



Linnunradan rakenne (FYS2053)

Luento 9: Kinemaattiset ryhmät. Linnunradan rotaatio.

Jorma Harju

07.11.2022, Exactum D123

Tällä luennolla käsitellään

1. Kinemaattiset ryhmät
2. Linnunradan rotaatio
3. Oortin kaavat
4. Oortin vakioiden määrääminen

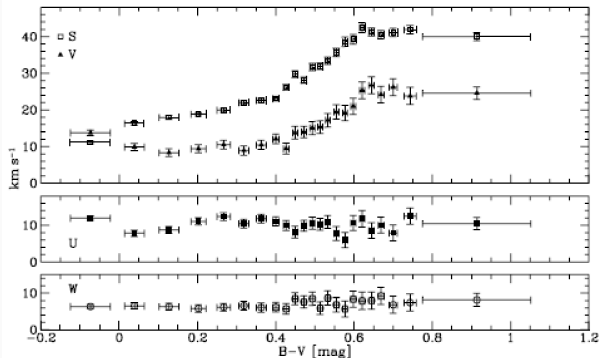
Kinemaattiset ryhmät

Auringolle mitattu nopeuskomponentti V_{\odot} kasvaa äkkiä kun mennään pääsarjassa F5:ä myöhempisiin spektriluokkiin. Myös nopeushajonnat kasvavat samassa kohdassa.

Tämä ns. *Parenagon epäjatkuvuus* voidaan tulkita seuraavasti: F5-luokkaa varhaisemmat spektriluokan tähdet kuuluvat kaikki Pop I ja ovat verrattain nuoria tähtiä. F5-luokkaa myöhäisemmät tähdet ovat sekoitus Pop I ja Pop II.

Vanhemmilla Pop II tähdillä on suurempi nopeushajonta, johtuen tähtien kohtaamisista massiivisten interstellaaristen pilvien ja muiden tähtien kanssa, jotka muuttavat painovoiman avulla niiden liikesuuntaa ja nopeutta → nopeushajonta kasvaa.

Parenagon epäjatkuvuus



Auringon liikkeen nopeuskomponentit $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (x'_{\odot}, y'_{\odot}, z'_{\odot})$ värin $B - V$ funktiona. V -komponentti kasvaa myöhäisen spektriluon tähdille. Kuva: Dehneń & Binney (1997), Hipparcos-dataan perustuen.

Kinemaattiset ryhmät II

F,G ja K-tähdillä voidaan erottaa tähdet voimakkaiden ja heikkojen metalliviivojen avulla

Heikkojen metalliviivojen tähdet kuuluvat Populaatioon II → suuret nopeudet

Vahvojen viivojen tähdet kuuluvat Populaatioon I → pienemmät nopeudet

M-kääpiöt voidaan jakaa normaaleihin kääpiöihin (Pop II) ja emissioviivakääpiöihin (Pop I), joilla havaitaan erilaiset nopeusjakaumat

'Pikakiitäjätahdet' (High velocity stars)

Ellipsoidinen nopeusjakautuma on voimassa vain tähdille joilla on pienet nopeudet LSR:n suhteen ($v \leq 65$ km/s), ts. jotka liikkuvat likimain pitkin ympyrärataa

Positiivisen V -akselin ($l = 90^\circ$) suunnassa ei esiinny suuria nopeuksia, kun taas vastakkaisessa suunnassa ($l = 270^\circ$) nopeudet voivat olla luokkaa $V = -500$ km/s

Selitys pikakiitäjätähdille

Suuren nopeuden tähdet kuuluvat linnunradan alisysteemiin, joka pyörii hitaammin kuin Auringon lähiympäristön tähtien enemmistön muodostama alisysteemi.

Niiden radat ovat soikeampia ja voimakkaammin kallistuneita Linnunradan tasoa vastaan (myös suuret *W*-nopeudet *Z*-suunnassa).

High-velocity tähtien spektrit ja tyypillisiä kohteita:

- Pääsarjan tähtiä (F-G-K-M), mutta heikkoja metalliivoja.
- Alikäipiöitä, metalliivat näilläkin heikkoja tai eivät näy lainkaan.
- Mira tähdet, pitkäperiodisia muuttuvia tähtiä.
- RR Lyrae tähdet
- Pallomaiset tähtijoukot

Pallomaisten tähtijoukkojen liike I

Pallomaisten tähtijoukkojen liikkeiden tutkiminen Linnunradassa on aikaisemmin perustunut vain säteisnopeuksiin

Tässä voidaan käyttää samaa kaavaa kuin aikaisemmin:

$$v_r = v_{r,p} - (u_{\odot} \cos \alpha \cos \delta + v_{\odot} \sin \alpha \cos \delta + w_{\odot} \sin \delta)$$

Nyt $v_{r,p}$ on pallomaisten joukkojen pekuliaarinen nopeus pallomaisten joukkojen nopeuksien painopisteen suhteen. Sama pätee auringon nopeudelle $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot})$.

Tämä nopeuksien painopiste poikkeaa huomattavasti Local Standard of Rest:istä

Pienimmän neliösumman menetelmän avulla saadaan LSR:n nopeus pallomaisten joukkojen keskimääräisen liikkeen avulla

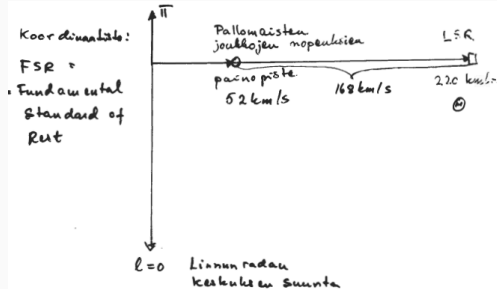
Pallomaisten tähtijoukkojen liike II

$$\begin{cases} U_{\text{LSR}} &= -73 \pm 33 \text{ km/s} \\ V_{\text{LSR}} &= +93 \pm 22 \text{ km/s} \\ W_{\text{LSR}} &= -119 \pm 28 \text{ km/s} \end{cases}$$

$$\rightarrow U \approx 0, V \approx -170, W \approx 0$$

$$V_{\text{LSR}} = 168 \pm 27 \text{ km/s}$$

$$l = 90^\circ \quad b = -4^\circ$$



Aurinko liikkuu siis huomattavan suurella nopeudella pallomaisten joukkojen suhteen.

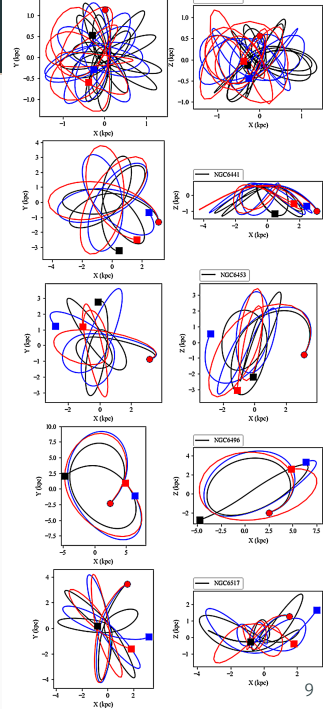
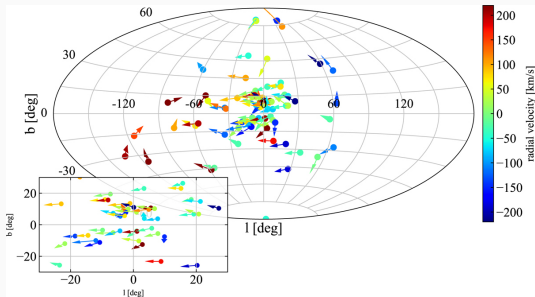
Pallomaiset joukot pyörivät paljon hitaammin kuin Linnunradan litteä kiekko.

Pallomaiset joukkojen radat ovat hyvin elliptisiä ja niiden orientaatio on satunnainen \rightarrow suuriakin kaltevuuksia Linnunradan tasoa vasten.

Pallomaisten tähtijoukkojen liike III

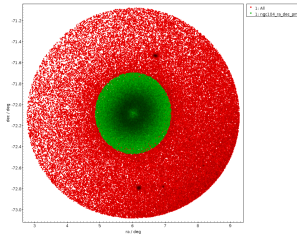
*Gaia*n ansiosta myös ominaisliikkeet ja parallaksit pystytään määrittämään kymmenille pallomaisille tähtijoukoille

Oheisa 75 joukon tangentialiaali- (nuolet) ja säteisnopeudet (värit), sekä esimerkkejä joukkojen radoista viimeisen 250 miljoonan vuoden aikana. Eri väriset radat vastaavat eri malleja Linnunradan gravitaatiopotentiaalille (Helmi et al. 2018, A&A 616, A12)

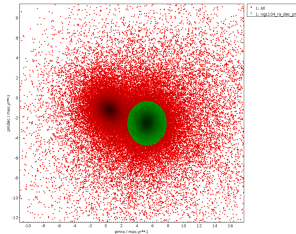


Joukon NGC104 parallaksin ja ominaisliikkeen määrittäminen

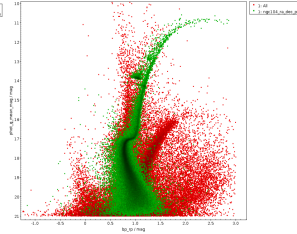
jakauma taivaalla



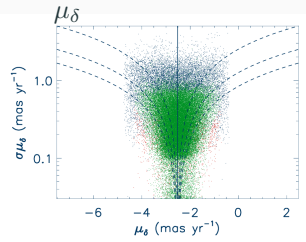
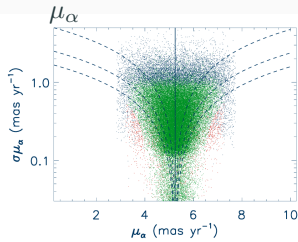
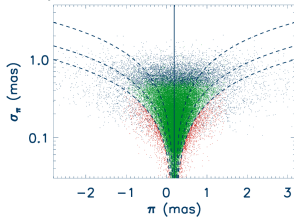
ominaisliike



HR-diagrammi



parallaksi



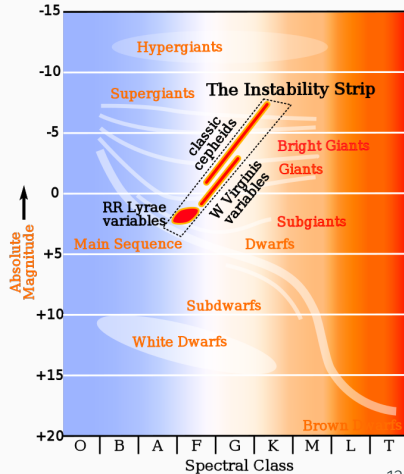
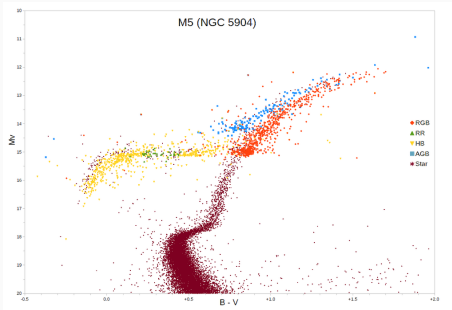
RR Lyr tähdissä voidaan erottaa selvästi toisistaan poikkeavia erilaisia kinemaattisia ryhmiä. Lyhytperiodisten ($P = 0.25 - 0.5$ d) nopeudet LSR:n suhteen ovat ≤ 100 km/s, kun taas pitkäperiodisten ($P = 0.5 - 0.8$ d) nopeudet ovat luokkaa ~ 200 km/s.

Pitkäperiodiset RR Lyr tähdet Pop II (samoja kuin pallomaiset joukot), lyhytperiodiset kuuluvat välipopulaatioon (Pop I).

Alikääpiöt sijaitsevat $1 - 2^m$ pääsarjan alapuolella. Hyvin pienet metallipitoisuudet. Näillä tähdillä on tyypillisesti suuret LSR nopeudet ($V_{\text{LSR}} = 130 \pm 20$ km/s) ja suuret nopeushajonnat. Selvä merkki siitä että nämäkin tähdet kuuluvat Pop II:een.

RR Lyrae -tähdet, alikääpiöt ja kefeidit HR-diagrammassa

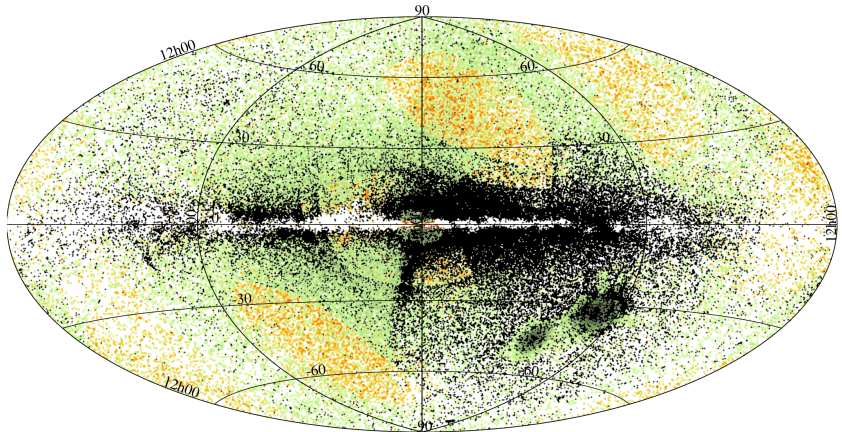
Vasemmalla pallomaisen tähtijoukon M5 HR-diagramma, oikealla generinen HR-diagramma johon on merkitty alue, jossa sykkivät muuttujat esiintyvät



RR Lyrae -tähtien jakauma taivaalla

Tunnettujen RR Lyrae tähtien jakauma taivaalla, galaktisessa koordinaatistossa. Näitä tähtiä tunnetaan noin 220000.

Oranssit ja vihreät pisteet ovat aikaisemmin tunnettuja RR Lyrae -tähtiä. Vihreille pisteille *Gaia* on tähän mennessä varmistanut luokittelun. Mustat pisteet ovat *Gaian* löytämiä RR Lyrae tähtiä (n. 50000; Clementini et al. 2019)



Linnunradan rotaatio

Historiallinen katsaus Linnunradan rotaatioon

Bertil Lindblad (1926): Linnunradassa on useita alisysteemejä, joilla kullakin erilainen kiertonopeus ja vastaavasti erilainen litistyneisyys.

Harlow Shapley (1918): Linnunradan keskus on pallomaisien joukkojen muodostaman systeemin keskuksessa.

Aurinko ja sen lähiympäristön tähdet kuuluvat samaan alisysteemiin, pienet nopeudet Auringon suhteen. Pallomaisien joukkojen alisysteemin rotaationopeus pieni → nopeudet Auringon suhteen suuria.

Jan Oort (1927-1928): Linnunradan rotaatio ei voi olla jäykän kappaleen rotaatiota, vaan sisempänä olevien tähtien kulmanopeus on suurempi → Differentiaalinen rotaatio, jolla havaittavia efektejä tähtien säteisnopeuksissa ja ominaisliikkeissä.



Oortin-Lindbladin teoria Linnunradan rotaatiosta I

Tarkastellaan Linnunradan tasossa olevaa tilavuusalkiota. Siinä olevien tähtien keskimääräinen liike on ympyräliike Linnunradan keskuksen ympäri:

$\Theta_c(R)$ = nopeus ympyräliikkeessä (km s^{-1})

$F(R)$ = keskeiskiihtyvyys:

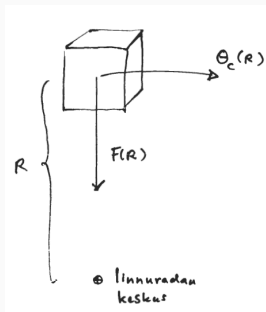
$$F(R) = \frac{[\Theta_c(R)]^2}{R}$$

Rotaatiosuunta sama kaikissa Linnunradan osissa ja kaikille alisysteemeille.

$\Theta_c(R)$ riippuu etäisyydestä Linnunradan keskukselta.

Auringon etäisyydellä ($R \sim 8.1 \text{ kpc}$, seuraava luento)

$\Theta_c(R) = 220 \text{ km/s}$.

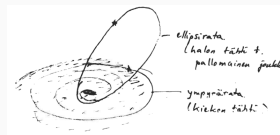
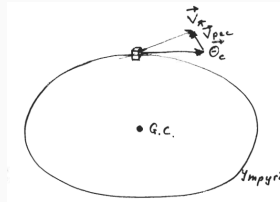


Oortin-Lindbladin teoria Linnunradan rotaatiosta II

Myös vähän galaksin ylä- tai alapuolella ($|z/R| \ll 1$) liike on sama kuin galaksin tasossa.

Tähtien pekuliaariset liikkeet johtuvat siitä, että yksittäisten tähtien radat eivät ole tarkkaan ympyräratoja, vaan ne ovat hieman eksentrisiä ja niillä on pienet kaltevuuskulmat Linnunradan tasoa vastaan.

Nämä oletukset pätevät Auringon lähiympäristön tähdille. Hitaasti pyörivät, vain vähän litistyneet halopopulaation alisysteemit eivät ole ympyräradoilla. Näiden kohteiden radat ovat lisäksi voimakkaasti kallellaan Linnunradan tasoa vastaan.



Oortin-Lindbladin teoria Linnunradan rotaatiosta III

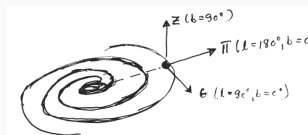
Linnunradan rotaatiota tutkittaessa sopivia koordinaatisto on Fundamental Standard of Rest (FSR) (Luento 8). Koordinaatisto ei liiku Auringon mukana, vaan on levossa kaukaisten galaksien suhteen.

Koordinaattiakselit:

Θ ($l = 90^\circ, b = 0^\circ$),

Π ($l = 180^\circ, b = 0^\circ$),

Z ($b = 90^\circ$).



LSR:n koordinaatit: $\Theta_{\text{LSR}} = \Theta_c =$ ympyräliikkeen nopeus, $\Pi_{\text{LSR}} = 0$, $Z_{\text{LSR}} = 0$.

Differentiaalirotaation vaikutus I

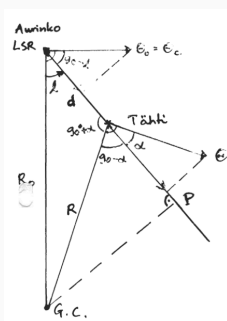
Oletetaan, että tähdet liikkuvat ympyräradoilla Linnunradassa. Johdetaan oheisesta kuvasta differentiaalirotaation vaikutus havaittuihin säteis- ja tangentialinopeuksiin.

Säteisnopeus: $v_r = \Theta \cos \alpha - \Theta_0 \sin l$

Tässä Θ on havaitun tähden ratanopeus, Θ_0 on Auringon ratanopeus ja l on havaitun tähden galaktinen pituus.

Käytetään seuraavaksi [sinilausetta](#):

$$\frac{\sin l}{R} = \frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{R_0} = \frac{\cos \alpha}{R_0}$$



Differentiaalirotaation vaikutus II

Ratkaistaan edellisestä $\cos \alpha$ ja sijoitetaan se säteisnopeuden kaavaan:

$$v_r = \Theta \frac{R_0 \sin l}{R} - \Theta_0 \sin l = R_0(\omega - \omega_0) \sin l$$

Kun käytetään kulmanopeuden määritelmiä havaitulle tähdelle, $\omega = \Theta/R$, ja Auringolle, $\omega_0 = \Theta_0/R_0$, säteisnopeudelle saadaan:

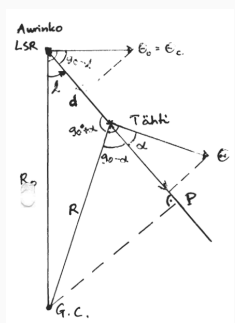
$$v_r = R_0(\omega - \omega_0) \sin l$$

Tangentiaalinopeus: $t = \Theta \sin \alpha - \Theta_0 \cos l$

t on positiivinen kasvavan l :n suunnassa

Kolmiosta Aurinko-G.C.-P saadaan

$$R \sin \alpha = R_0 \cos l - d$$



Differentiaalirotaation vaikutus III

Sijoitetaan vielä tämä $R \sin \alpha$ tangentialinopeuden kaavaan:

$$t = \frac{\Theta}{R}(R_0 \cos l - d) - \Theta_0 \cos l$$

Tästä saadaan johdettua lopullinen kaava, kun sijoitetaan jälleen kulmanopeuden määritelmät: $\omega = \Theta/R$ ja $\omega_0 = \Theta_0/R_0$.

$$t = R_0(\omega - \omega_0) \cos l - \omega d$$

Johdetuissa kaavoissa ainoa oletus oli, että tähdet liikkuvat ympyräradoilla. Lähitähtiä havaittaessa etäisyydet ovat pieniä, $d \leq 2 - 3 \text{ kpc} \ll R_0 = 8.1 \text{ kpc}$.

Tällöin voidaan käyttää edellä mainituista kaavoista johdettuja approksimaatioita, jotka tunnetaan **Oortin kaavoina**.

Oortin kaavat

Oortin kaavojen johto I

Sekä säteis- että tangentialinopeuden kaavoissa esiintyy tekijä: $\omega - \omega_0$

Kun havaitaan suhteellisen lähellä olevia tähtiä tämä erotus on pieni ja tekijä voidaan kehittää Taylorin sarjaksi, josta toisen ja korkeamman asteen termit jätetään huomiotta:

$$\omega(R) - \omega(R_0) = \omega - \omega_0 \approx \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_0} (R - R_0) + \dots$$

$$\frac{d\omega}{dR} = \frac{d(\Theta/R)}{dR} = \frac{1}{R} \left(\frac{d\Theta}{dR} - \frac{\Theta}{R} \right)$$

$$\Rightarrow \omega - \omega_0 \approx \frac{1}{R_0} \left[\left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right] (R - R_0)$$

Oortin kaavat: Säteisnopeus I

Säteisnopeuden kaava: $v_r = R_0(\omega - \omega_0) \sin l$

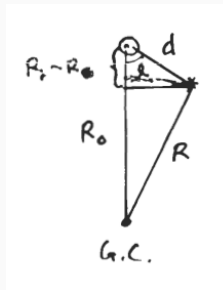
Kun $d \ll R_0$, $d \cos l \approx (R_0 - R)$

Sijoitetaan Taylorin sarjan lauseke tekijälle $(\omega - \omega_0)$ sekä yllä johdettu lauseke tekijälle $(R_0 - R)$:

$$v_r = - \left[\left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right] d \cos l \sin l$$

Käyttämällä kaavaa $\sin l \cos l = \frac{1}{2} \sin 2l$, saamme

$$v_r = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right] d \sin 2l$$



Lopulliseksi säteisnopeuden kaavaksi saadaan

$$v_r = A d \sin 2l$$

Tässä A on ensimmäinen Oortin vakio, joka määritellään

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right]$$

(Huom. Tekijöiden järjestys vaihdettu miinusmerkin takia.)

Oortin kaavat: Tangentiaalinopeus I

Tangentiaalinopeuden kaava: $t = R_0(\omega - \omega_0) \cos l - \omega d$

Kirjoitetaan tämä muotoon: $t = (\omega - \omega_0)(R_0 \cos l - d) - \omega_0 d$

Sijoitetaan Taylorin sarjan lauseke tekijälle $(\omega - \omega_0)$ sekä edellä johdettu lauseke tekijälle $(R_0 - R)$:

$$t = \frac{1}{R_0} \left[\left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right] (-d \cos l)(R_0 \cos l - d) - \omega_0 d$$

Toisen asteen termi $d^2/R_0 \approx 0$, jonka jälkeen saadaan:

$$t = \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right] (d \cos^2 l) - \frac{\Theta_0}{R_0} d$$

Oortin kaavat: Tangentiaalinopeus II

Käytetään hyväksi trigonometrista kaavaa $\cos^2 l = \frac{1}{2}(1 + \cos 2l)$:

$$t = \frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right] d \cos 2l + \frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right] d - \frac{\Theta_0}{R_0} d$$

Määritellään toinen Oortin vakio:

$$B = -\frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} + \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right]$$

Käyttämällä Oortin vakioita saadaan tangentiaalinopeuden lopullinen lauseke:

$$t = A d \cos 2l + B d$$

Oortin kaavat: Ominaisliike ja yhteys vakioden välillä

Ominaisliikkeelle saadaan tangentialinopeuden kaavasta seuraava lauseke:

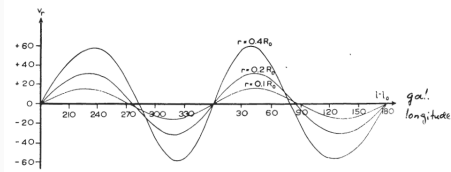
$$\mu_t = \frac{t}{4.74d} = \frac{A}{4.74} \cos 2l + \frac{B}{4.74}$$

Huomataan, että ominaisliike μ_t ei riipu etäisyydestä kun $d \ll R_0$.

Oortin vakioden erotukselle ja summalle saadaan:

$$\begin{cases} A - B & = \frac{\Theta_0}{R_0} \\ A + B & = - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \end{cases}$$

Havaittavat efektit säteisnopeudessa



$$v_r = A d \sin 2l$$

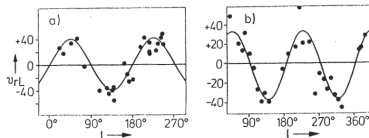


Fig. 3.45a,b. Radial velocity after discounting the solar motion v_{rL} [km s^{-1}] as a function of the galactic longitude: (a) for classical Cepheids with mean distance $\bar{r} = 2.3 \text{ kpc}$ (from Joy, 1939) and (b) for early type B-stars with $\bar{r} = 2.0 \text{ kpc}$ (from Feast and Thackeray, 1959).

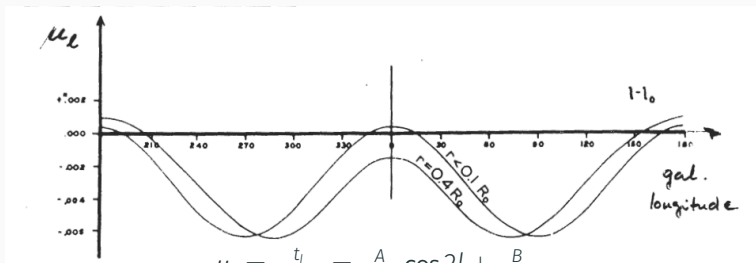
Kaavan mukaisesti saadaan säteisnopeuden maksimi kun $l = 45^\circ$ ja $l = 225^\circ$ (tällöin $\sin 2l = 1$)

Minimit saadaan kun $l = 135^\circ$ ja $l = 315^\circ$ (tällöin $\sin 2l = -1$)

Säteisnopeus on 0 kun $l = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ja 270° (tällöin $\sin 2l = 0$)

v_r -käyrän amplitudi on verrannollinen etäisyyteen d

Havaittavat efektit ominaisliikkeissä



Ominaisliike μ_t on positiivinen lähellä pisteitä $l = 0^\circ$ ja $l = 180^\circ$ ($\cos 2l = 1$), muuten negatiivinen (Oortin vakioille $A > 0$ ja $B < 0$)

Suurimmat efektit suunnissa $l = 90^\circ$ ja $l = 270^\circ$ ($\cos 2l = -1$), μ_t :n minimi

Ominaisliikkeen μ_t kaksoissinikäyrä ei riipu etäisyydestä kun d on pieni, $d \leq 0.1R_0$

Oortin vakioiden määrittäminen

Rotaatiovakioiden määrittäminen

Oort laski kaavojensa ennustamia käyriä radiaalinopeudelle ja ominaisliikkeille ja vertasi niitä havaintoihin. Hän totesi, että ennustetut efektit ovat olemassa ja osoitti näin, että Linnunradan differentiaalinen rotaatio on tosiasia. Samalla tuli verifioiduksi Linnunradan keskuksen suunta, joka on Sagittariuksen tähdistöissä.

Seuraavaksi on määrittävä rotaatiovakioiden, A , B , Θ_0 ja R_0 arvot.

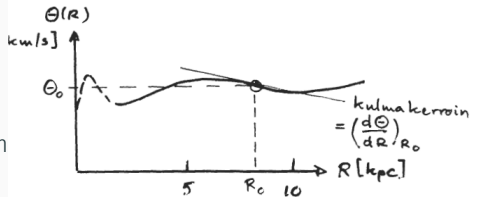
Näistä vain kolme ovat riippumattomia, koska A ja B voidaan lausua parametrien Θ_0 , R_0 ja $(d\Theta/dR)_0$ avulla:

$$\begin{cases} \frac{\Theta_0}{R_0} & = & A - B \\ \left(\frac{d\Theta}{dR}\right)_{R_0} & = & -(A + B) \end{cases}$$

Oortin vakio A

- Säteisnopeuksien vaihtelusta käyttäen kaavaa $v_r = A d \sin 2l$
- Ominaisliikkeiden vaihteluista:
$$\mu_t = \frac{t_l}{4.74d} = \frac{A}{4.74} \cos 2l + \frac{B}{4.74}$$
- Linnunradan rotaatiokäyrästä käyttäen suoraan A:n määritelmän

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \left(\frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right]$$



Menetelmässä 1 on tärkeää että etäisyydet d ovat suuria (OB-tähdet)

Hipparcos: $A = +14.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

Gaia DR1: $A = +15.3 \pm 0.04 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ auringon lähiympärisössä ($d < 230 \text{ p}$; Bovy 2017).

Gaia DR2: $A = +15.1 \pm 0.1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (Li et al. 2019)

Oortin vakio B

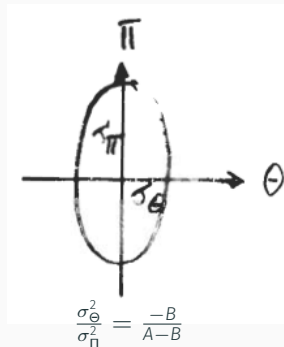
- Ominaisliikkeiden kaavan vakiotermi B .
Vaikeutena tämän vakiotermin erottaminen precession aiheuttamasta systemaattisesta efektistä ominaisliikkeissä, ts. fundamentaalisen koordinaattisysteemin vaikeudet.
- Epäsuorasti auringon lähiympäristön tähtien nopeusjakautuman avulla. Teoreettisesti voidaan osoittaa että, nopeuksien hajonnat σ_{Θ} ja σ_{Π} noudattavat relaatiota oikealla.

Määrätään nopeusdispersiot ja $A \rightarrow B$ -vakion arvo

Hipparcos: $B = -12.4 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

Gaia DR1: $B = -11.9 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (Bovy 2017)

Gaia DR2: $B = -13.4 \pm 0.1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (Li et al. 2019)



Oortin vakioiden merkitys

$-(A + B) = \left(\frac{d\Theta}{dR}\right)_{R_0}$ on ratanopeuden gradientti auringon etäisyydessä Linnunradan keskustasta. *Gaia*-tulosten mukaan $3.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$.

$A - B = \frac{\Theta_0}{R_0} = \Omega$ on kulmanopeus auringon etäisyydellä. *Gaia*-tulosten mukaan $27.2 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Tästä saadaan kiertoaika 226 Myr.

A kuvaa kulmanopeuden gradienttia auringon lähiympäristössä

$$R_0 \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R_0} = \left[\left(\frac{d\Theta}{dR}\right)_{R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right] = -2A$$

B kuvaa liikemäärämomentin gradienttia auringon lähiympäristössä

$$\frac{1}{R_0} \left(\frac{d(R^2\omega)}{dR}\right)_{R_0} = \left[\left(\frac{d\Theta}{dR}\right)_{R_0} + \frac{\Theta_0}{R_0} \right] = -2B$$

Mitä opimme?

Nopeusdatasta voidaan havaita kinemaattisia ryhmiä, erityisesti Pop I ja Pop II tähdet liikkuvat eri nopeuksilla.

Pallomaiset tähtijoukot eksentrisillä radoilla galaksin keskustan ympäri ja tämä ilmenee suurina havaittuina LSR nopeuksina.

Klassisen Oort-Lindblad teorian mukaan tähtien keskimääräinen liike Linnunradassa on ympyräliikettä. Linnunradassa esiintyy differentiaalirotaatiota ja kiertosuunta on sama kaikissa Linnunradan osissa ja kaikille alisysteemeille.

Differentiaalirotaatio aiheuttaa kaksoissinikäyrän havaittuihin radiaalinopeuksiin ja ominaisliikkeisiin.

Oortin vakiot A ja B mittaavat kulmanopeutta ja kiertonopeuden gradienttia auringon etäisyydellä Linnunradan keskustasta. Auringon lähiympäristön liikkeen kvantifoimiseksi tarvitaan lisäksi auringon ratanopeus Θ_0 sekä auringon etäisyys Linnunradan keskuksesta R_0 , joita käsitellään ensi luennolla.