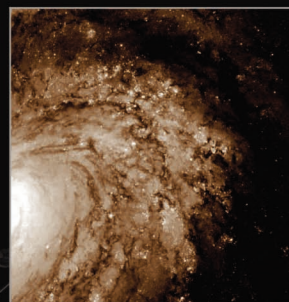
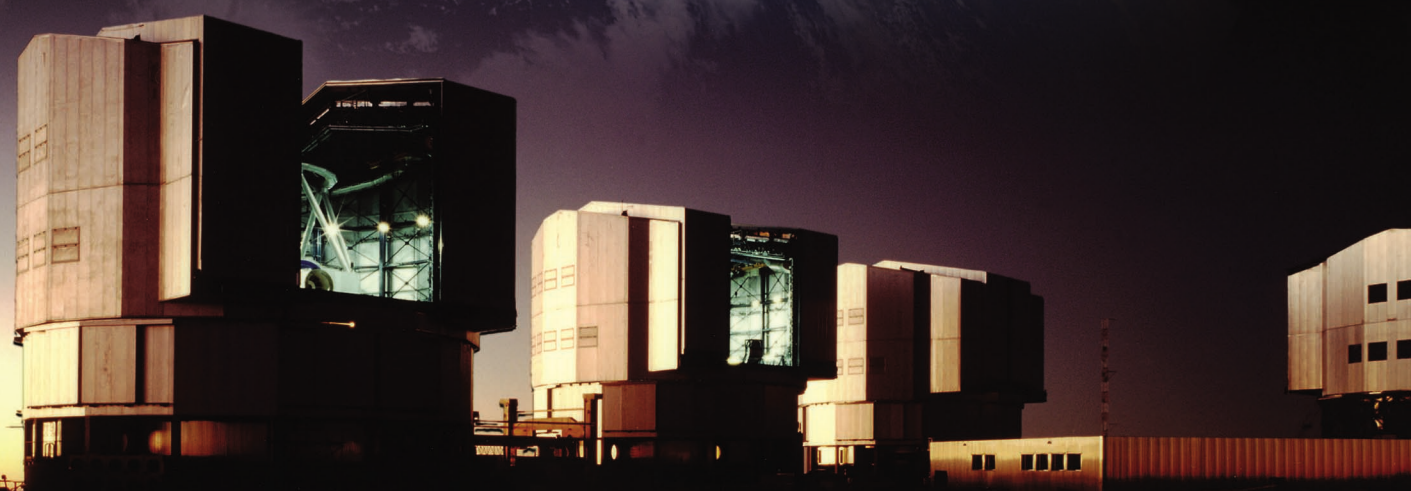


ZBIRKA VAJ ESA-ESO



Vaja 2



Merjenje oddaljenosti galaksije M 100
s kefeidami



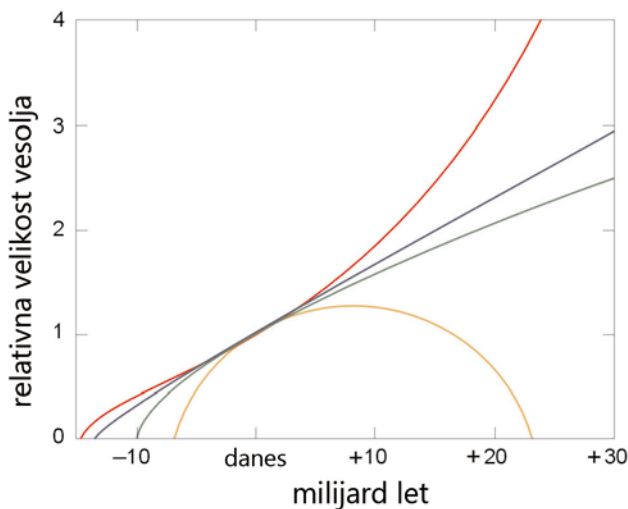
MERJENJE ODDALJENOSTI GALAKSIJE M 100 S KEFEIDAMI

UVOD

Kozmologija in meritve oddaljenosti

Kako staro je vesolje? Kako hitro se širi? Se bo nekoč začelo krčiti? To so temeljna kozmološka vprašanja, ki so dolgo čakala na zadovoljive odgovore.

Usoda vesolja je tesno povezana s prihodnjim obnašanjem oz. razvojem hitrosti njegovega širjenja. Ena od možnosti je ta, da se hitrost širjenja zmanjšuje, dokler se ne sprevrže v krčenje. Sodobna opazovanja kažejo, da se bo vesolje širilo v nedogled in celo vse hitreje.



Slika 1: Usoda vesolja

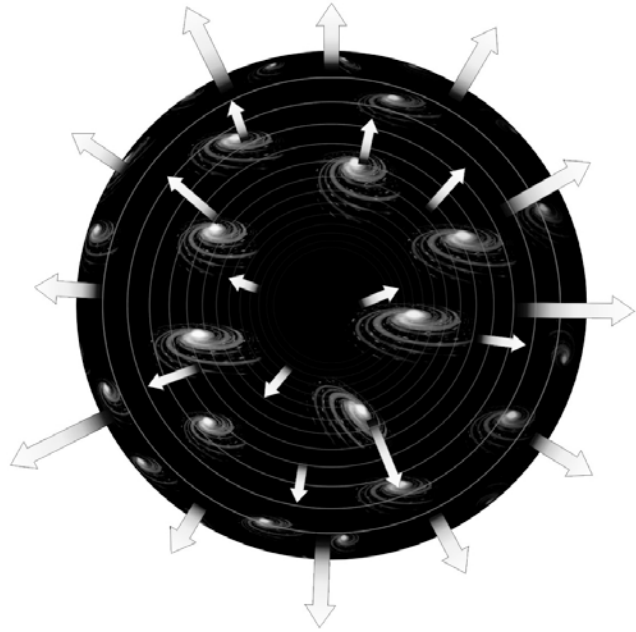
Krivulje na grafu označujejo velikost vesolja v odvisnosti od časa po velikem poku za različne modele vesolja. Glede na sodobna spoznanja je najverjetneje, da se bo vesolje širilo v nedogled in vse hitreje (rdeča krivulja).

Posledica širjenja vesolja je medsebojno oddaljevanje galaksij. Gledano s stališča ene galaksije se zdi, da se vse druge galaksije oddaljujejo od nje in to vse hitreje, bolj kot so oddaljene. To zvezo

opisuje Hubblov zakon, ki ga je leta 1929 zapisal Edwin Hubble:

$$v = H_0 D,$$

pri čemer je v hitrost oddaljevanja kake galaksije, H_0 Hubblova konstanta in D njena oddaljenost od nas.



Slika 2: Oddaljujoče se galaksije

Ker se prostor med galaksijami oz. jatami galaksij širi, se te med seboj oddaljujejo. Za opazovalca v določeni galaksiji se zdi, kot bi se vse druge galaksije (jate galaksij) od njega oddaljevale. »Hitrost« galaksij je tem večja, čim dlje so od opazovalčeve galaksije.

Iz Hubblovega zakona sledi, da je hitrost oddaljevanja galaksij sorazmerna z njihovo oddaljenostjo. Hubblova konstanta H_0 je temeljna lastnost vesolja, ki je nadvse pomembna pri številnih kozmoloških vprašanjih, meri pa trenutno hitrost širjenja vesolja. Tako je mogoče starost vesolja t oceniti z inverzno vrednostjo Hubblove konstante:

$$t = 1/H_0.$$

Vrednost H_0 ima velik pomen pri ocenah starosti vesolja. Toda kako jo izmerimo? Za merjenje H_0 moramo »enostavno« izmeriti hitrost v oddaljevanja galaksij in njihove oddaljenosti D , seveda

čimvečjega števila galaksij, da dobimo boljše srednjo vrednost. Hitrost oddaljevanja galaksij je relativno lahko izmeriti: izmeriti moramo tako

svetloba premakne proti rdeči svetlobi. Galaksijam z velikim rdečim premikom tako pripišemo velike hitrosti oddaljevanja.



imenovani rdeči premik v svetlobi galaksij. Rdeči premik je neposredna posledica oddaljevanja svetila in je podoben Dopplerjevemu pojavu, pri katerem se oddaljujočemu svetilu valovne dolžine svetlobe podaljšajo tem bolj, čim večja je njihova hitrost. V vesolju se pojav kaže v tem, da so valovne dolžine svetlobe v spektru galaksije premaknjene k daljšim valovnim dolžinam. V času potovanja svetlobe od galaksije do nas se zaradi širjenja vesolja valovna dolžine podaljša. To pomeni, da se na začetku modra

*Slika 3: Zelo oddaljene galaksije
Vesoljski teleskop Hubble je posnel tudi galaksije na samem robu vidnega vesolja.*

Kefeide kot standardni svetilniki za določanje oddaljenosti

Meritev oddaljenosti kakega vesoljskega telesa je mnogo težja naloga in eden največjih izzivov za astronome. Tekom časa so astronomi našli različna vesoljska telesa, ki lahko služijo kot meter za določanje velikih razdalj. Ena

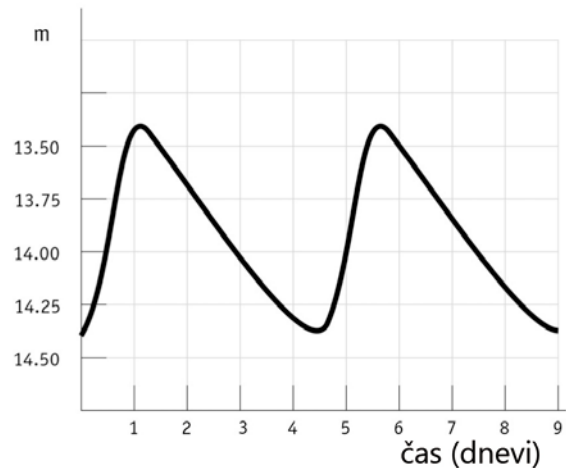
od teh je posebna vrsta spremenljivih zvezd, ki jim pravimo kefeide.



Slika 4: Henrietta Leavitt
Na razumevanje zveze med izsevom in periodo spreminjanja sija kefeid je bistveno prispevala Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), ki je delovala na Harvardskem observatoriju. Zelo natančno je umerila fotografske magnitude 47 zvezd, ki so nato služile kot referenčne zvezde za določanje magnitud vseh drugih zvezd. Henrietta Leavitt je odkrila in katalogizirala več kot 1500 spremenljivk v Magellanovih oblakih, satelitskih galaksijah naše Galaksije. Katalog ji je omogočil odkritje, da imajo kefeide z večjim izsevom tudi daljše periode, kar danes s pridom izkoriščamo pri določanju velikih kozmoloških razdalj.

Kefeide so maloštevilne zvezde z velikim izsevom. Ime so dobile po zvezdi Delta Kefeja, prvi znani zvezdi tega tipa, ki je tudi vidna s prostim očesom. Leta 1912 je astronomka Henrietta Leavitt (glej sliko 4) opazovala 20 kefeid v Mallem Magellanovem oblaku (MMO). Ker je MMO zelo oddaljen v primerjavi z razdaljami med zvezdami v njem, lahko predpostavimo, da so vse zvezde v njem od nas enako oddaljene. Posledično lahko privzamemo, da je navidezni sij zvezd v MMO odvisen samo od njihovega izseva. Henrietta Leavitt je na podlagi te predpostavke odkrila zvezo med izsevom in periodo spreminjanja sija kefeid – kefeide z večjim izsevom imajo tudi daljšo periodo. To pomeni, da lahko z meritvijo periode spreminjanja sija

kefeid izračunamo njen izsev, z meritvijo navideznega sija pa še njeno oddaljenost. Na tak način lahko kefeide služijo kot »standardni svetilniki« za merjenje velikih razdalj v vesolju, lahko pa jih uporabimo za kalibracijo oz. umeritev drugih vesoljskih teles, ki lahko potem služijo kot indikatorji oddaljenosti. Kefeide od drugih spremenljivk ločimo po značilnih krivuljah sija (glej sliko 5).



Slika 5: Tipična krivulja sija kefeid
Krivulja sija kefeid ima tipičen potek – njen sij hitro naraste, upade pa počasneje. Razlika med minimalno in maksimalno magnitudo je tipično od 1 do 2 magnitudi.

Najnatančnejše so seveda meritve oddaljenosti teles in hitrosti širjenja vesolja, ki so bližje naši Galaksiji. Preden je začel delovati vesoljski teleskop Hubble, je bilo kefeide mogoče opazovati do oddaljenosti 3,5 megaparsekov (definicijo parseka si lahko ogledaš v razdelku Osnovni pojmi in računska orodja). Toda pri teh majhnih oddaljenostih ni zanemarljivo lastno gibanje galaksij po prostoru, kar otežuje meritve hitrosti širjenja vesolja. Galaksije se namreč medsebojno gravitacijsko privlačijo in gibljejo relativno ena glede na drugo. Te hitrosti pa so na majhnih razdaljah primerljive s komponento hitrosti, ki je posledica širjenja vesolja. Če hočemo natančneje določiti hitrost širjenja vesolja, jo moramo meriti pri bolj oddaljenih galaksijah, pri katerih postane hitrost njihovega lastnega gibanja zanemarljiva

v primerjavi s hitrostjo, ki je posledica širjenja prostora. Z vesoljskim teleskopom Hubble pa je kefeide mogoče videti do razdalje 20 megaparsekov. Pred Hubblovo dobo so se astronomi prepirali o tem, ali je vesolje staro 10 ali 20 milijard let, danes pa vemo, tudi na podlagi drugih metod, da je vesolje staro okrog 13,7 milijarde let. Eden od glavnih Hubblovih projektov je bil tudi natančnejša meritev Hubblove konstante in s tem starosti vesolja. S Hubbлом so astronomi opazovali osemnajst različno oddaljenih galaksij, da bi v njih izmerili sije kefeid. Ena od teh je bila galaksija M 100.

M 100 – velika spiralna galaksija



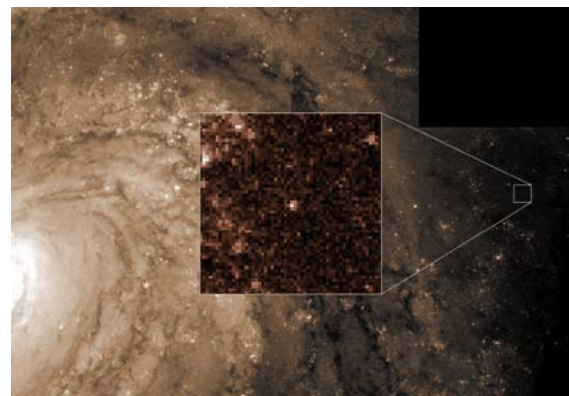
Slika 6: Spiralna galaksija M 100

Če bi lahko našo Galaksijo opazovali z vrha, bi bila zelo podobna galaksiji M 100. V spiralnih galaksijah je veliko prahu in plina. Prašnati oblaki so na sliki videti kot temne proge v osupljivih spiralnih rokavih galaksije. M 100 je dobro poznana med amaterskimi astronomi, ki jo v spomladanskih mesecih z lahkoto najdemo v ozvezdju Berenikini kodri.

Fotografija je bila posneta z vesoljskim teleskopom Hubble. Območja mladih in vročih zvezd so modrikasta.

M 100 je čudovita spiralna galaksija v veliki jati galaksij v Devici, v kateri je kar 2500 galaksij. M 100 je vrteči se sistem plina, prahu in zvezd, podoben naši Galaksiji, ki ga vidimo z vrha. Oznaka M 100 je kataložka številka te galaksije v Messierjevem katalogu nezveznih objektov.

M 100 je ena najbolj oddaljenih galaksij, v katerih so bile narejene natančne meritve krivulj sija kefeid. Ta vaja je osnovana na posnetkih in meritvah, ki so bile narejene z vesoljskim teleskopom Hubble.



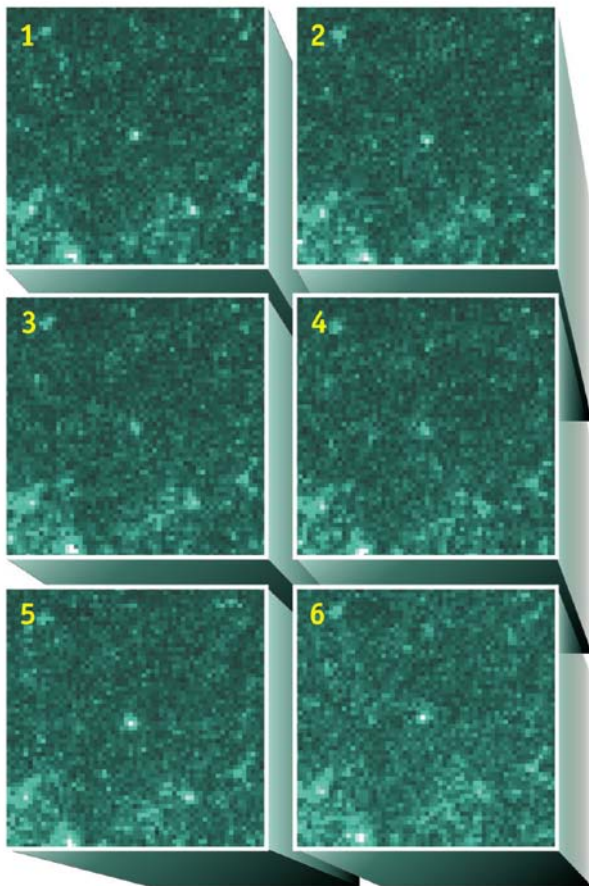
Slika 7: Hubble na lovu za kefeidami v M 100
Z vesoljskim teleskopom Hubble je mogoče neposredno videti posamezne kefeide v M 100. Ena od teh je v sredini povečanega okvirčka na sliki.

Meritve in izračuni

Zveza med periodo in izsevom kefeid je bila od časov prvih meritev Henriette Leavitt večkrat popravljena. Danes najboljšo oceno za to zvezo podaja enačba

$$M = -2,78 \log P - 1,35,$$

kjer je M absolutna magnituda kefeide, P pa njena perioda, merjena v dnevih.



Slika 8: Sprememba sija kefeide v M 100
V sredini zaporednih slik je kefeida v galaksiji M 100. Povsem očitno je, da se njen sij spreminja.

Krivulje sija dvanajstih kefeid v M 100 prikazuje slika 9.

1. naloga

Na podlagi krivulj sija določi absolutne magnitude M za vseh 12 kefeid.

Cilj te naloge je določitev oddaljenosti M 100. Kot veš (oglej si razdelek Osnovni pojmi in računsko orodja), absolutna magnituda ni dovolj za določitev oddaljenosti kakega vesoljskega telesa – potrebuješ tudi navidezno magnitudo.

Poleg težav pri natančnosti meritev magnitud zvezd, s čemer se astronomi ukvarjajo že sto let, je s kefeidami povezana še ta težava, da se njihov sij spreminja.

2. naloga

Razmisli, kako bi na podlagi krivulj sija določil navidezno magnitudo kefeid.

Na začetku 20. stoletja so astronomi izmerili minimum navidezne magnitude m_{\min} in njen maksimum m_{\max} in nato izračunali srednjo oz. povprečno vrednost $\langle m \rangle$.

Če narediš tako ali pa uporabiš kak boljši razmislek, potem lahko dobiš vse podatke, ki so potrebni z izračun oddaljenosti M 100.

3. naloga

Za vsako kefeido izračunaj $\langle m \rangle$ in D (v Mpc).

Seveda lahko dvanajstkrat ponoviš enak račun, lahko pa na primer sprogramiraš kalkulator ali izkoristiš računske možnosti programa Excel oz. podobnega računalniškega programa.

4. naloga

Razmisli, zakaj dobiš nekoliko različne oddaljenosti za kefeide.

5. naloga

Ali dobljene oddaljenosti kefeid dajejo tudi pravo oddaljenost M 100?

Ali je razlog za različne oddaljenosti kefeid ta, da se te nahajajo na različnih koncih galaksije M 100?

V literaturi ali na spletu poišči podatek o velikosti Galaksije. Predpostavi, da je M 100 velika približno kot Galaksija in še enkrat poskusi ugotoviti (preveri z računom), če so razlike v izračunanih oddaljenostih kefeid posledica njihovih različnih leg v M 100 – da se njihove oddaljenosti od nas zaradi tega znatno razlikujejo.

6. naloga
Izračunaj povprečno oddaljenost kefeid in jo obravnavaj kot oddaljenost M 100.

V znanstvenem članku, ki predstavlja rezultate meritev oddaljenosti M 100 z vesoljskim teleskopom Hubble, je izračunana oddaljenost $D = 17,1 \pm 1,8$ Mpc, pri čemer so astronomi upoštevali tudi absorpcijo svetlobe na medzvezdnem prahu.

Za koliko tvoj rezultat odstopa od te vrednosti?

7. naloga
Iz podatkov za hitrost oddaljevanja in oddaljenosti galaksije M 100 je mogoče oceniti hitrost širjenja vesolja oz. Hubblovo konstanto H_0 . H_0 navadno izražamo v enotah km/s/Mpc. Freedman je s sodelavci leta 1994 za hitrost oddaljevanja jate v Devici dobil vrednost $v=1400$ km/s.

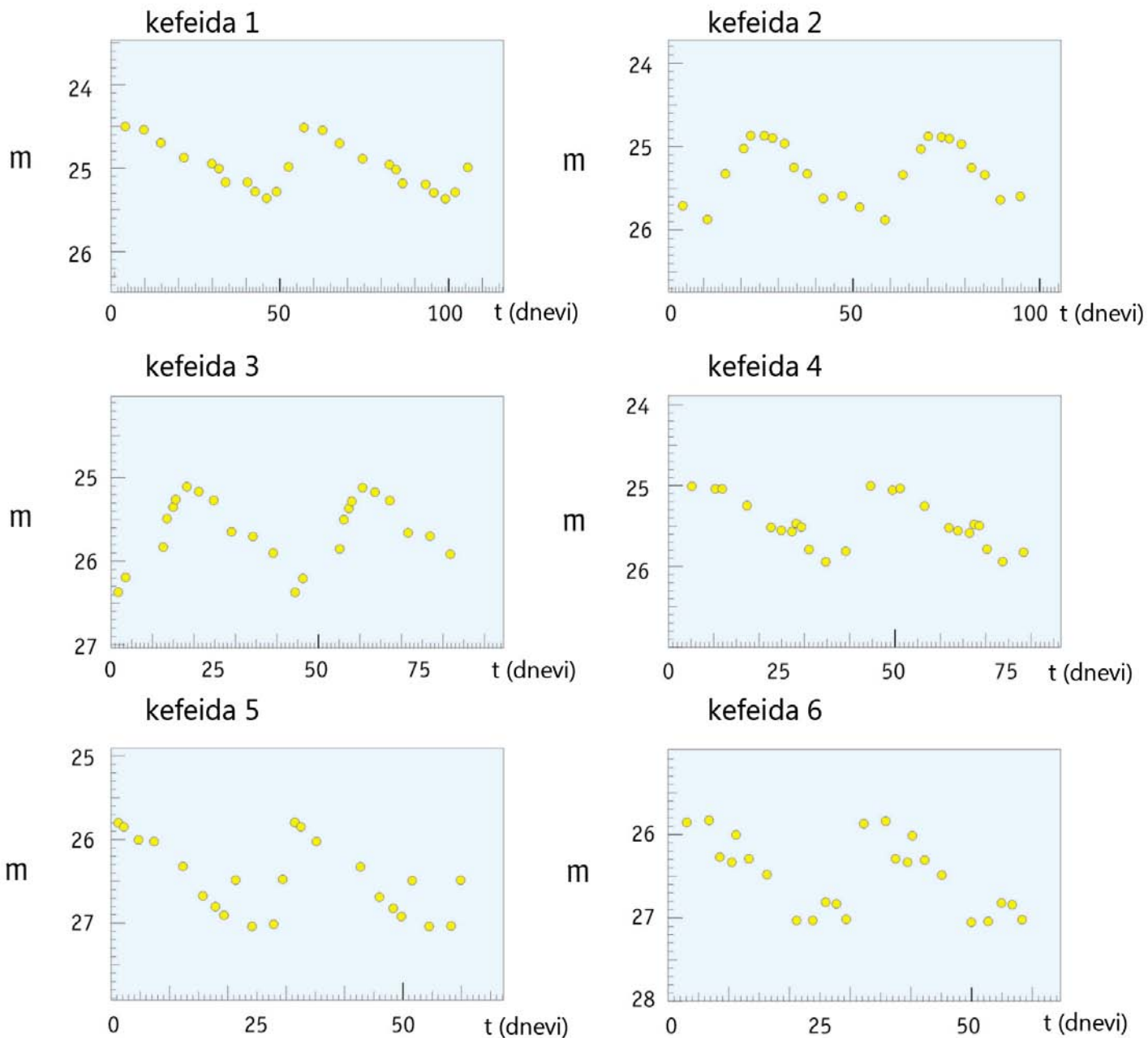
Izračunaj Hubblovo konstanto iz podatka za v in vrednostjo oddaljenosti D , ki si jo izračunal s pomočjo kefeid.

8. naloga
Starost vesolja t oceni z enostavno zvezo $t = 1/H_0$. Ne pozabi pretvoriti količin in zaokroženo vrednost izrazi v milijardah let.

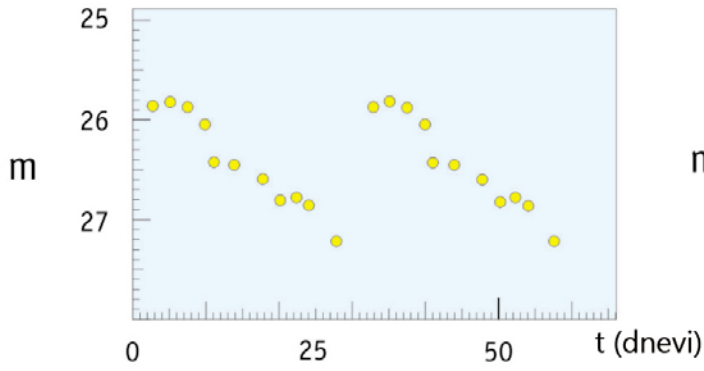
Koliko je starejše vesolje od Zemlje?

Podatek o starosti Zemlje poišči v literaturi ali na spletu.

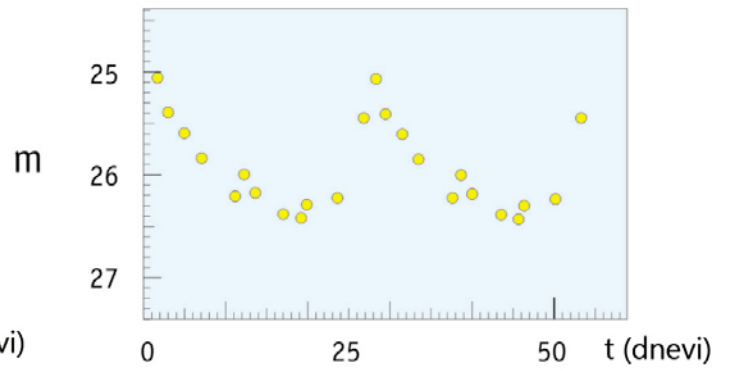
Slika 9: Krivulje sija kefeid v M 100



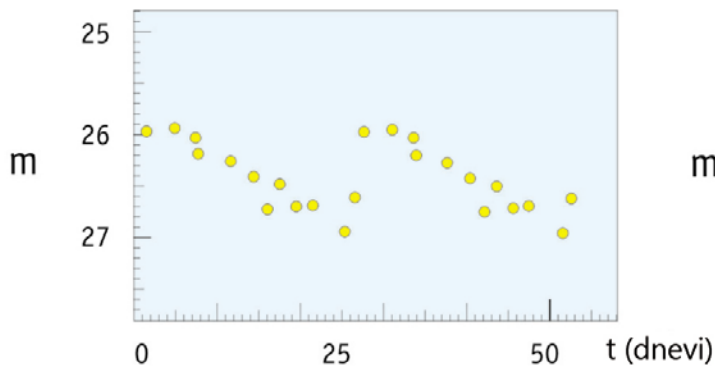
kefeida 7



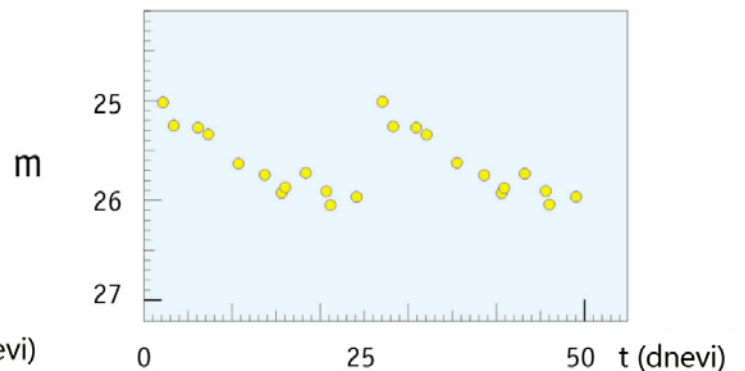
kefeida 8



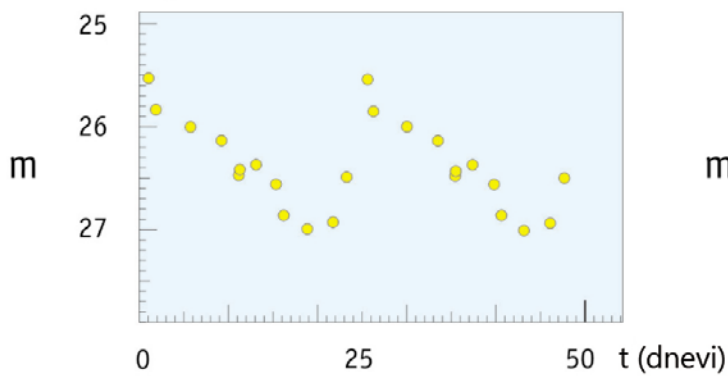
kefeida 9



kefeida 10



kefeida 11



kefeida 12

