

# Uporaba programov Virtualnega observatorija za študijo jate galaksij Berenikini kodri

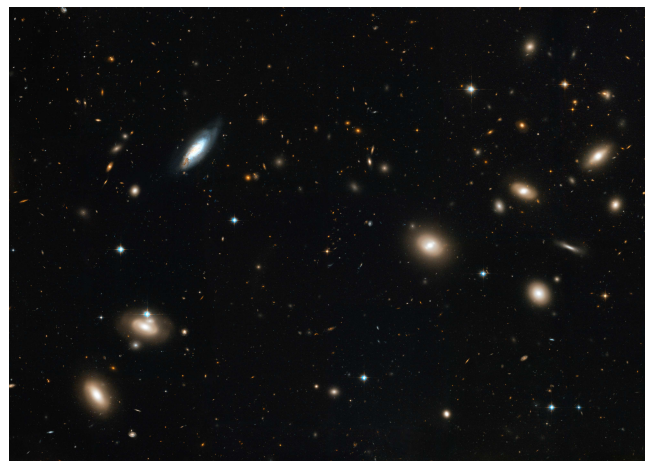
↓↓↓

DUNJA FABJAN

→ Galaksije, ki jih opazujemo na nočnem nebu, niso naključno razporejene po nebesnem svodu. Med razvojem vesolja se pod vplivom gravitacije združujejo v večje sestave, ki jim pravimo skupine in jate galaksij. Skupine sestavlja manj članic, okrog 50 različnih galaksij, jate pa so bogatejše in vsebujejo tudi do tisoč galaksij. To je tudi primer jate Berenikini kodri (uradno Abell 1656), kjer bomo z vzorcem približno 500 galaksij ocenili nekatere njene osnovne lastnosti.

Pri opazovanjih jat moramo najprej razčistiti, ali se na sliko ni prikradla kakšna bližnja ali bolj oddaljena galaksija, ki se po naključju nahaja vzdolž smeri pogleda. Potrebna so torej dodatna opazovanja gostote svetlobnega toka posamične galaksije v različnih valovnih dolžinah (spekter galaksije). V razčlenjeni svetlobi so prisotne črte, iz katerih lahko s pomočjo Hubblovega zakona razberemo razdaljo galaksije.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Preizkusite sami učinek rdečega premika na spekter galaksije na spletni strani skupine za astronomsko izobraževanje Univerze Nebraska-Lincoln: <http://astro.unl.edu/classaction/animations/cosmology/galacticredshift.html>.



**SLIKA 1.**

Jata galaksij Berenikini kodri (Abell 1656), ki jo je posnel vesoljski teleskop Hubble. Jata se nahaja na razdalji približno 300 milijonov svetlobnih let, v premeru pa meri okrog 20 milijonov svetlobnih let. Avtorstvo: NASA, ESA in Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

Hubbllov zakon nam namreč pove, da se zaradi širjenja vesolja galaksije od nas oddaljujejo. Hitrost oddaljevanja galaksij vzdolž smeri pogleda (radialna hitrost galaksij,  $v_{rad}$ ) je premo sorazmerna oddaljenosti galaksije,  $v_{rad} = H_0 \cdot d$ , kjer premo sorazmerje določa Hubblova konstanta  $H_0$ . Zaradi samega širjenja vesolja pa se spreminja valovna dolžina svetlobe, ki jo prejemamo od galaksije. Pri oddaljevanju ga-

laksije so karakteristične črte v spektru pomaknjene proti višjim valovnim dolžinam, torej proti rdeči svetlobi (zato to označujemo z besedno zvezo rdeči premik). Rdeči premik  $z$  lahko opišemo s formulo

$$\blacksquare z = \frac{\lambda_{op} - \lambda_{odd}}{\lambda_{odd}} \simeq \frac{H_0 \cdot d}{c},$$

kjer sta  $\lambda_{op}$  in  $\lambda_{odd}$  opazovana oziroma oddana valovna dolžina objekta (galaksije),  $H_0 \cdot d$  je radialna hitrost galaksije,  $c$  hitrost svetlobe. Skrajni desni del enačbe velja pri dovolj majhnih rdečih premikih.

Z meritvijo rdečega premika lahko sklepamo, ali je galaksija del jate: galaksije na približno istem rdečem premiku so tudi na približno isti razdalji, in če se nahajajo na istem območju neba, so zelo verjetno del jate.

Poleg hitrosti zaradi širjenja vesolja pa imajo galaksije tudi svoje lastno gibanje. Znotraj jate so namreč njihove hitrosti reda velikosti več 100 km/s, gibljejo pa se neurejeno v vse smeri. Meritve radialnih hitrosti bodo zato pokazale (Maxwellovo) porazdelitev okrog središčne vrednosti. Vrh porazdelitve bo na povprečnem rdečem premiku jate (oziroma pri hitrosti  $v_{rad} = z \cdot c$ ). Povprečno hitrost galaksij znotraj jate pa določimo s pomočjo polovične širine porazdelitve na polovični višini,  $\sigma_{rad}$ .<sup>2</sup>

Pri opazovanjih moramo biti pozorni, da je naš vzorec čimbolj popoln in da se nam ne izmuznejo šibkejše galaksije. Če je vzorec nepopoln, bi lahko bile naše končne ugotovitve napačne. V primeru jate Berenikini kodri, ki so jo opazovali v pregledu neba SDSS, so ocenili, da je popolnost vzorca dovolj visoka do mejne magnitude 17,77 (v r filtru). Pri višjih magnitudah pa so zaznali premalo šibkih galaksij in zato vzorec ni več popoln.

Z uporabo jat galaksij je leta 1933 švicarski astronom Fritz Zwicky prvi sklepal o prisotnosti temne snovi in to približno 40 let, predno je svoje meritve in ugotovitve o prisotnosti temne snovi v galaksijah zapisala astronomka Vera Rubin. Zwicky je svojo razlago podal takole. Na nebu lahko opazimo veliko jat galaksij. Sklepamo, da ne gre za objekte šele v razvoju, marveč za stabilne strukture in si lahko za oceno njihove mase pomagamo z virialnim teo-

remom. Pri tem predpostavimo, da je porazdelitev galaksij v jati sferna in da je jata v dinamičnem ravnovesju. Virialni teorem nam pove, da je povprečna gravitacijska energija takega sistema ( $W_g$ ) enaka negativni vrednosti dvakratnika povprečne termične (kinetične) energije sistema ( $W_k$ ), torej  $W_g = -2W_k$ . Ker sta gravitacijska energija  $W_g = -\frac{3}{5} \frac{G \cdot M^2}{R}$  in kinetična energija galaksij  $W_k = \frac{1}{2} M \cdot 3\sigma_{rad}^2$ , lahko izrazimo maso sistema  $M$  kot

$$\blacksquare M = \frac{5\sigma_{rad}^2 R}{G},$$

kjer sta  $R$  radij jate in  $G$  gravitacijska konstanta.

V prvem približku bi lahko maso takega objekta ocenili s seštevanjem mase galaksij, ki jih vidimo na astronomskem posnetku in za katere sklepamo, da pripadajo jati. Toda Zwicky je opazil, da je masa, izračunana z virialnim teoremom, bistveno (v njegovi oceni celo nekaj 100-krat) večja. Sklepal je, da mora obstajati temna snov, ki jato drži skupaj, saj bi se galaksije v obratnem primeru porazgubile po prostoru. Danes vemo, da je okrog 85% mase jate galaksij v obliki temne snovi, nekaj več kot 10% v obliki vročega plina, manj kot 5% pa v zvezdah in galaksijah.

Virialni teorem na podoben način uporabimo za oceno mase gravitacijsko vezanih sistemov, kot so zvezde ali kroglaste zvezdne kopice, le da pri prvih upoštevamo termično energijo plina, pri drugih pa kinetično energijo zvezd.

V nadaljnjem besedilu predstavljamo vajo za izračun povprečnega rdečega premika jate, povprečne hitrosti galaksij v jati ter maso celotne jate. Vaja je razdeljena na devet točk, vsaka pa vsebuje še navodila za uporabo ukazov dveh programov Virtualnega observatorija. **Virtualni observatorij** je mednarodna mreža, pri kateri sodelujejo astronomska podatkovna središča, ki razvijajo skupno programsko opremo in platformo in nam omogočajo, da obilico podatkov zemeljskih in vesoljskih teleskopov raziščemo, povežemo, obdelamo in prikažemo.

### Študij jate galaksij Berenikini kodri (Abell 1656)

Avtorja: Giulia Iafate in Massimo Ramella, Tržaški astronomski observatorij

<sup>2</sup>V astronomiji s črko  $\sigma$  označimo »disperzijo hitrosti« (angl. *velocity dispersion*), ki je enaka standardni deviaciji porazdelitve hitrosti v primeru, ko je povprečna hitrost objektov enaka nič.





15

nadaljevanje  
s strani

Uporabljeni programi: Aladin<sup>3</sup>, TOPCAT<sup>4</sup>

**Cilj.** Raziskati jato galaksij Berenikini kodri (Abell 1656) z uporabo podatkov in orodij Virtualnega observatorija (VO) ter s hitrim postopkom oceniti povprečni rdeči premik jate in disperzijo hitrosti galaksij v jati ter tako pridobiti oceno njene mase.

1. **Odpri sliko jate A1656** v vsenebnem barvnem atlasu (*Allsky color atlas*) programa Aladin.
  - Vnesi napis A1656 v okno Location, nato klikni SDSS.
2. Predlagamo uporabo funkcije zoom za **prikaz vidnega polja velikosti približno 1,5°**.
  - Zoom drsnik najdeš na dnu strani desno, velikost vidnega polja FOV (angl. *field of view*) je zapisana v spodnjem delu slike.

Na razdalji, kjer se nahaja jata Berenikini kodri, je 40' enakovrednih 1,1 Mpc<sup>5</sup> (pri uporabi sledečih kozmoloških parametrov:  $H_0 = 71$  km/s/Mpc,  $\Omega_\Lambda = 0.73$ ,  $\Omega_M = 0.27$ ), kar je dovolj veliko območje za našo vajo.

*Namig.* Velikost območja na sliki lahko preveriš tako, da s pomočjo gumba »dist« narišeš črto dolžine 40'.

*Namig.* Klikni na gumb pan v primeru, da bi želel sliko premakniti oziroma jo znova postaviti na sredino ekrana.

3. **Naloži katalog SDSS-DR9** iz serverja All Vizier catalog.
  - **File** → **Open...**; **Surveys** (desno na seznamu Catalog servers) izberi SDSS-DR9; radij 40', odkljukaj »retrieve all columns« (pridobi vse stolpce in klikni SUBMIT).

S filtrom v SDSS katalogu izberi samo galaksije (odstrani zvezde in ostale izvore):

<sup>3</sup>Interaktivni nebesni atlas Aladin (beri Aladèn, po francosko) je prosto dostopen na spletni povezavi <http://aladin.u-strasbg.fr/>.

<sup>4</sup>Program TOPCAT je prostodostopen na spletni povezavi <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>.

<sup>5</sup>Mpc označuje 10<sup>6</sup> parsekov (pc) oziroma en mega parsek. Parsek (paralaksa ene ločne sekunde) je ena izmed osnovnih astronomskih enot za razdaljo in meri  $3,08 \cdot 10^{16}$  m.

- **Catalog** → **Create a filter** → **Advanced mode**; **Columns** → **Columns in loaded catalogs**; izberi »CL« in vnesi ukaz  $\{c\}=3 \{draw\}$ . Uporabi funkcijo »MATH«, če potrebuješ vnos oklepajev »{}«; klikni **Apply**.

V okencu filtra izvozi (*Export*) filtrirani katalog na novo ravnino in ga preimenuj v SDSSGalaxies (z desnim klikom na izbrano ravnino lahko spreminjaš ime, barvo ter simbole v oknu lastnosti – *properties*). Za bolj jasen prikaz svetujemo, da pušiš na desnem seznamu samo obarvano ravnino SDSS9 in ravnino SDSSGalaxies.

#### 4. Prenesi filtrirani katalog v aplikacijo TOPCAT.

- Zaženi program TOPCAT; izberi ravnino SDSSGalaxies v Aladinu in klikni na malo parabolično anteno v spodnjem desnem kotu aplikacije Aladin.

#### 5. Ustvari niz galaksij s fotometričnimi podatki (rPmag) v SDSS.

Ustvari niz galaksij (poimenuj ga MAG\_LIMITED), ki ga bodo sestavljale galaksije z magnitudami rPmag, ki so svetlejše od omejitve v popolnosti za spektroskopski vzorec SDSS,  $rPmag_{lim} = 17,77$ .

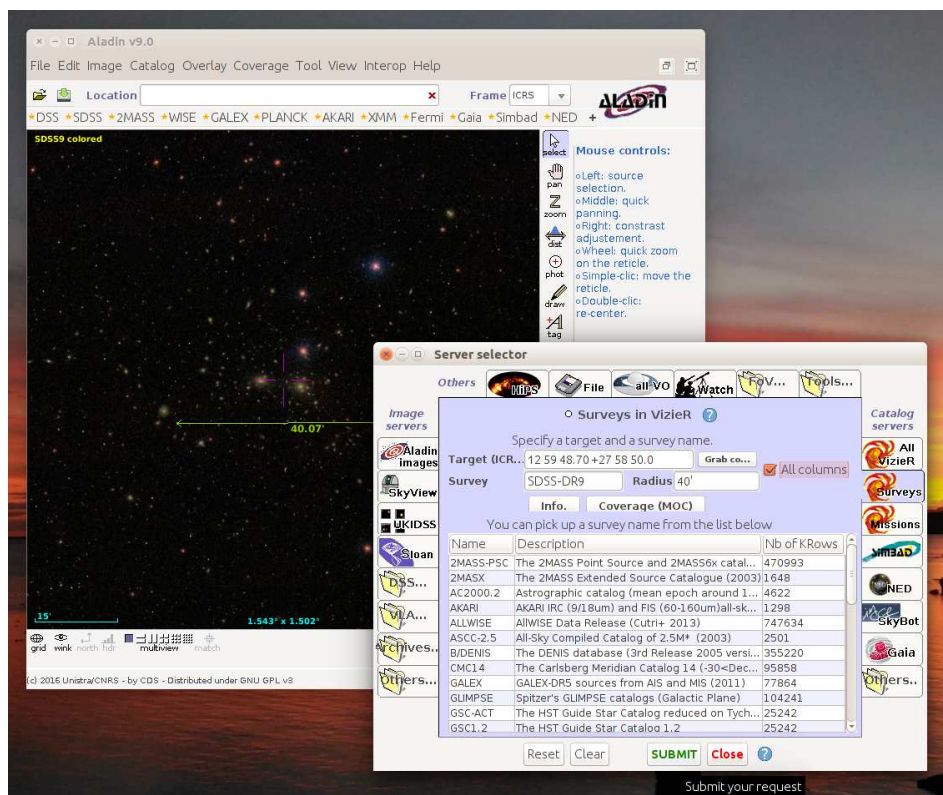
- **Views** → **Row Subsets** ter v oknu subset klikni na zeleni križec. Vnesi ime niza ter izraz  $\$83 \leq 17.77$ .

Preveri velikost svojega vzorca ( $N_{MAG\_LIMITED} = 648$ ).

*Pozor.* TOPCAT ne razlikuje med velikimi in malimi črkami, SDSS pa vsebuje tako magnitude rPmag kot rPmag. V tem primeru je potrebno uporabiti \$ID (identifikacijsko polje) posamičnega stolpca raje kot njegovo ime. \$ID stolpcev si lahko ogledate z **Views** → **Column Info**.

Ustvari manjši vzorec iz vzorca galaksij, omejenih v magnitudi in za katere obstaja vrednost rdečega premika (zsp) v SDSS. Ustvari podvzorec Z znotraj te omejitve v popolnosti vzorca in za galaksije z rdečim premikom.

- Klikni na zeleni križec in vnesi izraz  $MAG\_LIMITED \& \text{zsp} > 0$ ; subset name Z.



SLIKA 2.

Slika jate A1656 v programu Aladin. Na sliki je označena velikost polja ter okno za izbiro kataloga pregleda neba SDSS-DR9.

Preveri velikost vzorca ( $N_Z = 482$ ). Opaziš lahko, da je vzorec manj kot 100% popoln v rdečem premiku ( $482/648 = 74\%$ ).

## 6. Posreduj vzorec Z Aladinu.

- V glavnem oknu programa TOPCAT izberi **Row Subset: Z; Interop → Broadcast table**.

Preimenuj ga v Z v Aladinovem desnem seznamu in pregledj. Za boljši pregled lahko odstraniš SDSSGalaxies.

## 7. Pridobi povprečno radialno hitrosti in disperzijo hitrosti za jato galaksij Berenikini kodri. V TOPCATu spremeni rdeči premik v radialne hitrosti ( $v = c \cdot zsp$ ).

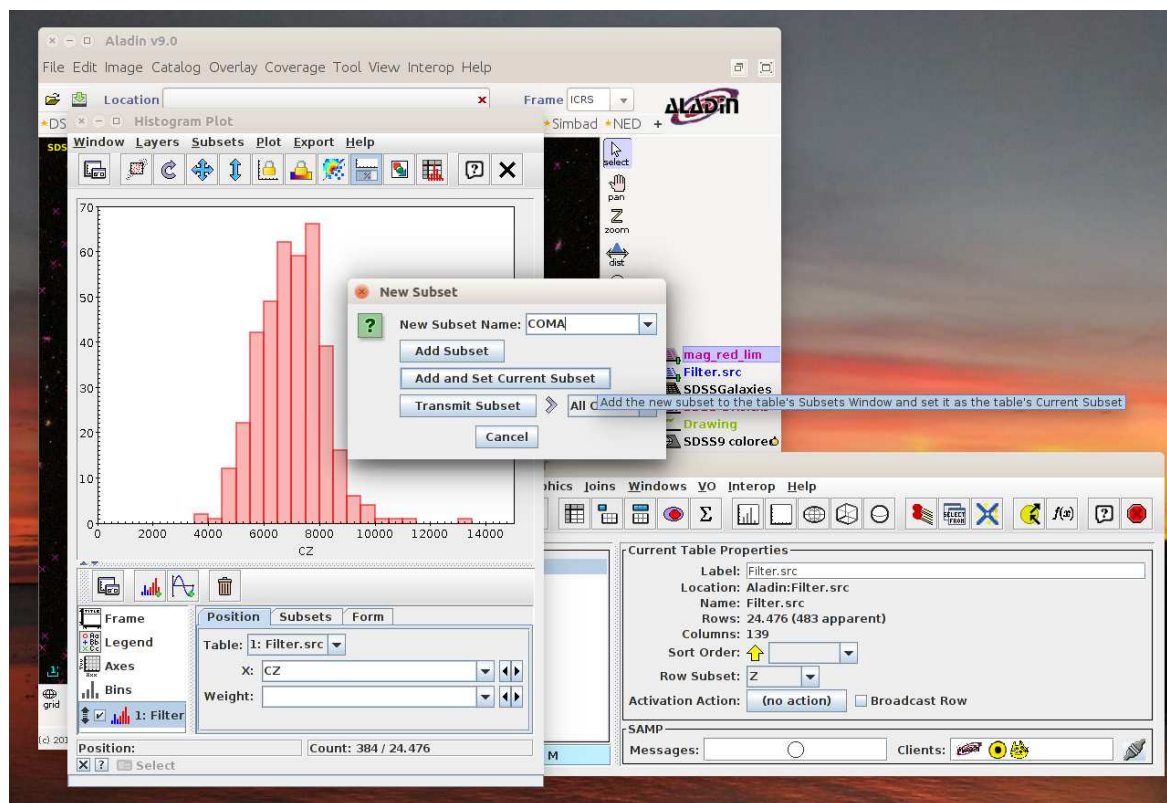
- **Views → Column info**; v novem oknu klikni na zeleni križec; ime (*name*) CZ ; izraz (*expression*)  $zsp * toDouble(300000)$ .
- **Views → Table data**; preveri prisotnost in pravilnost novega stolpca (na zadnjem mestu v tabeli).

8. **Izoliraj vrh radialne hitrosti jate** v oknu porazdelitve (*histogram window*), ustvari nov podvzorec COMA. TOPCAT je zmožen ustvarjanja podvzorcev iz predela histograma, ki je trenutno prikazan. Porazdelitev hitrosti jate je podobna krivulji v obliki zvonca z vrhom pri približno 7000 km/s in se razteza do nekaj 1000 km/s stran od vrha. Ko jo boš videl jasno in dobro izolirano v svojem oknu, boš lahko ustvaril seznam galaksij, ki sestavljajo jato.

- **Graphics → Histogram Plot**; v novem oknu izberi **Position → X → CZ; Subsets → Z**;
- razišči histogram s premikanjem miške in sočasnim pritiskom na levo tipko;
- izberi vrh v grafičnem oknu s premikom miške in pritiskom na desno tipko (lahko tudi izbereš **Axes → Range** in ročno vneseš mejne vrednosti  $X_{min}$ ;  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ).
- na koncu še **Subsets → New Subset from visible** → ime COMA; **Add and Set Current Subset**.







**SLIKA 3.**  
Prikaz histograma porazdelitve hitrosti galaksij v programu TOPCAT.

### 9. Pridobi povprečno hitrost in disperzijo hitrosti v jati galaksij Berenikini kodri.

- **Views** → **Column statistics** v glavnem oknu TOPCATa izpiše  $n_{Good} = N_{members} = 381$ ,  $\langle cz \rangle = 6977$  km/s in disperzijo hitrosti  $\sigma = 1120$  km/s, kar se odlično sklada z bolj natančnimi analizami.

*Pozor.* Prikažeš lahko več statističnih lastnosti in jih pregledaš v seznamu **Display**.

Bolj natančne statistične analize galaksij, ki sestavljajo jato, in sistematičnih napak pokažejo, da je disperzija hitrosti jate  $\sigma = 947 \pm 31$  km/s. Skupaj z oceno radija jate,  $R_{200} = 2.23 \pm 0.08$  Mpc, je ocenjena jatna masa  $M_{200} = 1.29 \pm 0.15 \cdot 10^{15} M_{\odot}$  (Soncevih mas). Podatki so iz članka Sohn J., Geller, M. J., Zahid, H. J. et al. 2016, arXiv:1612.06428.

Vajo Študij jate galaksij Berenikini kodri sta sestavila avtorja v sklopu projekta Asterics, ki ga podpira okvirni program EU Obzorje 2020 (Horizon 2020).

Več podobnih vaj (v angleščini) najdete na spletnih straneh Euro-VO (<http://www.euro-vo.org/?q=science/scientific-tutorials> ter [http://vo-for-education.oats.inaf.it/index\\_eng.html](http://vo-for-education.oats.inaf.it/index_eng.html)).

### Literatura

- [1] Sohn J. idr. 2016, *The Velocity Dispersion Function of Very Massive Galaxy Clusters: Abell 2029 and Coma*, dostopno na: <https://arxiv.org/abs/1612.06428>, ogled: 20. 4. 2017.
- [2] program Aladin Sky Atlas, dostopno na: <http://aladin.u-strasbg.fr/>, ogled: 20. 4. 2017.
- [3] program TOPCAT, dostopno na: <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>, ogled: 20. 4. 2017.

× × ×