

# Tähtitieteen tutkimusprojekti 1: Galaksijoukot ja viriaalteoreema (HS 11.10.2021)

---

## Tehtävä

Projekti koostuu kahdesta osasta: 1) Coma-galaksijoukon tiheysprofiilin ja joukon kineettisen ja potentiaalienergian arviointi galaksien etääntymisnopeuksien ja projisoitujen sijaintien perusteella. Määritä viriaalteoreeman avulla kuinka paljon pimeää ainetta joukossa täytyy olla, jotta se olisi tasapainossa. Osassa 2) käytetään Illustris TNG-100 N-kappaleen simulaatiosta poimitua dataa, joka sisältää sekä tähtiä että pimeää ainetta edustavien kappaleiden 3-ulotteiset paikat ja nopeudet. Vertaa simuloidun joukon tiheysprofiilia Coma-joukkoon sekä sovelta viriaalteoreemaa simuloidun joukon stabiilisuteen.

### 1) Coman galaksijoukko

#### Datan lukeminen:

Tiedosto `coma.fits` sisältää Biviano et al. (1995; Astron.Astrophys.Suppl. 111, 265) luetelon Coman galaksijoukon galaksien spektroskooppisesti mitatuista punasiirtymistä. Voit lukea tämän fits-tiedoston ASTRO-kirjaston `mrdfits`-funktiolla IDL structure-muuttujaan.

```
data=MRDFITS('coma.fits',1,h)
IDL> help,data,/st
** Structure <43a4188>, 7 tags, length=56, data length=56, refs=1:
   RA          DOUBLE          195.55895
   DEC          DOUBLE          28.507108
   Z            DOUBLE          0.022664210
   R            DOUBLE          17.904430
   I            DOUBLE          17.605460
   G            DOUBLE          18.643470
   PETROR50_R   DOUBLE          4.4357020
;RA, DEC       rektaskensio ja deklinaatio (1950.0 epookki)
;z             punasiirtymä
;R,I,G         naennaiset magnitudit kolmessa kaistassa
;PETROR50_R    etäisyys, jonka sisällä puolet R-kaistan säteilystä
;              (yksikkönä kaarisekunti)
plot,data.ra,data.dec,psym=3,xr=[196.,194.],yr=[27,29],xtitle='RA',ytitle='dec',title='COMA'
ra=data.ra & dec=data.dec
ok=where(data.r lt 12) & oplot,ra(ok),dec(ok),psym=6,syms=2
ok=where(data.r lt 14) & oplot,ra(ok),dec(ok),psym=1,syms=1
```



Kaikki luettelon galaksit eivät ole Coma-joukon fysikaalisia jäseniä, vaan joka kauempana tai lähempänä olevia samassa suunnassa näkyviä galakseja. Sovella seuraavaa puoli-empiristä karsintaa (Giovanelli 1997, AJ 113,22) jonka mukaan joukon jäsenille

$$|v - 4500\text{km/s}| < \theta \times 1000\text{km/s},$$

jossa  $v$  on galaksin punasiirtymästä laskettu etääntymisnopeus ja  $\theta$  on kulmaetäisyys asteissa joukon keskustasta. Käytä kulmaetäisyyden laskemiseen ASTRO-kirjaston `sphdist`-funktia, joka käyttää tarkkoja pallotrigonometrian kaavoja (tosin joukon näennäinen koko on niin pieni, että taso-approksimaatio ei poikkea merkittävästi). Wikipedian mukaan joukon keskikohdan koordinaatit ovat

$$\text{RA}=12^{\text{h}} 59^{\text{m}} 49^{\text{s}} \quad \text{DEC}=27^{\text{d}} 58^{\text{m}} 50^{\text{s}}$$

Nämä ovat kuitenkin epookin 2000.0 koordinaatteja: muunna ne epookille 1950.0 ASTRO-kirjaston `precess`-ohjelmalla. Laske jatkossa pyydetty suureet käyttäen ainoastaan joukon fysikaalisia jäseniä. Piirrä kuva kulmaetäisyyksistä ja nopeuksista, sekä käyttämästäsi valintaehdosta. Piirrä myös kuva luettolon galaksien jakaumasta: tunnistaatko edellisen sivun Hubble Avaruusteleskooppikuvan galakseja?

### Coma-joukon radiaalinen profiili:

Arvioi joukon etäisyys keskimääräisen nopeuden perusteella (käytä Hubble vakion arvoa 70 km/s/Mpc). Muuta joukon galaksien kulmaetäisyydet kiloparsekeissa mitatuiksi projisoiduiksi etäisyyksiksi joukon keskustasta ( $R$ ). Konstruoi joukon pintatiheys-profiili etäisyyden funktiona (galaksien lukumäärä/kpc<sup>2</sup> =  $N(R)$ ).

Sovita laskemaasi profiiliin muotoa

$$N(R) = N(0)R^k$$

oleva power-law tiheysporfiili: tässä  $N(0)$  ja  $k$  ovat sovitettavia vakioita. Huomaa että voit tehdä sovituksen helposti käyttämällä yhtelöä logaritmi-muodossa

$$\log N(R) = \log(N(0)) + k \log(R),$$

jolloin sovitus palautuu suoran sovittamiseen. Piirrä sovituksesi yhdessä havintojen kanssa.

### Viriaalteoreeman soveltaminen:

Viriaalteoreeman mukaan tasapainotilassa olevan  $N$ -gravitoivan kappaleen muodostaman systeemin kineettisen energian

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \vec{V}_i \cdot \vec{V}_i$$

ja potentiaalienergian

$$U = -\frac{1}{2}G \sum_{j=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N \frac{m_j m_k}{r_{jk}}$$

aikakeskiarvot toteuttavat ehdon

$$\langle T \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle \quad = \text{viriaalteoreema}$$

Eo. kaavoissa  $\vec{V}_i = [vx, vy, vz]$  on systeemin keskipisteen suhteen laskettu nopeusvektori,  $m_i$  on kappaleen  $i$  massa,  $r_{jk}$  kappaleiden  $j$  ja  $k$  välinen etäisyys ja  $G$  gravitaatiovakio [huomaa että potentiaalienergian kaavassa jokainen kappalepari  $j, k$  summataan kahdesti, minkä takia lopputulos jaetaan kahdella], Viriaaliteoreemaa voidaan soveltaa galaksijoukkojen stabiilisuu-den arvioimiseen olettamalla, että aikakeskiarvot vastaavat joukon jäsengalaksien yli laskettuja keskiarvoja. Jos näin lasketuille arvoilla joukon kineettinen energia ylittää selvästi potenti-aalienergian,  $T \gg |U|$ , voidaan päätellä että joukko on joko hajoamassa, tai että se sisältää näkymätöntä massaa, jota ei ole otettu huomioon suureita laskettaessa.

Arvioidaan Coma-joukon **kineettistä energiaa** laskemalla joukon etääntymisnopeuksien hajonta  $v_{disp}$  ja olettamalla yksinkertaisuuden vuoksi, että joukon massa  $M_{total}$  vastaa sen galaksien sisältämien tähtien kokonaismassaa, jolloin voidaan kirjoittaa

$$T \approx \frac{3}{2} M_{total} v_{disp}^2$$

(Selitä mistä tekijä 3 tulee? Vihje: mikä on kokonais-nopeusdispersion ja mitattavan nopeusdis-persion ero?). Laskea tähtien kokonaismassa käyttämällä galaksien  $r$  tai  $i$ -kaistoissa mitattuja magnitudeja. Muuta galaksien näennäiset magnitudit absoluuttisiksi magnitudeiksi edellä laske-maasi joukon etäisyyttä käyttäen, ja vertaa galaksien yhteenlaskettua luminositeettia Auringon luminositeettiin vastaavassa kaistassa (Auringon absoluuttiset R ja I magnitudit ovat 4.42 ja 4.08). Muuta luminositeettien suhde massasuhteeksi käyttäen tyypillistä arvoa  $M/L = 3$  (mas-saksi pitäisi tulla hieman alle  $1e13$  auringon massaa). Laske kineettinen energia SI-yksiköissä (suurehko numeroarvo!)

**Potentiaalienergian** arvioinnissa voit käyttää approximaatioita

$$U \approx -\frac{3}{5} \frac{GM_{total}^2}{R_{cluster}}$$

(kerroin  $3/5$  vastaa homogeenisen  $R_{cluster}$ -säteisen pallon energiaa). Sijoita joukon säteen paikalle galaksien projisoitujen etäisyyksien keskiarvo.

Tuloksena pitäisi olla että  $T \approx 60|U|$  eli yli 100-kertainen viriaaliteoreeman tulokseen ver-rattuna! [Jos saat jotain kovin erilaista niin tarkista että olet tehnyt muunnokset oikein: ehdot-tamasti helpointa on muuntaa kaikki suureet SI-yksiköiksi].

Tavallisesti eo. approksimaatiot kineettiselle ja potentiaalienergialle yhdistetään: oletta-malla viriaaliteoreeman olevan voimassa, saadaan arvio ns. dynaamiselle massalle,

$$M_{dyn} = 5R_{cluster}v_{disp}^2/G,$$

joka nyt on siis n. 120-suurempi kuin tähtien yhteenlaskettu massa! Tämä tulos johti Fritz Zwickyyn v. 1933 julkaisemaan johtopäätökseen, että suurin osa galaksien joukosta on ns. pimeää ainetta, joka ei säteile valoa mutta vaikuttaa tähtien liiketilaan painovoimallaan. Nykyään tiedetään että joukoissa on runsaasti kuumaa kaasua, mutta sen massa on n. 10-kertainen tähtien massaan nähden, eli Zwickyyn havaitsema epäsuhta on edelleen voimassa.

## 1) Illustris TNG-100 simulaatiot

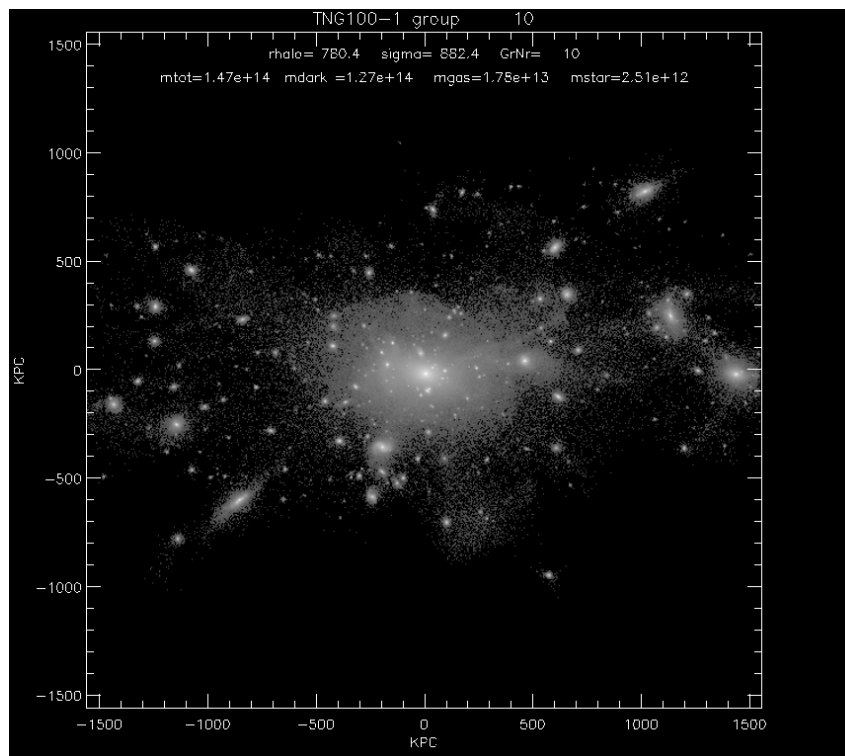
Sovella seuraavaksi viriaalteoreemaa N-kappaleen simulaatio-dataan, joka on peräisin Illustris TNG-projektin kts. <https://www.tng-project.org/> sivustolta. N-kappaleen simulaatio seuraa tähtiä, kaasua ja pimeää ainetta edustavia kappaleita, joiden sijainnit ja nopeudet simulaation kuluessa tunnetaan. Eli voit käyttää edellä olleita kineettisen energian ja potentiaalin energian lausekkeita 3D dataan.

### Datan lukeminen:

Data-aineistona on kolme Illustris TNG-100 simulaation  $z=0$  tallennuksesta valittu galaksi-joukkoa, joiden sisältämien galaksien tiedot on kirjoitettu IDL-save tiedostoon. Esim.

```
IDL> restore, 'GrNr20.save', /v
% RESTORE: Save file written by heikki@astro100, Mon Oct 11 10:19:16 2021.
% RESTORE: IDL version 8.7.2 (linux, x86_64).
; DX          x-koordinaatti suhteessa joukon keskusgalaksiin (kpc)
; DY          y          "-"
; DZ          z          "-"
; DVX         vx         "-"
; DVY         vy         "-"
; DVZ         vz         "-"
; MTOT_GROUP   joukon kokonaismassa (yksikkönä Auringon massa)
; MHALO_GROUP  pimeän aineen kokonaismassa
; MGAS_GROUP   kaasun kokonaismassa
; MSTAR_GROUP  tähtien kokonaismassa
; MBH_GROUP.   mustien aukkojen kokonaismassa
; MTOT_GAL     yksittäisten galaksien kokonaismassa
; MHALO_GAL    pimeän aineen
; MGAS_GAL     kaasun
; MSTAR_GAL    tähtien
; MBH_GAL      keskus-mustan aukon
; RSTAR_GAL    tähtien puoliarvosäde (sis 50% galaksin tähdistä)
```

Huom: alkuperäinen simulaatiodata sisältää yksittäisten kappaleiden tiedot, joista eo yksittäisten galaksien arvot on luotu.



Huom: alkuperäinen simulaatio käyttää periodista laskenta-aluetta, jonka koko on 75 Mpc kussakin koordinaatti-suunnassa. Joukkoja tallennettaessa ei ole tarkistettu ulottuuko joukko 'reunan ympäri'. Luettuaasi save-tiedosto tarkista pitääkö dx,dy,dz koordinaatteihin lisätä/vähentää 75 Mpc. Esim

```
bad=where(dy gt 50e3,count)
if(count ge 1) then dy(bad)=dy(bad)-75e3
bad=where(dy lt -50e3,count)
if(count ge 1) then dy(bad)=dy(bad)+75e3
; ja vastaavasti x ja z
```

### Analyysi:

Valitse jokin joukoista (**GrNr4.save**, **GrNr10.save**, **GrNr20.save**) ja muodosta sille radiaalinen projisoitu tiheysprofiili kuten edellä Coma-havainnoille. Huom: nyt voit helposti katsoa joukkoa eri suunnista! Laske myös 3D tiheysprofiili ( $\text{gal/kpc}^3$ ) ja tee siihen vastaava sovitus. Tee sama kaikille joukoille.

Viriaalteoreemaa soveltaaksesi voit laskea joukon kineettisen ja potentiaalienergian suoraan sivun 2 kaavoista käyttäen galaksien kokonaismassoja ja korvaamalla ne 'massapisteillä'. Muista muuttaa simulaatioyksiköt, kpc ja Auringon massa, SI-yksiköiksi! Nyt tuloksena pitäisi olla, että  $T/|U|$  suhde on samaa suuruusluokkaa, mutta hieman teoreettista suhdetta (0.5) pienempi. Ero johtuu siitä että ko. joukot ovat simulaatiossa yhä muodostumassa, eivätkä siten vole täysin iriaalteoreeman edellyttämässä tasapainotilassa; sama pätee myös oikeassa maailmankaikkeudessa! Myös potentiaalienergian lasku on epätarkka, koska galaksien sisäistä massajakaumaa ei otettu huomioon.

Sovella viriaalteoreemaa myös käyttämällä tähtien massaa (tai tähdet +kaasu) gaksin kokonaismassana. Muistuttaako tulos Coma-joukolle saamaasi tulosta?

Voit myös katsoa muita asioita simulaatiodatasta. esim. mikä on projisoidun etäisyyden ja etäätymisnopeuden relaatio (simuloidussa joukossa ei ole etu- eikä taka-alan 'outlier'-galakseja). Samoin esim. miten hyvin Coma-joukolle tehty approksimatiivinen potentiaalienergian lasku (olettaen pollysymmetrinen homogeeninen jakauma) pätee jne...

### Kaikki edellä mainitut tiedostot hakemistossa:

**yl124-pc01:/study/2021/765304A/ATK2021/PROJEKTIT2021/COMA\_CLUSTER\_2021**

```
yl124-pc01:/study/2021/765304A/ATK2021/PROJEKTIT2021/COMA_CLUSTER_2021> lt
total 5696
-rw-r--r-- 1 hsalo 765304 34560 Nov 26 2020 coma.fits
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 217829 Oct 8 17:22 tng_cluster4.png
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 185160 Oct 8 17:36 tng_cluster20.png
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 278780 Oct 8 17:36 tng_cluster10.png
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 35668 Oct 11 10:18 GrNr4.save
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 27316 Oct 11 10:19 GrNr10.save
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 15220 Oct 11 10:19 GrNr20.save
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 36383 Oct 11 10:47 contents.txt
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 1039093 Oct 11 16:28 coma_cluster_HST_ACS.png
-rw-rw-r-- 1 hsalo 765304 1310010 Oct 11 17:15 atk2021_harj_coma.pdf
```