



Linnunradan rakenne (FYS2053)

Luento 8: Tähtien liikkeet auringon lähiympäristössä

Jorma Harju

31.10.2022, Exactum D123

Tällä luennolla käsitellään

1. Tähtien liikkeet auringon lähellä - määritelmät ja koordinaatistot
2. Tähtien nopeusjakauma avaruusnopeuksista
3. Nopeusellipsoidi
4. Tähtien nopeusjakauma säteisnopeuksista
5. Auringon liike ominaisliikkeistä ja apeksin paikka

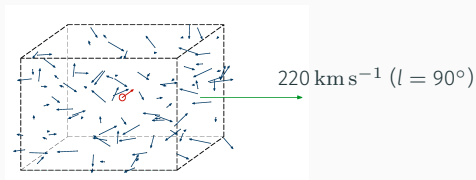
Tähtien liikkeet auringon lähellä

Määritelmiä

Aurinko ja muut kiekon tähdet liikkuvat suurinpiirtein ympyräradoilla Linnunradan keskuksen ympäri.

Auringon lähellä olevassa kiekon osassa ($r <$ muutama sata pc) voidaan erottaa seuraavat liikkeet:

- Kaikkien tähtien yhteinen keskimääräinen liike Linnunradan keskuksen ympäri
- Auringon liike tämän keskiarvon suhteen
- Tähtien liikkeet tämän keskiarvon suhteen



Säteis- ja tangentialinopeudet

Tähden avaruusnopeus tiedetään, jos voidaan mitata sen säteisnopeus, etäisyys ja ominaisliike (eli kulmanopeus taivaan tasossa)

Säteisnopeus, v_r , saadaan spektriviivojen Doppler-siirtymästä

Ominaisliike jaetaan rektaskension ja deklinaation suuntaisiin komponentteihin μ_α ja μ_δ ("/v tai mas/v; mas=millikaarisekunti)

Vastaavat tangentialinopeuden komponentit

$$t_\alpha = 4.74 \text{ km s}^{-1} \frac{\mu_\alpha}{\varpi}, \quad t_\delta = 4.74 \text{ km s}^{-1} \frac{\mu_\delta}{\varpi},$$

missä **trigonometrinen parallaksi** ϖ ("/> tai mas) saadaan astrometrisista mittauksista (ks. Luento 2)

Tangentialinopeus $v_t = \sqrt{t_\alpha^2 + t_\delta^2}$

Avaruusnopeus $v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$

Paikallinen lepostandardi, LSR

Dynaaminen määritelmä: Paikallinen lepostandardi (Local Standard of Rest) on piste, joka liikkuu ympyräradalla Linnunradan keskuksen ympäri auringon etäisyydellä

Kinemaattinen määritelmä: Liikkuva piste, jonka suhteen auringon lähellä olevien tähtien nopeuksien keskiarvo on nolla (ks. Luento 2)

Lähitähtien avaruusnopeuksien keskiarvo ja nopeushajonta riippuu valittujen tähtien spektriluokasta (koska eri-ikäisillä tähdillä on erilaiset nopeusjakaumat)

Periaatteessa dynaaminen määritelmä on parempi, mutta vaikeampi toteuttaa käytännössä

Auringon liikkeen määrittäminen LSR:n suhteen on lähtökohta kaikille Linnunradan dynamiikkaa koskeville tutkimuksille

Tähtien avaruusnopeudet esitetään suorakulmaisissa koordinaateissa

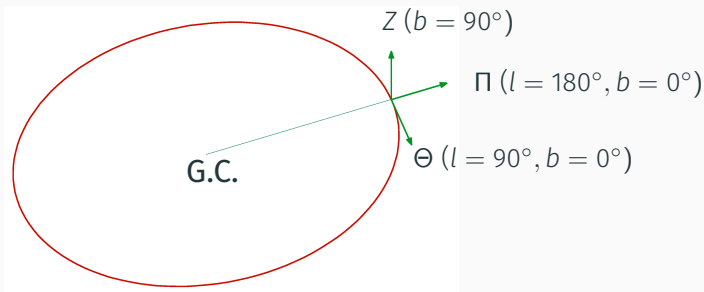
- $(t_\alpha, t_\delta, v_r)$ projisoidut nopeudet (km/s) taivaanpallolla
- $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ aurinkokeskeiset nopeudet, x-akseli osoittaa suuntaan $\alpha = 0, \delta = 0$
- (u, v, w) pekuliaariset nopeudet LSR suhteen, akselien suunnat samat kuin yllä
- (U, V, W) tai $(\dot{x}', \dot{y}', \dot{z}')$, nopeudet galaktisessa koordinaatistossa, x-akseli osoittaa suuntaan $l = 0^\circ, b = 0^\circ$ (tai $l = 180^\circ, b = 0^\circ$)

Fundamentaalin lepokoordinaatisto

Fundamentaalisessa lepokoordinaatistossa, (Π , Θ , Z), (Fundamental standard of Rest = FSR) koordinaatisto ei liiku Auringon mukana, vaan on paikallaan Linnunradan keskuksen suhteen

FSR ei myöskään kierry: kaukaisten galaksien suunnat eivät muutu sen suhteen.

FSR:tä käytetään kun mallinnetaan koko Linnunrataa.



Aurinkokeskeinen koordinaatisto

$A = \odot$, $S =$ tähti, $C =$ LSR
(kinemaattinen määritelmä)

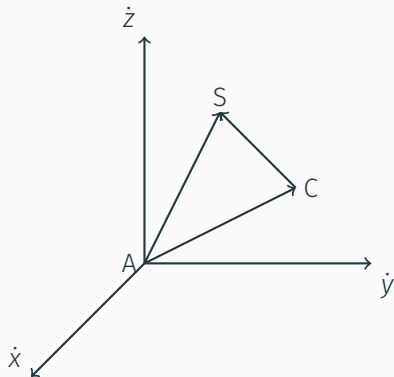
\vec{AS} : tähden nopeus Auringon suhteen

\vec{CS} : tähden pekuliaarinen nopeus (u, v, w)

\vec{AC} : tähtien keskimääräinen nopeus Auringon suhteen

\vec{CA} : auringon pekuliaarinen nopeus \vec{V}_{\odot}

$$\vec{AS} = \vec{AC} + \vec{CS} = -\vec{V}_{\odot} + \vec{CS}$$



Muunnos $(v_r, t_\alpha, t_\delta) \rightarrow (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$

Kierrot y- ja z-akseleiden suhteen kulmien δ ja α verran (ks. Luento 2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R_z(-\alpha) R_y(\delta) \begin{bmatrix} v_r \\ t_\alpha \\ t_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta & -\sin \alpha & -\cos \alpha \sin \delta \\ \sin \alpha \cos \delta & \cos \alpha & -\sin \alpha \sin \delta \\ \sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ t_\alpha \\ t_\delta \end{bmatrix}$$

R on matriisi, joka kiertää **koordinaatistoa** alaindeksinä annetun akselin suhteen:

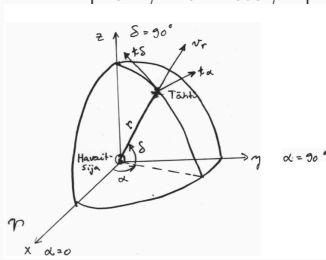
$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

Käänteinen muunnos

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} v_r \\ t_\alpha \\ t_\delta \end{bmatrix} :$$

yo. matriisin transpoosi



Tähtien nopeusjakauma avaruusnopeuksista

Auringon keskimääräinen liike läheisten tähtien suhteen voidaan määrätä 1) tähtien avaruusnopeuksista, 2) säteisnopeuksista, tai 3) ominaisliikkeistä.

Avaruusnopeudet vaativat etäisyyden, ominaisliikkeen ja säteisnopeuden mittausta

Säteisnopeudet voidaan mitata kaukaisemmille kohteille kuin ominaisliikkeet

Kun auringon liike Linnunradassa tunnetaan, eri-ikäisten tähtien nopeudet ja nopeushajonnat antavat tietoa Linnunradan dynaamisesta kehityshistoriasta

Tähtien nopeusjakautuma avaruusnopeuksista I

Käytämme tässä **oikeakätistä** (U, V, W) -koordinaatistoa, jossa U -akseli osoittaa Linnunradan keskukseen ($l = 0^\circ, b = 0^\circ$). Joihinkin toisiin lähteisiin verrattuna U voi olla vastakkaismerkkinen.

Lähitähtien nopeuksien (U, V, W) keskiarvot määrittelevät LSR:n.

Auringon nopeuskomponenteiksi LSR:n suhteen saadaan:

$$U_{\odot} = -\frac{1}{N} \sum_i U_i \quad V_{\odot} = -\frac{1}{N} \sum_i V_i \quad W_{\odot} = -\frac{1}{N} \sum_i W_i$$

Lähitähtien jakaumasta on johdettu esim. seuraavan tyyppisiä arvoja:
 $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11, 12, 7)$ km/s (Schönrich et al.2010).

Tästä saadaan vauhti ja suunta $v_{\odot} = \sqrt{U_{\odot}^2 + V_{\odot}^2 + W_{\odot}^2} \approx 18$ km/s

$$\begin{cases} l & = \arctan(V_{\odot}/U_{\odot}) & = 47^\circ 5 \\ b & = \arcsin\left(\frac{W_{\odot}}{\sqrt{U_{\odot}^2 + V_{\odot}^2 + W_{\odot}^2}}\right) & = 23^\circ 3 \end{cases}$$

$(\alpha \approx 17^{\text{h}}49^{\text{m}}5, \delta \approx 22^\circ 41')$

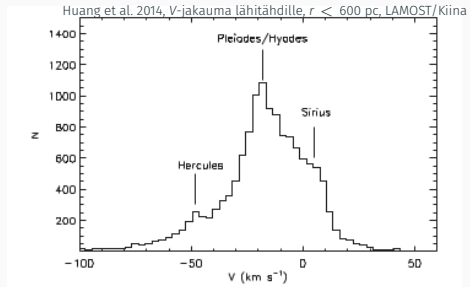
Tähtien nopeusjakauma avaruusnopeuksista II

Jakauma muistuttaa ellipsoidia, jossa on kuitenkin paikallisia tihentymiä (liikkuvia tähtiryhmiä)

Vertexin poikkeama: isoakseli poikkeaa suunnasta $l = 0^\circ$ positiiviseen suuntaan, $l_1 \sim 10^\circ - 20^\circ$

Asymmetria: suuret negatiiviset V :n arvot tavallisempia kuin positiiviset

Eri spektriluokan (eri ikäisille) tähdille saadaan erilaisia keskiarvoja ja hajontoja



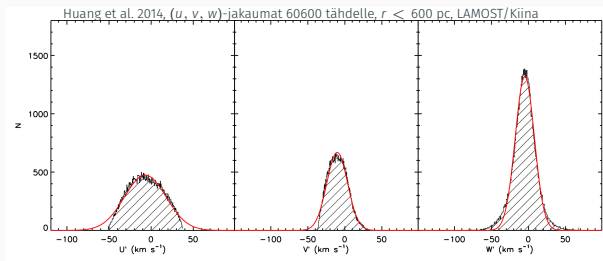
Nopeusellipsoidi

Tähtien havaitut nopeusjakaumat

Lähitähtien ominaisliike- ja säteisnopeusmittauksista johdetut avaruusnopeusjakaumat muistuttavat Gaussista jakaumaa, jonka **hajonta** on $\sim 15 - 25$ km/s

Vallitseva käsitys on, että nopeuksien jakaumaa voidaan parhaiten kuvata gaussisella ellipsoidilla

Jakaumassa on selviä poikkeuksia, joita kutsutaan liikkuviksi ryhmiksi



Karl Schwarzschild (1907) osoitti, että havaintojen mukainen epäisotrooppinen nopeusjakauma saadaan olettamalla, että nopeudet ovat ellipsoidisesti jakautuneet:

$$\Phi(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = C e^{-\frac{1}{2}E(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})},$$

jossa ellipsoidin yleinen yhtälö on

$$E(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = \alpha\dot{x}^2 + \beta\dot{y}^2 + \gamma\dot{z}^2 + \delta\dot{x}\dot{y} + \varepsilon\dot{y}\dot{z} + \zeta\dot{x}\dot{z}$$

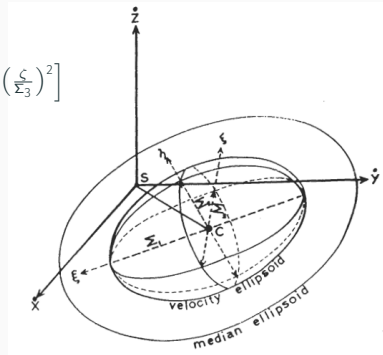
Valitaan koordinaatisto niin, että origo = ellipsin keskipiste ja koordinaattiakselien suunnat = ellipsoidin pääakselien suunnat

Ellipsoidihypoteesi II

Kirkkaiden tähtien, $V \leq 6^{\text{mag}}$, on saatu seuraavat parametrit pääakseleille, (l_1, b_1) on vertexin suunta:

$$\begin{cases} \Sigma_1 = 23.7 \text{ km/s}, & l_1 = 13^\circ, & b_1 = -2^\circ \\ \Sigma_2 = 16.0 \text{ km/s}, & l_2 = 103^\circ, & b_1 = +4^\circ \\ \Sigma_3 = 14.6 \text{ km/s}, & l_3 = 325^\circ, & b_3 = +86^\circ \end{cases}$$

$$\Phi(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3} e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\xi}{\Sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{\eta}{\Sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\zeta}{\Sigma_3} \right)^2 \right]}$$



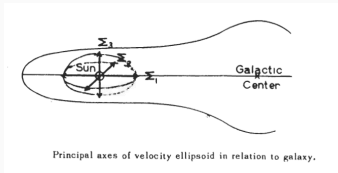
Ellipsoidihypoteesin tulkinta

Nopeusellipsoidin keskipisteen paikka antaa auringon nopeuden arvon ja suunnan:

$$\begin{cases} V_{\odot} = 19.5 \text{ km/s} \\ l_{\odot} = 56^{\circ} \\ b_{\odot} = 23^{\circ} \end{cases}$$

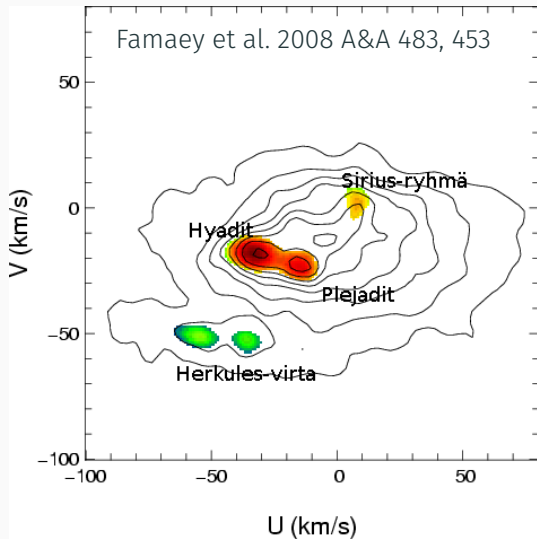
Tämä vastaa suuntaa $\alpha = 18^{\text{h}}, \delta = 30^{\circ}$

Ellipsoidinen nopeusjakautuma on suorassa yhteydessä Linnunradan dynamiikkaan. Ellipsoidin isoakseli (Σ_1) osoittaa likimain galaksin keskukseen ja lyhyin akseli likimain galaksin napaan.



Ellipsoidinen nopeusjakauma voidaan johtaa olettamalla, että tähtien rataelementit poikkeavat tilastollisesti ympyräradasta galaksin tasossa. Vertex-poikkeaman aiheuttaa todennäköisesti Linnunradan epäsymmetrinen potentiaali.

Lähitähtien (U, V) -jakauma



Tähtien nopeusjakauma säteisnopeuksista

Edellä tutkittiin Auringon liikettä tähtien nopeusjakautuman avaruusnopeuksista.

Jos emme tiedä tähtien avaruusnopeuksia, sen sijaan meillä on useammin tiedossa tähtien säteisnopeudet ja/tai ominaisliikkeet, joita käyttämällä voidaan tutkia kauempanakin olevien tähtien liikkeitä, joille ei tunneta parallakseja eikä siis avaruusnopeuksia.

Tällä luennolla tarkastellaan vielä säteisnopeus- ja ominaisliikehavaintoja. Näiden pohjalta voidaan tehdä merkittäviä yleistyksiä Auringon liikkeelle Linnunradassa.

Auringon liike säteisnopeuksista I

Edellä esitettiin yhteys säteisnopeuden v_r ja aurinko-keskeisten nopeuksien $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ välillä:

$$v_r = \dot{x} \cos \alpha \cos \delta + \dot{y} \sin \alpha \cos \delta + \dot{z} \sin \delta$$

Esitetään nopeudet LSR:n suhteen:

$$\begin{cases} \dot{x} &= u - u_{\odot} \\ \dot{y} &= v - v_{\odot} \\ \dot{z} &= w - w_{\odot} \end{cases}$$

Sijoitetaan nämä säteisnopeuden kaavaan:

$$v_r = u \cos \alpha \cos \delta + v \sin \alpha \cos \delta + w \sin \delta + \\ -(u_{\odot} \cos \alpha \cos \delta + v_{\odot} \sin \alpha \cos \delta + w_{\odot} \sin \delta)$$

Ensimmäiset kolme tekijää yhdessä muodostavat tähden pekuliaarisen säteisnopeuden:

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

LSR:n määritelmän perusteella keskiarvo $v_{r,p} = 0$

Auringon liike säteisnopeuksista III

Auringon nopeus saadaan havaitsemalla v_r suurelle määrälle tähtiä eri puolilla taivasta. Kullekin tähdelle saadaan yhtälö:

$$u_{\odot} \cos \alpha_i \cos \delta_i + v_{\odot} \sin \alpha_i \cos \delta_i + w_{\odot} \sin \delta_i + v_{r,i} = v_{r,p,i} ,$$

missä $v_{r,i}$ on tähden i havaittu säteisnopeus ja $v_{r,p,i}$ on tähden i pekuliaarinen säteisnopeus.

Tämä yhtälöryhmä ratkaistaan pienimmän neliösumman keinolla. Tällöin tuntemattomien ($u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$) arvot tulevat määräytyiksi siten, että satunnaisten 'virheiden' (tässä pekuliaarinopeuksien $v_{r,p,i}$ neliösumma) on pienin mahdollinen:

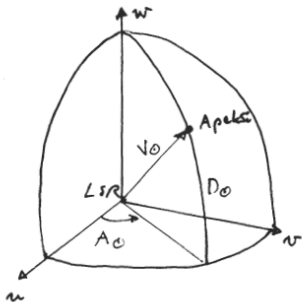
$$\sum_{i=1}^N v_{r,p,i}^2 = \text{minimi}$$

Auringon liike säteisnopeuksista IV

Kun on ratkaistu pienimmän neliösumman keinolla ($u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$), voidaan ($V_{\odot}, A_{\odot}, D_{\odot}$) laskea kaavoista:

$$\begin{cases} u_{\odot} &= V_{\odot} \cos A_{\odot} \cos D_{\odot} \\ v_{\odot} &= V_{\odot} \sin A_{\odot} \cos D_{\odot} \\ w_{\odot} &= V_{\odot} \sin D_{\odot} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{\odot}^2 &= u_{\odot}^2 + v_{\odot}^2 + w_{\odot}^2 \\ \tan A_{\odot} &= v_{\odot}/u_{\odot} \\ \sin D_{\odot} &= w_{\odot}/\sqrt{u_{\odot}^2 + v_{\odot}^2 + w_{\odot}^2} \end{cases}$$



Auringon liike ominaisliikkeistä ja apeksin paikka

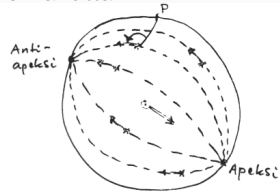
Auringon liike ominaisliikkeistä

Ominaisliikkeistä (ilman että tiedetään säteisnopeuksia tai parallakseja) voidaan määrätä auringon apeksiliikkeen suunta samaan tapaan kuin säteisnopeuksista

Menetelmä toimii, jos tarkasteltavat tähdet valitaan jotakuinkin pienellä etäisyysvälillä, käyttäen apuna spektriluokkia ja näennäisiä magnitudia.

Yhtälöön jää tähtien keskimääräinen etäisyys, jota ilman auringon nopeutta ei saa ratkaistua.

Herschel (1783) ja Argelander (1837) määrsivät apeksin suunnan geometrisesti ominaisliikkeen suuntakulmien avulla



Tuloksia eri spektriluokille I

Standard Solar Motion: Tämä on määritelty läheisimpien säteisnopeus- ja ominaisliikeluetteloissa esiintyvien tähtien avulla (suluissa koordinaattiakselien suunta):

$$\begin{cases} U_{\odot} &= 10.4 \text{ km/s} & (l = 0^{\circ}, b = 0^{\circ}) \\ V_{\odot} &= 14.8 \text{ km/s} & (l = 90^{\circ}, b = 0^{\circ}) \\ W_{\odot} &= 7.3 \text{ km/s} & (b = 90^{\circ}) \end{cases}$$

$$V_{\odot} = 19.5 \text{ km/s}, l = 56^{\circ}, b = 23^{\circ} (\alpha = 18^{\text{h}}, \delta = +30^{\circ})$$

Basic solar motion: Nopeus yleisimpien ympyräradalla liikkuvien lähitähtien suhteen.

| | U_{\odot} | V_{\odot} | W_{\odot} |
|----|-------------|-------------|-------------|
| A | +9.4 | +9,9 | +5.6 |
| gK | +9.3 | +10.7 | +6.7 |
| dM | +8 | +10 | +6 |

$$V_{\odot} = 15.4 \text{ km/s}, l = 51^{\circ}, b = 23^{\circ} (\alpha = 17.9^{\text{h}}, \delta = +26^{\circ})$$

'Standard Apex' on johdettu pääsarjan A-G-tähtien sekä jättiläistähtien avulla

'Basic Solar Motion' perustuu A-tähtien, K-jättiläisten ja M-kääpiöiden mittauksiin

Auringon nopeudessa nähdään systemaattinen V -komponentin kasvu kun mennään varhaisen spektriluokan tähdistä myöhäisempiin luokkiin, jotka ovat pitkäikäisempiä ja siis keskimäärin vanhempia

Tämä osoittaa, että vanhemmilla tähdillä on keskimäärin suuri nopeus negatiivisen V -akselin suuntaan, siis Linnunradan kiertosuuntaa vastaan

Myös nopeushajonnat kasvavat spektriluokan myötä

Apeksin paikka taivaalla

Auringon liikkeen apeksin paikkaa taivaalla on määrätty lukuisissa tutkimuksissa Herschelin (1783) tuloksesta lähtien

Tulos vaihtelee tarkasteltavien tähtien mukaan

Herschel ja Argelander (joka teki mittauksensa Suomessa) sijoittivat apeksin aika lähelle nykyisiä Standard Solar ja Basic Solar Motion pisteitä.

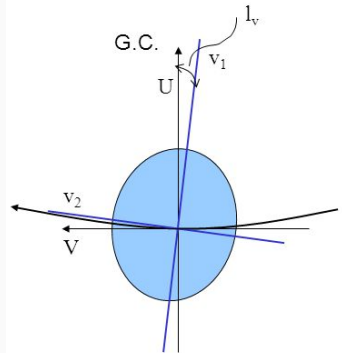
Piste sijaitsee Herkuleen tähdistössä, Lyran Vegan alapuolella.



Vertexin poikkeama

Havainnoista saatu nopeusellipsoidin isoakselin suunta ei yleensä yhdy suuntaan $l = 0^\circ$, kuten aksiaalisymmetrisessä järjestelmässä olettaisi.

Vertexin poikkeama johtuu todennäköisesti siitä, että Linnunradan painovoimakenttä ei ole täysin aksiaalisymmetrinen (spiraalihaarat, sauva), ja että tähdet syntyvät spiraalihaaroissa. Poikkeama on suurin ($> 20^\circ$) nuorimmille tähdille, ja taasoittuu 10° tienoille vanhoille tähtipopulaatioille.



Vertex Deviation of the Velocity Ellipsoid

| Stellar type | l^{v} (vertex) | Stellar type | l^{v} (vertex) |
|--------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Supergiants | | Main sequence | |
| O-B5 | 36° | O-B | -42° |
| F-M | 18° | A0 | 23° |
| | | A5 | 30° |
| Giants | | F0 | 19° |
| A | 27° | F5 | 7° |
| F | 14° | G0 | 10° |
| G | 11° | G5 | 11° |
| K | 8° | K | 8° |
| M | -8° | M | 7° |

Source: Adapted from J. Delhaye, in A. Blaauw and M. Schmidt (eds.), *Galactic Structure*, Chicago: University of Chicago Press, 1965, p. 64, by permission.

Mitä opimme?

Tähtien säteis- ja ominaisliikemittausten avulla voidaan niiden avaruusnopeudet auringon suhteen.

Auringon nopeus lähitähtien keskimääräisen liikkeen eli paikallisen lepostandardin (LSR) suhteen sekä LSR:n liike Linnunradan ympäri muodostavat perustan Linnunradan dynamiikan tutkimukselle.

Tähtien nopeusjakaumat riippuvat spektriluokasta. Nuorimmilla (lyhytikäisimmillä) tähdillä on pienin nopeushajonta keskimääräisen liikkeen suhteen.

Auringon lähellä olevien tähtien liikkeitä voidaan selittää erilaisilla hypoteeseilla, joista ellipsoidihypoteesi tähtien nopeusjakautumalle vastaa parhaiten havaintoja.

Lähitähtien nopeusjakamaa kuvaavan ellipsoidin vertexin suunta poikkeaa $l = 0^\circ$ arvosta, johtuen Linnunradan spiraalihaararakenteesta.