Linnunradan rakenne FYS2053, 5 op, syksy 2022

D123 Exactum

Luento 2: Tähtien etäisyyksien ja nopeuksien määrääminen , 12/09/2022

Tällä luennolla käsitellään

1. Tähtitieteelliset koordinaatistot.
2. Tähtien nopeusmittaukset. Radiaalinopeudet sekä tangentiaalinopeudet. Paikallinen lepostandardi.
3. Primääriset etäisyydenmittausmenetelmät: Trigonometrinen parallaksi, liikkuvien tähtiryhmien menetelmä, statistiset parallaksit.
4. Sekundääriset etäisyydenmittausmenetelmät: Fotometriset mittaukset, muuttujat ja pääsarjasovitus.
5. GAIA satelliitti: Tähtien paikkojen ja etäisyyksien mittaustarkkuus nousee aivan uudelle tasolle.
6. Vastaa soveltuvin osin: M: sivut 6-24
S&E: sivut 32-60
B&M: sivut 31-46

2.1 Tähtitieteelliset koordinaatistot

- Etäisyydenmittaukset tähtitieteessä perustuvat yleisesti ottaen suuntien mittaamiseen yleensä useana eri ajankohtana (poikkeus: tutkan käyttö aurinkokunnassa).
- Tarvitaan reprodusoitavissa oleva koordinaatisto, johon eri ajan-kohtina tehdyt havainnot tähtien paikoista (α,δ) voidaan palauttaa.
- Ekvatoriaalinen koordinaatisto on kiinnitetty seuraavasti:

1. Maan akselin suunta -> ekvaattoritaso -> δ (deklinaatio).
2. Maan ratatason ja ekvaattoritason leikkaussuoran suunta (=kevättasauspiste) -> α=0h (rektaskensio).

- Absoluuttisista α,δ:n arvoista suurelle joukolle tähtiä seuraa myös koordinaatiston kiinnitys.

Fundamentaalinen koordinaatisto

- Absoluuttisista havainnoista saadut α,δ muuttuvat ajan mukana seuraavista syistä: 1) Prekessio (kuu-aurinkoprekessio+planeettaprekessio), 2) Nutaatio, 3) Aberraatio, 4) Parallaksi (hyvin lähellä oleville tähdille), 5) Tähtien ominaisliike (lähellä olevat tähdet).
- Kun edellä mainitut efektit otetaan mahdollisimman hyvin huomioon, saadaan kiinteä koordinaatisto (Huom. tämä on vain approksimaatio), josta käytetään nimeä fundamentaalinen tähtitieteellinen koordinaatisto.
- FK4 (1535 tähteä, 1963 m≤7), FK5 (≈5000 tähteä, 1984, m≤9.5). Viimeisin luettelo FK6 (≈5000 tähteä, 2000, m≤9.5) perustuu Hipparcos-satelliitin havaintoihin.
- Tarkin käytössä oleva koordinaatisto 'GAIA Celestial Reference Frame' perustuu GAIA:n havaitsemiin kaukaisiin kvasaareihin (556 869 kvasaaria).
- Lisäksi mannertenvälisellä radiointerferometrilla (VLBI) voidaan havaita kvasaareja myös hyvin suurella tarkkuudella (tarkkuus <0.”05).
- Suurelle joukolle muille tähdille saadaan fundamentaaliluettelon avulla mitattua suhteelliset (α,δ)–koordinaatit.

2.2 Nopeusmittaukset: Radiaalinopeus

- Tähden nopeusvektorin määräämiseksi tarvitaan sen suunta (esim. α,δ) ja suuruus (km/s), tai vaihtoehtoisesti nopeuden kolme komponenttia suorakulmaisessa koordinaatistossa.
- Nopeus näkösäteen suunnassa = radiaalinopeus v'_r saadaan verrattain helposti spektriviivojen Doppler-siirtymistä:

$$\frac{v'_r}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (v'_r << c)$$

- Lähestyvän tähden valo sinisiirtyy ja loittonevan tähden valo punasiirtyy. Lähitähtien nopeudet Auringon suhteen ovat tyypillisesti luokkaa ≈10-100 km/s, joten ehto $v'_r << c$ on aina voimassa. Suhteellisuusteoreettisia korjauksia ei siis tarvita.

Radiaalinopeus II

- Havainnoista saatu radiaalinopeus v'_r on mitattu suhteessa havaitsijaan Maapallon pinnalla. Tähden todellinen heliosentrinen nopeus v_r Auringon suhteen levossa olevalle havaitsijalle saadaan yhtälöstä:

$$v_r = v'_r + v_a + v_d$$

- v'_r on havaittu nopeus Maapallon suhteen.
- v_a on Maapallon nopeus tähden suhteen johtuen Maapallon rataliikkeestä Auringon ympäri (Maan ratanopeus 30 km/s).
- v_d on Maapallon pyörimisliikkeestä johtuva nopeuskomponentti, Maan pyörimisnopeus päiväntasaajalla ≈0.5 km/s (huomioi cos ϕ efekti leveyspiirin ϕ funktiona).
- Ennen GAIA:a radiaalinopeudet tunnettiin noin 500 000 tähdelle, tarkkuus yleensä luokkaa 0.5-1 km/s, esim. RAVE – the Radial Velocity Experiment. GAIA (DR3) on toistaiseksi mitannut radiaalinopeudet noin 34 miljoonalle tähdelle tarkkuudella 0.2-0.3 km/s, himmeille tähdille tarkkuus on huonompi, noin ~1-2 km/s.

Ominaisliikkeen määrääminen

- Ominaisliike μ ilmoitetaan yksiköissä kaarisekuntia/vuosi (”/a). Suurin ominaisliike 10.3 ”/a (Barnardin tähti). Useimmille tähdille vain ~0”.01/a.

$$\begin{cases} \mu''_\alpha = \mu'' \sin P \\ \mu''_\delta = \mu'' \cos P \end{cases}$$

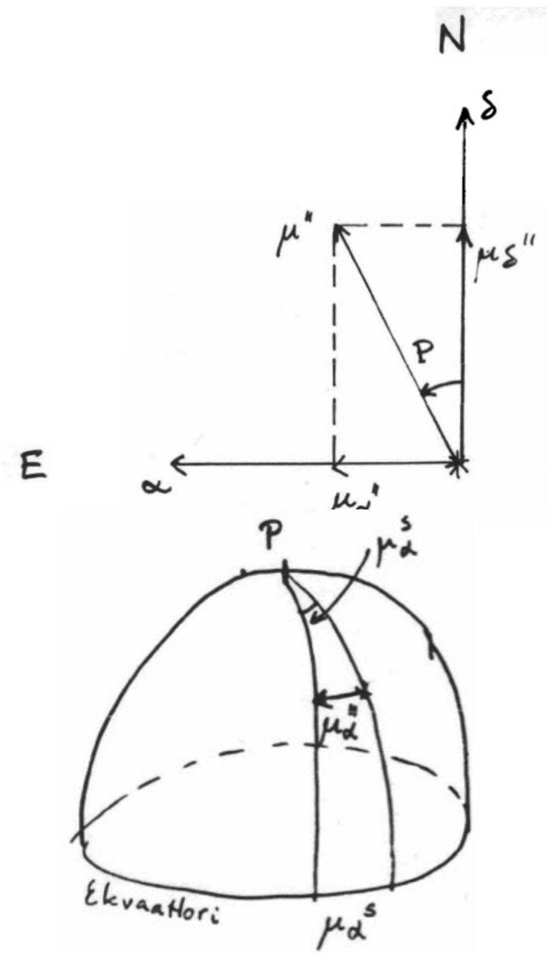
$$\mu^s_\alpha = \frac{1}{15}\frac{\mu''_\alpha}{\cos\delta}$$

- Aikamitassa:

$$\mu''_\alpha = \mu^s_\alpha \cdot 15 \cdot \cos\delta$$

Huom: cos δ-tekijä pituuspiirit lähenevät

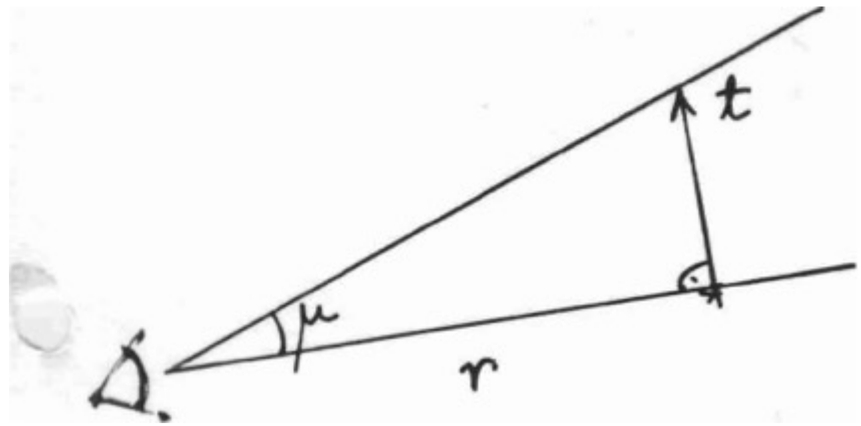
toisiaan navan suunnassa.



Tangentiaalinopeus

- Tangentiaalinopeuden komponentit voidaan ilmaista:

$$\begin{cases} t_\alpha = K r \mu_{\alpha''} \ [\mathrm{km/s}] \\ t_\delta = K r \mu_{\delta''} \ [\mathrm{km/s}] \\ [r] = \mathrm{pc} \\ [\mu_{\alpha''}, \mu_{\delta''}] = '' \ /\mathrm{vuosi} \end{cases}$$

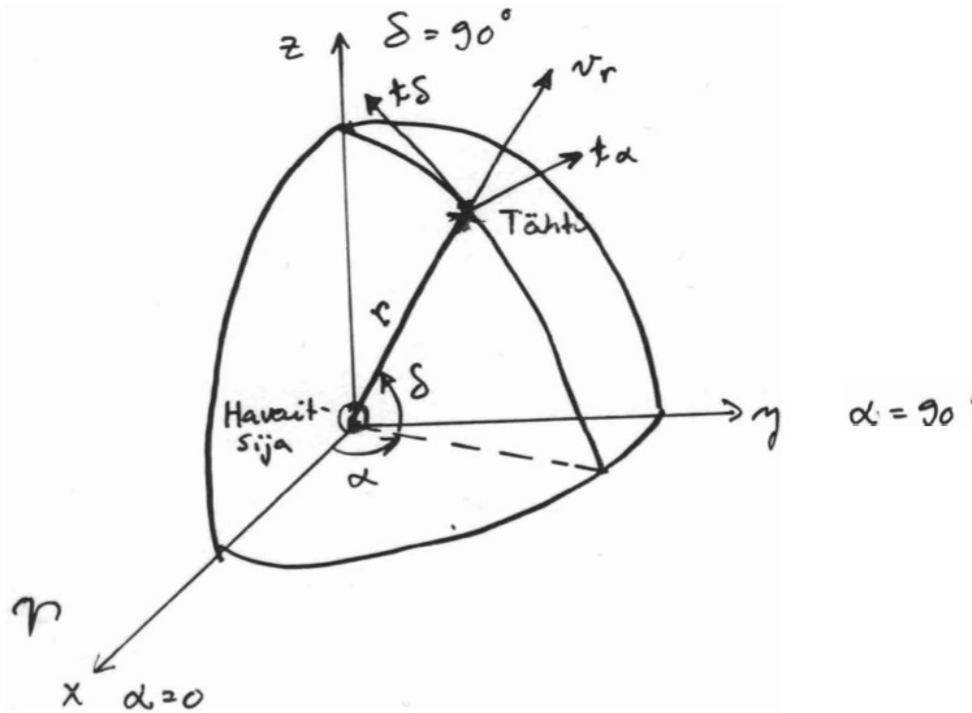


$$K = \frac{(\mathrm{pc/km}) \times ('' /\mathrm{rad})}{\mathrm{vuosi/s}} = \frac{3.08568 \cdot 10^{13} \times \frac{1}{206265}}{31556926} = 4.7406$$

Nopeudet kiinteässä koordinaatistossa I

- Komponentit v_r, t_α ja t_δ riippuvat tähden suunnasta taivaalla (α,δ).
- Käytetään mieluummin kiinteää suorakulmaista koordinaatistoa: x,y,z:

$$\begin{cases} x = r\cos\alpha\cos\delta \\ y = r\sin\alpha\cos\delta \\ z = r\sin\delta \end{cases}$$



Nopeudet kiinteässä koordinaatistossa II

- Nopeudet saadaan derivoimalla x,y,z-koordinaatit termeittäin:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{r}\cos\alpha\cos\delta - \dot{\alpha}r\sin\alpha\cos\delta - \dot{\delta}r\cos\alpha\sin\delta \\ \dot{y} = \dot{r}\sin\alpha\cos\delta + \dot{\alpha}r\cos\alpha\cos\delta - \dot{\delta}r\sin\alpha\sin\delta \\ \dot{z} = \dot{r}\sin\delta + \dot{\delta}r\cos\delta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{r} = v_r \ [\mathrm{km/s}] \\ \dot{\alpha} = d\alpha/dt \ [\mathrm{rad/s}] \ \mathrm{t}_\alpha = \dot{\alpha}\mathrm{r}\cos\delta \\ \dot{\delta} = d\delta/dt \ [\mathrm{rad/s}] \ \mathrm{t}_\delta = \dot{\delta}\mathrm{r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = v_r\cos\alpha\cos\delta - t_\alpha\sin\alpha - t_\delta\cos\alpha\sin\delta \\ \dot{y} = v_r\sin\alpha\cos\delta + t_\alpha\cos\alpha - t_\delta\sin\alpha\sin\delta \\ \dot{z} = v_r\sin\delta + t_\delta\cos\delta \end{cases}$$

Paikallinen lepostandardi I

- Tähän asti lasketut nopeudet ovat nopeuksia Auringon suhteen (x,y,z). Auringolla on tietysti myös oma pekuliaarinopeus, joten on tarkoituksen-mukaisempaa tarkastella tähtien nopeuksia sellaisessa Auringon suhteen tasaisella nopeudella liikkuvassa koordinaatistossa, jossa Auringon lähiympäristön tähtien nopeuskomponenttien keskiarvot ovat =0.
- Tällainen koordinaatisto on nimeltään **paikallinen lepostandardi (Local Standard of Rest = LSR)**.
- Määritellään nopeuskoordinaatit: u,v,w =tähtien nopeudet LSR:n suhteen:

$$\begin{cases} u_i = \dot{x}_i - < \dot{x} > \\ v_i = \dot{y}_i - < \dot{y} > \\ w_i = \dot{z}_i - < \dot{z} > \end{cases} \qquad \begin{cases} < \dot{x} > = \frac{1}{N} \sum_i^N \dot{x}_i \\ < \dot{y} > = \frac{1}{N} \sum_i^N \dot{y}_i \\ < \dot{z} > = \frac{1}{N} \sum_i^N \dot{z}_i \end{cases}$$

Paikallinen lepostandardi II

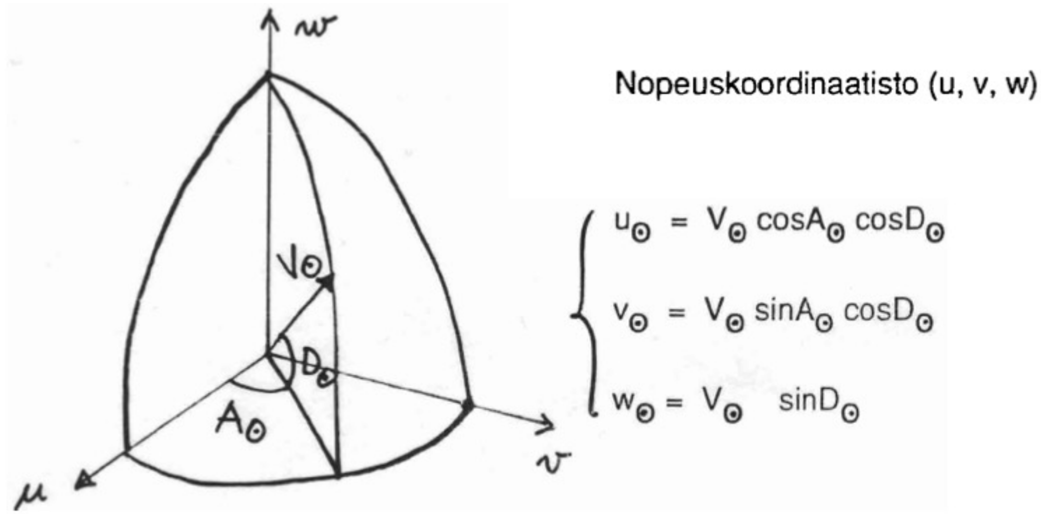
- Määritelmän mukaan:

$$< u >=< v >=< w >= 0$$

- Auringolle itselleen on:

$$\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0$$

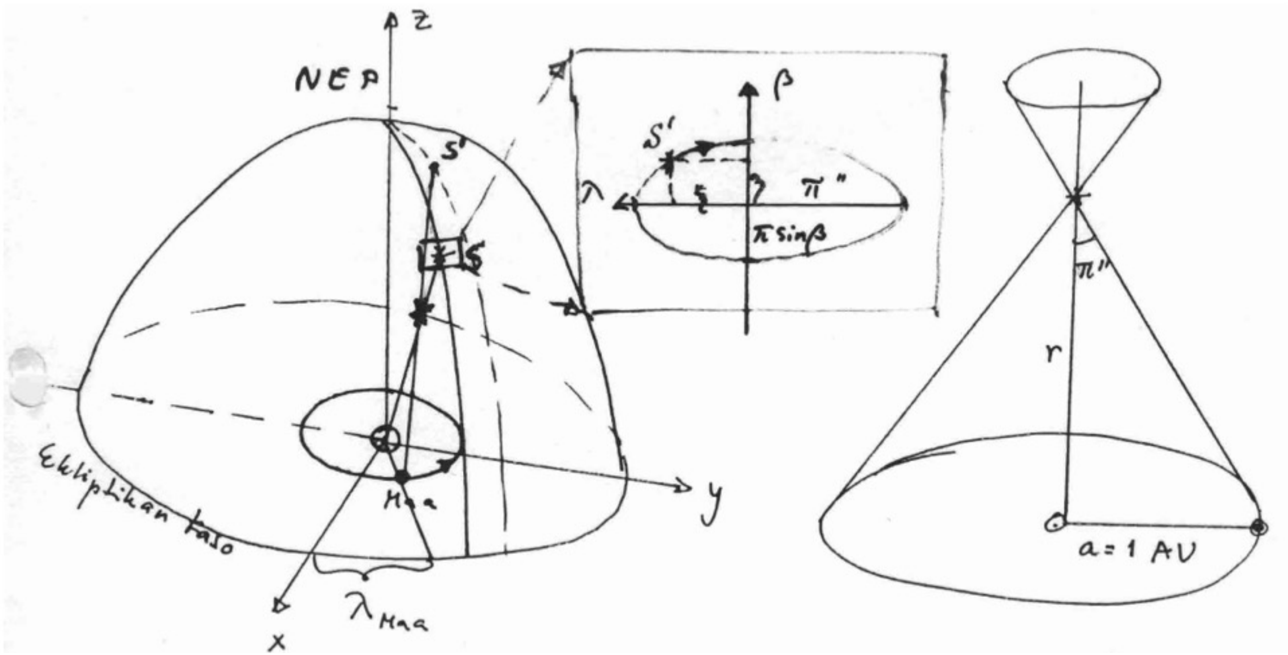
$$\begin{cases} u_\odot = - < \dot{x} > \\ v_\odot = - < \dot{y} > \\ w_\odot = - < \dot{z} > \end{cases}$$



- Auringon liike LSR:n suhteen: Auringon Apeksi on Herkuleksen tähdistössä, melko lähellä Vega-tähteä.

$$\begin{cases} \alpha(2000) = 18^{\mathrm{h}}3^{\mathrm{m}} \\ \delta(2000) = +30°0' \\ V_\odot = 19.4\ \mathrm{km/s} \end{cases}$$

2.3 Primääriset menetelmät etäisyyksien määräämiseen: Trigonometrinen parallaksi



- Käytetään Maan ratasädettä kantana. Parallaksin määritelmä:

$$\pi'' = \frac{1}{r[\mathrm{pc}]} \quad \pi = 1'' \Rightarrow r = 1\ \mathrm{pc} = 206265\ \mathrm{AU}$$

Trigonometrinen parallaksi II

- Tähden äärellisen suuruisen etäisyyden ansiosta sen koordinaatit muuttuvat periodisesti yhden vuoden jaksolla siten, että tähti piirtää taivaanpallolle ellipsin, jonka puoliakselit ovat λ– ja β-koordinaattien suuntaiset ja suuruudeltaan π'' ja $\pi''\sin\beta$, missä λ ja β ovat kohteen ekliptikaalinen pituus ja leveys (katso edellisen sivun kuvaa).
- Koordinaattisiirroksille voidaan johtaa ellipsin yhtälö (katso yksityiskohdat vanhasta Mattilan luentomonisteesta (sivu 16) tai S&E kirjasta sivuilta 33-34).

$$\left(\frac{\xi}{\pi''}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{\pi''\sin\beta}\right)^2 = 1$$

$$\xi = \cos\beta\Delta\lambda \quad \eta = \Delta\beta$$

Parallaksihavainnot

- Lähimmän tähden (Proxima Cen) etäisyys r=1.32 pc -> π''=0.76. Parallaksi on pieni ja absoluuttiset mittaukset täten vaikeita.
- Tehdään suhteellinen mittaus samassa suunnassa näkyvien ja paljon kauempana olevien tähtien suhteen, joiden parallaksi on häviävän pieni.
- Hyviä parallaksikohteita: Kirkkaat tähdet ($m<5^m$), sekä suuren ominaisliikkeen tähdet >0".2/vuosi.
- ESA:n Hipparcos (1989-1993) satelliitti mittaisi tarkasti 100,000 tähden etäisyydet ja epätarkemmin miljoonan tähden etäisyydet.
- GAIA (2013-) on mitannut parallaksin noin 1.7 miljardille tähdelle!

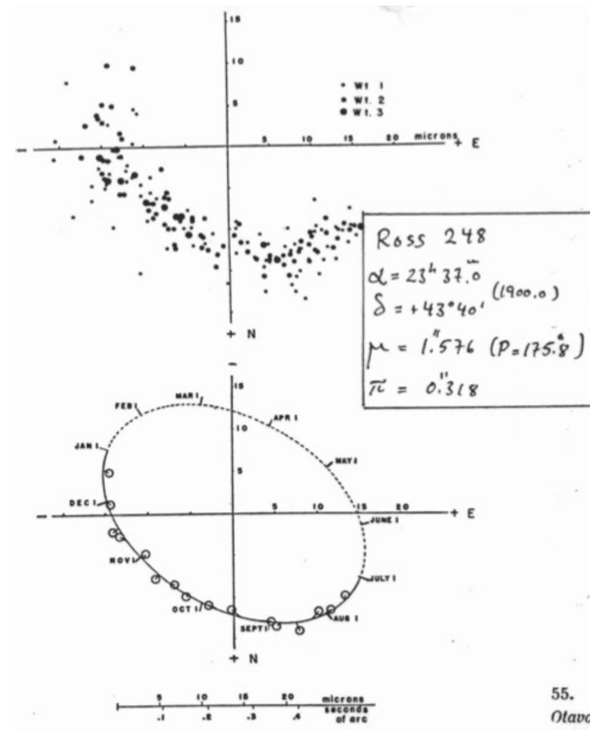
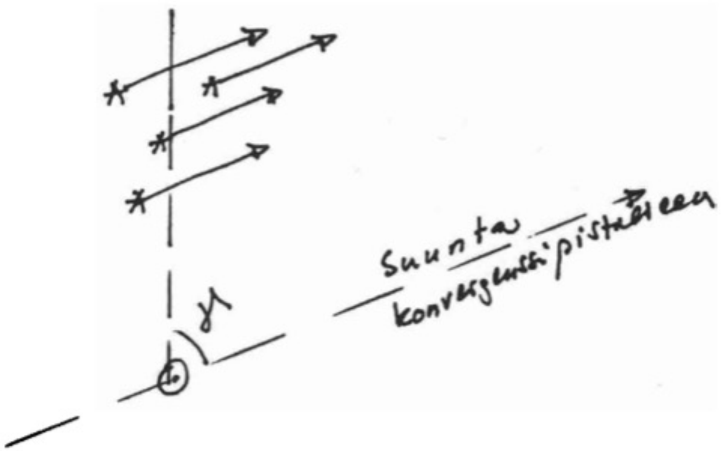
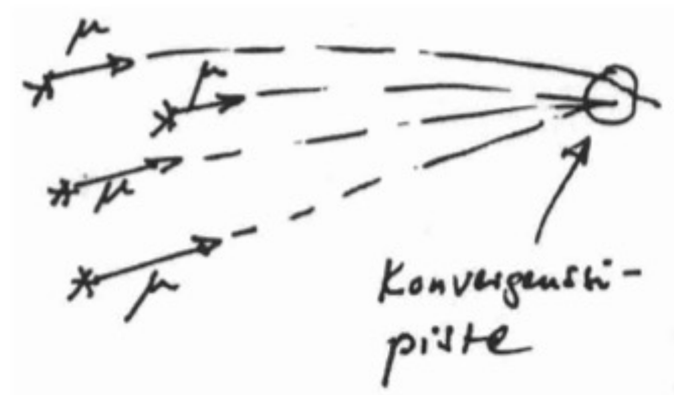


Figure. Upper curve: observed parallactic displacements of Ross 248, 1937–1946. Lower curve: normal places and apparent orbit.

Liikkuvien tähtiryhmien menetelmä I





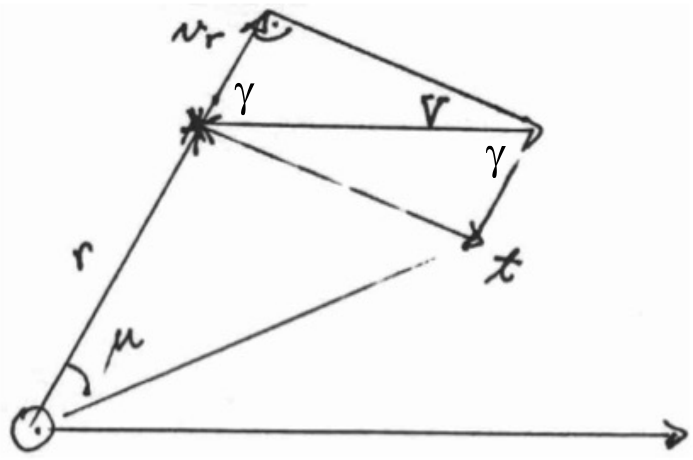
- Fysikaalisesti yhteenkuuluvien tähtien ryhmä liikkuu avaruudessa likimain yhdensuuntaisesti ja lähes samalla nopeudella. Esim. avoimet tähtijoukot, joiden tähdet ovat syntyneet yhdessä.
- Taivaanpallolla perspektiivin vaikutuksesta isoympyrän kaaret ominaisliikevektorien kautta leikkaavat konvergenssipisteessä.

Liikkuvien tähtiryhmien menetelmä II

- Etäisyyden määräämiseksi on tunnettava vähintään yhden tähden säteisnopeus (v_r). Lisäksi pitää olla tiedossa ominaisliike ja sen suunta mahdollisimman monelle tähdelle.
- Oletus, kaikilla tähdillä sama avaruusnopeus V:

$$t = Kr\mu'' = V \sin\gamma$$

$$\Rightarrow r = \frac{V \sin\gamma}{K\mu''}$$



$$V = v_r / \cos\gamma$$

γ, μ'' ja r erisuuret tähtiryhmän eri tähdille.

Liikkuvien tähtiryhmien menetelmä esim.

- Menetelmän kantana on tangentiaali-nopeus. Oleellista on se, että radiaalinopeus antaa tangentiaali-nopeuden absoluuttisissa yksiköissä. Käyttökelpoinen r≈100 pc etäisyydelle.
- Tärkein esimerkki on Hyadien tähtijoukko jonka keskuksen etäisyys on r=46.34±0.27 pc (Hipparcos, 1997).
- Hyadien parallaksi on tärkeä tähtien luminositeettien kalibroinnissa.
- Hyadien lisäksi käytetään Plejadien tähtijoukkoa (r=136±1.2 pc), jossa on paljon kirkkaita nuoria tähtiä, jotka puuttuvat vanhemmasta Hyadien joukosta.

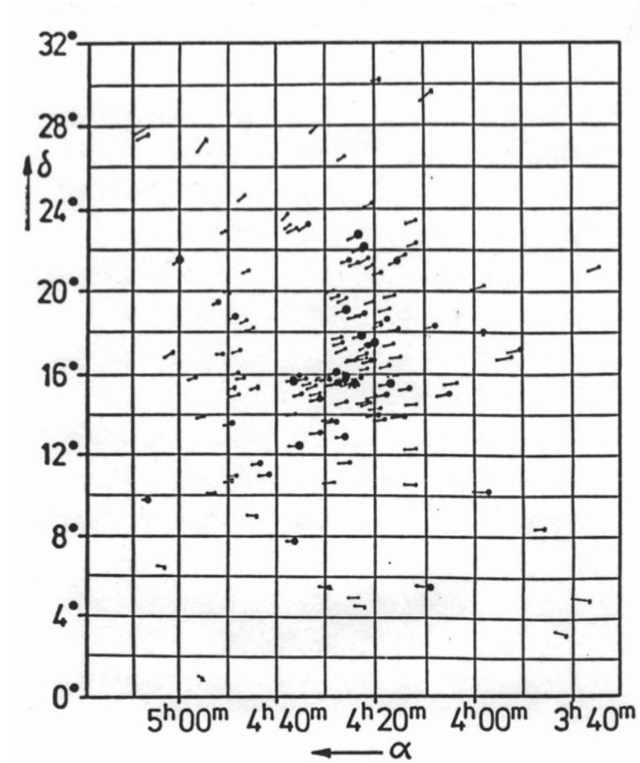
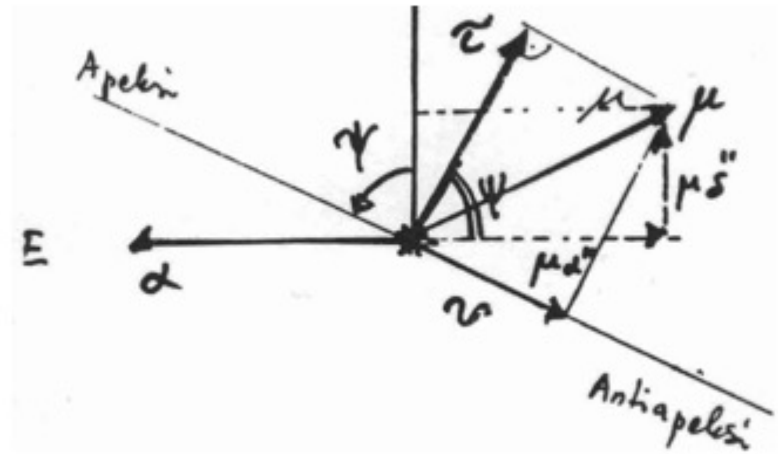


Fig. 2.16. The Taurus moving group with the Hyades. The individual motions of the stars are indicated by darts. [After Van Bueren (1952)]

Statistiset parallaksit I

- Näissä menetelmissä käytetään kantana joko Auringon liikettä tai tähtien liikettä Auringon suhteen.
- Etäisyyksiä yksittäisiin tähtiin ei saada määrätyksi, vaan ainoastaan keskimääräinen etäisyys valitulle tähtiryhmälle.
- Perusajatuksena on jakaa ominaisliike kahteen komponenttiin (katso yksityiskohdat vanhasta Mattilan luentomonisteesta sivut 20-22).



υ: yhdensuuntainen apeksi-antiapeksi suunnan kanssa

τ: kohtisuorassa apeksin kanssa

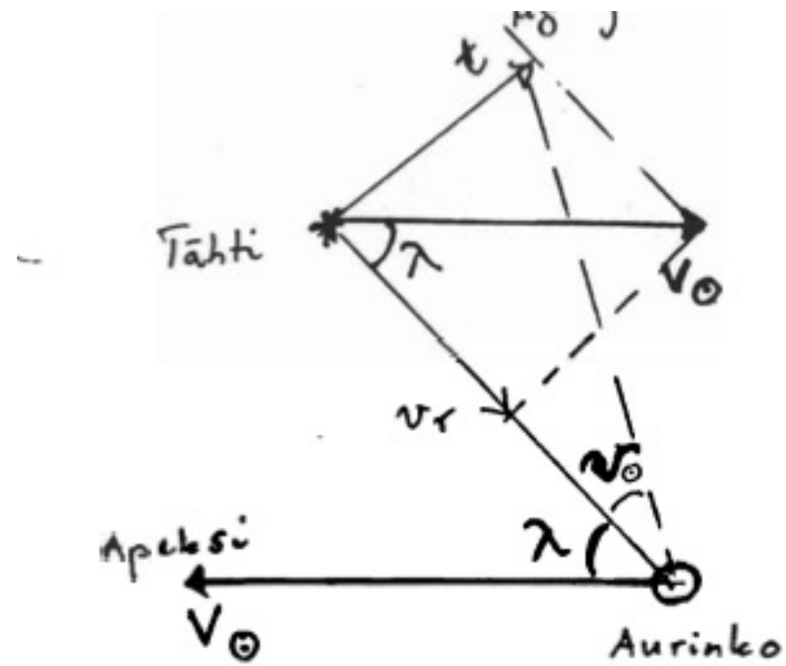
Ψ: Apeksin suunnan positiokulma (riippuu tähden α,δ–koordinaateista.

$$\begin{cases} \upsilon = \mu''_\alpha \sin\Psi + \mu''_\delta \cos\Psi \\ \tau = -\mu''_\alpha \cos\Psi + \mu''_\delta \sin\Psi \end{cases}$$

Statistiset parallaksit II

- Auringon liike nopeudella $V_\odot$=19.4 km/s kohden apeksia aiheuttaa tähden liikkeen antiapeksin suuntaan nopeudella $V_\odot$.
- Tähden tangentiaali- ja radiaalinopeudet:

$$\begin{cases} t = V_\odot \sin\lambda \\ v_r = -V_\odot \cos\lambda \end{cases}$$



- Toisaalta: $t=Kr\upsilon_\odot$, missä $\upsilon_\odot$ auringon liikkeen aiheuttama tähden ominaisliike.

$$\Rightarrow \upsilon_\odot = \frac{V_\odot \sin\lambda}{Kr} = \frac{V_\odot \sin\lambda}{K}\pi''$$

Statistiset parallaksit III

- Tähdille υ ja τ koostuvat Auringon liikkeestä johtuvasta tekijästä ($\upsilon_\odot$ ja $\tau_\odot$) ja tähtien omista liikkeistä johtuvasta tekijästä (pekuliaariliike, υ_* ja τ_*).

$$\begin{cases} \upsilon = \upsilon_\odot + \upsilon_\star \\ \tau = \tau_\odot + \tau_\star \end{cases}$$

- Pekuliaariliikkeet ovat satunnaisesti jakautuneita ja kun havaitaan riittävän monta tähteä N, ne ovat keskimäärin nolla:

$$< \upsilon_\star > = < \tau_\star > = 0 \qquad v_r = -V_\odot \cos\lambda + v_r^*, \quad |\langle t_\tau \rangle| = \langle |v_r^*| \rangle = \langle |v_r + V_\odot \cos\lambda| \rangle$$

- Saadaan statistiset etäisyydet valitulle tähtipopulaatiolle, lisäksi oletuksella, että nopeudet ovat isotrooppisesti jakautuneet:

$$< |\tau| > = \frac{\bar{\pi} < |t_\tau| >}{K} \qquad \bar{\pi} = \frac{K < |\tau| >}{< |v_r + V_\odot \cos\lambda| >}$$

2.4 Sekundääriset menetelmät etäisyyksien määräämiseen: Fotometrinen menetelmä

- Fotometriset menetelmät perustuvat kaikki havaittuun eroon näennäisen ja absoluuttisen magnitudin välillä. Tarvitaan standardikynttilöitä, joiden absoluuttinen kirkkaus on tiedossa.

$$m - M = 5\log\left(\frac{r}{10\ \mathrm{pc}}\right) + A(r)$$

- A(r) kuvaa ekstinktion vaikutusta. Näin mitattuja etäisyyksiä kutsutaan usein spektrofotometrisiksi etäisyyksiksi.
- Menetelmä on tehokas kuin jonkin standardikynttilän absoluuttinen magnitudi voidaan määrätä primääristä etäisyysmetodia käyttäen, näin menetelmä voidaan kalibroida.
- Tähden spektristä voidaan yleensä määrätä absoluuttinen magnitudi M, ja tästä laskea niin kutsuttu spektroskooppinen parallaksi.

Havainnot muuttuvista tähdistä

- Kefeidi-tähdet ovat sykkiviä punaisia jättiläisiä, joiden periodi on verrannollinen niiden luminositeettiin:

$$\langle M_V \rangle = -2.78 \log(P/10\mathrm{d}) - 4.13$$

- Mittaamalla Kefeidin periodi saadaan absoluuttinen magnitudi ja etäisyys voidaan täten laskea. Menetelmässä on ainakin 0.3 magnitudin hajonta, joka johtuu Kefeidi-tähtien hieman eri kehitysvaiheista ja erilaisista metallipitoisuuksista.
- RR Lyrae tähdet ovat pienimassaisempia ($\approx$0.5 $M_\odot$) sykkiviä tähtiä, joita löytyy erityisesti pallomaisista tähtijoukoista. Näitäkin tähtiä voidaan käyttää standardikynttilöinä.

Pääsarjasovitus tähtijoukoille

- Suurin osa tähdistä sijaitsevat pääsarjalla ja niiden absoluuttiset magnitudit ovat hyvin määritelty värin, (B-V) funktiona
- Vertailemalla eri tähtijoukkojen havaittujen pääsarjojen erotuksia (m-M)-suunnassa voidaan määrätä tähtijoukkojen keskinäiset suhteelliset etäisyydet. Hyadien etäisyys on perusyksikkönä, josta muut suhteelliset etäisyydet saadaan.

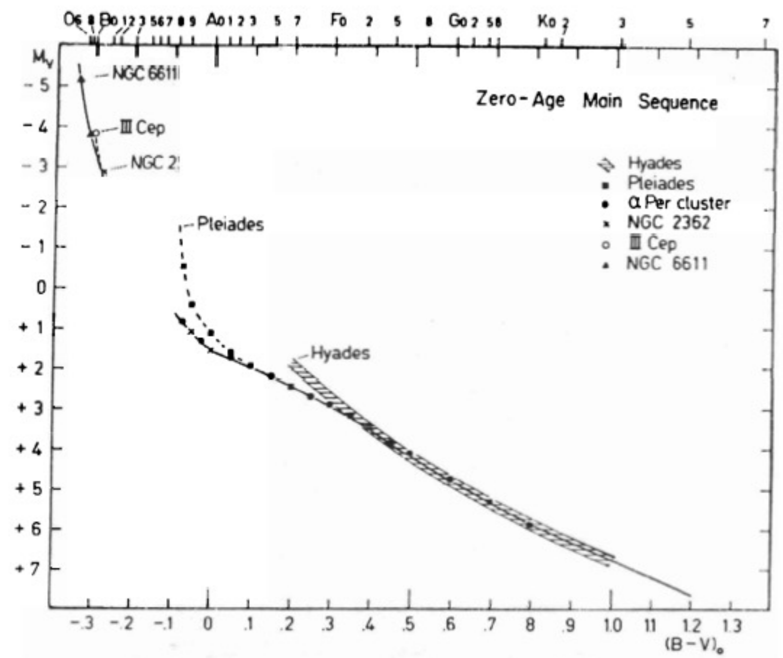


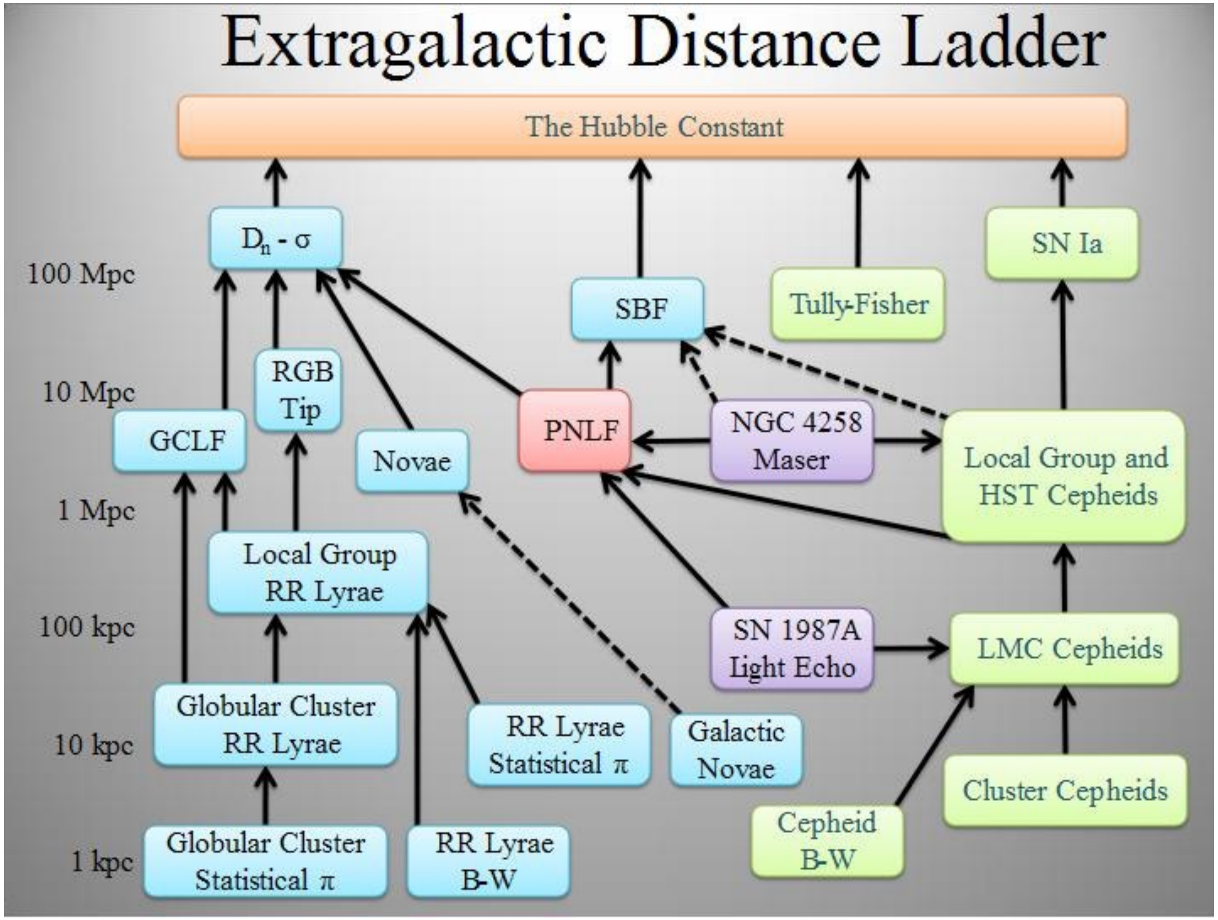
FIG. 9.—The zero-age main sequence ("ZAMS") for visual absolute magnitudes, as defined by the non-evolved parts of the main sequences of the clusters indicated in the diagram.

Muita menetelmiä lyhyesti

1. Joissakin kaksoistähdissä voimme havaita tähtien kulmaetäisyyden taivaalla ajan funktiona. Mikäli voimme samalla päätellä radan fysikaalisen koon esim. radiaalinopeusmittausten ja Keplerin lain avulla, voimme määrätä kohteen etäisyyden -> dynaaminen parallaksi.
2. Karkea tapa mitata etäisyyttä on laskea arvio tähtijoukon kulmakoolle taivaalla ja käyttää oletusta, että kaikki tähtijoukot ovat fysikaalisesti yhtä isoja -> etäisyydelle arvio.
3. Havaitsemalla tähtienvälisen aineen aiheuttamien viivojen ekvivalenttileveyttä tähdissä voidaan arvioida tähden etäisyys. Mitä enemmän absorptiota sitä kauempana kohde on. Isoja eroja eri suuntien välillä Linnunradassa, menetelmä melko epätarkka.

Galaksien etäisyyksien mittaaminen

- Yleisesti ottaen galaksien etäisyys-mittaukset ovat hyvin hankalia.
- Käytetään kosmista tikapuu-menetelmää, pyritään määrittämään pienet etäisyydet mahdollisimman hyvin, joita sitten käytetään kaukaisimpiin kohteisiin.
- Virheet kertaantuvat!! Joidenkin galaksien etäisyydet voivat olla hyvinkin 50% pielessä.



ESA:n GAIA satelliitti (Lisää luennolla 7)

- GAIA satelliitti laukaistiin 17.12.2013 ja sillä on 5 vuoden ohjeellinen toiminta-aika, L2 pisteessä.
- GAIA on mullistava havainto-laite ja sen tarkoitus on mitata noin 1.7 miljardin tähden (≈1% kaikista Linnunradan tähdistä) tarkat paikat, etäisyydet, ominaisliikkeet sekä radiaalinopeudet (pienemälle määrälle tähtiä).
- Ensimmäinen tarkka 3D kartta Linnunradasta, myös lähigalaksit (Magellanin pilvet) mukana.

Parallaksitarkkuus: 20 mikrokaarisekuntia Kirkkaille tähdille (m_V<15) ja noin ~200 mikro-Kaarisekuntia himmeille tähdille (m_V=20).

Mitä opimme?

1. Etäisyyden mittaus tähtitieteessä perustuvat suuntien mittauksiin yleensä eri ajankohtina. Fundamentaalikoordinaatisto on edellytys tarkoille mittauksille.
2. Tähtien radiaalinopeudet voidaan mitata verrattain helposti Doppler-siirtymistä. Tangentiaalinopeudet mitataan ominaisliikkeistä ja se vaatii tarkkoja pitkiä aikasarjoja sekä tähden etäisyyden.
3. Parallaksimetodi on paras ja tarkin tapa mitata tähtien etäisyyksiä. Muita hyödyllisiä primäärisiä metodeja ovat liikkuvien tähtiryhmien menetelmä sekä statistiset parallaksit.
4. Sekundääriset etäisyydenmittausmenetelmät perustuvat standardikynttilöiden käyttöön, näennäisen ja absoluuttisen kirkkauden erotuksesta saadaan etäisyys.
5. GAIA satelliitti on mullistamassa tähtien paikkojen ja etäisyyksien mittauksen luomalla tarkan kartan Linnunradasta, jossa on yli miljardia tähteä (lisää tästä luennolla 7).