



Linnunradan rakenne (FYS2053)

Luento 12: Linnunradan rotaatiokäyrä ja spiraalirakenne

Jorma Harju

28.11.2022, Exactum D123

Tällä luennolla käsitellään

1. Linnunradan massajakauma rotaatiokäyrästä
2. Paikallinen näkyvän massan tiheys
3. Auringon lähiympäristön massa-valo-suhde
4. Linnunradan spiraalirakenteesta
5. Linnunradan kiekon rakenteesta

Linnunradan massajakauma rotaatiokäyrästä

Linnunradan massajakauma rotaatiokäyrästä I

Linnunradan tähtien ja kaasupilvien ratanopeusmittaukset voidaan ulottaa suurille etäisyyksille Auringosta

Jos merkitään $\bar{\Theta}(R)$:lla keskimääräistä ratanopeutta säteellä R , radiaalinen kiihtyvyys on

$$f_r = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} \right)_{z=0} = - \frac{\bar{\Theta}(R)^2}{R}$$

Eräs mahdollinen oletus on, että massajakaumaa voidaan approksimoida sisäkkäisillä, navoilta litistyneillä ellipsoidisilla kuorilla

Jos merkitään yhden tällaisen kuoren ekvatoriaalista puoliakselia a :lla, ja eksentrisyyttä e :llä ($e^2 = 1 - b^2/a^2$, b on pikkuakseli), radiaalinen voima etäisyydellä R on

$$f_R = -4\pi G \sqrt{1 - e^2} \frac{1}{R} \int_0^R \frac{\rho(a) a^2 da}{\sqrt{R^2 - a^2 e^2}}$$

(ulommat kuoret eivät vaikuta)

Havaitun ratanopeusjakauman $\bar{\Theta}(R)$ perusteella tiheysjakauma $\rho(a)$ voidaan periaatteessa johtaa yo. integraaliyhtälöstä (jos oletetaan aivan litteä kiekko, pintatiheysjakauma voidaan ratkaista analyyttisesti, Abelin muunnos).

Yleisessä tapauksessa ratkaisua voidaan etsiä olettamalla potenssisarja

$$\rho(a) = p_{-2}a^{-2} + p_{-1}a^{-1} + p_0 + p_1a + p_2a^2 + \dots$$

Tämä johtaa nopeusjakaumaan

$$\frac{\bar{\Theta}(R)^2}{R^2} = c_{-2}R^{-2} + c_{-1}R^{-1} + c_0 + c_1R + c_2R^2 + \dots$$

Sovittamalla kertoimet c_n , tiheysjakauma voidaan laskea, koska kertoimet c_n riippuvat kertoimista p_n ja parametrilla e yksinkertaisella tavalla.

Linnunradan massajakauma rotaatiokäyrästä IV

M. Schmidtin mukaan (1965) nopeusjakaumaa voidaan approksimoida ottamalla em. sarjakehitelmästä vain kaksi termiä sekä keskustassa sijaitsevaa pistemassaa vastaava termi:

$$\frac{\bar{\Theta}(R)^2}{R^2} = GM_0 R^{-3} + c_{-1} R^{-1} + c_1 R$$

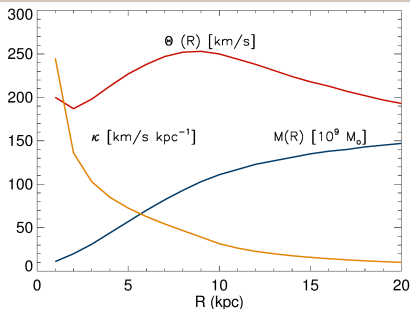
Kun tässä esiintyvät vakiot valitaan sekä ellipsoidin eksentrisyys valitaan niin, että Auringon etäisyys R_0 , Oortin vakiot A ja B , sekä tiheys ρ_0 täsmäävät ($e = 0.999$) niin, tiheysjakaumalle saadaan etäisyyksille $a < 10$ kpc:

$$\rho(a) = 3.930a^{-1} - 0.025a$$

$$[a] = \text{kpc}, [\rho] = M_\odot \text{pc}^{-3}$$

Linnunradan massajakauma rotaatiokäyrästä V

Oikealla Schmidtin mallin mukaisia jakaumia ratanopeudelle, massalle ja episyklitaajudelle. Uudemmissa tutkimuksissa sovitukseen on käytetty useampia komponentteja, yleensä: keskuspullistuma, kiekko, halo

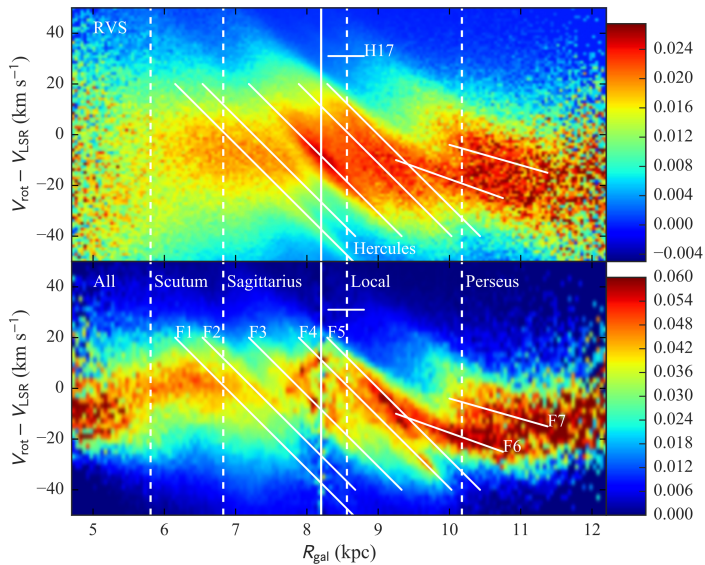


N.B. Aiemmin johdimme episyklitaajuudelle Auringon lähellä.

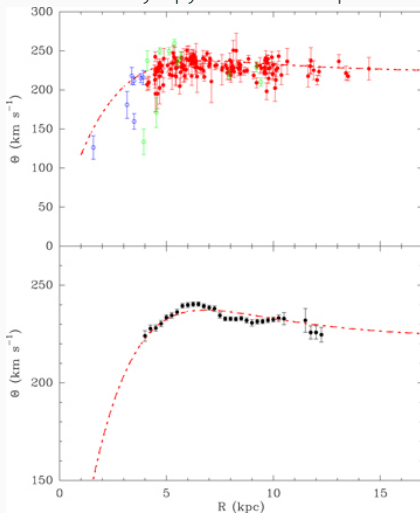
$$\kappa^2 = -4B(A - B) = 2 \left[\frac{\Theta_0}{R_0} + \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right] \frac{\Theta_0}{R_0} = \left(R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2 \right)_{R_0}$$

Tämä voidaan yleistää myös muille etäisyyksille R

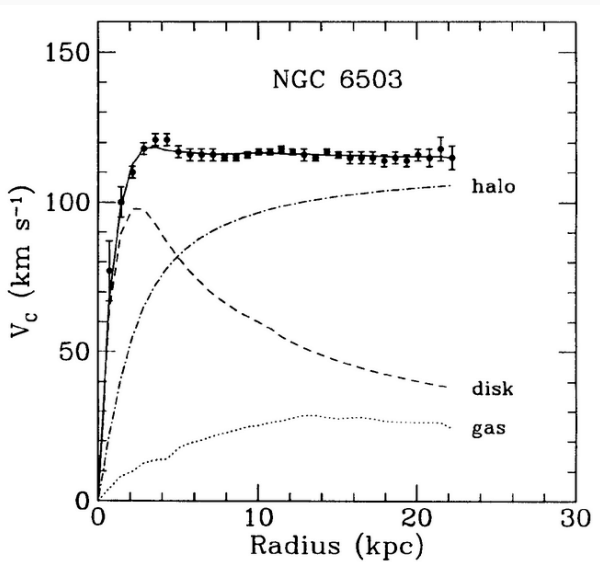
Vrt. Luennolla 10 esitetty *Gaia*-havaintoihin perustuva erittäin laakea rotaatiokäyrä artikkelista Kawata et al. MNRAS 479, L108 (2018): Tähtien kiertonopeudet suhteessa Θ_0 :aan välillä $5 < R < 12$ kpc.



Linnunradan rotaatiokäyrä, joka on johdettu radioalueessa maserlähteiden parallaxeista ja säteisnopeuksista (Reid et al. 2019, ApJ 885, 131). Alempi kuva esittää tietyin välein otettuja keskiarvoja. Punainen katkoviiva on sovitus tekijöiden Persic et al. (1996, MNRAS 281, 21) esittämään ”yleiseen” rotaatiokäyrämalliin, joka sisältää näkyvän aineen ja pimeän aineen halon kontribuutiot ympyräliikkeen nopeuteen.



Kääpiöspiraaligalaksin NGC 6503 rotaatiokäyrä, johon on mallinnettu havaittavan kiekon ja vetykaasun sekä pimeään aineen halon vaikutukset (kuva: Katherine Freese).



Paikallinen näkyvän massan tiheys

Suurin osa paikallisesta massatiheydestä voidaan yhdistää tunnettuun materiaan, kuten tähtiin ja kaasuun

Puuttuvasta massasta osa voi olla hyvin himmeissä tähdissä, mutta suurin osa on todennäköisesti pimeää ainetta, joka ei siis kuitenkaan täysin dominoi painovoimakenttää Auringon lähellä.

McKee+15 (ApJ 814, 13): $\rho_0 = 0.097 \pm 0.013 M_\odot \text{ pc}^{-3}$,

$\rho_{\text{DM}} = 0.013 \pm 0.003 M_\odot \text{ pc}^{-3}$ auringon läheisyydessä, siis $\rho_{\text{DM}}/\rho_0 \sim 0.13$

Huom. kaasukomponenttien gaussiset jakaumat

Local Stellar Surface Densities (Excluding Halo Stars with $z > 3 \text{ kpc}$)^a

Description	$\Sigma_*(F06)^b$ ($M_\odot \text{ pc}^{-2}$)	ρ_{*0} ($M_\odot \text{ pc}^{-3}$)	h (pc)	Σ_* ($M_\odot \text{ pc}^{-2}$)	$\Sigma_{*1.1}$ ($M_\odot \text{ pc}^{-2}$)
$M_V < 3$	1.5	0.0018	140	0.5	0.5
$3 < M_V < 4$	1.1	0.0018	236	0.8	0.8
$4 < M_V < 5$	2.2	0.0029	384	2.2	2.1
$5 < M_V < 8$	7.2	0.0072	400	5.8	5.4
$8 < M_V$ (M dwarfs)	13.8	0.0216	400	17.3	16.2
Giants	0.5	0.0006	344	0.4	0.4
Halo ($z < 3 \text{ kpc}$) ^c	0.4	0	0
Visible Stars	26.7	0.036	...	27.0	25.4
Brown dwarfs (BD)	2.3	0.0015	400	1.2	1.1
White dwarfs (WD)	6.9 ^d	0.0056	430	4.9	4.5
Neutron stars (NS)	...	0.0001	...	0.2	0.1
Black holes (BH)	...	0.0001	400 ^e	0.1	0.1
Total	35.9	0.043	...	33.4 ± 3	31.2 ± 3

The Vertical Distribution of the Local Interstellar Medium^a

	$n_{\text{H}}(z)$ (cm^{-3})	$N_{\text{H},\perp}$ (10^{20} cm^{-2})	Σ_{H}^b ($M_\odot \text{ pc}^{-2}$)	$\Sigma_{\text{H},1.1}^b$ ($M_\odot \text{ pc}^{-2}$)
H_2	$0.15 \exp - (z/105 \text{ pc})^2$	0.9 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3
HI: CNM ^d	$0.80 \exp - (z/127 \text{ pc})^2$	5.54	6.21	6.21
WNM ₁	$0.13 \exp - (z/318 \text{ pc})^2$	2.24	2.51	2.51
WNM ₂	$0.077 \exp - (z/403 \text{ pc})^2$	1.91	2.14	2.00
Total HI	$n_{\text{H},0} = 1.01$	9.7 ± 1.5	10.9 ± 1.6	10.7 ± 1.6
HI ^d	$0.0154 \exp - (z/1590 \text{ pc})^2$	1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Total	...	12.2 ± 1.5	13.7 ± 1.6	12.6 ± 1.6

Vrt. Widmark & Monari (2019): $\rho_0 = 0.12 M_\odot \text{ pc}^{-3}$ (Luento 11)

Auringon lähiympäristön massa-valo-suhde

Luminositeettifunktio I

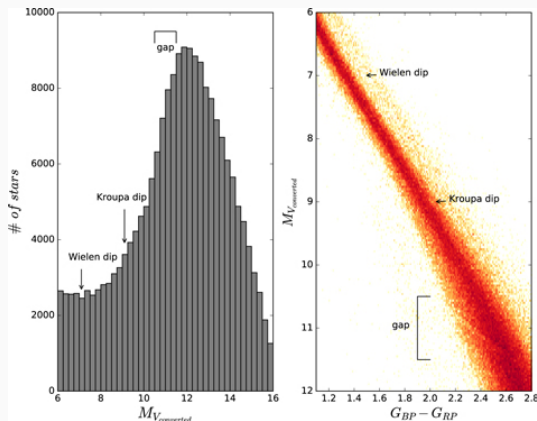
Luminositeettifunktio $\Phi_L(M)$ ilmoittaa tähtitiheyden (lukumäärä kuutioparsekissa) absoluuttisessa magnitudivälissä $M - 0.5 \rightarrow M + 0.5$

Absoluuttinen magnitudi $M = m - 5 \lg \left(\frac{d}{10 \text{pc}} \right)$

Auringon absoluuttinen visuaalinen magnitudi $M_{V,\odot} = 4.81^{\text{mag}}$ (Johnsonin V-kaista), absoluuttinen bolometrinen magnitudi, $M_{\text{bol},\odot} = 4.75^{\text{mag}}$

Luminositeettifunktio II

Tähtien luminositeettifunktio ja väri-magnitudidiagrammi *Gaia* DR2-dataan perustuen (Jao et al. 2018).



Wienin ja Kroupan minimit K -kääpiöillä aiheutuvat mahdollisesti H^- -ionin ja H_2 -molekyylien vaikutuksesta atmosfääriin opasiteettiin. Tässä työssä löydetty "aukko" liittyy ehkä M -tyypin kääpiöiden muuttumiseen kokonaan konvektiivisiksi kun mennään pienempiin massoihin.

Massa-valo-suhde

Luminositeettifunktion $\Phi_L(M)$ avulla voidaan laskea kuutioparsekissa olevien Auringon lähiympäristön tähtien säteilemä valo Auringon luminositeetin, $L_\odot \approx 4 \times 10^{26}$ W, yksiköissä:

$$L = \Sigma \Phi_L(M) \times 10^{-0.4(M-M_\odot)} = 0.068 L_\odot \text{ pc}^{-3}$$

Yhdistämällä massatiheyden funktion kanssa saadaan massa-valo-suhde (mass-to-light ratio):

$$\frac{M}{L} = \frac{0.12 M_\odot \text{ pc}^{-3}}{0.068 L_\odot \text{ pc}^{-3}} \approx 1.8 \frac{M_\odot}{L_\odot}$$

Auringon lähetyvillä jokaista yhtä Auringon luminositeettia kohti tarvitaan ~ 2 Auringon massaa. Tämä on verrattain matala M/L suhde, galaksien ulko-osissa $M/L \geq 10 - 100$

Linnunradan spiraalirakenteesta

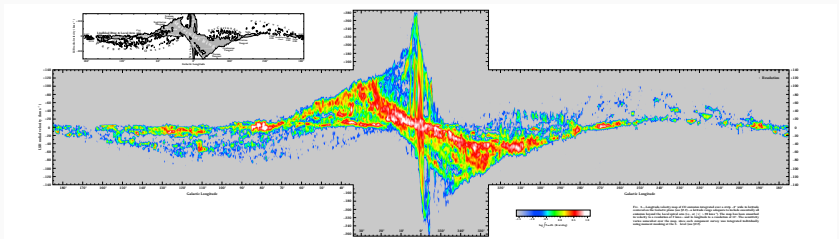
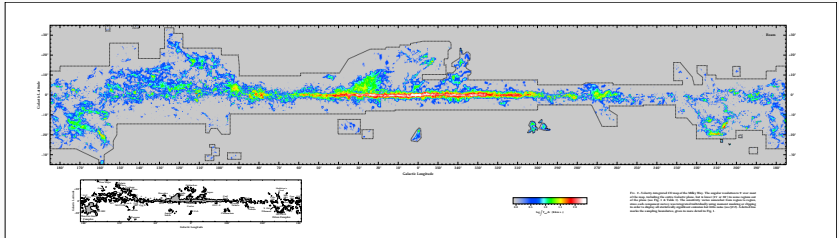
Kuten yleensä kiekkogalakseilla, Linnunradalla on spiraalirakenne.

Spiraalihaaroja on vaikea tutkia, koska sijaitsemme Linnunradan tasossa, ja koska tähtienvälinen pöly keskittyy tähän tasoon

Käsitys suuren skaalan rakenteesta perustuu etupäässä HI- ja CO-mittauksiin radioalueessa

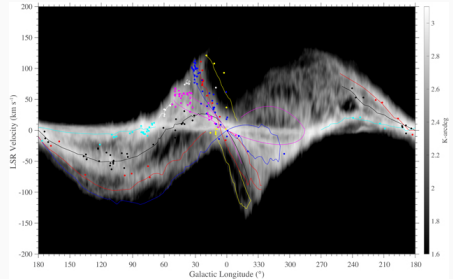
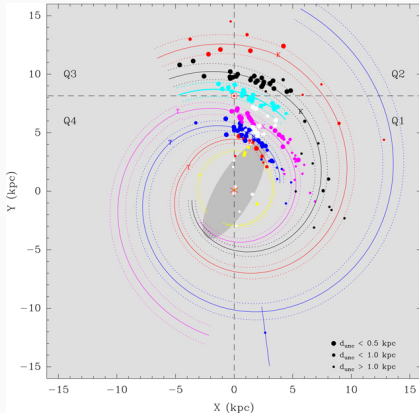
Spiraalihaarat voidaan tunnistaa OB-tähtien ja molekyyliiviivamaserlähteiden jakaumasta

Linnunradan CO-kartoitus (Dame et al. 2001, ApJ 547, 792)



Vasemmalla: Suurimassaisten tähtien syntyalueet (eriväriset pisteet) maserien parallaksimittauksista.

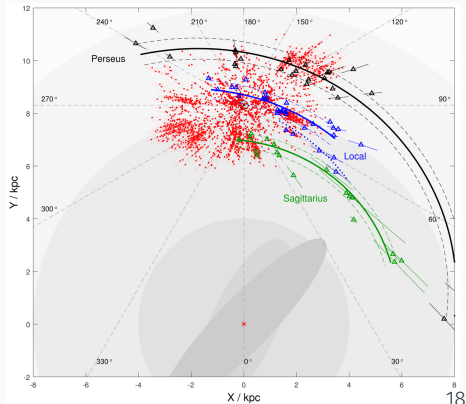
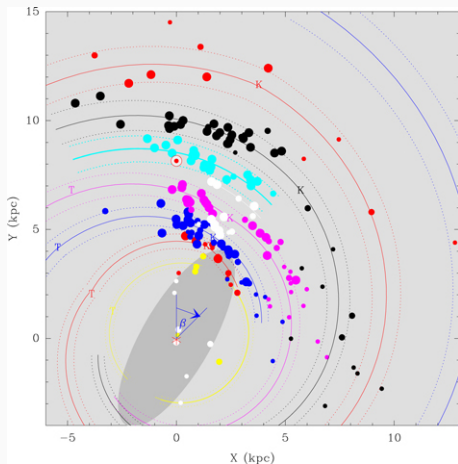
Oikealla: HI-viivaemission intensiteetti V_{LSR} -nopeuden ja galaktisen pituuden funktiona. Spiraalihaarat osoitettu (Reid et al. 2019)



Spiraalihaarat Reidin mukaan: 3 kpc -haara (keltainen), Norma-ulompi haara (punainen), Scutum-Centaurus-haara (sininen), Sagittarius-Carina-haara (violetti), paikallinen haara (vaalean sininen), Perseus-haara (musta)

Vasemmalla: Zoomaus edellisen sivun kuvasta (Reid et al. 2019). Harmaa ellipsi on Linnunradan sauva tekijöiden Wegg et al. (2015) mukaan. Sauva ulottuu tässä 5 kpc päähän keskustasta, ja muodostaa $\sim 30^\circ$ kulman suunnan $l = 0^\circ$ suhteen.

Oikealla: *Gaia* DR2 O-B2-spektriluokan tähtien jakauma (Xu et al. 2018, A&A 616, L15)

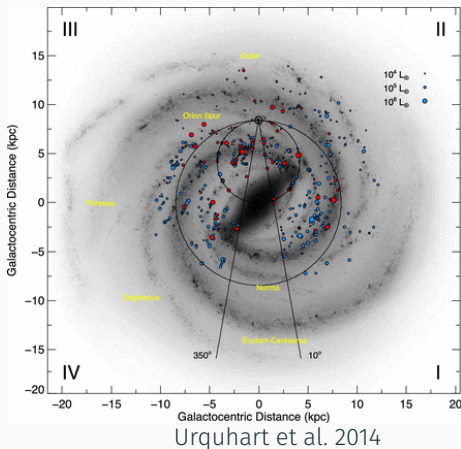


Linnunradan spiraalirakenne II

Linnunradalle yleensä oletetaan 4 kaasumaista spiraalahaaraa:

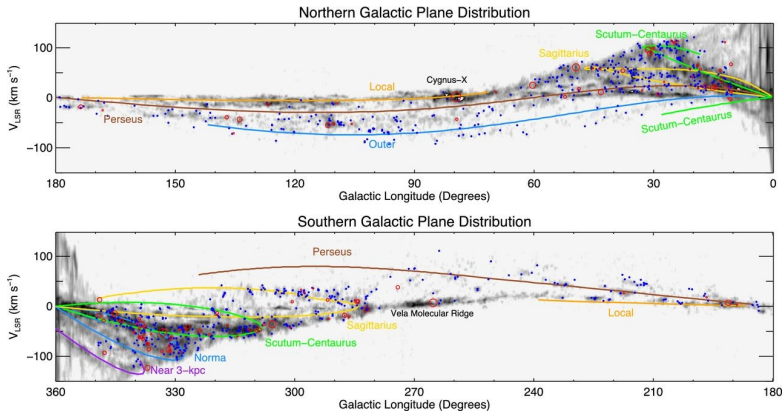
- 1) 3-kpc - Perseus
- 2) Norma + ulompi haara
- 3) Scutum-Centaurus
- 4) Sagittarius-Carina

Aurinko sijaitsee Carina- ja Perseushaarojen välissä ns. Orionin sivuhaarassa (Orion spur)



Norma- ja Sagittarius-haarat alkavat ehkä sauvan päästä, n. 4.5-5 kpc Linnunradan keskustasta

The upper and lower panels show the longitude and velocity distribution of the RMS sources in the northern and southern Galactic plane, respectively.



Urquhart J S et al. MNRAS 2014;437:1791-1807

Linnunradan spiraalirakenne III

Spiraalihaarat ovat spiraarinmuotoisia pyöriviä häiriöitä lähes aksisymmetrisessä potentiaalissa.

Haarojen kohdalla tähdet liikkuvat hitaammin kuin tavallisesti (vrt. tietyömaa moottoritiellä).

Spiraalihaarojen kulmanopeus Ω_p on vakio

Tietyn säteen R_c sisällä, tähdet kiertävät nopeammin kuin spiraalihaarat $\Omega(R) > \Omega_p$, kun $R < R_c$.

Vastaavasti tämän ulkopuolella $\Omega(R) < \Omega_p$, kun $R > R_c$.

Sädettä R_c sanotaan “myötäpyörimissäteeksi” (co-rotation radius, CR).

Linnunradan spiraalirakenne IV

m -haaraisessa spiraalissa tähti säteellä R ylittää spiraalihaaran kulmataajudella $m(\Omega_p - \Omega(R))$

Tiheysaaltoteorian mukaan spiraalirakenne voi säilyä pitkään alueessa, jossa ko. taajuus on pienempi kuin episyklitaajuus κ .

Lindbladin resonanssit: $m|\Omega_p - \Omega(R)| = \kappa$

Sisempi Lindbladin resonanssi (ILR): $\Omega(R) = \Omega_p + \kappa/m$

Ulompi Lindbladin resonanssi (OLR): $\Omega(R) = \Omega_p - \kappa/m$

Nämä sijaitsevat siis co-rotation -säteen R_c molemmin puolin

Linnunradan spiraalirakenne V

Sauvaspiraaleilla sauva ulottuu korkeintaan myötäpyörimissäteelle R_c saakka, ja heikkenee ILR-säteen vaiheilla

Kaasu pyrkii ajautumaan resonansseihin \rightarrow rengasrakenteita

Kuten valtaosalla spiraaligalakseista, Linnunradan haarat laahaavat perässä, eli kaartuvat poispäin pyörimissuunnasta

Aurinko sijaitsee co-rotation säteen ulkopuolelle, joten tiheysaalto saavuttaa sen. Seuraavaksi aurinko kohtaa Carina-Sagittarius-sivuhaaran.

Linnunradan rotaatiokäyrän perusteella ILR sijaitsee säteellä $R \sim 4$ kpc, $R_c \sim 5 - 6$ kpc, ja OLR vähän auringon radan ulkopuolella, $\Omega_p \sim 40 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$.

Linnunradan spiraalirakenne VI

Tiheysaaltojen [alkuperästä](#) on useita teorioita, esim.

-Hallitseva, kvasi-staattinen epästabiiisuusmoodi kiekon gravitaatiopotentiaalissa

-Kiekon tiheysvaihtelujen aiheuttama dynaaminen häiriö

-Epäsymmetrisen massajakauman (sauva, epäsymmetrinen halo) tai massiivisen seuralaisen (kääpiögalaksi, pimeän aineen halo) vuorovesivoiman aiheuttama häiriö

N-kappaleen simulaatioissa näkyy poikkeuksetta spiraalirakenteita

Rakenteen säilyvyydestä ei selkeää kuvaa. Rakenteessa yhdistyy säännöllisyys ja epäsäännöllisyys eri skaaloilla. Useampikin em. tekijöistä voi vaikuttaa samanaikaisesti.

Linnunradan kiekon rakenteesta

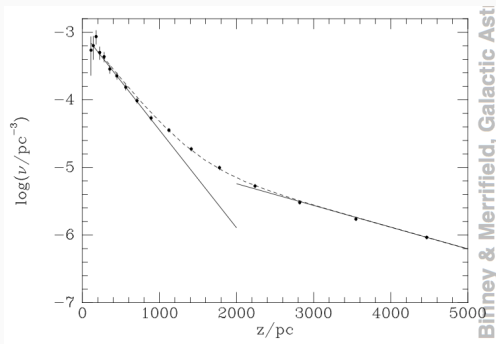
Linnunradan kiekko

Tähtitiheyttä (lukumäärä/ pc^3) korkeuden z funktiona ei voi sovittaa yhdellä eksponenttifunktiolla $n = n_0 e^{-z/z_0}$

Tähdet näyttävät jakautuneen kahteen komponenttiin:

Ohut kiekko: $z_0 = 260 \pm 50$ pc

Paksu kiekko: $z_0 = 760 \pm 50$ pc

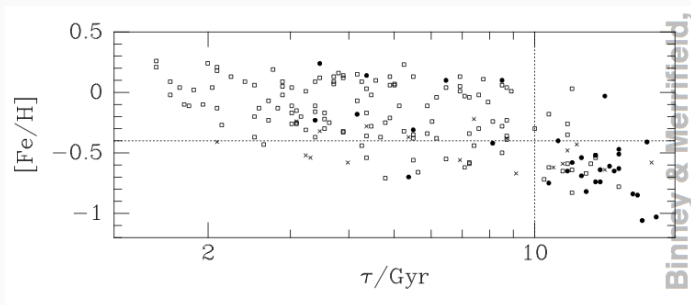


Ohut ja paksu kiekko I

Noin 20% kiekon luminositeetista on paksussa komponentissa.

Paksun kiekon tähdet ovat keskimäärin vanhempia ($t > 10$ Gyr) ja niillä on pienemmät rautapitoisuudet ($[\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$)

Paksun kiekon tähdillä on myös suurempi nopeusdispersio



$$[\text{Fe}/\text{H}] \equiv \lg[\text{N}(\text{Fe})/\text{N}(\text{H})]_{\star} - \lg[\text{N}(\text{Fe})/\text{N}(\text{H})]_{\odot} \quad , \quad [\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = 0$$

Ohut ja paksu kiekko II

Taulukko: nopeusdispersiot ja keskimääräiset V -nopeuksien poikkeamat (“asymmetric drift”) LSR:sta Auringon lähiympäristössä kiekko- ja halopopulaatioiden tähdille.

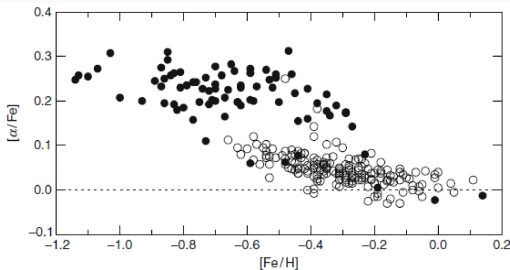
f = suhteellinen osuus

Population	σ_U km s ⁻¹	σ_V km s ⁻¹	σ_W km s ⁻¹	V_{ad} km s ⁻¹	f
Thin disk	43	28	17	-9	0.93
Thick disk	67	51	42	-48	0.07
Halo	131	106	85	-220	0.006

Kuva: $[\alpha/Fe]$ vs. $[Fe/H]$

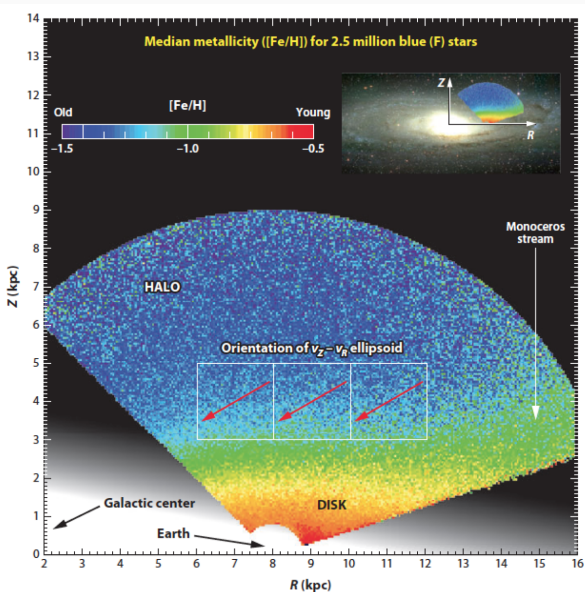
- paksu kiekko,
 - ohut kiekko
- (nopeuksien perusteella arvioituja todennäköisyyksiä)

P.E. Nissen, Reddy et al. (2006) mukaan



$$[\alpha/Fe] = ([Mg/Fe] + [Si/Fe] + [Ca/Fe] + [Ti/Fe])/4 \quad 27$$

Leikkaus tähtien rautapitoisuuden jakaumasta tasossa, joka kulkee Auringon ja Linnunradan keskuksen kautta kohtisuoraan tasoa vastaan (Bland-Hawthorne & Gerhard 2016, ARA&A).

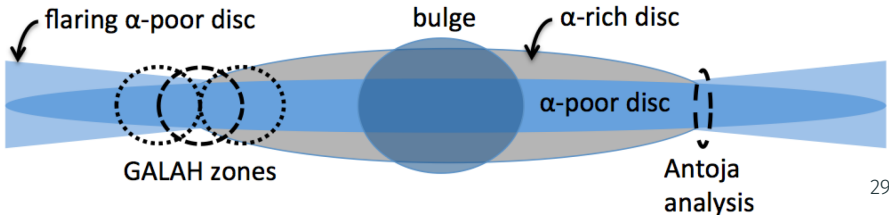


Ohut ja paksu kiekko III

Ohuen ja paksun kiekon sijaan olisi ehkä parempi puhua rautapitoisesta ja rautaköyhästä kiekosta.

Viimeaikaisten tutkimusten mukaan paksu, rautaköyhä kiekko (" α -rich disc") ulottuu likimain Auringon etäisyydelle Linnunradan keskuksesta, kun taas ohut, rautapitoinen kiekko (" α -poor disc") ulottuu kauemmas ja laajenee ulko-osissa.

Kuva: Bland-Hawthorn et al. 2018, MNRAS



Linnunradan massajakauma voidaan johtaa rotaatiokäyrästä. Tässä oletetaan usein ellipsoidiset jakaumat eri komponenteille, kuten keskuspullistuma, kiekko ja halo.

Linnunradan kiekon spiraalihaarat ovat alueita, joissa on keskimääräistä suurempi pintatiheys. Aine virtaa näiden läpi, kysymys on siis spiraalimaisista häiriöistä gravitaatiopotentiaalissa. Tähtien synty on tehokkainta näissä alueissa.

Linnunradan kiekon tähdet voivat jakaa kahteen komponenttiin, ohueen ja paksuun kiekkoon, joilla on erilaiset kemialliset ja kinemaattiset ominaisuudet.