



Linnunradan rakenne

FYS2053, 5 op, syksy 2022

B120 Exactum

Luento 1: Johdanto, 05/09/2022



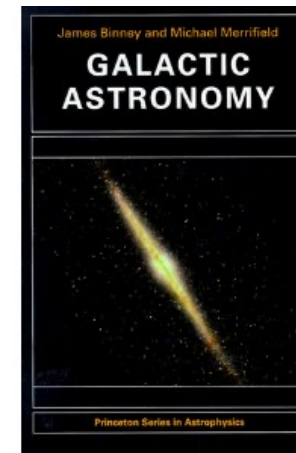
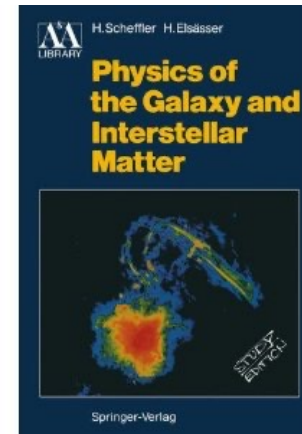
Kurssin perusasiat

- Luennoitsijat: Prof. Peter Johansson (Huone D311) – Periodi 1
Dosentti Jorma Harju (Huone D333) – Periodi 2
- Laskuharjoitusassistentit: FM Matias Mannerkoski (Huone D315)
FM Atte Keitaanranta (Huone D308)
- Luennot maanantaisin klo 12.15-14.00 huoneessa D123, Exactum, yhteensä 14 luentoa.
- Kotisivu: <https://wiki.helsinki.fi/display/astjourn/Linnunradan+rakenne>
- Kurssin virallinen kotisivu: https://studies.helsinki.fi/courses/cur/hy-opt-cur-2223-c55da04d-67fb-4318-87b2-c7c043232d18/FYS2053/Linnunradan_rakenne_Lectures
- Laskuharjoituksia, joka toinen viikko. Tehtävät tulevat jakoon Moodlessa ja ne myös palautetaan sinne.
- Yhteensä 6x5=30 tehtävää, **1/3 (10 tehtävää minimisuoritus)**, ylittävästä määrästä plus-pisteitä. Esittämällä tehtävän laskuharjoitustilaisuudessa voi saada lisäpisteen.
- Kurssimateriaali: Tämä luentomoniste, sekä vanha luentomoniste (Mattila).
- Lopputentti: **Alustavasti ma 19.12.2020 klo 10-14.**



Kurssikirjat ja lisämateriaali

- Vanha luentomoniste Mattila (2002) **M**. Löytyy skannattuna kurssin kotisivulta. Luentomonisteiden lisäksi kurssilla käytetään kurssikirjana:
- Scheffler & Elsässer: “Physics of the Galaxy and Interstellar Matter”, Springer Verlag, 1988. **S&E**.
- Hyödyllistä lisämateriaalia löytyy myös kirjasta: Binney&Merrifield: “Galactic Astronomy”, Princeton University Press, 1998. **B&M**.





Kurssin yhteys muihin HY:n kursseihin

- Esitiedot: Tähtitieteen, fysiikan ja mieluiten teoreettisen fysiikan peruskurssit.
- Hyödyllisiä tähtitieteen kandiopintoja: Galaksit ja kosmologia (syksy 2023), Astrofysiikan peruskurssit I ja II (kevät 2024), Tähtien rakenne ja kehitys (kevät 2023).
- Maisteriopintoja PAP-maisteriohjelma (Astrofysikaaliset tieteet): Tähtienvälinen aine, Radiotähtitiede, Säteilynkuljetus, Galaksien synty ja kehitys, Dynamiikan jatkokurssi
- Maisteriopintoja PAP-maisteriohjelma (Hiukkasfysiikka ja kosmologia): Cosmology I-II.



Kurssin sisältö 1

- Luento 1: 05.09.2022 – Johdanto
- Luento 2: 12.09.2022 – Tähtien etäisyydet ja nopeudet
- Luento 3: 19.09.2022 – Tähtienvälinen aine ja ekstinktio – Lask. 1
- Luento 4: 26.09.2022 – Stellaaristatistiikka
- Luento 5: 03.10.2022 – Linnunradan yleisrakenne I: Kiekkok ja avoimet tähtijoukot – Lask. 2
- Luento 6: 10.10.2022 – Linnunradan yleisrakenne II: Halo, pallomaiset tähtijoukot sekä Linnunradan keskusta.
- Luento 7: 17.10.2022 – Linnunrata ESA:n GAIA-satelliitin silmin -- Lask. 3
- Opetuksen väliviikko 24.10.2022



Kurssin sisältö 2

- Luento 8: 31.10.2022 – Tähtien liikkeet auringon lähiympäristössä
- Luento 9: 07.11.2022 – Kinemaattiset ryhmät ja Linnunradan rotaatio I – Lask. 4
- Luento 10: 14.11.2022 – Linnunradan rotaatio II ja tähtien radat Linnunradassa I
- Luento 11: 21.11.2022 – Tähtien radat Linnunradassa II ja Linnunradan massatiheys – Lask. 5
- Luento 12: 28.11.2022 – Linnunradan rotaatiokäyrä ja spiraalirakenne
- Luento 13: 05.12.2022 – Linnunradan synty ja kehitys – Lask. 6
- Luento 14: 12.12.2022 – Kertausluento/kyselytunti
- Lopputentti: Alustavasti: 19.12.2022 klo 10-14



Tällä luennolla käsitellään

1. Linnunrata-tutkimuksen historiaa. Tähtilaskennat ja erilaiset historialliset mallit Linnunradalle.
2. Linnunradan rakenneosat. Yleiskatsaus Linnunradan rakenteeseen: Kiekkö, keskuspulistuma, tähtijoukot, sumut ja yhteys naapurigalakseihin.
3. Galaktinen koordinaatisto. Mitä koordinaatteja käytetään Linnunradan tutkimuksessa ja miten ne voidaan muuttaa ekvatoriaalisiksi koordinaateiksi.
4. Vastaa soveltuvin osin: **M:** sivut i-viii, sekä 1-6
S&E: sivut 1-32
B&M: sivut 1-31



1.1 Linnunrata-tutkimuksen historiaa

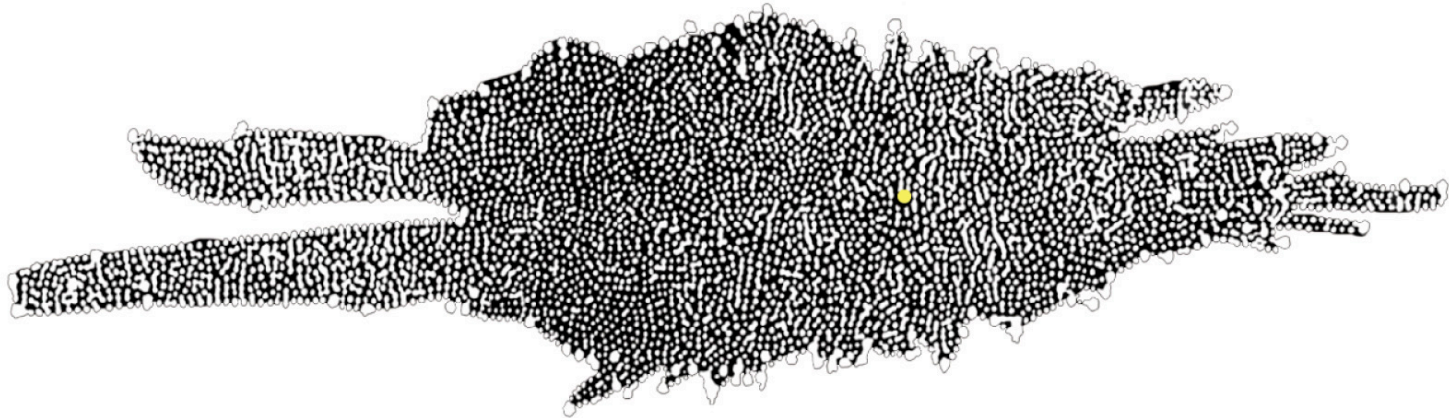
- Sana galaksi tulee kreikan kielen sanasta *galaxias* [γαλαξίας], joka tarkoittaa maitomaista, jolla on viitattu Linnunrataan: Milky Way, Via Lactea (latina). Eri kielissä eri sana esim. Linnunrata (suomi) ja Vintergatan (ruotsi).
- Jo muinaiskreikkalainen Demokritos spekuloi, että Linnunradan vyö koostuu kaukaisista tähdistä. Galileo Galilei (1610) todisti tämän ensimmäisillä kaukoputkihavainnoillaan.

Linnunradan vyö





Herschelin malli Linnunradalle



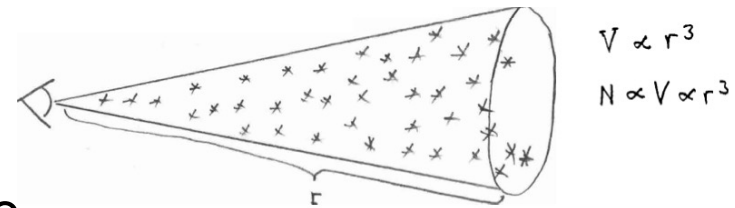
- Tähtitieteilijä Wright (1750), sekä filosofit Kant (1755) ja Lambert (1761) esittävät ensimmäisinä näkemyksiä siitä, että maailmankaikkeudessa on lukuisia Linnunradan kaltaisia järjestelmiä, eli galakseja.
- William Herschel (1738-1822) suoritti ensimmäisenä tähtilaskentoja ja päätyi malliin jossa Linnunrata on litteä levy, jonka ulottuvuus linnunradan vyön suunnassa on hyvin suuri, kun taas kohtisuorassa suunnassa reuna tulee vastaan melko nopeasti. Havaintojen takana oli (virheellinen) oletus, että kaikki tähdet ovat todellisuudessa yhtä kirkkaita.



Klassinen stellaaristatistiikka

- Tähtilaskentojen klassinen kysymys on: Havaituista, rajasuurusluokkaa m kirkkaampien tähtien lukumäärästä neliöastetta kohden, $N(m)$, jotka havaitaan mahdollisimman monille ei $m:n$ arvoille, on johdettava tähtien kolmiulotteinen-avaruusjakauma, $D(r)$, etäisyyden r funktiona:

$$N(m) = \omega \int_0^{r(m)} D(r) r^2 dr$$



- Tässä ω on avaruuskulma, esim. 1 neliöaste. Lisäksi voidaan ottaa huomioon että kaikki tähdet eivät todellisuudessa ole yhtä kirkkaita. Tällöin painotetaan yhtälö tähtien luminositeettifunktiolla $\Phi(M)$: Stellaaristatistiikan perusyhtälö:

$$N(m) = \omega \int_0^{\infty} \Phi(M) D(r) r^2 dr$$



Tähtilaskennat

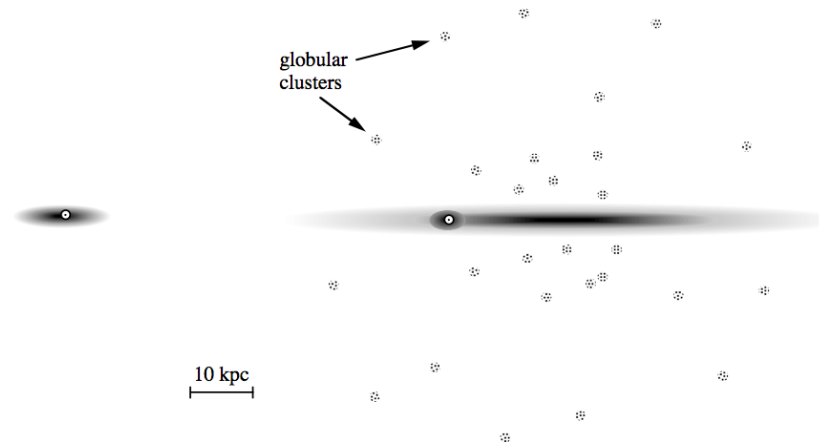
- Tähtilaskentoja aloitettiin jo 1800-luvulla Suomessakin vaikuttaneen F.W.A. Argelanderin toimesta: Bonner Durchmusterung 1859-1862, 324198 tähteä, deklinaatiovälillä $\delta=+90^\circ - -2^\circ$ suuruusluokkaan $9^m.2$ ja osittain jopa 10^m asti.
- Südliche Bonner Durchmusterung ja Cordoba Durchmusterung täydensivät luetteloa eteläiselle taivaalle, noin 580 000 tähteä 10^m asti.
- Kansainvälisen Carte du Ciel projektin (1887 Pariisi) tarkoitus oli kuvata koko taivas 14^m asti käyttäen silloin uutta valokuvaustekniikkaa. 18 observatoriota mukana, mukaan lukien Helsinki ($\delta=39^\circ - 46^\circ$), joka ainoana saattoi projektin loppuun, viimeiset luettelot julkaistiin vuonna 1938!
- Koko taivaan kartoitusten lisäksi tehtiin useita syvempiä havaintoja pienillä taivaanalueilla (Selected Areas).
- Nykyään, esim. Hubble Guide-star luettelossa on noin miljardi tähteä magnitudiin 21^m saakka. GAIA:n uusimmassa luettelossa (2022) on tarkat tiedot 1.7 miljardista tähdestä (noin $\sim 1\%$ kaikista Linnunradan tähdistä).



Kapteyn ja Shapleyn mallit

Kapteyn Universe

Shapley's Model

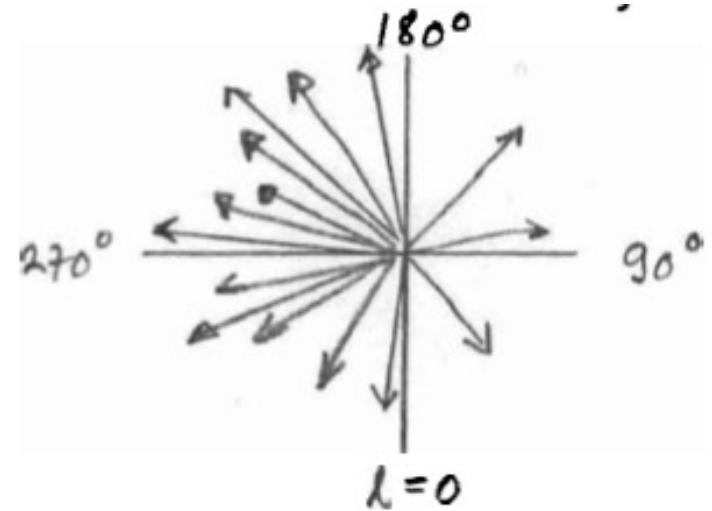


- Kapteyn esitti vuonna 1920 mallin Linnunradalle, jossa Aurinko oli lähellä keskustaa ja tähtitiheys väheni kaikkiin suuntiin, ja oli noin 1/10 arvossa 2 kpc päässä. Tämä malli jäi melko lyhytikäiseksi.
- Shapley havaitsi muuttuvia Kefeidi-tähtiä pallomaisissa tähtijoukoissa ja mittasi niiden etäisyyksiä. Tähtijoukkojen muodostaman järjestelmän keskipiste sijaitsi Jousimiehen tähdistössä ~14 kpc etäisyydellä (nykyinen arvo on noin 8 kpc).



Tähtien liikkeet – Auringon apeksi

- Tutkimalla läheisten tähtien liikkeitä Herschel määrittä vuonna 1783 Auringon liikkeen suunnan taivaalla (ns. Auringon apeksi): $\alpha=17^{\text{h}}30^{\text{m}}$, $\delta=+26^{\circ}$, Herkuleen tähdistön suunnassa. Argelander paransi tulosta käyttämällä 390 tähteä.
- Useimpien lähitähtien suhteelliset nopeudet ovat alle <30 km/s ja suunnat ovat lähes satunnaisesti jakautuneet.
- Tähdet, joilla on suuret nopeudet (>60 km/s) ovat asymmetrisesti jakautuneet (High velocity stars=HVS).
- Aurinko ja suurin osa tähdistä kiertävät lähes ympyräradoilla, HVS tähdet, jotka sijaitsevat pullistuman suunnassa eivät osallistu samalla tavalla pyörimiseen.



Auringon liikkeen suunta $l=90^{\circ}$, missä l on galaktinen pituus.

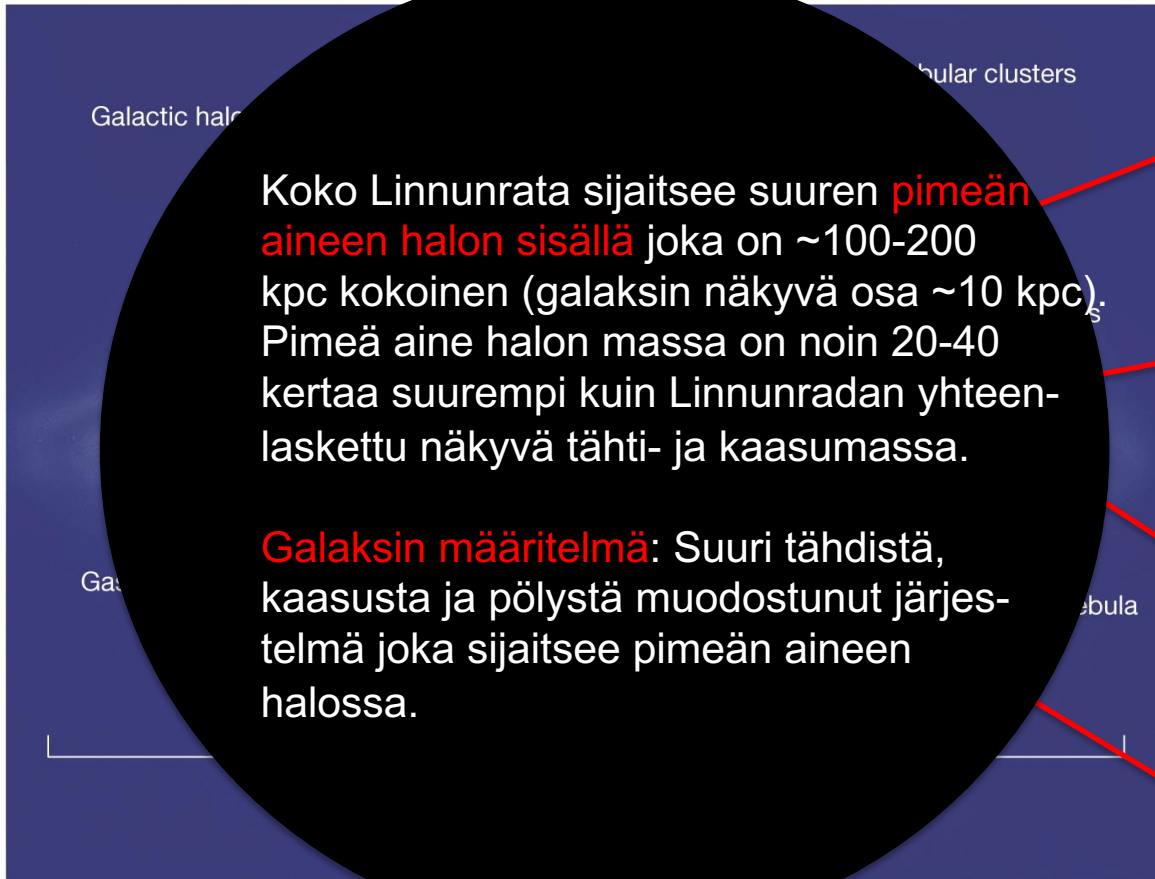


Linnunradan tähtienvälinen aine

- Varhaisia sumuhavaintoja jo 1700-1800 luvuilla Herschelin ja Messierin toimesta.
- R.J. Trümpler (1930) havaitsi että Linnunradan yleinen ekstinktio on noin $0.7^m/\text{kpc}$, nykyarvo $2^m/\text{kpc}$ ja z-suuntainen paksuus alle 100 pc.
- Hubble löysi "Zone of Avoidance"-alueen Linnunradan tasosta jossa ei ollut juurikaan ekstragalaktisia kohteita etualan pölyn takia.
- Tähtienvälisessä kaasussa esiintyy teräviä absorptioviivoja, esim. Natriumin (Na) ja Kalsiumin (Ca) viivoja. Viivat esiintyvät myös kaksoistähdissä stationäärisinä, eli kyseessä oli tähtienvälisen aineen viivoja (Hartman 1904).
- Viivojen ekvivalentti leveys kasvaa verrannollisesti tähden etäisyyteen (Struve 1928), eli absorboivan väliaineen määrä on verrannollinen etäisyyteen.
- Neutraalin vedyn $\lambda=21$ cm viiva (spin p-ylös, spin e-ylös -> spin p-ylös, spin e-alas). Radiohavainnot osoittavat Linnunradan tähtienvälisen aineen pyörimisen. 21 cm viiva: van de Hulst teoria (1945), Even ja Purcell havainnot (1951).



1.2 Linnunradan rakenneosat



Koko Linnunrata sijaitsee suuren **pimeän aineen halon sisällä** joka on ~100-200 kpc kokoinen (galaksin näkyvä osa ~10 kpc). Pimeä aine halon massa on noin 20-40 kertaa suurempi kuin Linnunradan yhteenlaskettu näkyvä tähti- ja kaasumassa.

Galaksin määritelmä: Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa.

Linnunradan keskeltä löytyy **keskuspulistuma** joka koostuu tyypillisesti **vanhoista tähdistä**.

Linnunradan **kiekko** (ohut ja paksu) on litteä rakennelma, jossa on **kaasua ja nuoria tähtiä**.

Linnunradan **halossa** on hyvin **vanhoja tähtiä** sekä pallomaisia tähti-joukkoja.

Linnunradan **ytimessä** on **supermassiivien musta aukko**.

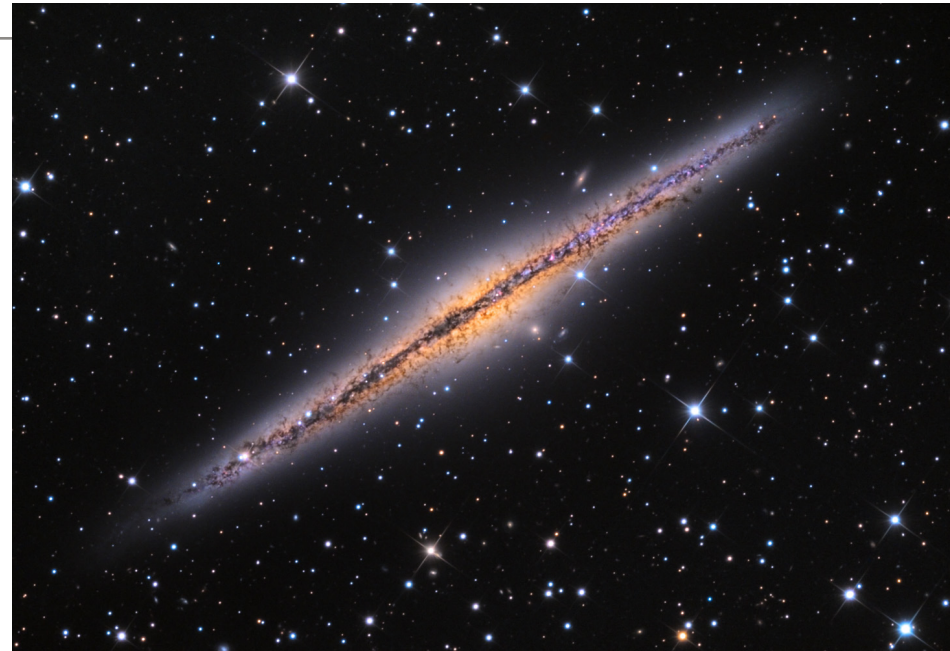
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley



Linnunradan kaltaiset galaksit

M 74

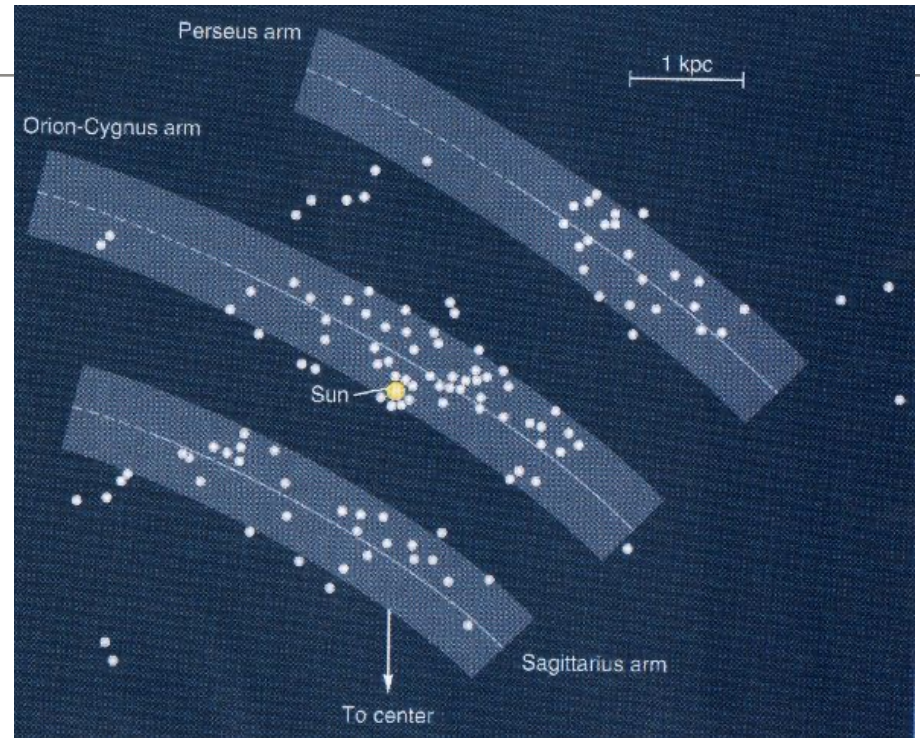
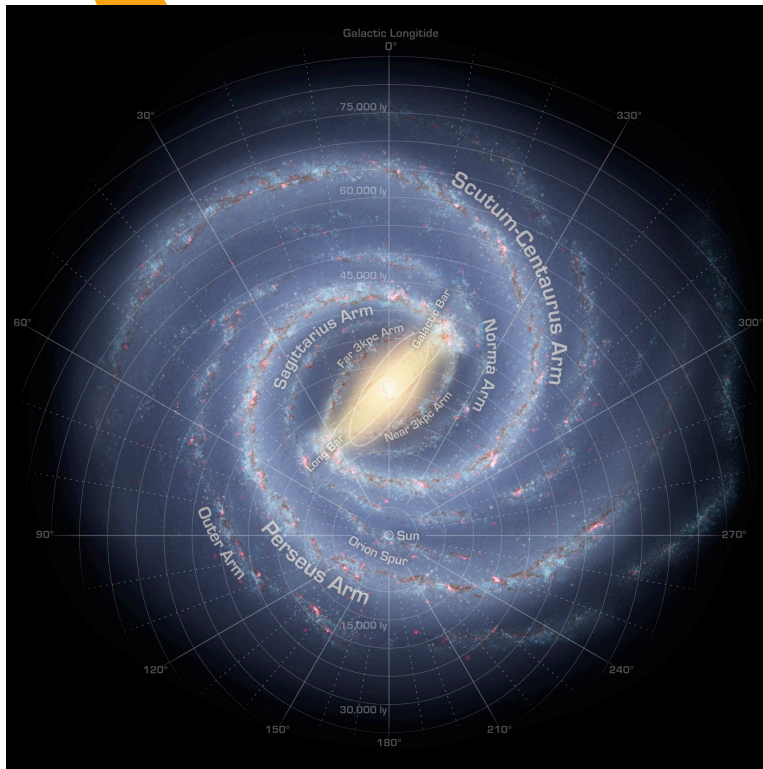
NGC 891



- Koska sijaitsemme Linnunradan sisällä on sen havainnointi usein hankalaa. Tutkimalla Linnunradan kaltaisia galakseja voimme saada käsityksen siitä, miltä Linnunrata todennäköisesti näyttäisi päältä päin (M 74) ja sivulta päin katsottuna (NGC 891).



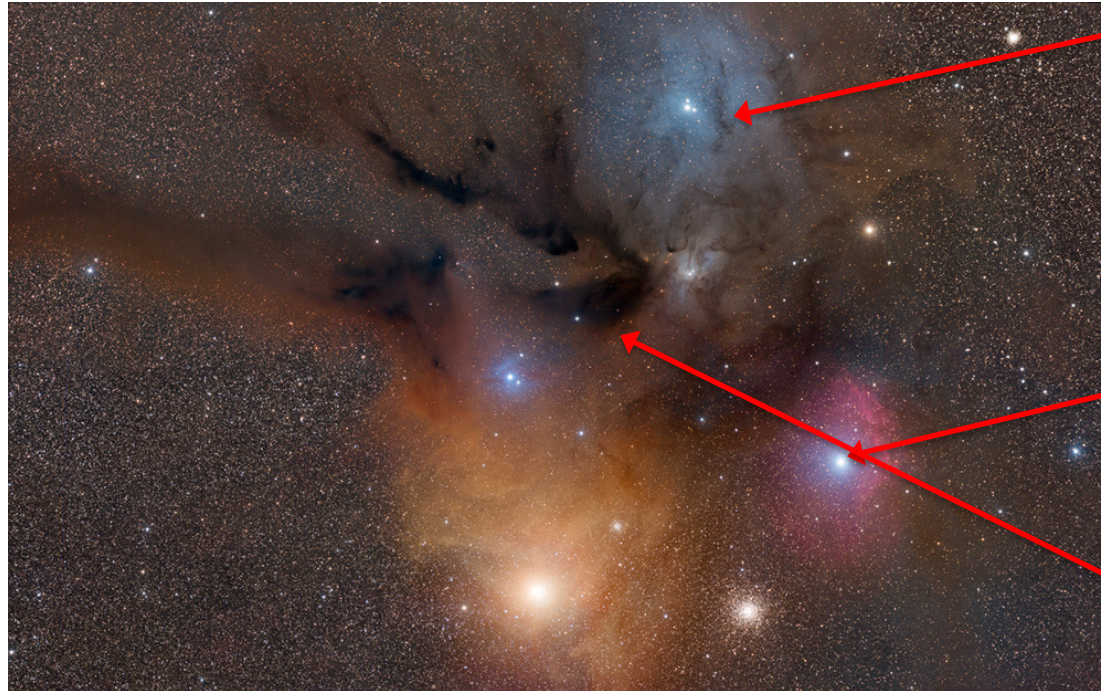
Linnunradan spiraalirakenne



- Aurinko sijaitsee paikallisen (Orion-Cygnus) haaran sisäreunassa. Ulompana on Perseuksen haara ja sisempänä Jousimiehen haara. Linnunrata on todennäköisesti SBc-luokan avonainen sauvaspiraaligalaksi.



Linnunradan kaasusumut



Sinertävä (Rayleighin sironna $I_{\text{sir}} \propto \lambda^{-4}$) heijastussumu. Syntyy kun tähti ei ole riittävän kirkas ionisoimaan kaasua (B1 ja myöhemmät spektriluokat).

Punainen väri ($H\alpha$ $\lambda=656\text{nm}$) tulee HII-alueesta, joka on ionisoivan tähden (B1 ja varhaisemmat spektriluokat) aiheuttamaa rekombinaatiosäteilyä.

Tiheät tähtienvälisen aineen molekyylipilvet absorboivat lähes kaiken optisen säteilyn. "Holes in the sky" (E.E. Barnard).



Linnunradan tähtijoukot



- Pallomaiset tähtijoukot ovat erittäin vanhoja (ikä > 10 Gyr) ja ne koostuvat punaisista metalliköyhistä tähdistä. Ne sijaitsevat Linnunradan halossa.
- Avoimet joukot sijaitsevat lähellä Linnunradan tasoa ja niissä on runsaasti nuoria tähtiä. Avoimet joukot hajoavat noin ~100 miljoonan vuoden aikaskaalalla molekyylipilvien ja muiden tähtien aiheuttamien painovoimahäiriöiden takia.



Mitkä tähdet dominoivat Linnunradan massaa ja valoa

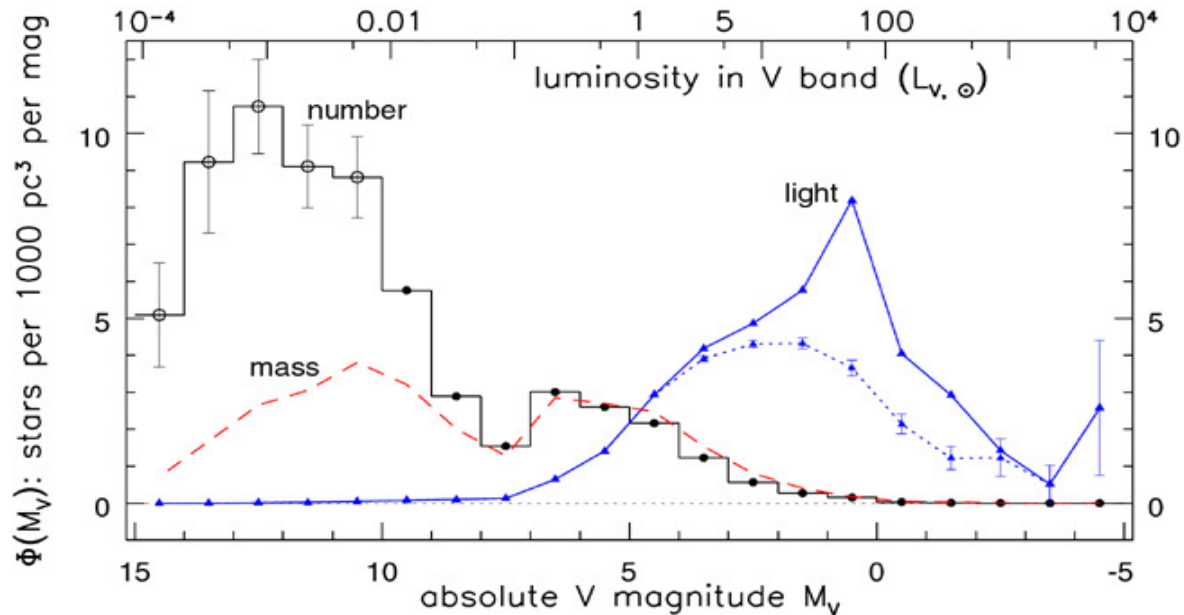
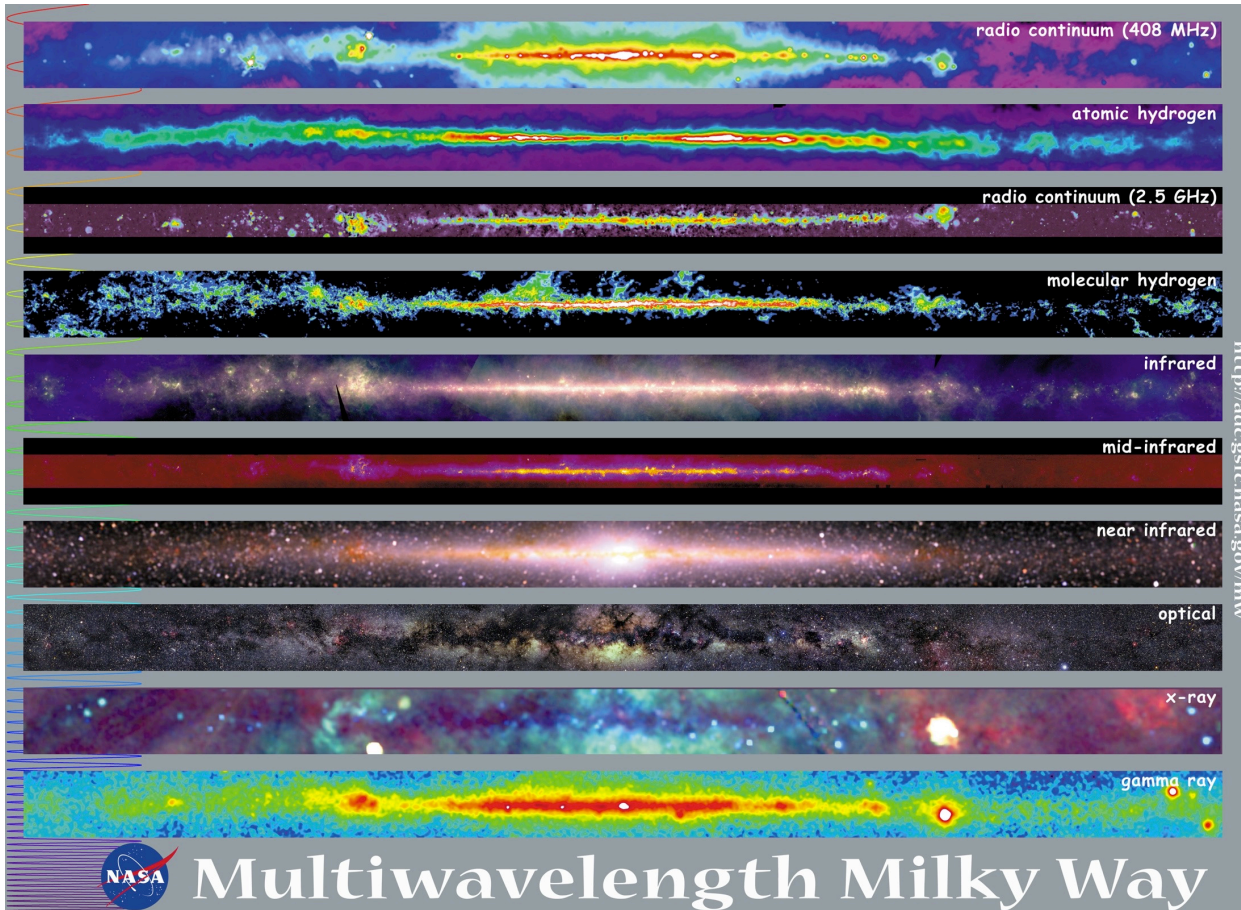


Fig 2.3 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Suurin osa Linnunradan valosta tulee kirkkaista A- ja F-tyypin tähdistä, sekä K-jättiläisistä. Melkein kaikki massa on K- ja M-tyypin punaisissa kääpiöissä jotka ovat erittäin heikkovaloisia.



Linnunrata eri aallonpituusalueilla



Kuuma ionisoitunut kaasu ja synkrotronisäteily.

Atomaarinen, lämmin vetykaasu.

Tiheä kylmä molekulaarinen kaasu.

Tähtienvälinen aine ja pöly

Tähtien säteily kaukaa (lähi-infrapuna) ja läheltä (optinen).

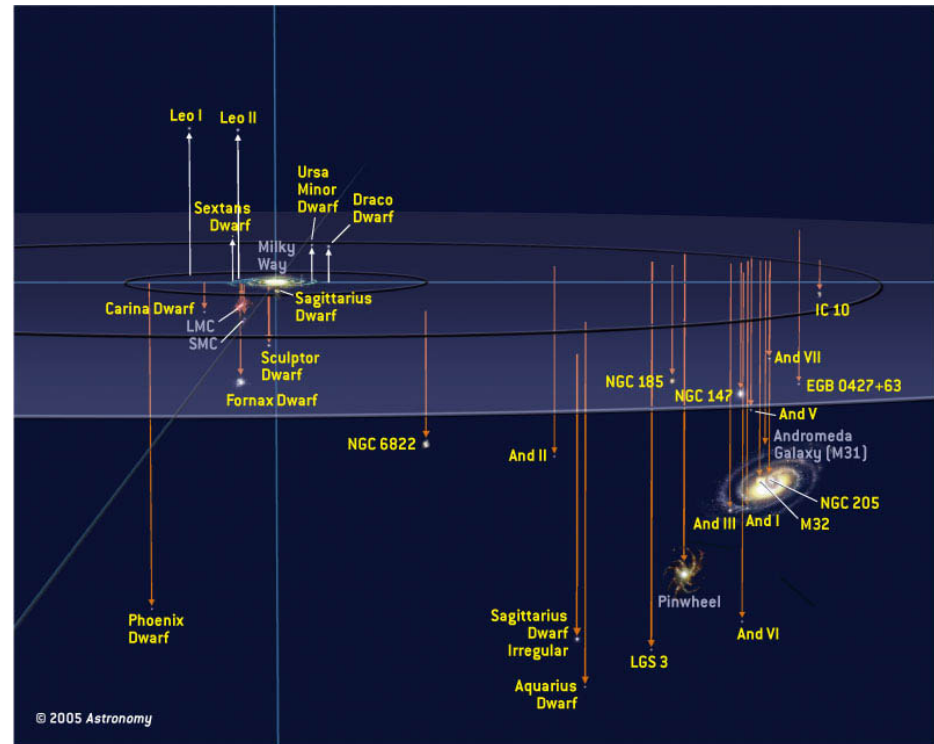
Shokeissa kuumennettua kaasua.

Kosmisten säteiden ja H-atomien törmäyksiä.



Linnunrata paikallisessa galaksiryhmässä

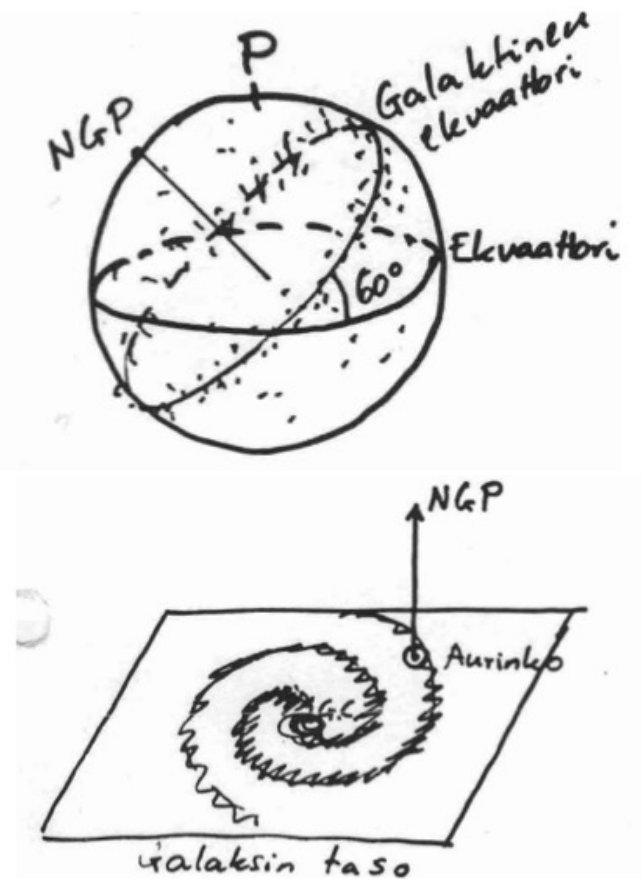
- Linnunrata sijaitsee paikallisessa galaksiryhmässä, jossa on Linnunradan lisäksi 2 isoa spiraaligalaksia (M31 ja M33, yhteensä 90% kaikesta valosta).
- Lisäksi sekä Linnunradan ja M31:sen ympärille on keskittynyt suuri joukko kääpiögalakseja.
- Kaiken kaikkiaan yli ~80 galaksia noin 1 Mpc alueella.





1.3 Galaktinen koordinaatisto

- Linnunradan vyö taivaalla muodostaa likimäärin isoympyrän, jota kutsutaan galaktiseksi ekvaattoriksi. Määritely siten että tähtien ja/tai tähtienvälisen aineen näennäinen jakautuma taivaalla olisi mahdollisimman symmetrinen galaktisen ekvaattorin suhteen.
- Aurinko sijaitsee hyvin lähellä Linnunradan symmetriatasoa. $Z_0=10-20$ pc.
- Galaktinen pohjoisnapa:
 $\alpha=12^{\text{h}}51^{\text{m}} \delta=+27^{\circ}8'$ (J2000)
 $\alpha=12^{\text{h}}49^{\text{m}} \delta=+27^{\circ}24'$ (J1950)





Linnunradan koordinaatisto

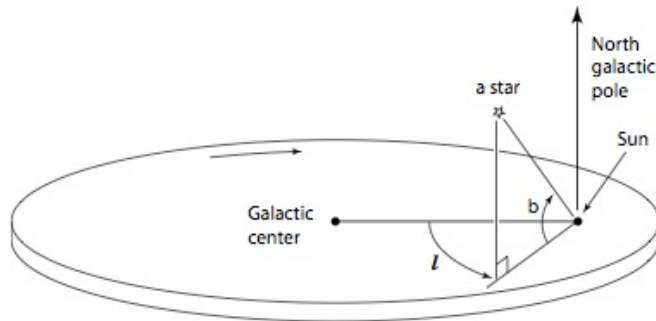
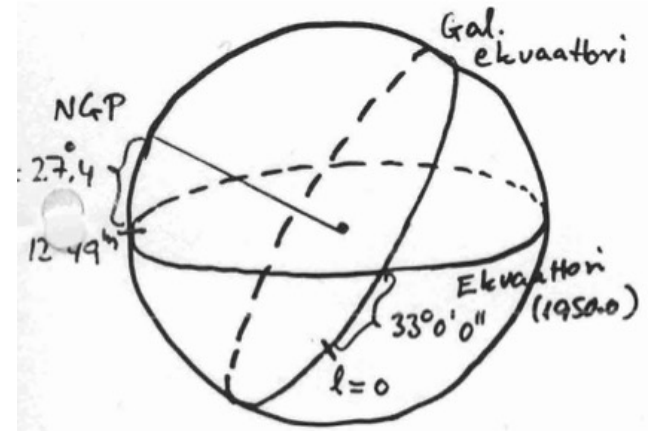


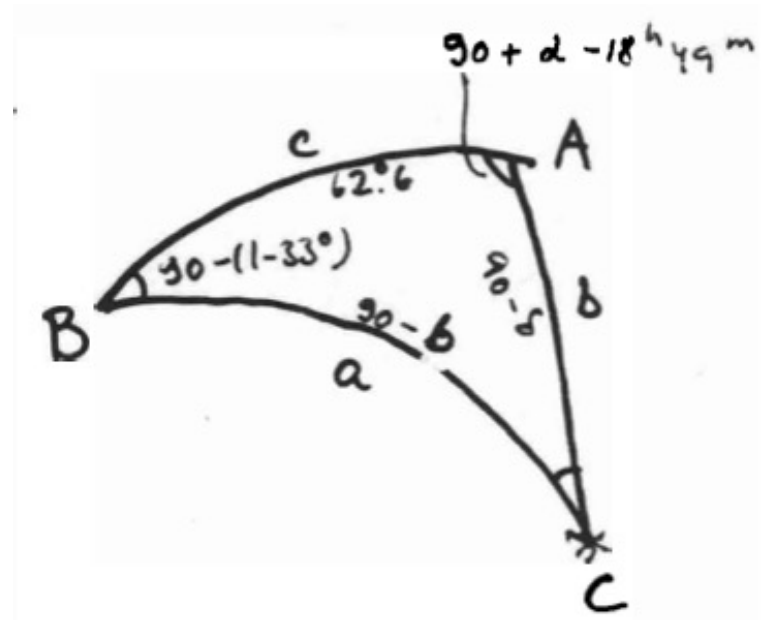
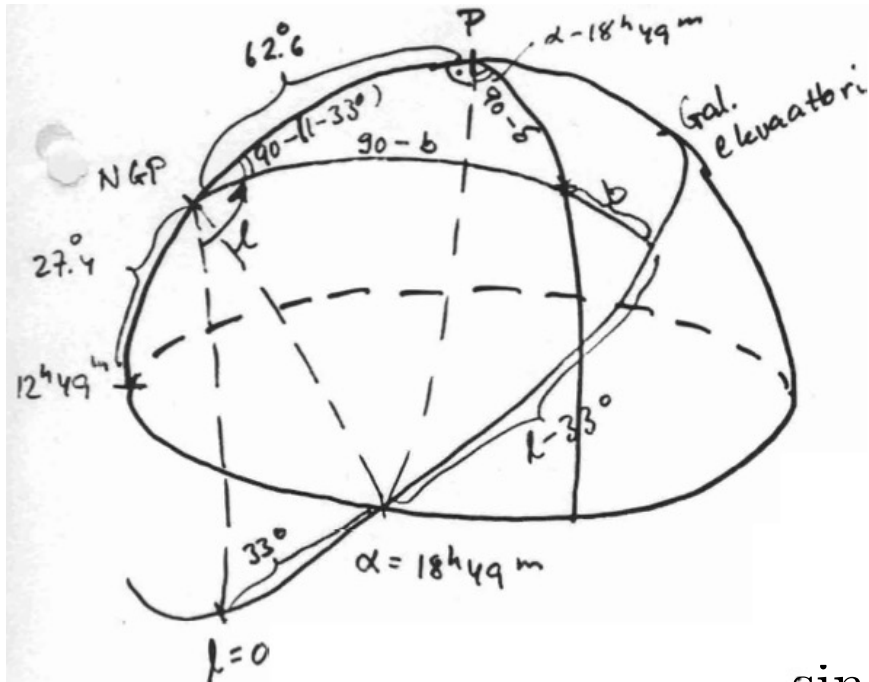
Figure 1.3 A schematic picture of the Sun's location in the Galaxy, illustrating the Galactic coordinate system. An arrow points in the direction of Galactic rotation, which is clockwise as viewed from the north Galactic pole.



- Linnunradan keskusta (Sgr A*, keskustan musta aukko) on suunnassa $(l,b)=(0,0)$, näkyvässä valossa voimme nähdä noin ~ 1 kpc päähän tähän suuntaan. Olemme noin ~ 8 kpc päässä keskustasta.
- Taivaanekvaattorin ja galaktisen ekvaattorin leikkauspiste on hyvin lähellä arvoa $\Delta l = 33^\circ 0' 0''$ (1950 epookki), nolla-pisteen määritelmä.



Koordinaattimuunnos



$$\sin a \sin B = \sin b \sin A$$

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A$$

- Pallokolmion peruskaavat:



Muunnos-kaavat (epookki 1950)

$$a \Rightarrow 90^\circ - b$$

$$B \Rightarrow 90^\circ - (l - 33^\circ)$$

$$b \Rightarrow 90^\circ - \delta$$

$$A \Rightarrow (\alpha - 18^h 49^m) + 90^\circ$$

$$c \Rightarrow 90^\circ - \delta_{\text{G.P.}} = 62.6^\circ$$

$$\begin{cases} \cos b \cos(l - 33^\circ) = \cos \delta \cos(\alpha - 18^h 49^m) \\ \sin b = \sin \delta \cos 62.6^\circ - \cos \delta \sin 62.6^\circ \sin(\alpha - 18^h 49^m) \\ \cos b \sin(l - 33^\circ) = \sin \delta \sin 62.6^\circ + \cos \delta \cos 62.6^\circ \sin(\alpha - 18^h 49^m) \end{cases}$$

- Huomaa, että: $\sin(90^\circ - x) = \cos x$, $\sin(x + 90^\circ) = \cos x$
 $\cos(90^\circ - x) = \sin x$, $\cos(x + 90^\circ) = -\sin x$



Muunnos-kaavat (epookki 2000)

$$a \Rightarrow 90^\circ - b$$

$$B \Rightarrow 90^\circ - (l - 33.9^\circ)$$

$$b \Rightarrow 90^\circ - \delta$$

$$A \Rightarrow (\alpha - 18^h 51^m) + 90^\circ$$

$$c \Rightarrow 90^\circ - \delta_{\text{G.P.}} = 62.87^\circ$$

$$\begin{cases} \cos b \cos(l - 33.9^\circ) = \cos \delta \cos(\alpha - 18^h 51^m) \\ \sin b = \sin \delta \cos 62.9^\circ - \cos \delta \sin 62.9^\circ \sin(\alpha - 18^h 51^m) \\ \cos b \sin(l - 33.9^\circ) = \sin \delta \sin 62.9^\circ + \cos \delta \cos 62.9^\circ \sin(\alpha - 18^h 51^m) \end{cases}$$



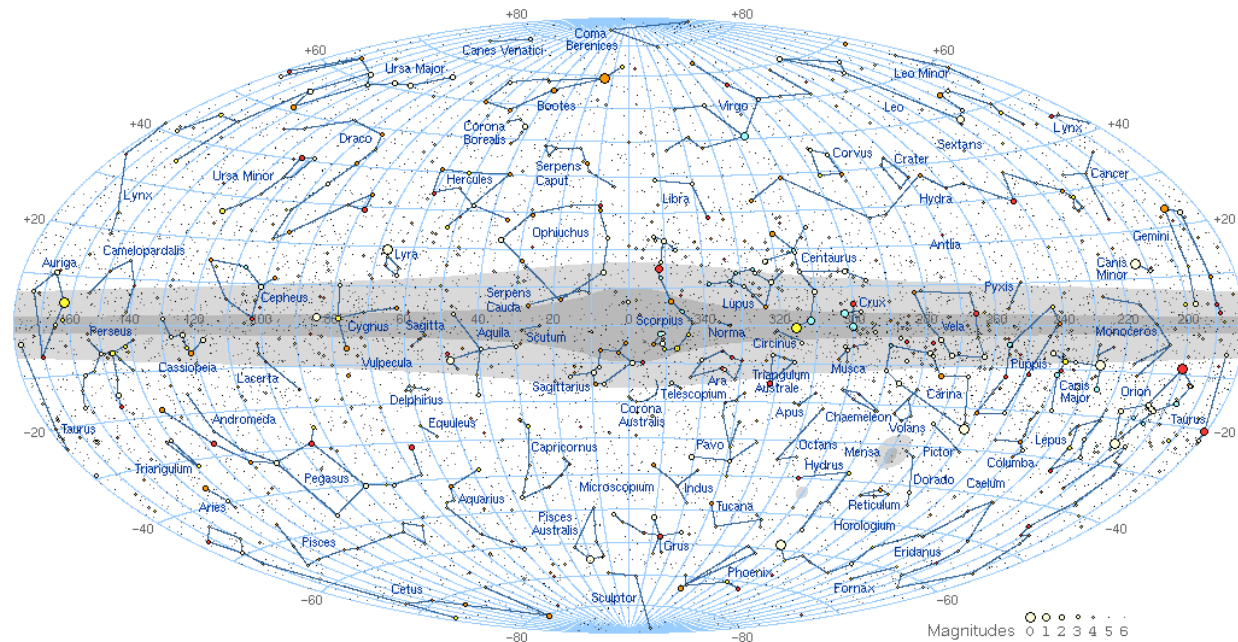
Koordinaatteja muuttavat tekijät

- Prekessio: Maapallo on navoiltaan hieman litistynyt, mistä johtuen Aurinko ja Kuu painovoimallaan pyrkivät kääntämään Maapallon ekvaattoria ekliptikan suuntaiseksi. Maa pyörimisliikkeeseen tämä aiheuttaa huojuntaa, akselin liike muistuttaa hyrrää. Täysi kierros kestää noin 26000 vuotta, liike on noin 50'' vuodessa (kevätpäiväntasauspisteen suunta siirtyy 50 kaarisekuntina/vuosi).
- Nutaatio: Kuun liikkeestä aiheutuva jaksollinen vaihtelu prekessioliikkeessä (18.6 vuotta), toisin kun prekessio vaikuttaa myös ekliptikan kaltevuuteen.
- Aberraatio: Valon äärellisestä nopeudesta johtuva kohteen siirros. Maapallon ratanopeus ≈ 30 km/s \rightarrow Aberraatiovakio on noin 21''.
- Parallaksi: Tähtien äärellisestä etäisyydestä johtuva ilmiö, kaikilla tähdillä alle $< 1''$.
- Ominaisliike: Tähtien liike Auringon suhteen taivaalla. Yleensä pieni, mutta tärkeä läheisille tähdille.



Galaktiset koordinaatit

- Linnunradan tasossa hyvin suuri tähtitiheys. Kirkkausluokan $m < 18$ alapuolella tasossa on satoja kertoja enemmän tähtiä kuin napojen suunnissa.
- Galaksin navat ovat suunnissa $b = +90$ ja $b = -90$, hyvin vähän ekstinktiota ja täten hyvä ekstragalaktisille havainnoille.





Mitä opimme?

1. Linnunratatutkimus on varsin nuori tieteen ala, alle 100 vuotta. Nykytutkimus etenee nopeasti ja uusia löytyjä tulee yhtenäen.
2. Linnunrata on keskisuuri sauvaspiraaligalaksi (SBc) ja se koostuu kiekosta, keskuspulistumasta sekä pimeän aineen halosta.
3. Linnunradan kiekossa on sekä runsaasti nuoria tähtiä ja kaasusumuja, sekä hyvin vanhoja tähtiä enimmäkseen Linnunradan halossa ja pallomaisissa tähtijoukoissa.
4. Linnunratatutkimuksessa käytetään galaktisia koordinaatteja, jotka on määritelty niin että galaktinen leveys 0° ja pituus 0° vastaavat Galaksin keskustan suunnassa olevaa supermassiivista mustaa aukkoa, joka on täten Linnunradan keskipiste.