



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

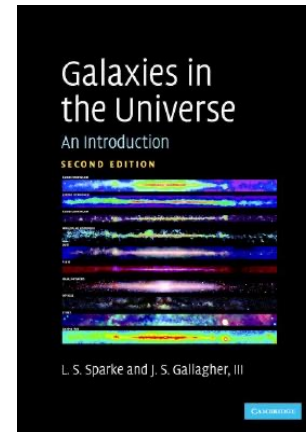
E207 Physicum

Luento 1: Johdanto, 04/09/2023



Kurssin perusasiat

- Luennoitsija: Prof. Peter Johansson (Huone D311)
- Laskuharjoitusassistentit: FM Atte Keitaanranta (D308) ja Dr. Ruby Wright (D333)
- Luennot maanantaisin klo 10.15-12.00 huoneessa E207 Physicum, yhteensä 14 luentoa (viimeinen luento 11.12). Kurssin kotisivu: <https://wiki.helsinki.fi/display/Galaksitjakosmologia/Galaksit+ja+kosmologia>
- Kurssin virallinen kotisivu: <https://studies.helsinki.fi/kurssit/toteutus/hy-opt-cur-2324-ee6282c1-9d10-49d6-adf5-ff2285503a66/FYS2052>
- Laskuharjoituksia, joka toinen viikko. Tehtävät tulevat jakoon Moodlessa ja ne myös palautetaan sinne.
- Yhteensä $6 \times 5 = 30$ tehtävää, **1/3 (10 tehtävää minimisuoritus)**, ylittävästä määrästä plus-pisteitä. Esittämällä tehtävän laskuharjoitustilaisuudessa voi saada lisäpisteen.
- **Luentomoniste** sekä ensisijainen kurssikirja:
Sparke&Gallagher: “Galaxies in the Universe”,
Cambridge Univ Press, 2007 **S&G**.



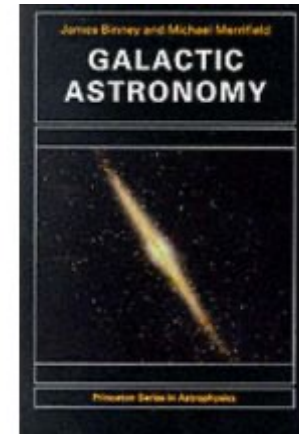
2. painos



Syventävä lisämateriaali

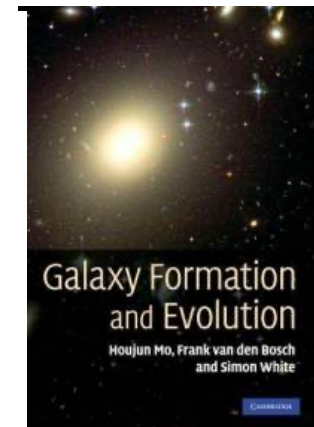
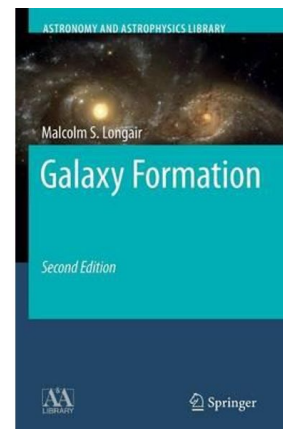
1. Kandiopintojen kirjoja:

- Combes, Boisse, Mazure, Blanchard: "*Galaxies and Cosmology*", 2nd ed. Springer, 2001. **CBMB**
- Binney & Merrifield: "*Galactic Astronomy*", Princeton University Press, 1998



2. Maisteriopintojen kirjoja:

- Longair: "*Galaxy formation*", 2nd ed. Springer, 2008.
- Mo, van den Bosch & White: "*Galaxy formation and evolution*", Cambridge Univ. Press, 2010





Kurssin yhteys muihin HY:n kursseihin

- Esitiedot: Tähtitieteen, fysiikan ja mieluiten teoreettisen fysiikan perusopinnot.
- Aiheeseen liittyviä Tähtitieteen kandiopintoja: Astrofysiikan peruskurssi I ja II (kevät 2024), Linnunradan rakenne (syksy 2024), Tähtien rakenne ja kehitys (kevät 2025).
- Maisteriohjelman opintoja, tähtitiede: Galaxy formation and evolution (syksy 2024), Galactic dynamics (kevät 2025), Open problems in modern astrophysics (syksy 2023).
- Maisteriohjelman opintoja, teoreettinen fysiikka: Kosmologia I-II, (syksy 2023) ja Yleinen Suhteellisuusteoria (kevät 2024).



Kurssin sisältö 1

- Luento 1: 04.09.2023 – Johdanto
- Luento 2: 11.09.2023 – Galaksien luokittelusta
- Luento 3: 18.09.2023 – Galaksien dynamiikka I – Lask. 1 tilaisuus
- Luento 4: 25.09.2023 – Galaksien dynamiikka II
- Luento 5: 02.10.2023 – Kosmologia I – Lask. 2 tilaisuus
- Luento 6: 09.10.2023 – Kosmologia II
- Luento 7: 16.10.2023 – Ellipsigalaksit – Lask. 3 tilaisuus
- Opetuksen väliviikko 23.10.2023



Kurssin sisältö 2

- Luento 8: 30.10.2023 – Spiraali- ja S0-galaksit
- Luento 9: 06.11.2023 – Aktiiviset galaksit – Lask. 4 tilaisuus
- Luento 10: 13.11.2023 – Paikallinen galaksiryhmä
- Luento 11: 20.11.2023 – Galaksijoukot ja maailmankaikkeuden suuren mittakaavan rakenne – Lask. 5 tilaisuus
- Luento 12: 27.11.2023 – Varhainen maailmankaikkeus
- Luento 13: 04.12.2023 – Galaksien synty ja kehitys - Lask. 6 tilaisuus
- Luento 14: 11.12.2023 – Kertausluento/kyselytunti
- **Loppuentti: 18.12.2023 klo 9-13 (alustavasti)**



Tällä luennolla käsitellään

1. Galaksitutkimuksen ja kosmologian historiaa.
2. Tähtien ja galaksien suhde: galaksit ovat tähtiensä summa. Galaksit eivät ole 'saarimaailmankaikkeuksia', vaan ne vuorovaikuttavat myös keskenään.
3. Galaksien havaitsemisesta. Miten galakseja havaitaan, mitkä ovat galaksien tyypilliset luminositeetit ja massat, mitä komponentteja havaitaan eri aallonpituusalueilla ja miten galaksien etäisyyksiä mitataan.
4. Vastaa soveltuvin osin: **S&G:** luvut 1.1-1.2, sekä luvut 2.1-2.2.
CBMB: sivut 17-25



1.1 Galaksitutkimuksen historiaa

- Sana galaksi tulee kreikan kielen sanasta *galaxias* [γαλαξίας], joka tarkoittaa maitomaista ja jolla on viitattu Linnunrataan (Milky Way, Via Lactea). Kreikan jumaltarustossa Heran (Zeuksen vaimon) maitoa.
- Jo muinaiskreikkalainen Democritus spekuloi, että Linnunradan vyö koostuu kaukaisista tähdistä. Galileo Galilei (1610) todisti tämän kaukoputkihavainnollaan, ja Simon Marius teki ensimmäiset havainnot Andromedasta (1612) -> Taivaalla on muitakin pysyviä kohteita kuin tähtiä.

Linnunradan vyö





Ensimmäiset galaksiluettelot

- Charles Messier julkaisi vuonna 1771 ensimmäisen luettelonsa sumumaisista kohteista jotka eivät ole komeettoja, lopullisessa luettelossa oli 109 kohdetta, joista 30 galaksia.
- Tanskalais-irlantilainen John Dreyer julkaisi 1888 omien ja William ja John Herschelin havaintojen pohjalta NGC-luettelon (New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars), jossa on 7840 kohdetta ja lisäksi vuonna 1895 kaksi lisäluettelo IC I ja IC II (Index Catalogue), joissa oli lisäksi yhteensä 5386 kohdetta.
- Noin puolet kohteista ovat galakseja ja kohteet on luetteloitu kasvavan rektaskension mukaan. Nämä luettelot ovat edelleen käytössä!

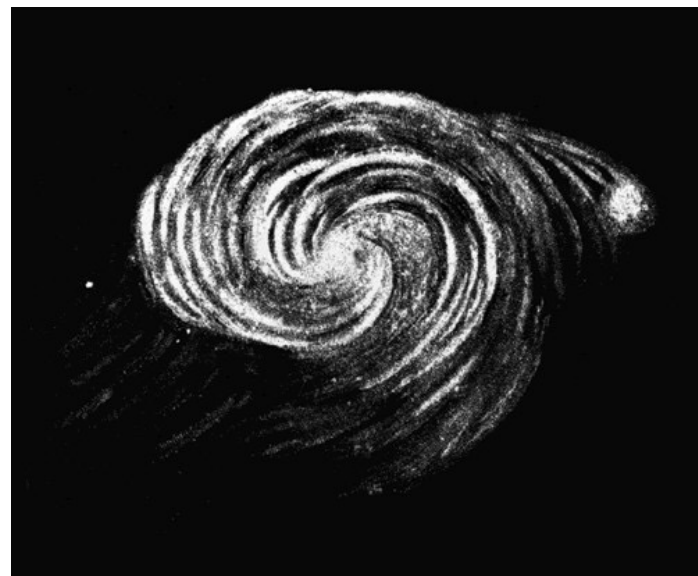


M51 = NGC 5194, Suuri Kierregalaksi



Varhaisia selityksiä galakseille

- Immanuel Kant esitti jo v. 1755 nebulaarihypoteesin, jonka mukaan aurinkokunta oli syntynyt pyörivästä kaasupilvestä. Kantin mukaan myös Linnunranta oli syntynyt samalla lailla paljon suuremmasta kaasupilvestä. Hän myös ehdotti että sumumaiset kohteet voisivat olla kaukaisia Linnunratoja.
- Lord Rosse teki havaintoja Irlannissa itsensä rakentamalla 72-tuumaisella (1.83m) kaukoputkella, joka oli silloin maailman suurin kaukoputki. Lord Rosse havaitsi ensimmäisenä galaksien spiraalirakenteen. Hän halusi osoittaa, että kaikki sumumaiset kohteet koostuvat tähdistä, mutta ei onnistunut siinä (vertaa emissiosumut vs. galaksit).



Lordi Rossen piirros M51:stä.



Suuri väittely – Great debate

- Suuri väittely käytiin vuonna 1920 Harlow Shapleyn ja Heber Curtisin kesken Harvardissa.
- Shapley väitti että sumumaiset kohteet sijaitsevat Linnunradan sisällä, ja että Linnunrata on täten koko maailmankaikkeus. Shapleyn syyt olivat seuraavat:
1) Suhteellinen koko, Andromedan kulmakoko on suhteellisen pieni -> etäisyys ”mahdoton” (miljoonia valovuosia). 2) Arvostettu hollantilainen tähtitieteilijä van Maanen oli ”nähty” spiraaligalaksien pyörivän vuosien aikaskaalassa (mahdoton $v > c$ nopeus). 3) Andromeda galaksissa oli havaittu vuonna 1885 (super)nova, jonka kirkkaus oli ”järjettömän” suuri.
- Curtis osoitti että Andromedassa on selvästi enemmän novia kuin vastaavassa osassa Linnunrataa. Myös havaitut pölyvanat muistuttivat Linnunrataa. Lisäksi joidenkin kohteiden suuret punasiirtyneet Doppler-viivat olivat erikoisia.
- **Shapley oli väärässä!** Toisaalta Shapley määritteli Linnunradan koon ja Auringon paikan siinä tarkasti käyttäen hyväksi pallomaisia tähtijoukkoja.



Edwin Hubble (1889-1953)

- Käyttäen 2.5m Hooker-teleskooppia Hubble havaitsi kaukaisissa galakseissa Kefeidejä, novia, epä-säännöllisiä muuttujia ja kirkkaita OB -superjättiläisiä.
- Vertaamalla näitä Linnunradassa oleviin tähtiin, joiden etäisyys ”tunnettiin”, hän mittasi galaksien etäisyydet.
- Yhdistämällä etäisyydet galaksien spektreistä mitattuihin säteisnopeuksiin hän päätyi kuuluisaan Hubblen lakiin.

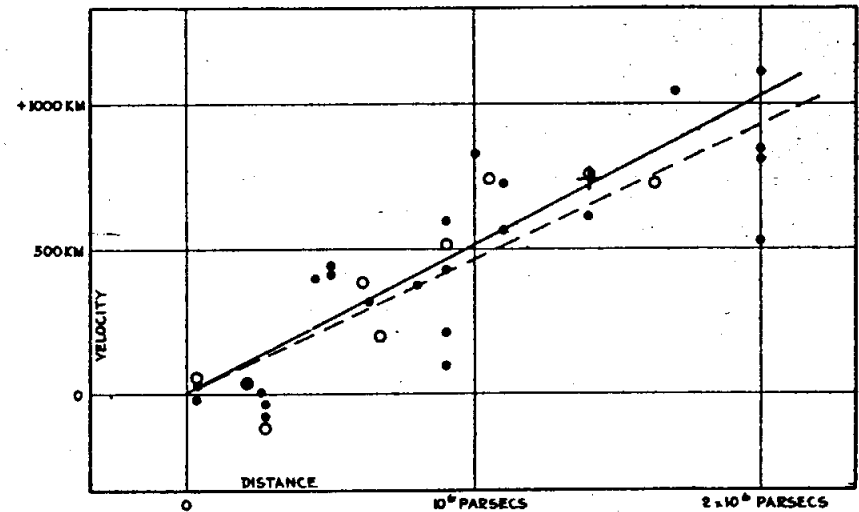


FIGURE 1

$$v_r = H_0 d + v_{pec}$$

$$H_0 = 550 \text{ km/s/Mpc} \Rightarrow$$

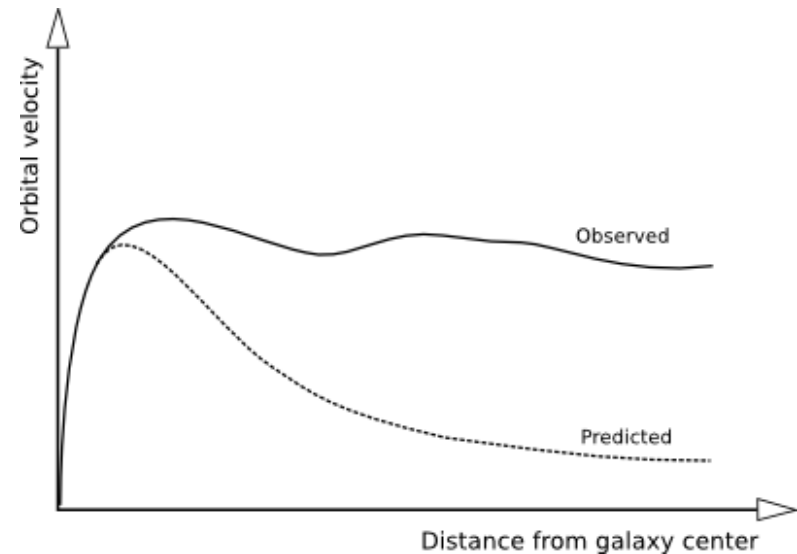
$$H_0 = 67.6 \pm 0.4 \text{ km/s/Mpc}$$

Planck-satelliitin tulokset vuodelta 2018.



Pimeä aine galakseissa

- Vera Rubinin havainnot 1970-luvun alussa osoittivat, että galaksien pyörimiskäyrät eivät laske samaan tahtiin valovoimaisen (eli näkyvän) aineen kanssa. Sen sijaan hän havaitsi laakean pyörimiskäyrän -> $M \propto R$ -> pimeää ainetta, määrä kasvaa suurilla R .
- Samoihin aikoihin Jerry Ostrikerin tietokone-simulaatiot Princetonnissa osoittivat, että kiekkomaiset spiraaligalaksit ovat epästabiileja, mikäli niitä ei ympäröi laaja pimeän aineen halo.



$$M(< R) = \frac{RV^2}{G}$$

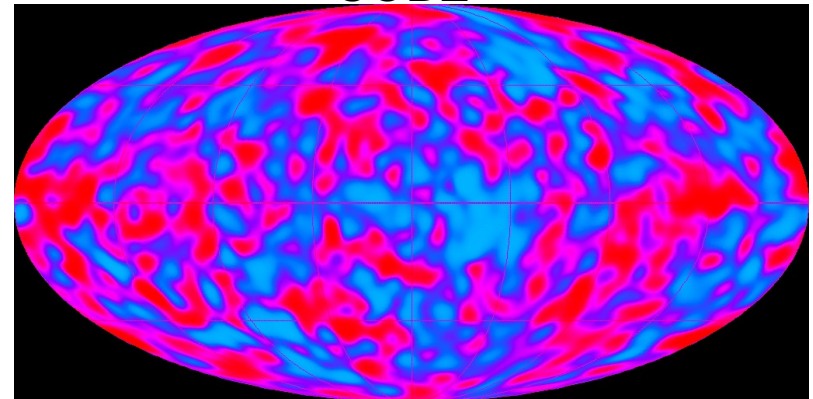
$$V_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$



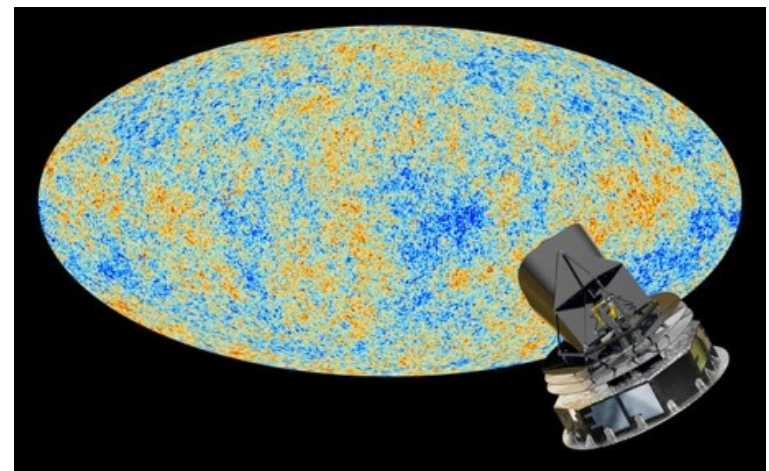
Kosminen mikroaaltotaustasäteily

- Arno Penzias ja Robert Wilson (Nobel 1978) löysivät vuonna 1965 sattumalta kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn (CMB), joka on kuumen alkuräjähdyksen jäännös. Täydellistä mustan kappaleen säteilyä, $T=2.728\text{ K}$.
- COBE-satelliittia käyttäen George Smoot ja John Mather (Nobel 2006) löysivät $\sim 10^{-5}$ kokoisia lämpötilafluktuaatioita, jotka ovat rakenteen muodostumisen siemeniä.
- WMAP ja PLANCK -> modernit kosmologiset parametrit.

COBE



PLANCK





1.2 Tähtien ja galaksien suhde

- Galaksitutkimuksessa täytyy hallita tähtien syntyä, rakennetta ja kehitystä kuvaavaa fysiikkaa, koska galaksien valo on kaikkien siinä olevien tähtien yhteenlaskettua valoa.
- Galakseja ei voi myöskään tutkia erillisinä kohteina vaan maailmankaikkeuden suuren mittakaavan rakenne ja kosmologia täytyy huomioida. Tähdet galakseissa eivät törmää juuri koskaan keskenään, mutta galaksien väliset törmäykset niiden ~ 10 miljardin vuoden elinkaareissa ovat hyvinkin yleisiä.
- Galaksien koot $R \sim 10$ kpc, nopeudet $v \sim 100$ km/s ja keskinäiset etäisyydet $x \sim 100$ kpc $\rightarrow t = x/v \sim 1$ Gyr. \rightarrow Galaksit eivät ole saarimaailmankaikkeuksia jotka kehittyvät itsenäisesti, vaan niiden väliset vuorovaikutukset ovat tärkeitä!



Hertzsprung-Russell -diagramma

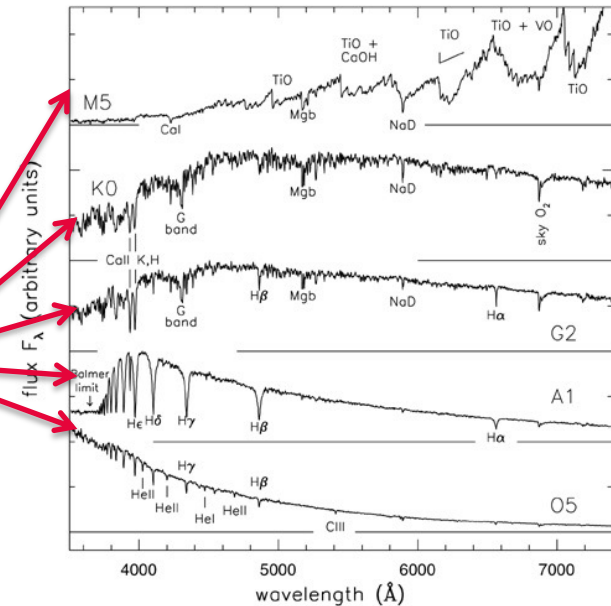
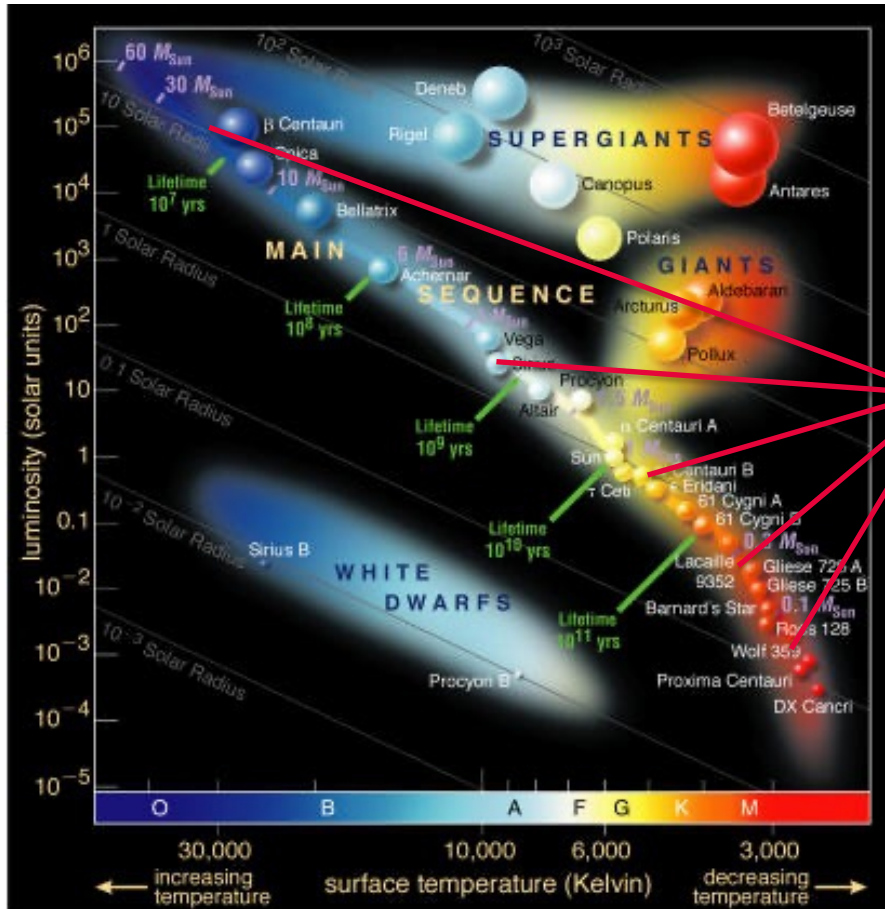


Fig 1.1 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Galaksien yhteenlaskettu valo riippuu tähtien valovoimasta tietyssä kehitysvaiheessa ja siitä kuinka kauan kyseinen vaihe kestää.



Tähtien luminositeetit ja iät

- Tähtien massat vaihtelevat välillä: $M_{\text{star}} \sim 0.1 - 100 M_{\odot}$
- Tähtien säteet pääsarjassa: $R_{\text{star}} \sim R_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{0.7}$
- Tähtien luminositeetit: $L_{\text{star}} \sim L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}$, $\alpha \sim 2.2 - 3.9$
- Tähtien iät: $\tau_{\text{MS}} \sim 10 \text{ Gyr} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5} \sim 10 \text{ Gyr} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-5/7}$
- Kirkkaimmilla tähdillä suurin L, mutta ne elävät lyhimmän ajan.



Galaksien spektrejä

- Mikäli galaksin spektrissä on paljon absorptioviivoja ja galaksi on punertava (sinistä valoa puuttuu), on galaksi mitä todennäköisimmin elliptinen tai linssimäinen galaksi jossa ei ole juurikaan tähtien syntyä.
- Galaksissa, jossa on vahvoja emissioviivoja (HII-alueita) ja ionisoituneen hapen viivoja ([OIII]), täytyy olla paljon nuoria tähtiä ja voimakasta tähtien syntyaktiiviteettia.
- Galaksin spektrit: -> tähtien keskimääräiset iät, tähtien syntyaktiivisuus, kemiallinen koostumus -> syntyhistoria.

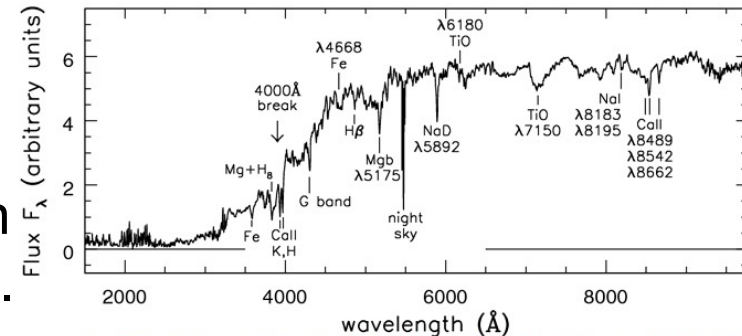
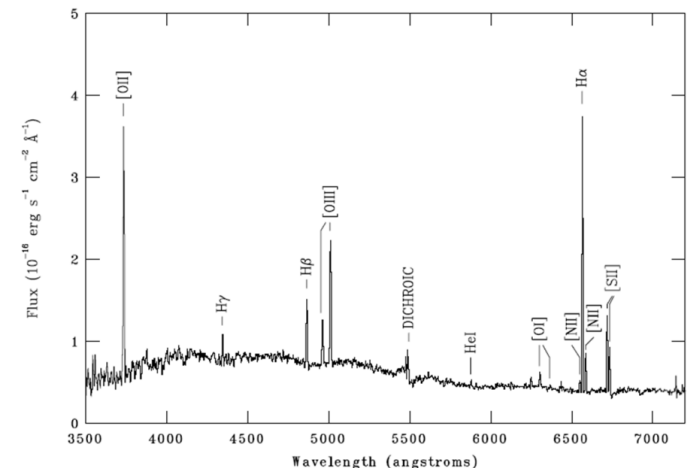


Fig 6.17 (A. Kinney) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



LRIS Spectrum of Minkowski's Object Credit: Croft et al. (2006)



Mitkä tähdet dominoivat galaksien massaa ja valoa

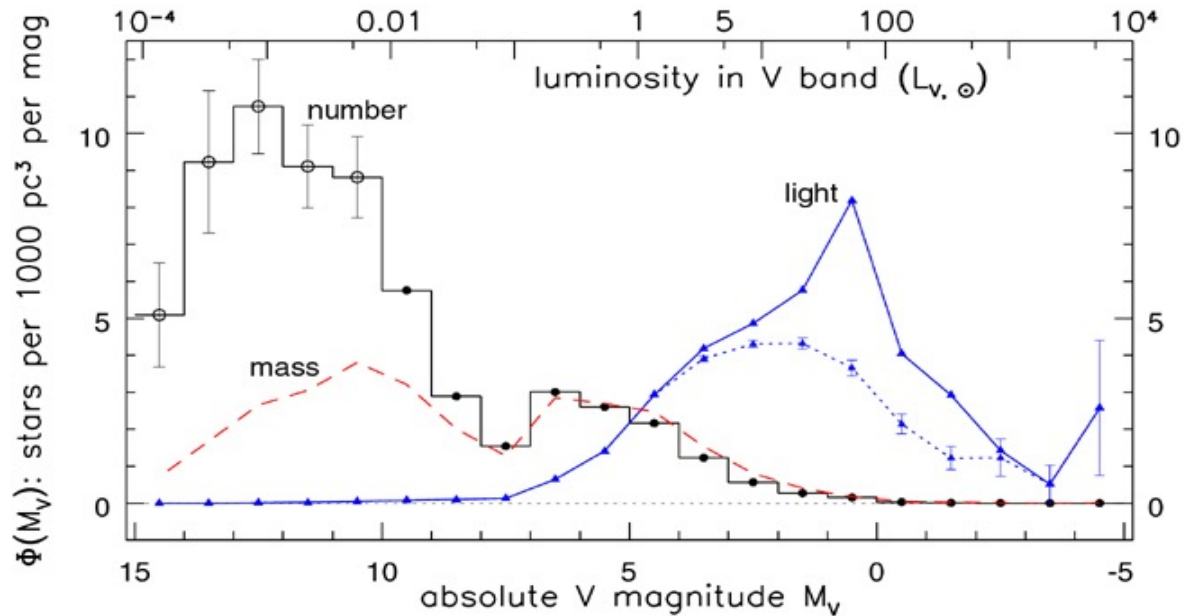


Fig 2.3 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Suurin osa galaksien (Linnunrata) valosta tulee kirkkaista A- ja F-tyypin tähdistä, sekä K-jättiläisistä. Melkein kaikki tähtimassa on K- ja M-kääpiöissä (punaiset kääpiöt) jotka ovat erittäin heikkovaloisia.



1.3 Galaksien havaitseminen

- Galakseilla ei ole selviä ulkorajoja, vaan tähtien valo vähenee ulospäin mentäessä ja jossain vaiheessa alittaa havaittavan taustataivaan kirkkauden.
- Galaksien ytimien kirkkaudet ovat tyypillisesti $I_B=18 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ja ulkorajana käytetään usein Holmbergin sädettä $I_B=26.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$.
- Infrapuna-aallonpituuksilla taivas on aina kirkkaampi kuin kohde ja joudumme havaitsemaan kohde+taivas ja pelkkä taivas -erotusta.
- Maan päältä voidaan havaita vain tietyissä havaintoikkunoissa.

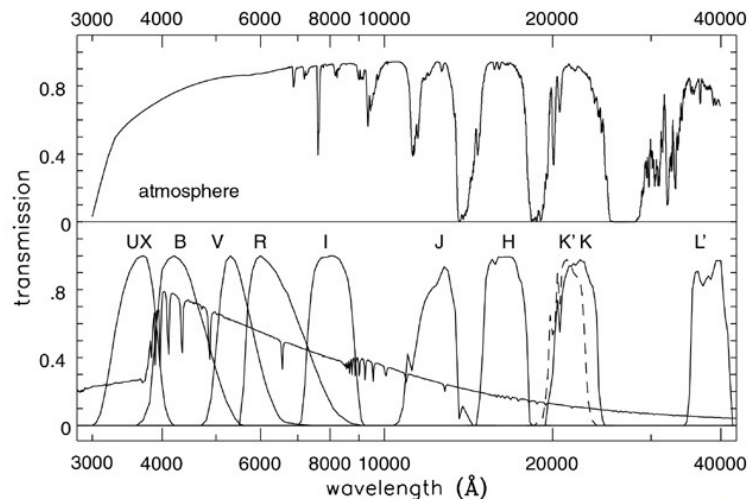


Fig 1.7 (M. Bessell) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

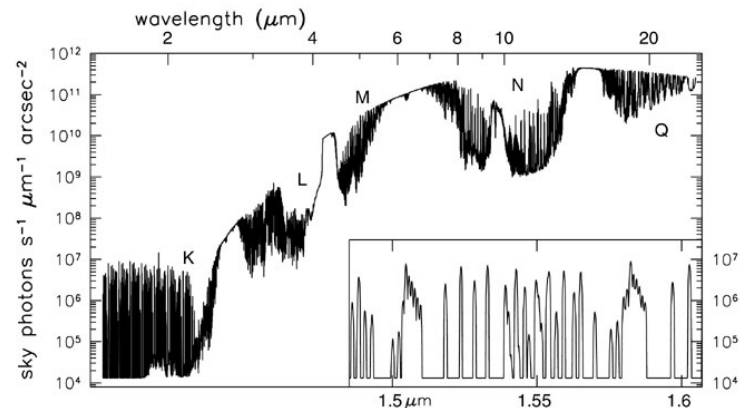


Fig 1.15 (Gemini) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Galaksien luminositeetit

- Galaksien luminositeetit vaihtelevat välillä $10^4 L_{\odot}$ (heikoimmat kääpiöt) ja $10^{12} L_{\odot}$ välillä (kirkkaimmat jättiläisgalaksit), jotka sijaitsevat galaksijoukkojen ytimissä.
- Galaksien luminositteja voidaan kuvata useamman kertaluvun yli **empiirisellä** Schechter-funktiolla, joka on polynomifunktion ja eksponenttifunktion tulo:

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^{\alpha} e^{-(L/L^*)} \frac{dL}{L^*}$$

$$\Phi_* \simeq 4.9 \times 10^{-3} h_7^3 \text{ Mpc}^{-3}, \quad \alpha = -1.1, \quad L_* \simeq 2.9 \times 10^{10} h_7^{-2} L_{\odot}$$

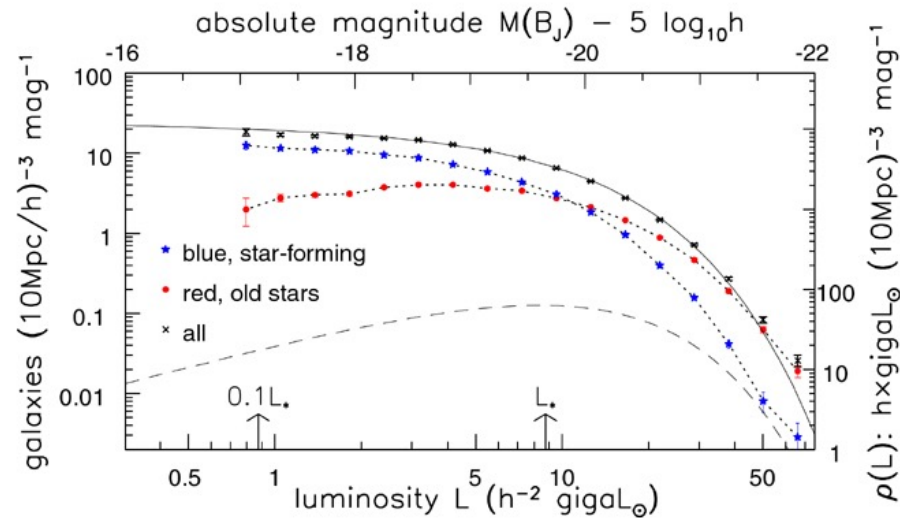


Fig 1.16 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

'Vakioiden' Φ_* , α ja L_* arvot riippuvat aallonpituudesta.



Galaksien massat

- Tyypillisesti galaksien kokonaismassat ovat välillä $\sim 10^7 - 10^{13} M_{\odot}$. Massojen tarkka määrittäminen on usein ongelmallista koska emme usein tiedä tarkkaan pimeän aineen määrää.
- Galaksien massoja voidaan määritellä seuraavia menetelmiä käyttäen:
 1. Planetaaristen sumujen ja pallomaisten tähtijoukkojen kinematiikka.
 2. Diffuusi röntgen-säteily galaksien halossa, jonka kaasun oletetaan olevan hydrostaattisessa tasapainossa.
 3. Satelliittigalaksien kinematiikka
 4. Spiraaleissa pyörimiskäyrät ja kääpiögalakseissa nopeusdispersio.
 5. Tärkeä suure on massa-valo suhde (M/L), Auringon ympäristössä $M/L \sim 2$, kääpiögalakseissa $M/L \sim 200-300$. Auringolle $M_{\odot}/L_{\odot} = 1$.



Linnunradan koordinaatisto

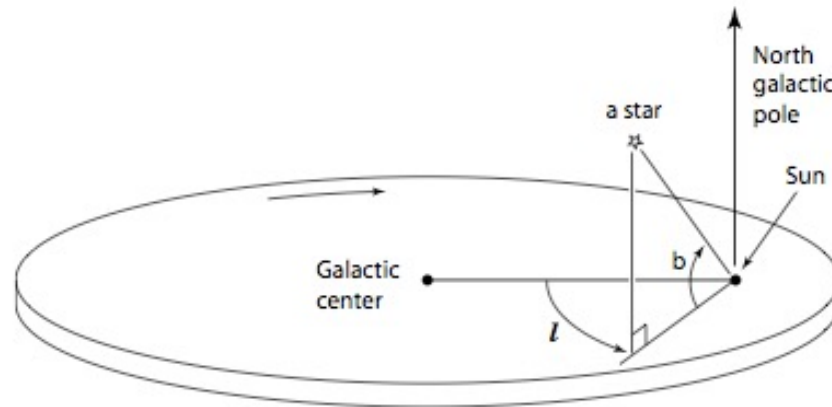
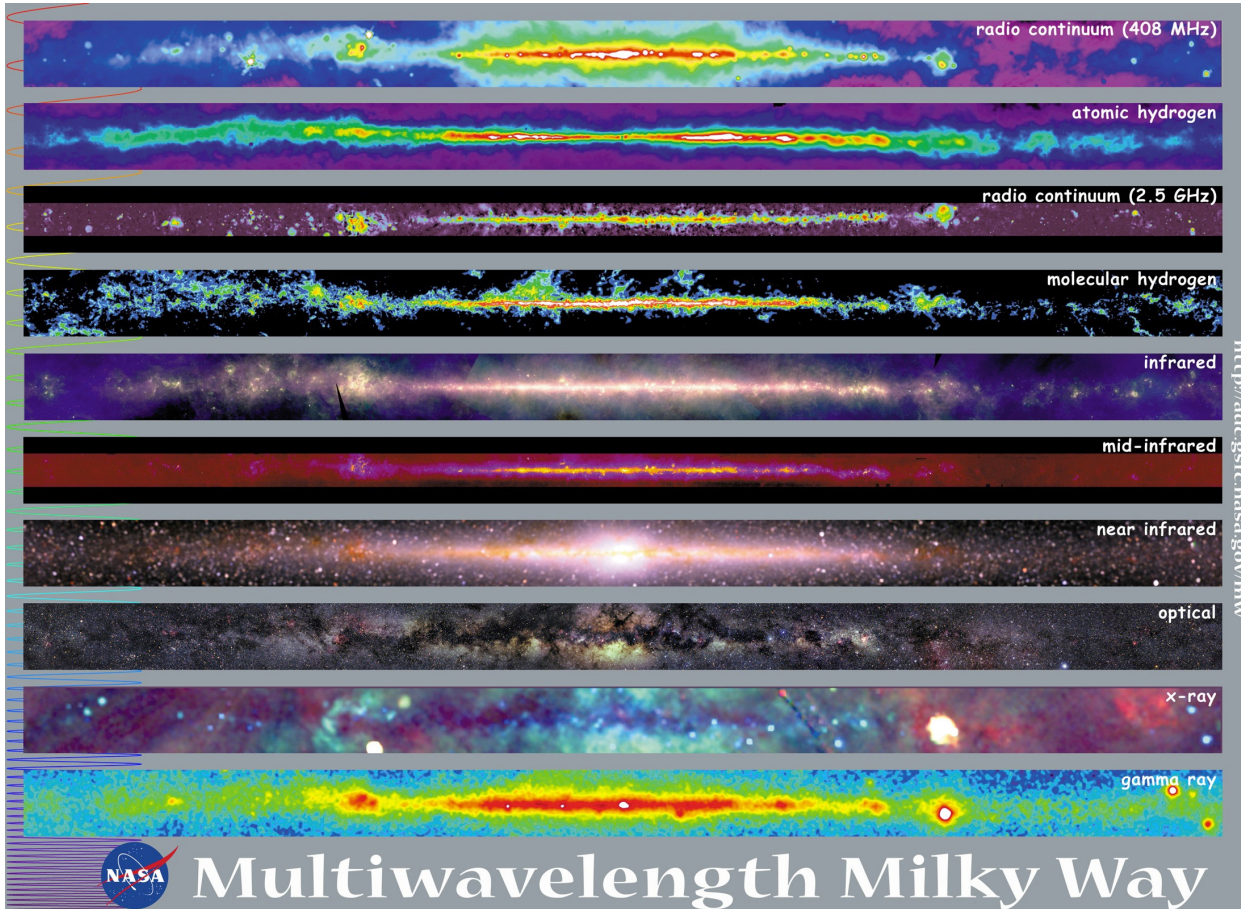


Figure 1.3 A schematic picture of the Sun's location in the Galaxy, illustrating the Galactic coordinate system. An arrow points in the direction of Galactic rotation, which is clockwise as viewed from the north Galactic pole.

- Linnunradan keskusta on suunnassa $(l,b)=(0,0)$, näkyvässä valossa voimme nähdä noin ~ 1 kpc päähän tähän suuntaan. Olemme noin ~ 8.2 kpc keskustasta.
- Galaksin navat ovat suunnissa $b=+90$ ja $b=-90$, napojen suunnissa on hyvin vähän ekstinktiota ja täten hyvä ekstragalaktisille havainnoille.



Linnunrata eri aallonpituusalueilla



Ei-termistä synkrotronisäteilyä, relativistiset elektronit.

Atomaarinen, lämmin vetykaasu.

Tiheä kylmä molekulaarinen kaasu.

Tähtienvälinen aine ja pöly.

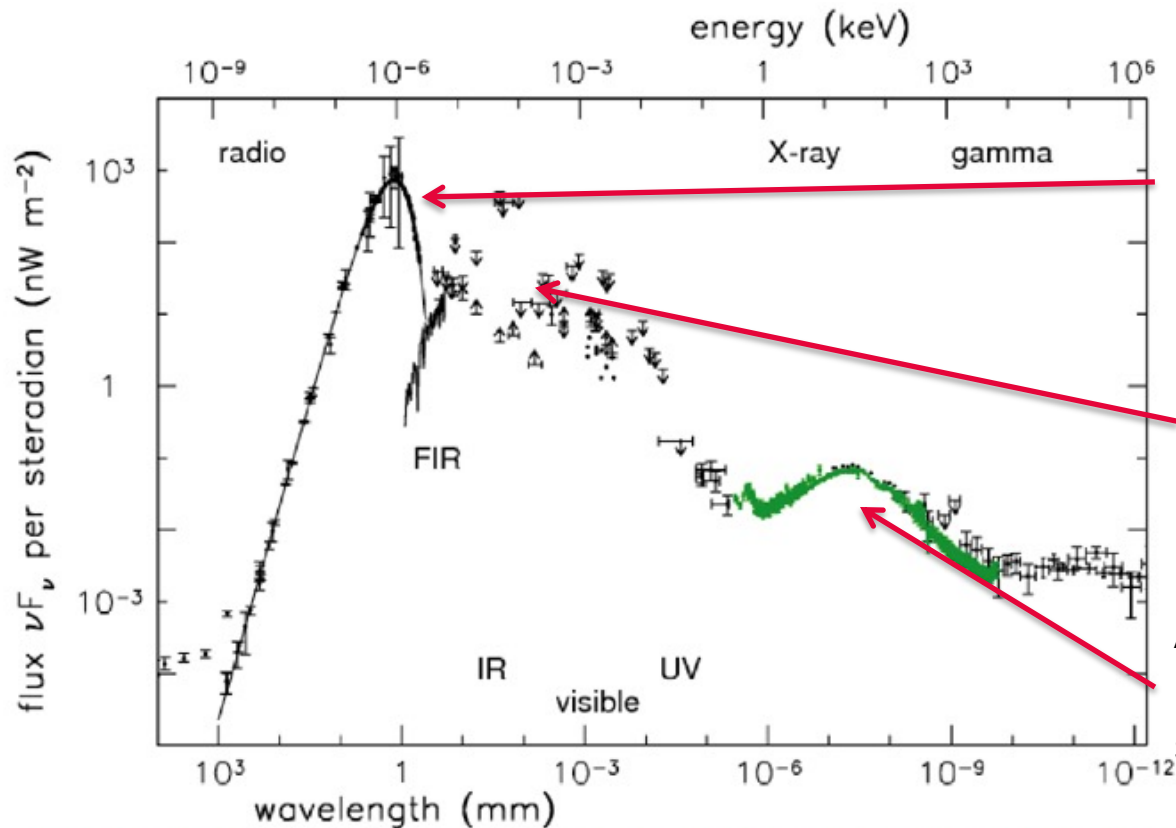
Tähtien säteily kaukaa (NIR) ja läheltä (optinen).

Shokeissa kuumennettua kaasua.

Kosmisten säteiden törmäyksiä H-atomeihin.



Kosminen taustasäteily



Kosminen mikroaaltotaustasäteily (CMB).

Tähtien ja aktiivisten galaksien suoraa valoa ja pölyn sirottamaa infrapuna- ja näkyvää valoa.

Aktiivisten galaksien kertymäkiekkojen röntgensäteilyä.

Fig 1.19 (D. Scott) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Parallaksimittaus ja standardikynttilät

- Parallaksimittaus on paras ja tarkin menetelmä, mutta soveltuu vain hyvin läheisille tähdille.
- Kefeidi-tähdet ovat sykkiviä punaisia jättiläisiä, joiden periodi on verrannollinen niiden luminositeettiin -> standardikynttilöitä.
- Tyypin Ia-supernovia voidaan käyttää standardikynttilöinä suurilla etäisyyksillä, koska ne oletettavasti räjähtävät kaikki samanmassaisina (Chandrasekharin raja $1.4 M_{\odot}$).
- Mikäli kosmologinen malli on tiedossa - > käytetään suoraan punasiirtymää.

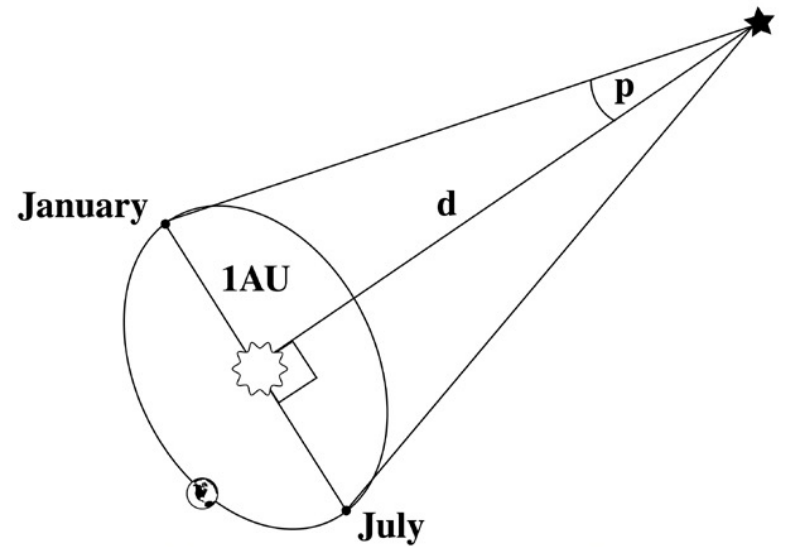


Fig 2.1 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Parallaksimittaukset. ESA:n GAIA luotain mullistaa parhaillaan parallaksi-mittaukset.



Mitä opimme?

1. Galaksitutkimus on nuori tieteen ala, alle 100 vuotta ja nykytutkimus etenee erittäin nopeasti.
2. Galaksien valo on tähtien valon summa, kirkkaat A- ja F-tyypin tähdet, sekä K-jättiläiset dominoivat valoa, himmeät K- ja M-tyypin kääpiöt massaa.
3. Galaksien luminositeetit vaihtelevat välillä 10^4 - $10^{12} L_{\odot}$ ja luminositeettifunktio voidaan sovittaa Schechter-funktiolla. Galaksien massat vaihtelevat välillä 10^7 - $10^{13} M_{\odot}$ ja valtaosa massasta on pimeää ainetta.
4. Galaksien etäisyyksien mittaaminen on hankalaa ja perustuu kosmiseen tikapuu-menetelmään, jossa pyritään määrittämään lyhyet etäisyydet ensin mahdollisimman tarkasti.