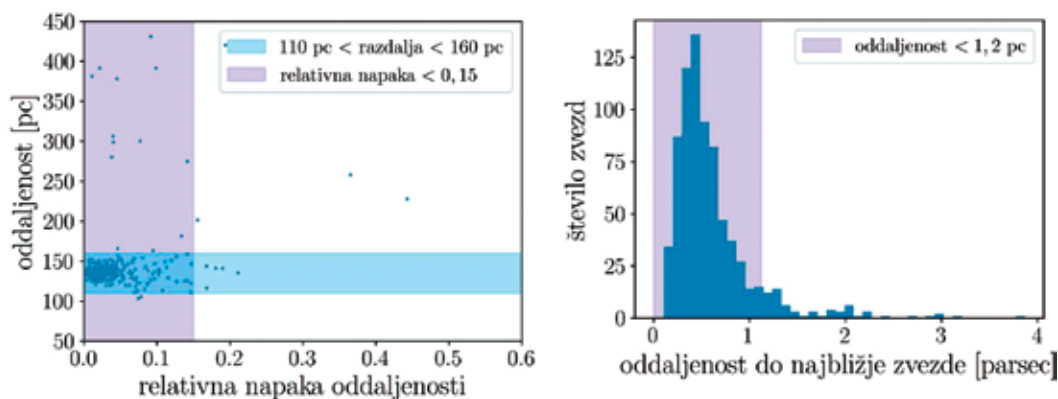
Med zvezdami, ki smo jih izbrali, so morda še vedno takšne, ki so preveč oddaljene od kopice. Za namen filtriranja narišemo graf odvisnosti oddaljenosti $d = 1/p$ od relativne napake oddaljenosti d_{rel} (glej enačbo 3), ki ga prikazuje slika 5 levo. Da bi zajeli le zvezde, ki pripadajo izbrani kopici, pri naslednji poizvedbi glede na oceno z grafa omejimo razdaljo na interval med 110 in 160 pc, relativno napako oddaljenosti pa lahko navzgor omejimo z 0,15. S takimi omejitvami izločimo zvezde, ki na grafu očitno odstopajo od glavnega zgoščenega območja.

Naredimo še zadnjo omejitev. Za zvezde, ki smo jih dobili s prejšnjo omejitvijo, izračunamo povprečno razdaljo do najbližje sosedice d_{12} po enačbi (5). Rezultate prikažemo s histogramom na sliki 5 desno. V jeziku Python rišemo histograme po spodnjem zgledu [10]:

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
n, bins, patches = plt.hist(x, 50, density=True, facecolor='g', alpha=0.75)
plt.grid(True)
plt.show()

```



Slika 5: (Levo) Graf odvisnosti oddaljenosti zvezd od relativne napake razdalje. V preseku obarvanih pravokotnikov so zvezde, za katere predvidevamo, da so res del zvezdne kopice M45.

(Desno) Histogram oddaljenosti zvezd od svoje najbližje sosedice. Zvezd zunaj obarvanega pravokotnika v naslednjem približku ne bomo upoštevali, saj so preveč oddaljene od najbližje sosedice.

Avtorica slike je Katarina Lodrant, študentka fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

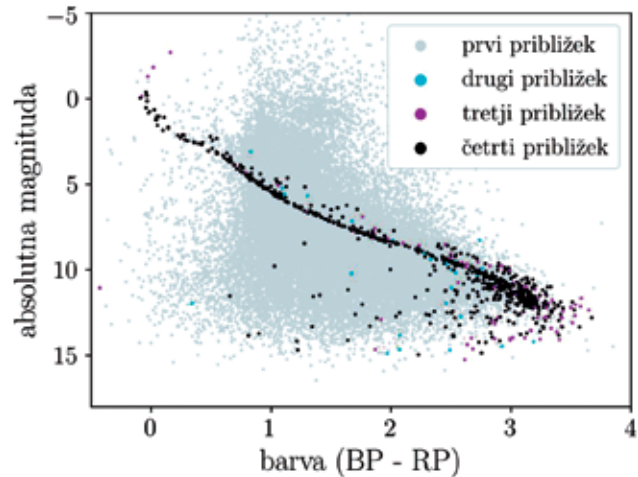
Za konec na skupni graf na sliki 6 naneseemo vse HR-diagrame, ki smo jih narisali po vsaki dodatni omejitvi. V prvem približku smo se omejili na krog okoli koordinat kopice, prebranih iz vira Simbad [9], v drugem približku smo uporabili lastno gibanje ekvatorialnih koordinat, v tretjem smo izločili zvezde, ki so očitno preveč oddaljene od celotne kopice, v četrtem pa zvezde, ki so preveč oddaljene od najbližje sosedice. Zvezde, ki pripadajo našemu končnemu

Da bi zajeli le zvezde, ki pripadajo izbrani kopici, pri naslednji poizvedbi glede na oceno z grafa omejimo razdaljo na interval med 110 in 160 pc, relativno napako oddaljenosti pa lahko navzgor omejimo z 0,15.

diagramu, so na sliki 6 narisane s črnimi točkami. Kaj nam pravzaprav pove končni HR-diagram? Ugotovimo lahko, da kopico sestavljajo zvezde, ki imajo absolutne magnitudo v razponu med 0 in 15 mag, barve pa med 0 in 3,5 mag. Če si pomagamo s sliko 1, vidimo, da gre večinoma za zvezde na glavni veji, ki obsegajo vse spektralne tipe med B in M. Hkrati lahko rečemo, da so to zvezde, katerih izsev meri od sto izsevov Sonca pa vse do zgolj tisočinke izseva Sonca. Na sliki 6 vidimo, da ima glavna veja nekakšen zavoj v desno. Lega tega zavoja nam pove tudi oceno starosti zvezdne kopice. Če je zavoj v precej modrem delu glavne veje, gre za zelo mlado zvezdno kopico, kot je to v našem primeru. Starost kopice M45 je ocenjena na okoli sto milijonov let [11]. Če bi želeli natančno oceniti starost, bi morali na HR-diagram prilagoditi t. i. izohrone, to so teoretične krivulje, ki predstavljajo zvezdne populacije enakih starosti [12].

Slika 6: Približki HR-diagramov zvezdne kopice M45.

Avtorica slike je Katarina Lodrant, študentka fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.



Zaključek

Ugotovili smo, da lahko prosto dostopno bazo podatkov Gaia uporabimo za izdelavo HR-diagrama poljubne zvezdne kopice. Z uporabo vedno strožjih in vedno bolj specifičnih filtrov smo iz baze podatkov uspeli poiskati zvezde, ki resnično pripadajo kopici M45. Za poizvedbo v bazi podatkov smo uporabili jezik ADQL, pri risanju pa jezik Python. V prvem približku smo se omejili na krog okoli koordinat kopice, prebranih iz vira Simbad, v drugem približku smo uporabili lastno gibanje ekvatorialnih koordinat, v tretjem smo izločili zvezde, ki so očitno preveč oddaljene od celotne kopice, v četrtem pa zvezde, ki so preveč oddaljene od najbližje sosedice. Končni HR-diagram nam pove, da je M45 mlada zvezdna kopica, ki vsebuje zvezde z absolutnimi magnitudami v razponu med 0 in 15 mag ter barve med 0 in 3,5 mag. Gre večinoma za zvezde na glavni veji, ki obsegajo vse spektralne tipe med B in M in katerih izsev meri od sto izsevov Sonca pa vse do zgolj tisočinke izseva Sonca.

Viri

- [1] Avsec, F. in Prosén, M. (2006). *Astronomija*. Ljubljana: DMFA-založništvo.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram (5. 4. 2021)
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnitude_\(astronomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnitude_(astronomy)) (5. 4. 2021)
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Main_sequence (5. 4. 2021)
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Open_cluster (5. 4. 2021)
- [6] <https://sci.esa.int/web/gaia/-/60198-gaia-hertzsprung-russell-diagram> (3. 4. 2021)
- [7] <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/index.html> (5. 4. 2021)
- [8] https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/Gaia_archive/chap_datamodel/sec_dm_main_tables/ssec_dm_gaia_source.html (5. 4. 2021)
- [9] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> (5. 4. 2021)
- [10] https://matplotlib.org/stable/gallery/pyplots/pyplot_text.html#sphx-glr-gallery-pyplots-pyplot-text-py (5. 4. 2021)
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pleiades> (5. 4. 2021)
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_isochrone (5. 4. 2021)