



HAVAITSEVAN TÄHTITIETEEN PK I

FOTOMETRIA

Syksy 2024

Thomas Hackman



8. FOTOMETRIA

Sisältö:

- Johdanto
- Peruskäsitteitä
- Magnitudijärjestelmät
- Fotometrit
- Fotometria CCD kameralla
- Instrumentaalimagnitudit
- Havaintojen redusointi standardijärjestelmään
- Kalibrointi käytännössä
- Absoluuttinen kalibrointi
- Punertuminen



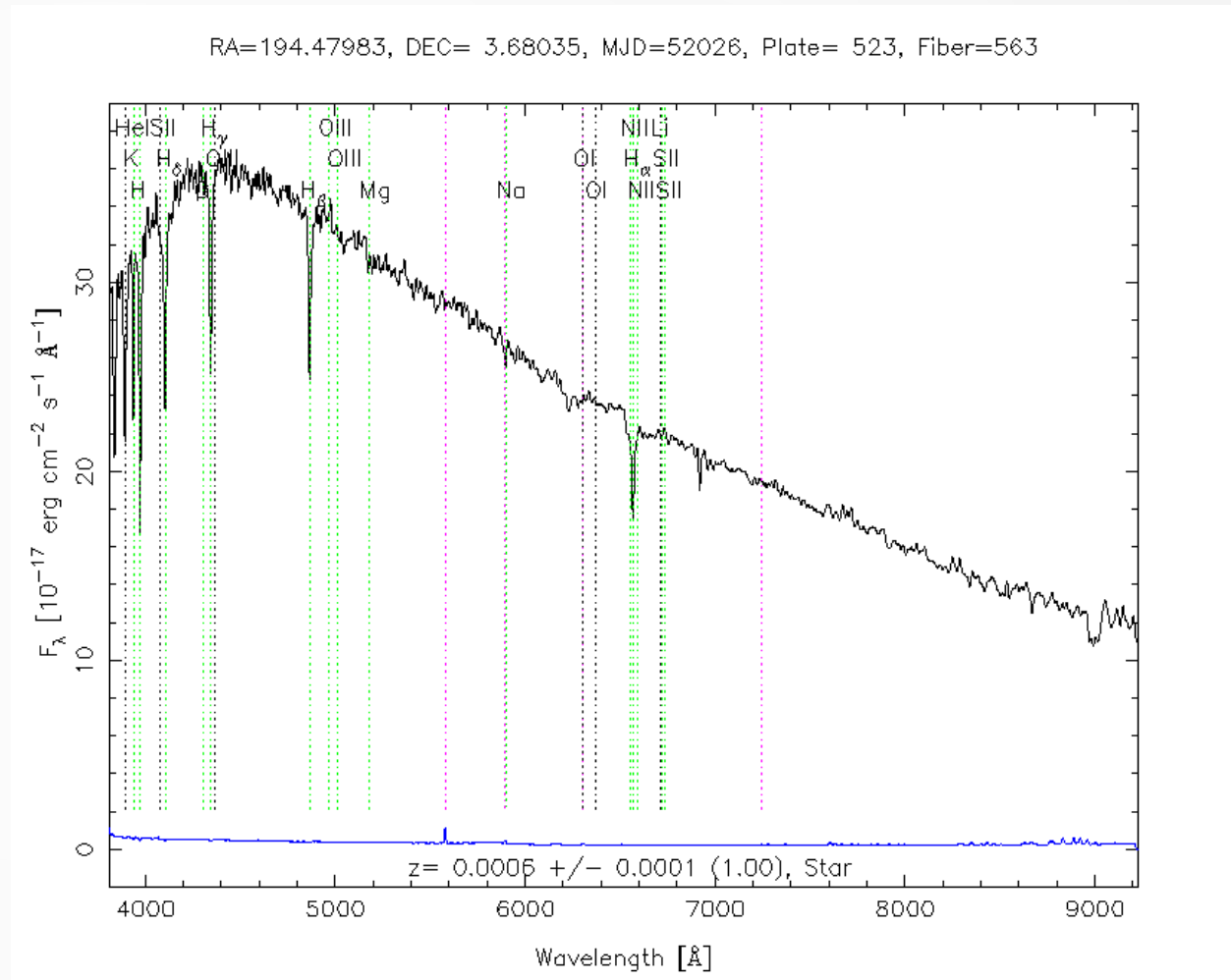
8.0 FOTOMETRIA: JOHDANTO

- Mitataan vuontiheys F tietyllä aallonpituuskaistalla $\Delta\lambda$
- $\Delta\lambda$ pienenee $\Rightarrow$ fotometria $\rightarrow$ spektrometria
- Käytetään kaikkien taivaankappaleiden tutkimiseen
- Usein halutaan kohteen valokäyrä, eli kirkkauden muuttuminen ajan funktiona $F(t)$



KERTAUSTEHTÄVÄ

- Miten syntyvät tähden spektrin osat?
 - Absorptioviivat
 - Emissioviivat
 - Kontinuumi

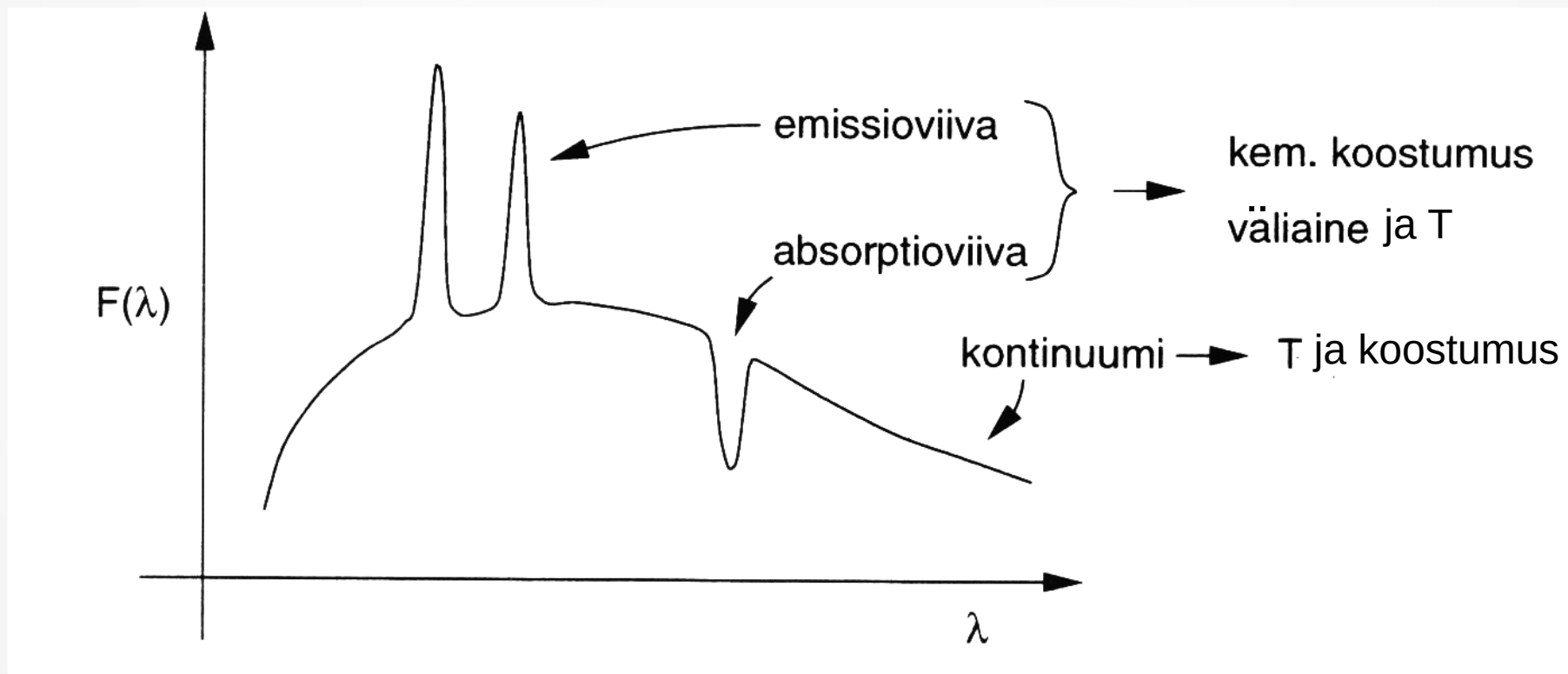


Tähden spektri (SDSS)



8.0 JOHDANTO

- Kohteen spektri





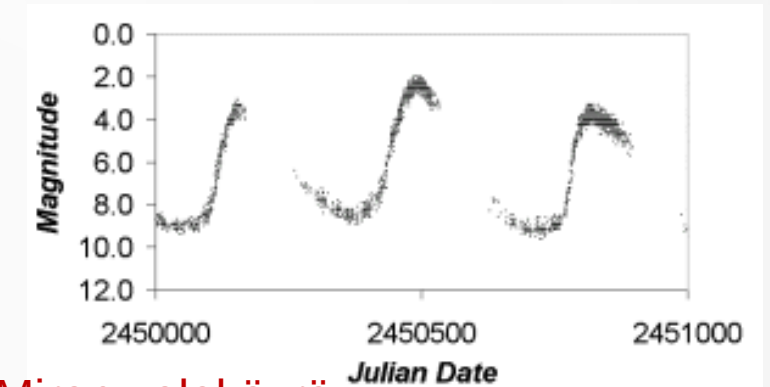
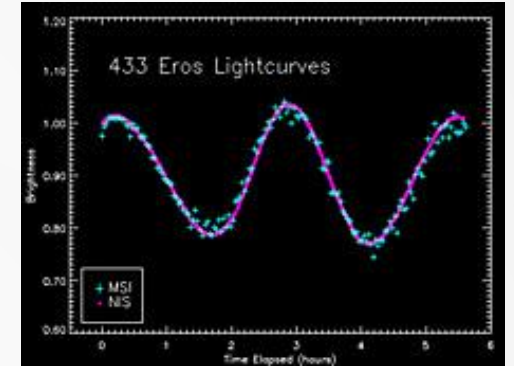
8.0 MIKSI FOTOMETRIAA

- Fotometriassa sisältää vähemmän informaatiota kuin spektro- tai polarimetria.
- Sen etuja ovat kuitenkin:
 - Korkeampi S/N lyhyemmällä valotuksella
 - Voidaan tutkia hyvin himmeitä kohteita
 - Voidaan hyödyntää pieniä teleskooppeja
 - Saadaan kohteen ominaisuuksia kuvattu yksinkertaisella tavalla
 - Havaintojen standardointi suoraviivaista



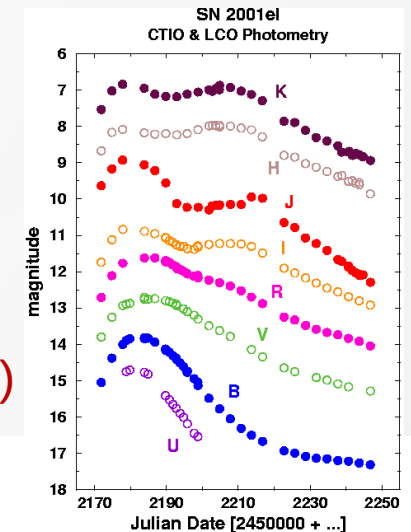
8.0 FOTOMETRIAN KÄYTTÖ

- Asteroidit
 - Valokäyrästä muoto ja pintaominaisuudet
- Planeettajärjestelmät
 - Eksoplaneettojen ylikulut
- Tähdet:
 - Tähtien etäisyydet
 - Spektriluokitus (HR-diagramma)
 - Muuttuvat tähdet
- Galaksit:
 - Galaksien etäisyydet
 - Aktiiviset galaksiytimet
- Kosmologia:
 - Gravitaatiolinssit
 - Supernovat SN Ia => maailmankaikkeuden rakenne



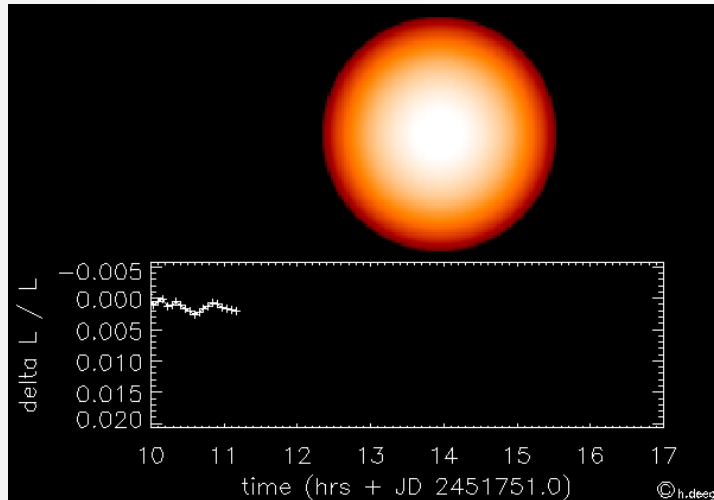
Miran valokäyrä

Supernova SN 2001el
(Krisciunas et al. 2003)

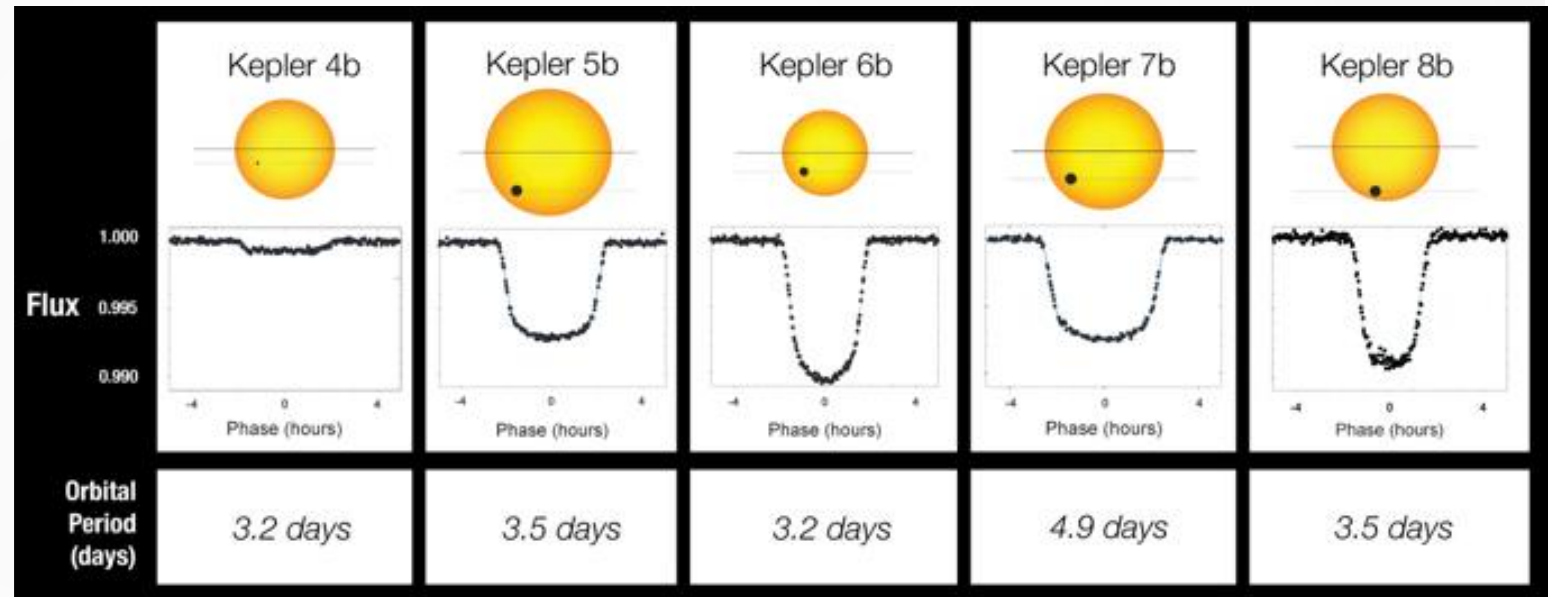




8.0 ESIMERKKI: PLANEETAN YLIKULKU



HD 209458: Havaattu valokäyrä & pimennyksen animaatio (IAA, Deeg & Garrido)



Viisi Kepler-avaruusteleskoopin havaitsemaa eri eksoplaneettojen ylikulkua (NASA)



8.1. FOTOMETRIAN PERUSKÄSITTEITÄ

- *Vuontiheys* = kohteesta tuleva säteilyn teho pinta-alayksikköä kohden: F , $[F]=W/m^2$
- *Vuo*: L , $[L]=W$
- Havaintolaite mittaa yleensä saapuvien fotonien määrän tietyllä aallonpituusalueella
- *Intensiteetti* = kohteen pintakirkkaus: I
- Havainnot: *Instrumentaalimagnitudit*
- Reduktion tuloksena: *Standardimagnitudit*
- *Absoluuttinen fotometria*
- *Differentiaalifotometria*: Kohteen kirkkaus suhteessa toiseen kohteeseen



8.1.1 MAGNITUDIT

$$m_1 - m_2 = 2.5 \lg \left(\frac{F_2}{F_1} \right),$$

- jossa kohteiden vuontiheydet ja magnitudit ovat $F_1, F_2; m_1, m_2$
- Magnitudi mitataan aallonpituuskaistalla, jonka rajoittaa suodin ja ilmaisimen herkkyys
- Magnitudijärjestelmät kiinnitetty standarditähtiin, joiden vuontiheys F_0 vastaa $m_0=0$:

$$m = -2.5 \lg \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

- Nyrkkisääntö: Kahden kohteen magnitudiero on $\Delta m=1 \mapsto$ vuontiheyksien suhde on n. 2.5



8.1.1 MAGNITUDIT

- Absoluuttinen magnitudi M :
 - M = kohteen näennäinen magnitudi etäisyydellä 10 pc

$$m = M + 5 \lg \frac{r}{10 \text{ pc}} + A(r),$$

- jossa $A(r)$ on ekstinktio
- $m-M$ on etäisyysmoduli



8.1.2 SPEKTRISELEKTIIVISYYS

- Merkitään $\begin{cases} f^*(\lambda) = \text{todellinen vuontiheys} \\ F = \text{havaittu vuontiheys (kaikki aallonpit.)} \end{cases}$
- $\Rightarrow F = \int_0^\infty \underbrace{\phi_A(\lambda) \phi_T(\lambda) \phi_F(\lambda) \phi_D(\lambda)}_{= S(\lambda) = \text{spektriselektiivisyys}} f^*(\lambda) d\lambda,$
- Missä
 - $\phi_A(\lambda)$ = ilmakehän transmissio
 - $\phi_T(\lambda)$ = teleskoopin transmissio
 - $\phi_F(\lambda)$ = suotimen transmissio
 - $\phi_D(\lambda)$ = detektorin hyötysuhde



8.1.3 STANDARDIJÄRJESTELMÄ

- Standardijärjestelmän spektriselektiivisyys määritelty
- Havainnot saadaan instrumentaalijärjestelmässä
- Siirto standardijärjestelmään: Spektriselektiivisyyden muunnos vastaamaan standardijärjestelmää
- Muunnoskaavat standarditähtien avulla



8.2 YLEISIMMÄT MAGNITUDIJÄRJESTELMÄT

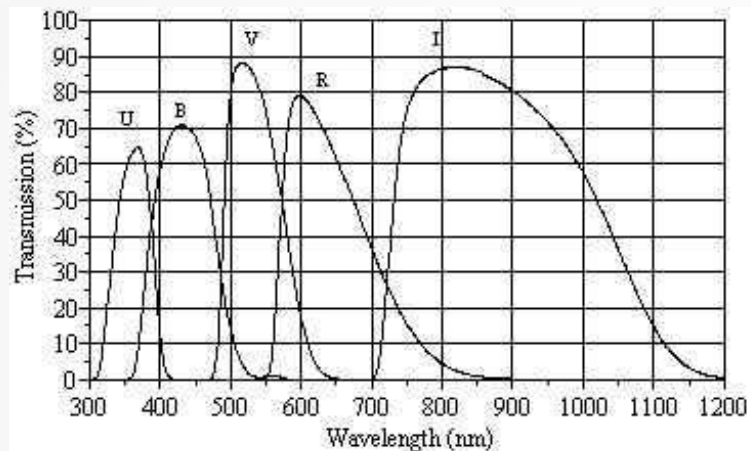
- *Besselin UBVRI / Cousinsin $R_C I_C$*
- *Strömgrenin uvby*
- *Thuan-Gunn uvgr*
- SDSS $u'g'r'i'z'$
- Suodinten valintaan vaikuttavat:
 - Tieteelliset tavoitteet
 - Historia (esim. vertailukelpoisuus)
 - Saatavuus
- Suotimet valmistetaan yleensä joko lasiyhdistelmillä tai interferenssikalvoilla



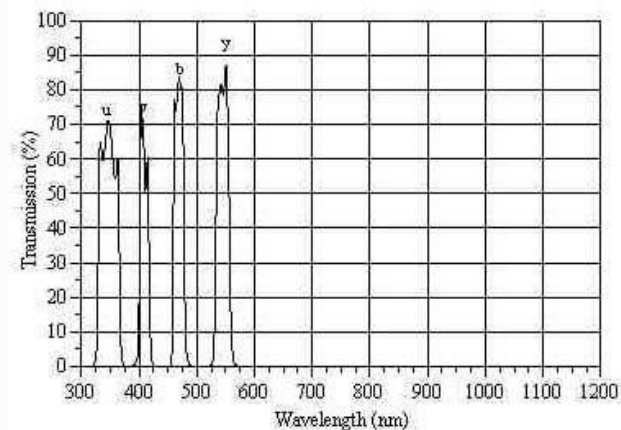


8.2 YLEISIMMÄT SUODINJÄRJESTELMÄT

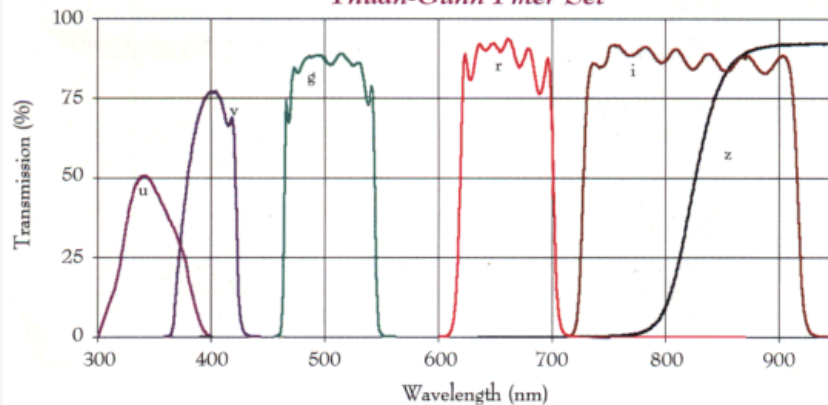
UBVRI



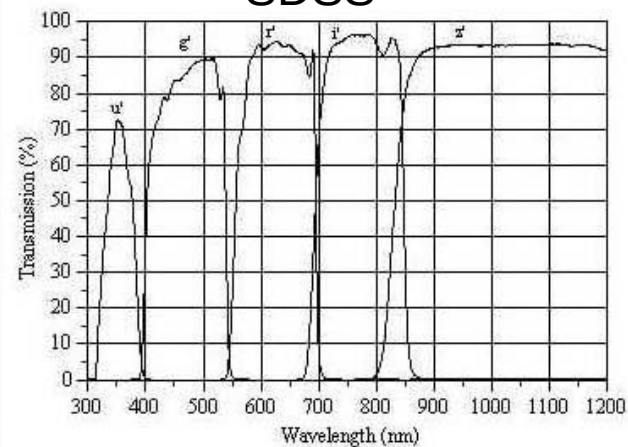
Strömgren ubvy



Thuan-Gunn Filter Set



SDSS



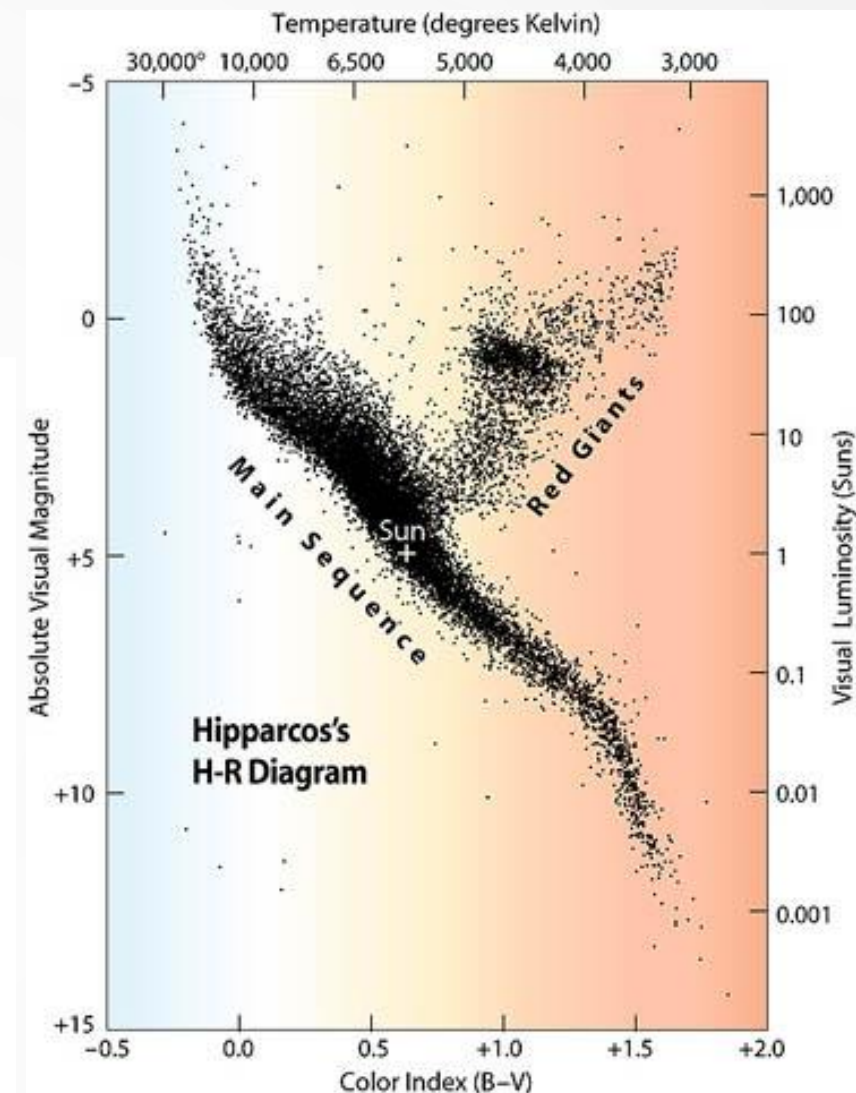
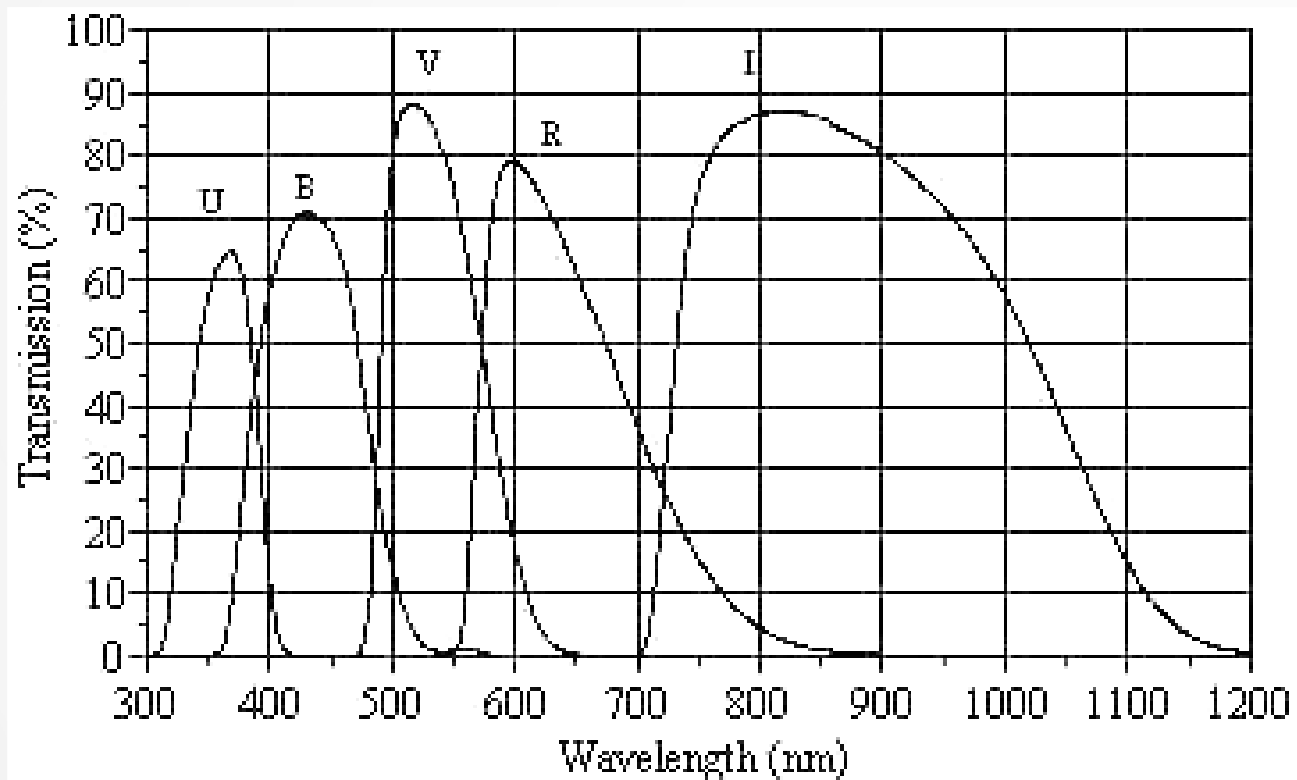


8.2.1 UBVR

- Alunperin *UBV* (Johnson & Morgan 1953)
- Yleisin käytössä oleva fotometrinen järjestelmä
- Noin 300-900nm alueella laajakaistafilttereitä
- Alunperin valomonistinputkien ominaisuuksien ja ilmakehän absorption rajoittama
- Nykyisin kaistat määritellään standardoitujen optisten väri lasien mukaan
- Nollakohdat: $U-B=B-V=V-R=R-I=0$ spektriluokan A0 -tähdelle (~Vegalle)
- Magnitudierotuksia, esim. $U-B$, kutsutaan *väri-indekseiksi* eli väreiksi



8.2.1 UBVRI



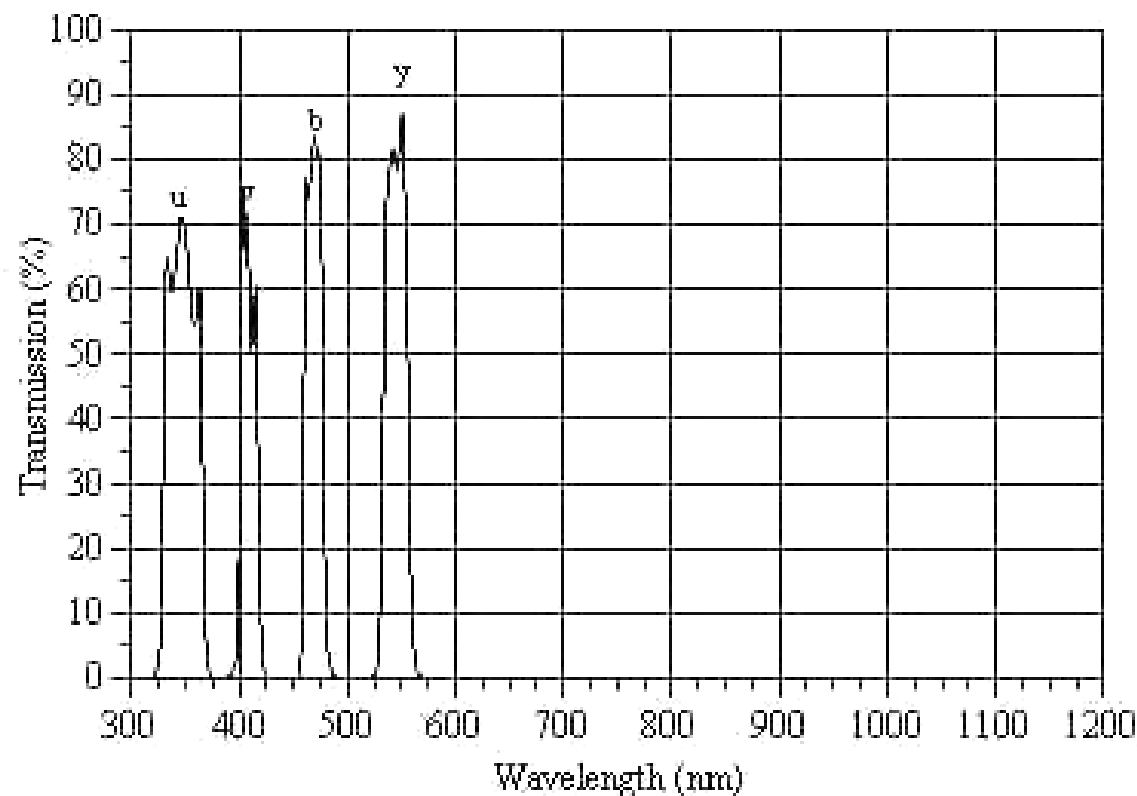
Tähten väri, esim.
 $B-V \mapsto$ spektriluokka



8.2.2 STRÖMGREN *uvby*

- Kehitetty tähtien ominaisuuksien määrittämiseen
- Kaistat kapeita (usein mukana myös leveä ja kapea H_{β} -suodin)
- Voidaan mitata kolme väri-indeksiä:
 - $b-y$, joka kuvaa spektriluokkaa joka riippuu tähden lämpötilasta
 - $C_1 = u + b - 2v$, on verrannollinen Balmerin epäjatkuvuuden voimakkuuteen
 - $m_1 = v + y - 2b$, “metallicity index” on verrannollinen tähden metallipitoisuuteen
- Koska kaistat ovat kapeita, pitää kohteiden olla vastaavasti kirkkaampia

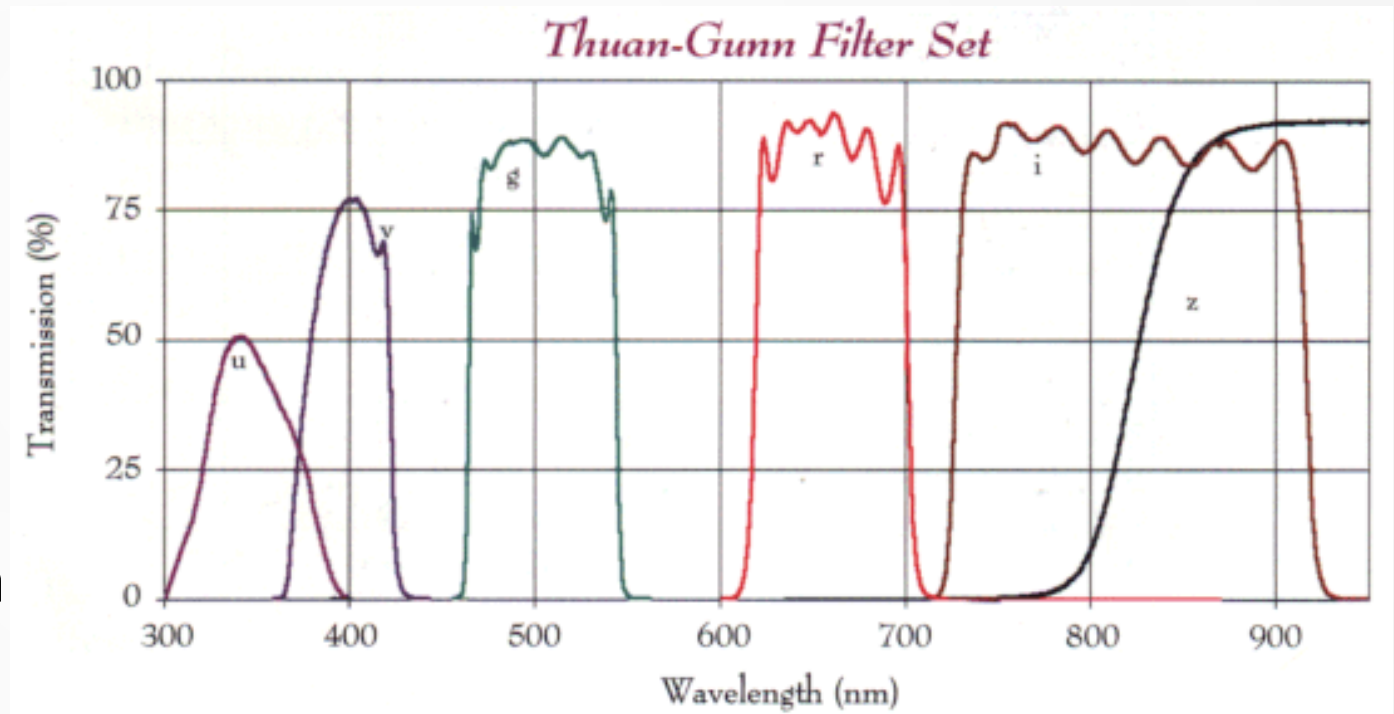
Virhe oppi-
kirjassa





8.2.3 THUAN-GUNN uvgr

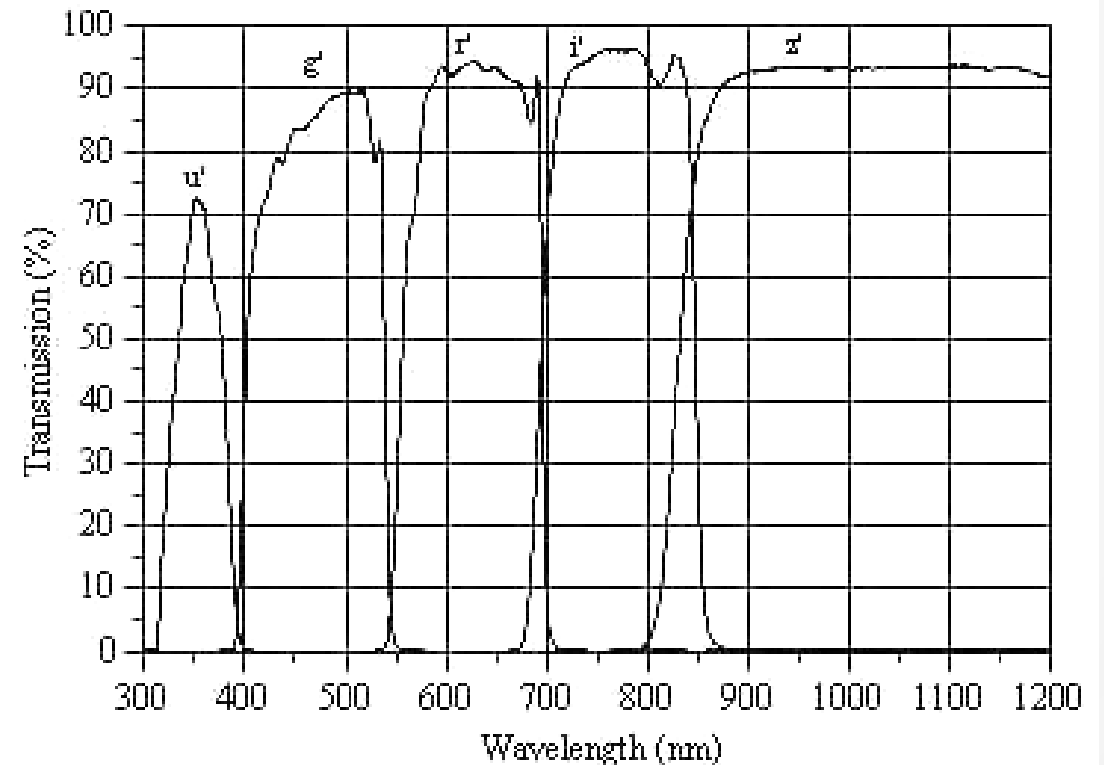
- “Kehittynyt UBVRI”
- Voimakkaat taustataivaan viivat jäävät kaistojen väliin, jolloin tausta on himmeämpi
- Kaistojen *g* ja *r* profiilit vastaavat tiettyjen valokuvauslevyjen herkkyysskäyriä ⇔ vanhojen kuvien fotometrisen kalibroinnin





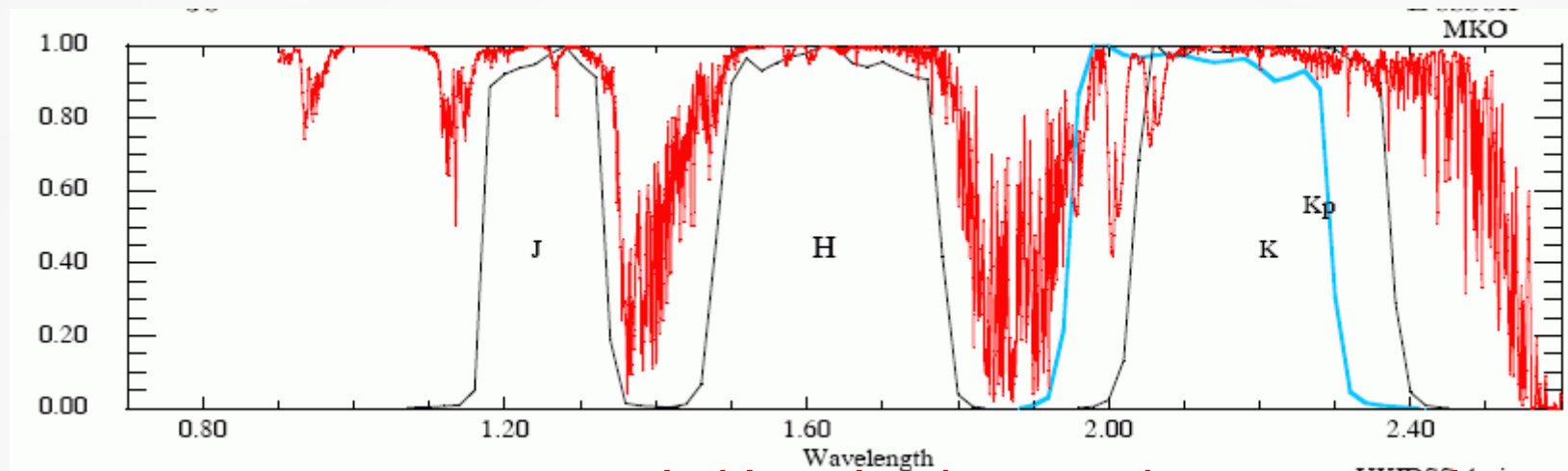
8.2.4 SDSS u' g' r' i' z'

- Sloan Digital Sky Survey luettelo
- Leveäkaistaisempia kuin UBVRI suotimet => himmeämmät kohteet
- Nollakohdat kiinnitetty AB-järjestelmään, jossa $u' = g' = r' = i' = z' = 0$ vastaa tasaista spektriä, jonka vuontiheys on vakio $F_{v,0} = 3631 \text{ Jy}$ (Fukugita et al. 1996)



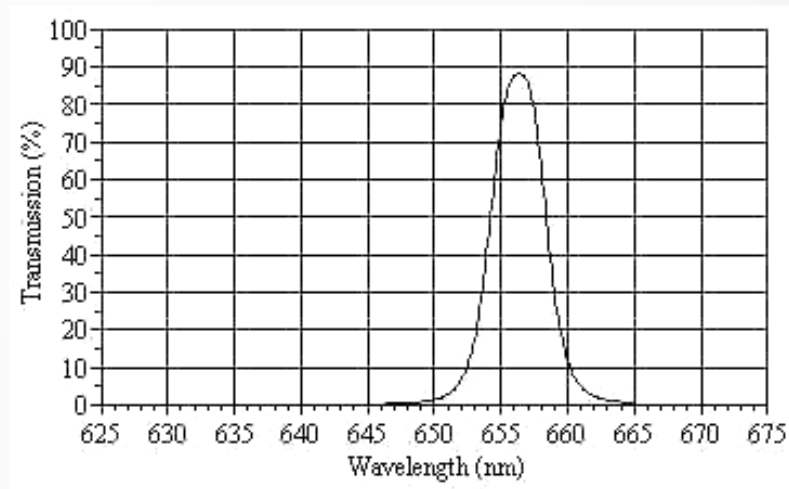


8.2.5 MUUT SUODATINJÄRJESTELMÄT



Kuva: astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast536/ast536week01.html

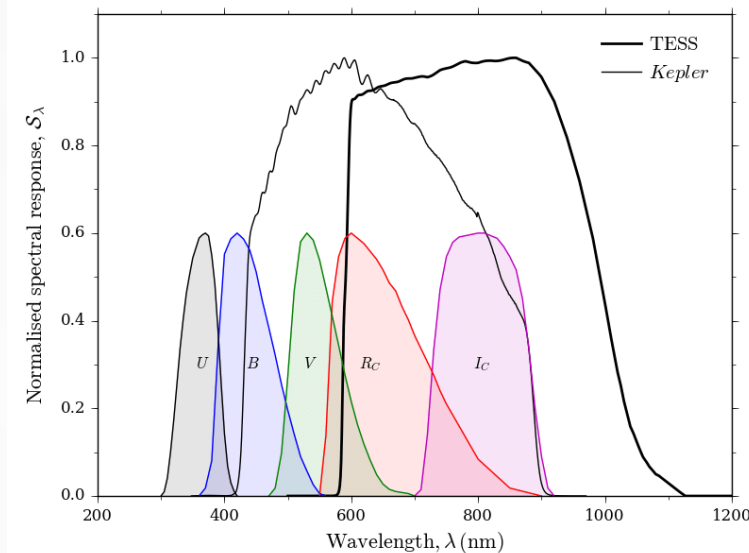
- Lähi-infrapuna: J, H, K
- Kapeakaistasuotimia
- Kontinuumisuotimia
- “Order sorters” (= kertalukujen erottajat)



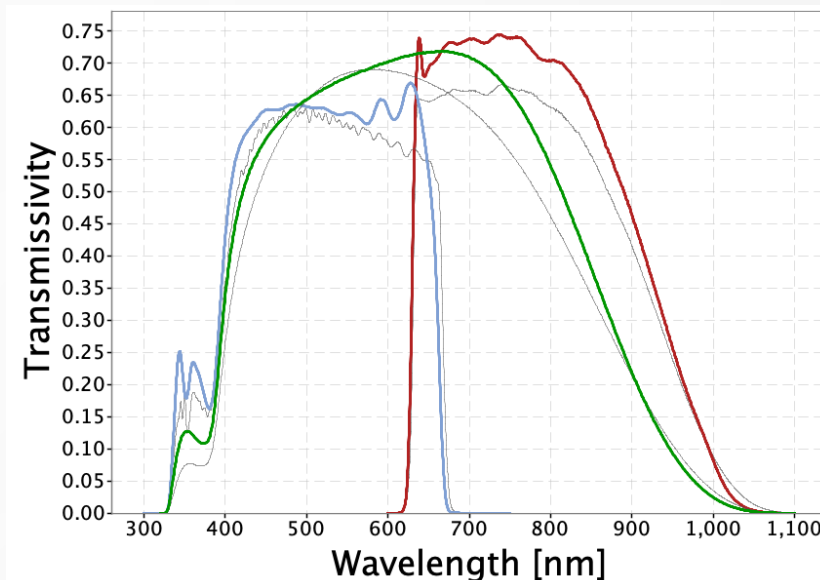


8.2.6 AVARUUSTELE- SKOOPPIEN SUODINJÄRJESTELMÄT

- Avaruusteleskoopeilla on (yleensä) omat suotimet, koska:
 - Avaruudessa havaintoihin tulee ylimääräisiä häiriöitä, esim. hiukkassäteilyä ja auringon valon heijastumisia
 - Havaintolaitteet optimoidaan tiettyä tarkoitusta varten
- Esim. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), Kepler, Gaia



TESS ja Kepler (Lund et al. 2016)



Gaia DR3: G, G_{BP} ja G_{RP} (ESA)



8.3 FOTOMETRI

- Kohteiden kirkkaus on mitattu
 - Silmällä (historiaa)
 - Valokuvauslevyllä (historiaa)
 - Fotometrilla (melkein historiaa)
 - Käytetään vielä esim. APT:issa (= automated photoelectric telescope)
 - CCD kameralla (nykypäivää)

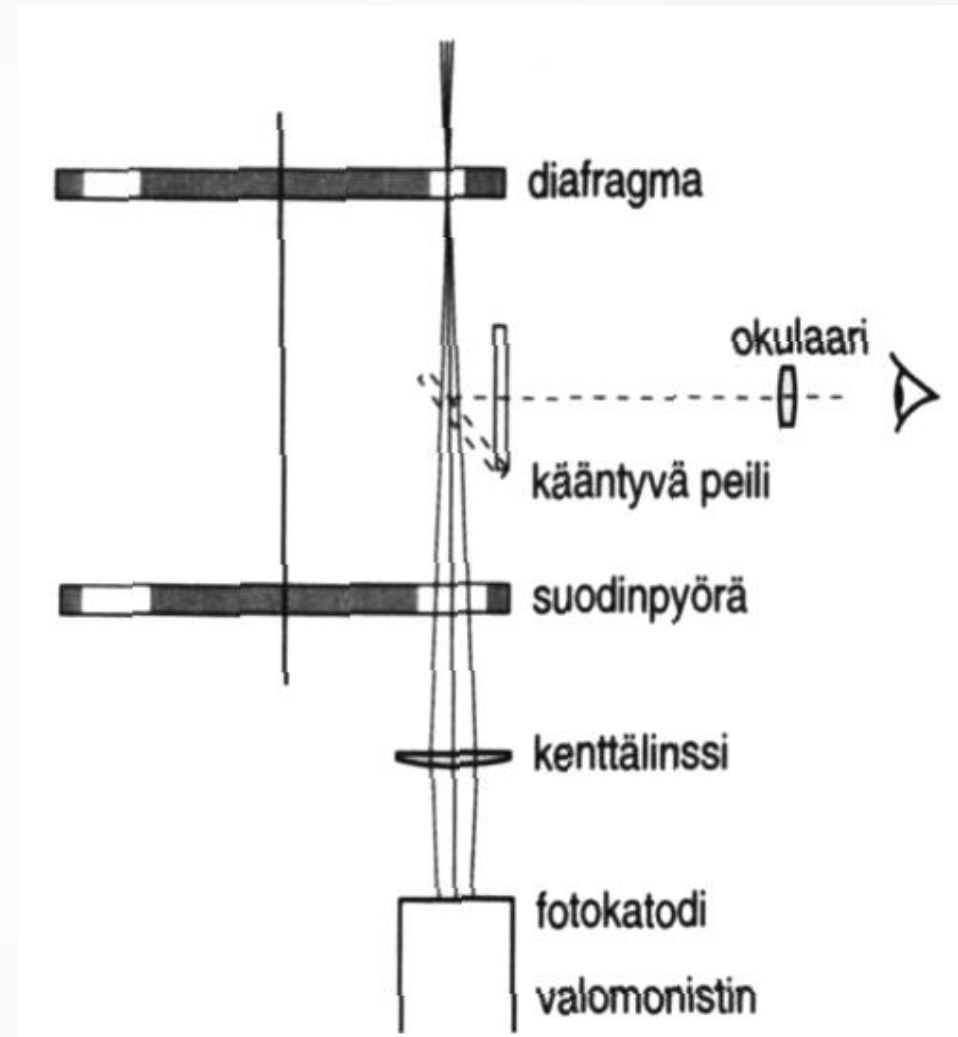


Tennesseen yliopiston APT-järjestelmä Arizonassa (Automated Astronomy Group).



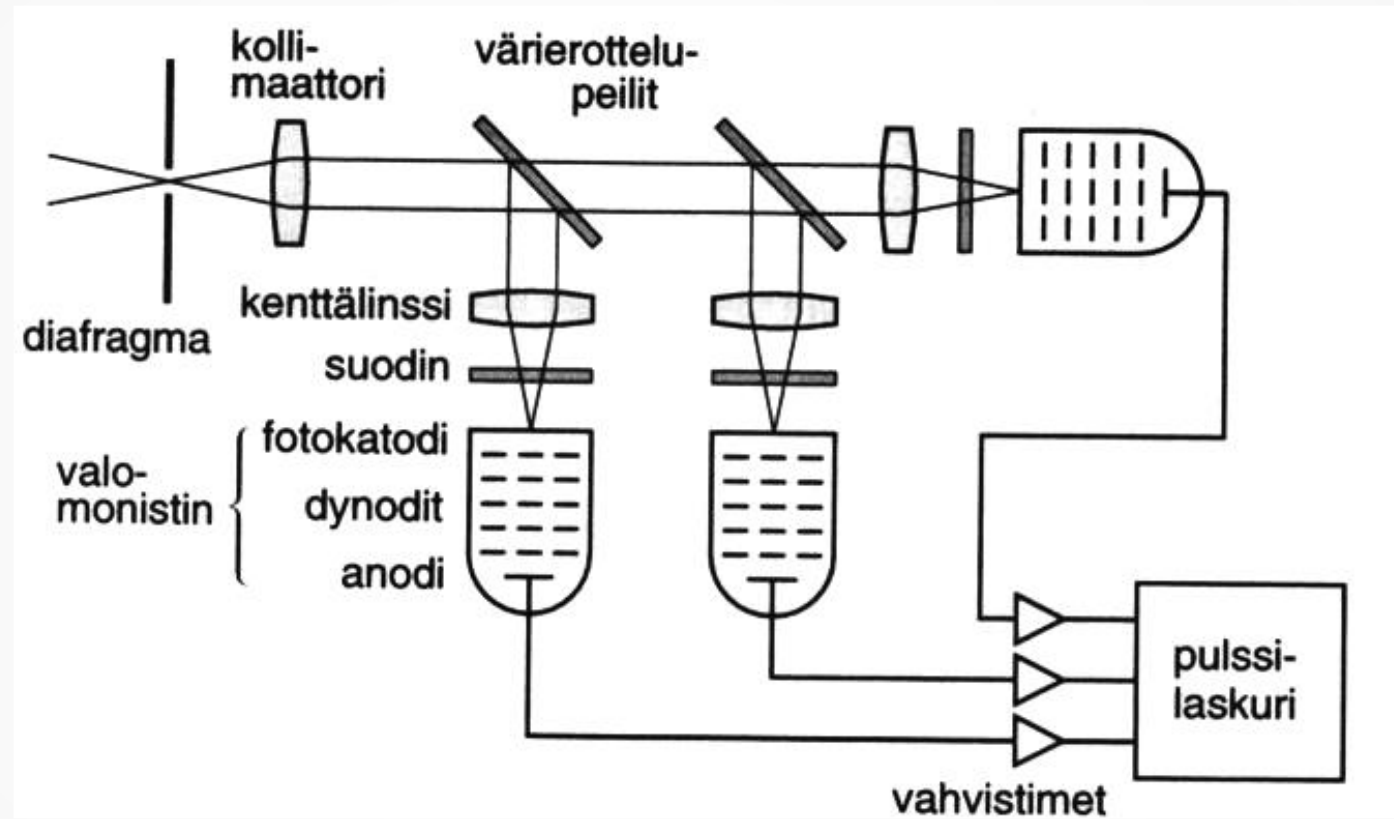
8.3 FOTOMETRI

- Fotometrin osia:
 - Diafragma
 - Suodin
 - Kenttälinssi
 - Valomonistinputki
 - Elektroniikka:
 - A/D muunnin
 - integrointi
 - tallennus





8.3 FOTOMETRI

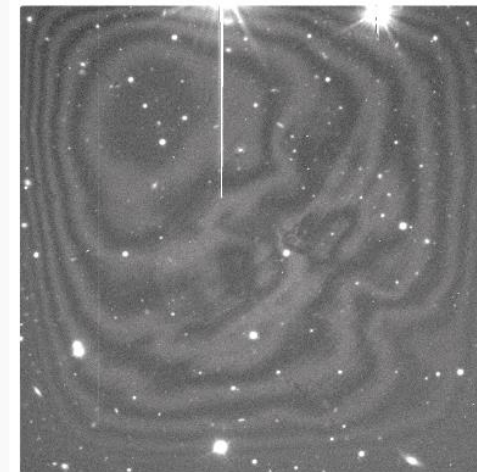


Monivärifotometrin toimintaperiaate



8.4 FOTOMETRIA CCD KAMERALLA

- Yleisin CCDn käyttötapa
- Yleensä CCDn edessä käytetään suodinta, jolloin kuvasta tulee “siistimpi”:
 - Valosaaste pienempi
 - Interferenssikuviot voidaan suodattaa
 - Ilmakehän dispersion vaikutus vähenee => fokus parempi
 - Yleensä seeing sitä parempi, mitä pidemmällä aallonpituuksilla havaitaan

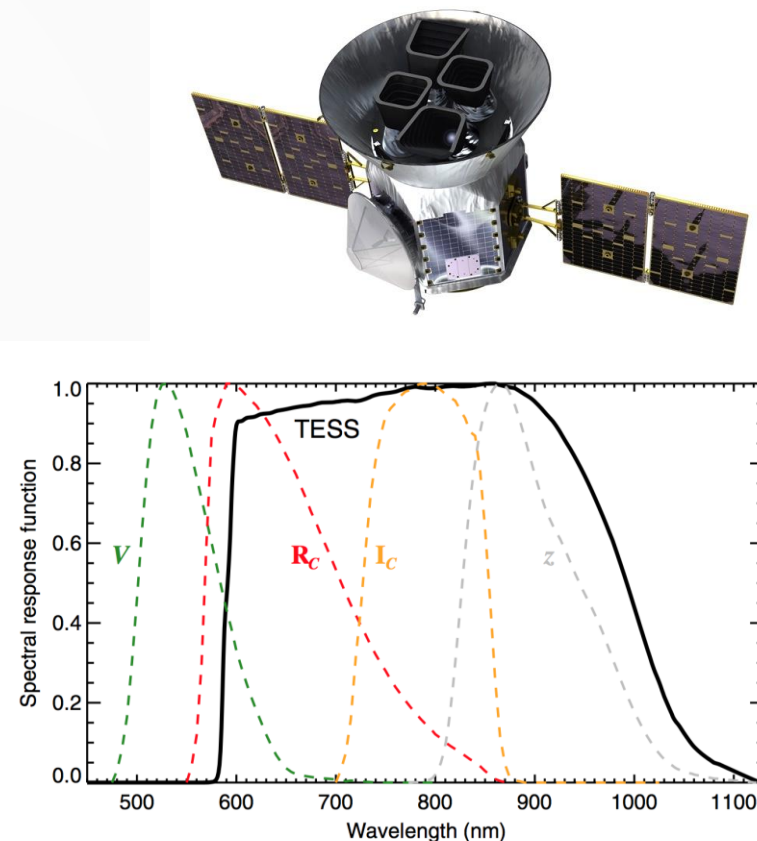


CCD-kuvan
interferenssi
(Snodgrass &
Carry 2013)



8.4 AVARUUSTELESKOOPPIEN FOTOMETRIA

- Usein hyvin laaja näkökenttä
- Esim. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS):
 - Neljä CCD-kameraa
 - Jokaisen kameran kuvakulma $24^\circ \times 24^\circ$
 - Havaitsee lähes koko taivaan toistuvasti 2018 →
 - Esim. n. 200 000 kohdetta havaittu 27 päivän periodeissa 2 min kadenssilla
- Oma (optimoitu) suodinjärjestelmä



Kuvat: NASA



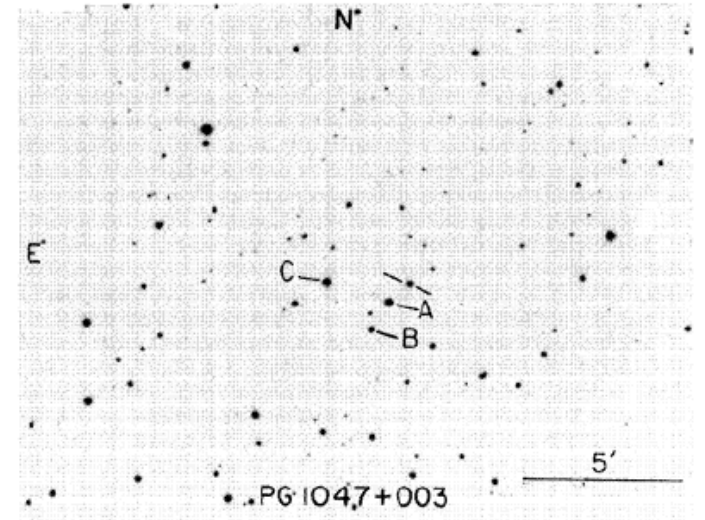
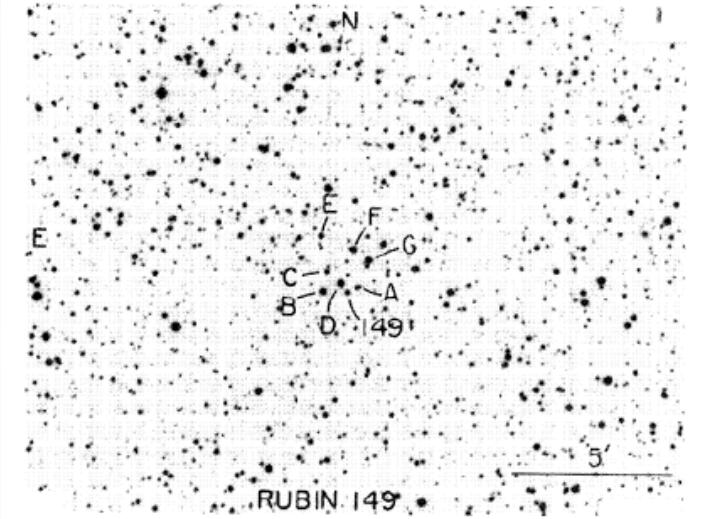
8.5 ABSOLUUTTINEN FOTOMETRIA

- Absoluuttisessa fotometriassa kohde havaitaan *fotometrisenä* yönä
- Kun havaitaan myös *standarditähtiä*, voidaan kohteelle laskea standardimagnitudi
- Jos kyseessä on muuttuva kohde, on kalibrointi tehtävä joka yö



8.6 STANDARDITÄHDET

- Optisella alueella käytetyn standardiluettelo on *Landolt* (AJ 104, 1, p.340)
- <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/Landolt.html>
- Muitakin on (esim. *Henden*) ja ne ovat hyödyllisiä etenkin kauempana taivaan ekvaattorista





8.7 DIFFERENTIAALIFOTOMETRIA

- Differentiaalifotometria on hyödyllistä, kun havaintokohde on muuttuva tai sille on muuten hankala määrittää standardimagnitudia
- Määritetään kohteen lähellä oleville vakioikirkkauksisille tähdille standardimagnitudi ja niitä käytetään kentän standardeina
- Riittää, kun tämä tehdään kerran
- Vähemmän herkkää ilmakehän muutoksille, koska standarditähti on samassa kuvakentässä



8.8 INSTRUMENTAALIMAGNITUDIT

- Instrumentaalimagnitudilla tarkoitetaan kuvasta määritettyä “raakamagnitudia”
- CCD -kameralla tehdään kuvaan aluksi normaali redusointi bias -tasolle, pimelleävirralle ja flat fieldille
- Magnitudi voidaan määrittää kuvasta (ainakin) kahdella eri menetelmällä, *apertuuri-* tai *PSF-fotometrialla*



8.9 APERTUURIFOTOMETRIA

- Apertuurifotometriassa mitataan (yleensä) ympyränmuotoisen alueen sisään tuleva säteily
- Tästä vähennetään tausta, jolloin saadaan itse kohteesta tullut energia: $N^* = N_{\text{ap}} - n_{\text{pix}} N_{\text{sky}}$
 - N_{ap} on apertuurista mitattu kokonaissignaali,
 $n_{\text{pix}} \approx \pi(r_{\text{ap}})^2$ on apertuurin pinta-ala ja N_{sky} on taustataivaan signaali pikseliä kohti
- Instrumentaalimagnitudi saadaan nyt kaavasta $m_{\text{instr}} = -2.5 \lg N^*$

Pätee vain jos
 n_{pix} on suuri



8.9 APERTUURIFOTOMETRIA

- Signaalikohina apertuurifotometriaan saadaan kaavasta:

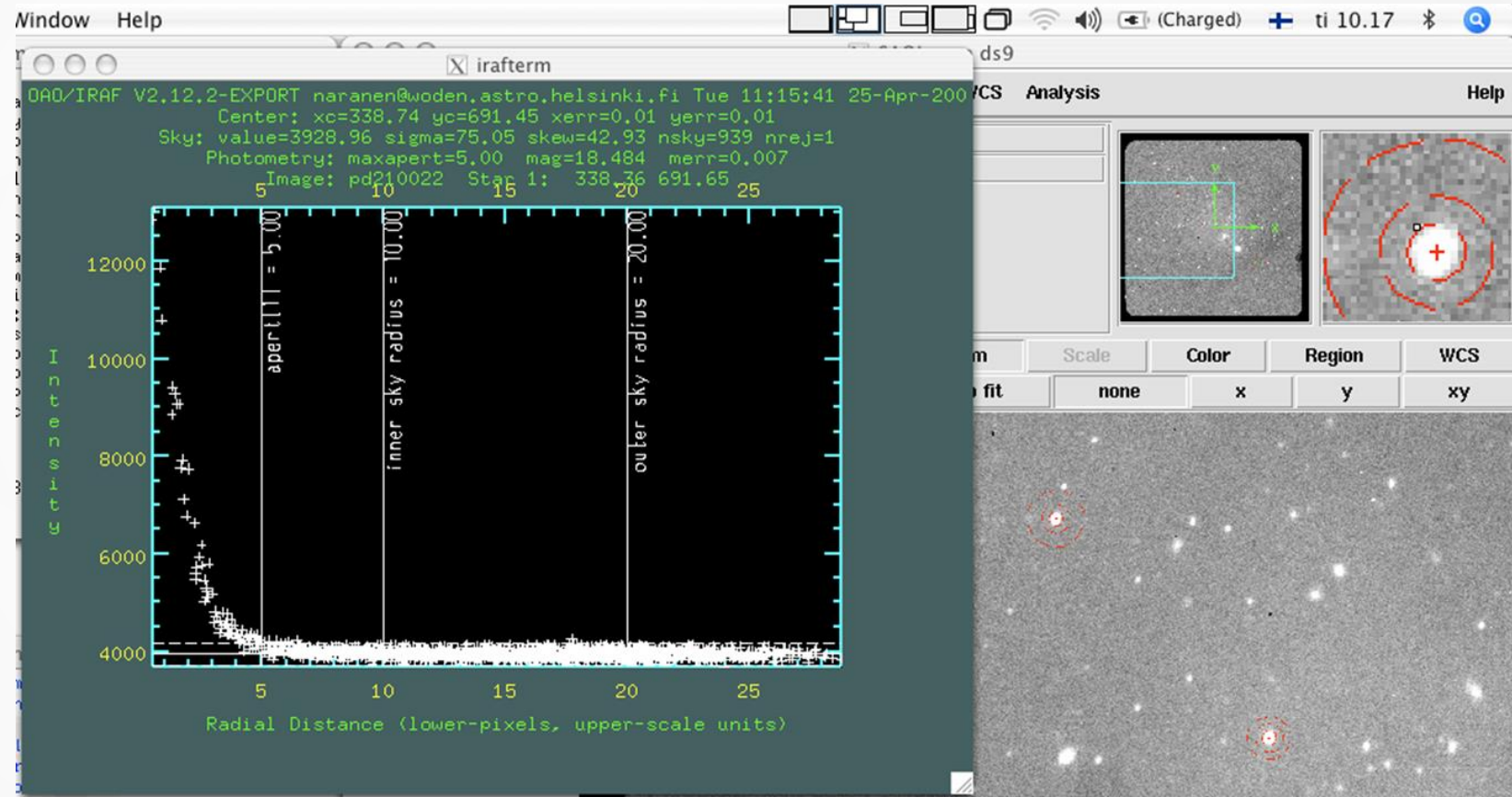
$$\frac{S}{N} = \frac{N^*}{\sqrt{N^* + n_{pix}(N_{sky} + N_D + N_R^2)}}$$

- Jossa N_{sky} on taustataivaan taso, N_D pimeävirran taso ja N_R lukukohina, kukin pikseliä kohti
- Optimaalinen apertuuri riippuu kohteen kirkkaudesta, mutta hyvä nyrkkisääntö on 2-3 kertaa kohteen *FWHM*



TEHTÄVÄ

- Millä tavalla optimaalinen apertuuri riippuu kohteen ja taustataivaan kirkkaudesta?

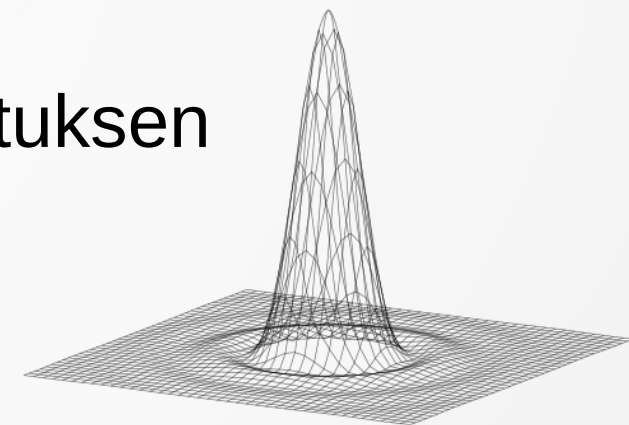




8.10 PSF -FOTOMETRIA

- Jos kohteet ovat lähellä toisiaan, apertuurifotometria ei toimi.
- Tällöin malli on muodostettava kohteen muotoon sopiva malli (*point spread function*), joka sovitetaan kohteelle.
- Instrumentaalimagnitudi lasketaan sovituksen profiilin korkeudesta h

$$m_{\text{instr}} = m_{\text{psf}} - 2.5 \lg \frac{h}{h_{\text{psf}}}$$





8.11 HAVAINTOJEN REDUSOINTI STANDARDIJÄRJESTELMÄÄN

- Eri teleskoopeilla ja instrumenteilla tehdyt havainnot halutaan usein vertailukelpoisiksi
- Tätä varten täytyy havainnoista korjata ilmakehän ja instrumentin sekä teleskoopin aiheuttamat poikkeamat standardista



8.11 HAVAINTOJEN REDUSOINTI STANDARDIJÄRJESTELMÄÄN

- Oletetaan, että on mitattu joukko kohteita ja standarditähtiä UBV kaistoilla.
- Mitatut instrumentaalimagnitudit: u, b , ja v . Standardimagnitudit: U, B , ja V .
- Näiden välille pätee yhtälöryhmä:

$$(v - V) = \xi_v + K'_v X + K''_v (B - V)X + \epsilon(B - V)$$

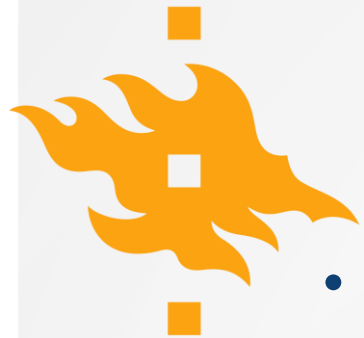
$$(b - v) = \xi_{bv} + K'_{bv} X + K''_{bv} (B - V)X + \eta(B - V)$$

$$(u - b) = \xi_{ub} + K'_{ub} X + K''_{ub} (U - B)X + \psi(U - B)$$



8.11 HAVAINTOJEN REDUSOINTI STANDARDIJÄRJESTELMÄÄN

- Nollapiste ξ liittyy teleskoopin ja mittalaitteen ominaisuuksiin ja vaihtelee ajan mukana.
- X on ilmamassa, jonka laskemiseksi on annettu kaava aikaisemmin
- K' on ensimmäisen kertaluokan ekstinktiokerroin
- K'' on toisen kertaluokan ekstinktiokerroin, ns. väriekstinktio
 - Voidaan yleensä unohtaa varsinkin isommilla korkeuksilla ja punaisemmilla suodattimilla
- ε , η ja ψ ovat ns. väritermit, jotka korjaavat mittausjärjestelmän poikkeamia standardista
 - Voidaan yleensä jättää huomiotta



8.12 KALIBROINTI KÄYTÄNNÖSSÄ

- Termien määrittämiseksi on mitattava eri väreisiä standarditähtiä eri ilmamassoilla ja ratkaistava kertoimet pienimmän neliösumman menetelmällä
- Yleensä K'' voi jättää huomiotta
- ε , η ja ψ ovat usein laitteen rakentajan valmiiksi määrittämiä eivätkä muutu kovin paljoa ajan myötä
- Differentiaalfotometrian tapauksessa:
 - Nollapiste ξ supistuu pois magnitudien erotuksesta
 - Vertailutähti samassa kentässä $\Rightarrow$ sama ilmamassa $X \Rightarrow K'$ -termit supistuvat pois
 - Valitsemalla vertailutähti niin, että sen väri-indeksi on lähellä havaintokohteen $\Rightarrow$ värikerrointen vaikutus pieni



8.13 ABSOLUUTTINEN KALIBROINTI

- Tarkoittaa annetun kaistan magnitudia $m = 0$ vastaavan vuontiheyden F_0 määrittämistä
- Absoluuttinen kalibrointi perustuen Vega-tähteen

- $V=0$ vastaavat vuontiheydet taajuus- ja aallonpituusyksikköä kohden ovat:

$$F_\nu = 3.50 \times 10^{-33} J s^{-1} m^{-2} Hz^{-1} \quad \text{ja} \quad F_\lambda = 3.39 \times 10^{-11} J s^{-1} m^{-2} nm^{-1}$$

kun $\lambda=555.6$ nm.

- AB-magnitudit (“absolute”), joissa nollakohdat on kiinnitetty taajuusyksikköä kohden vakiovuontiheyden spektriin ja

$$m(AB) = -2.5 \lg f_\nu - 48.60, [f_\nu] = \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$$



8.14 PUNERTUMINEN

- Tähtien välinen aineen aiheuttama on väririippuvaista ja näkyy havaitun valon punertumisena, eli esim. väri-indeksien ($U-B$) ja ($B-V$) kasvamisena
- Punertumisen määrää kuvaa *värieksessi*, E
- Punertuminen riippuu aallonpituudesta ja suunnasta
- E voidaan määrittää selvittämällä tähden ominaisväri sen spektristä ja vertaamalla sitä mitattuihin väri-indekseihin
- Punertumista voidaan käyttää tähtienvälisen aineen tutkimiseen



TEHTÄVÄ

- Minkälaista teleskooppia, instrumenttia, menetelmää ja suodinta kannatta käyttää?
1. Tutkitaan melko kirkkaan ($V=7$ mag) tähden valokäyrän muuttumista 30 vuoden ajalta.
 2. Havaitaan suuri määrä eri kirkkauden tähtiä tiheällä aikavälillä planeettojen ylikulun löytämiseksi.
 3. Tutkitaan gravitaatiolinssiä, jossa komponenttina on $g'=21$ mag kvasaari.