



# **Galaksit ja kosmologia**

## **FYS2052, 5 op, syksy 2021**

E207 Physicum

**Luento 10: Paikallinen galaksiryhmä,  
13/11/2023**



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita I

---

- **Kalvo 3:** Paikallisen galaksiryhmän tarkka galaksilukumäärä ei ole tiedossa. Hyvin himmeitä uusia kääpiögalakseja löydetään säännöllisesti. Kaikki kirkkaat galaksit ovat tiedossa.
- **Kalvo 4:** Paikallinen galaksiryhmä on tyypillinen galaksiryhmä, eli dominoivat galaksit ovat spiraaligalakseja. Paikallisessa galaksiryhmässä ei ole massiivisia ellipsigalakseja.
- **Kalvo 5:** Suurin osa kääpiögalakseista sijaitsevat Linnunradan ja Andromedan lähellä.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita II

---

- **Kalvo 5:** Andromedan galaksi lähestyy Linnunrataa nopeudella  $v_r = -120$  km/s. Galaksit tulevat törmäämään toisiinsa noin ~4-5 miljardin vuoden kuluttua.
- **Kalvo 7:** Suuri Magellanin pilvi (LMC) on varsin massiivinen kääpiögalaksiksi ja siinä on hyvin runsaasti kaasua ja tähtien syntyaktiivisuutta. LMC:ssä oleva Tarantula nebula on koko paikallisen galaksijoukon aktiivisin tähtiensynty-alue ja havaintojen mukaan massiivisimmat siellä syntyvät tähdet saattavat olla jopa  $M \sim 150 M_{\odot}$  massaisia.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita III

---

- **Kalvo 8:** Magellanin pilvien tarkka kolmeulotteinen rata on vasta tarkentumassa uusien GAIA-havaintojen myötä, mutta näyttää todennäköiseltä, että Magellanin pilvet ovat kaksoisgalaksijärjestelmä, jossa galaksit kiertävät toisiaan ja Linnunrataa.
- **Kalvo 8:** Todennäköisesti Magellanin pilvet ovat ensimmäistä kertaa näin lähellä Linnunrataa, joka selittää galaksien suuren kaasumäärän ja aktiivisen tähtiensynnyn.
- **Kalvo 10:** Kääpiösperoidaaligalaksit ovat yleisin galaksityyppi paikallisessa galaksiryhmässä, mutta ne ovat niin himmeitä, ettei vielä kaikkia ole löydetty.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IV

- **Kalvo 11:** Merkitään nopeus pyörimättömässä koordinaatistossa  $\mathbf{v}$ :llä ja tasaisella kulmanopeudella  $\Omega$  pyörivässä koordinaatistossa  $\mathbf{v}'$ :lla.

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \Omega \times \mathbf{x} \Rightarrow \mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{x}'}{dt'} = \mathbf{v} - \Omega \times \mathbf{x}$$

- **Kalvo 11:** Otetaan aikaderivaatta pyörivän koordinaatiston nopeuden suhteen ja sijoitetaan  $\mathbf{v}'$  lauseke:

$$\frac{d\mathbf{v}'}{dt'} = \frac{d\mathbf{v}'}{dt} - \Omega \times \mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \Omega \times \mathbf{v} - \Omega \times \mathbf{v}'$$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita V

---

- **Kalvo 11:** Identifioidaan termejä:

Tavallinen painovoimakiihtyvyys:  $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla\Phi$

Coriolis-voima:  $-2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}'$

Keskipakoisvoima:  $\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x})$

- **Kalvo 12:** Lasketaan keskipakoistermi käyttäen vektoritulosta:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VI

- **Kalvo 12:** Otetaan pistetulo  $\mathbf{v}'$  vektorin kanssa:

$$\mathbf{v}' \cdot \frac{d\mathbf{v}'}{dt'} = -\mathbf{v}' \cdot \nabla\Phi - \mathbf{v}' \cdot 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}' - \mathbf{v}' \cdot \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x})$$

- Ensimmäinen termi vasemmalla (katso luento 3):

$$\mathbf{v}' \cdot \frac{d\mathbf{v}'}{dt'} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt'} (\mathbf{v}'^2)$$

- Toinen termi oikealla:  $\mathbf{v}' \cdot 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}' = 0$

- Kolmas termi oikealla:

$$-\mathbf{v}' \cdot \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) = \boldsymbol{\Omega}^2 (\mathbf{x} \cdot \mathbf{v}') - (\mathbf{v}' \cdot \boldsymbol{\Omega})(\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt'} [(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x})^2]$$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VII

- **Kalvo 12:** Käytetään efektiivistä potentiaalia, joka huomioi koordinaatiston pyörimisen:

$$\Phi_{\text{eff}}(\mathbf{x}') = \Phi(\mathbf{x}') - \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}')^2$$

- **Kalvo 13:** Oletetaan, että pienempi galaksi  $m$  kiertää massiivisempaa galaksia  $M$  etäisyydellä  $D$  (katso kuva kalvolla 13). Painopiste voidaan laskea ja  $x$  on koordinaatti galakseja yhdistävällä janalla:

$$CM = \frac{DM}{M + m}, \quad \text{CM} = \text{Centre} - \text{of} - \text{mass} = \text{painopiste}$$





# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VIII

- **Kalvo 13:** Lagrangen pisteet saadaan derivoimalla  $x$ :n suhteen ja asettamalla derivaatan nolaksi.

$$0 = \frac{\partial \Phi_{\text{eff}}}{\partial x} = -\frac{GM}{(D-x)^2} \pm \frac{Gm}{x^2} - \Omega^2 \left( x - \frac{DM}{M+m} \right)$$

- **Kalvo 14:** Kun  $m \ll M$  voidaan käyttää approksimaatiota:

$$\frac{GM}{(D-x)^2} = \frac{GM}{D^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{x}{D}\right)^2} \approx \frac{GM}{D^2} \left(1 + \frac{2x}{D}\right), \quad \text{koska} \quad \frac{1}{(1-x)^2} \approx 1 + 2x$$

- **Kalvo 14:** Yhdistämällä tulokset:

$$0 \approx -\frac{GM}{D^2} - 2\frac{GM}{D^3}x \pm \frac{Gm}{x^2} - \frac{G(M+m)}{D^3} \left( x - \frac{DM}{M+m} \right)$$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IX

- **Kalvo 14:** Muutaman välivaiheen jälkeen, tästä voidaan ratkaista Jacobin säde, joka kuvaa minkä säteen sisäpuolella kääpiögalaksin tähdet pysyvät painovoimalla sidottuna.

$$x = \pm r_J, \quad r_J = D \left[ \frac{m}{3M + m} \right]^{1/3}$$

- **Kalvo 15:** Paikallisen galaksiryhmän dominoivat galaksit ovat Andromeda (M31) ja Linnunrata, M33 on jo selvästi himmeämpi.
- **Kalvo 16:** Andromedassa on enemmän neutraalia kaasua kuin Linnunradassa, mutta molekulaarisen kaasun osuus on pienempi ja täten tähtiensynty-aktiivisuus on myös jonkin verran pienempi.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita X

- **Kalvo 17:** M33 on hyvin myöhäisen tyypin spiraaligalaksi, jossa on runsaasti kaasua ja melko epäsäännöllinen spiraalirakenne.
- **Kalvo 18:** Kääpiösferoidaalit ovat lähes epäonnistuneita galakseja, tarkoittaen, että niissä on hyvin vähän tähtiä ja ei ollenkaan kaasua, mutta paljon pimeää ainetta. Ensimmäiset räjähtävät tähdet näissä galakseissa todennäköisesti heittivät ulos suurimman osan galaksin kaasusta, ja täten tähtiensynty pysähtyi.
- **Kalvo 19:** Epäsäännöllisissä kääpiögalakseissa on vielä kaasua ja ne sijaitsevat tyypillisesti kauempana päägalakseista ja täten ne ovat kokeneet keskimäärin vähemmän painovoimahäiriöitä.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XI

- **Kalvo 20:** Tähdet jakautuvat metallipitoisuuden ja iän perusteella kolmeen populaatioon, Populaatio I (nuoret tähdet), Populaatio II (vanhat tähdet) ja Populaatio III (ensimmäiset tähdet, näistä ei ole vielä suoria havaintoja).

- **Kalvo 21:** Suljettu laatikko (closed box) malli on yksinkertaisin kemiallisen evoluution malli. Kaasun metallipitoisuus muuttuu:

$$\Delta Z = \Delta \left( \frac{M_h}{M_g} \right) = \frac{p\Delta M_\star - Z[\Delta M_\star + \Delta M_g]}{M_g}$$

- **Kalvo 21:** Suljetussa laatikossa kaasua ei katoa tai tule lisää, eli  $\Delta M_\star = -\Delta M_g$ .



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XII

- **Kalvo 22:** Metallipitoisuuden kehitys saadaan integroimalla:

$$\Delta Z = p \frac{\Delta M_{\star}}{M_g} \Rightarrow dZ = p \frac{dM_g}{M_g} \Rightarrow Z = -p \ln \left( \frac{M_g(t)}{M_g(t=0)} \right)$$

- **Kalvo 23:** Suljetulle laatikolle voimme arvioida metallipitoisuuden ajan funktiona:

$$M_g(t) = M_g(0) e^{-[Z-Z_0]/p}$$

$$M_{\star}(< Z) = M_g(0) - M_g(t) = M_g(0) [1 - e^{-[Z-Z_0]/p}]$$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XIII

---

- **Kalvo 24:** Efektiivinen tuotto ottaa huomioon sen, että kaasua voi myös karata järjestelmästä.
- **Kalvo 26:** Tutkimalla metallien jakaumaa tähdissä niiden iän, paikan ja kinematiikan funktiona voi auttaa ymmärtämään Linnunradan syntyä ja kehitystä, enemmän tästä aiheesta Linnunradan rakenne kurssilla.