Havaitsevan tähtitieteen peruskurssi I

Fotometria

Jyri Lehtinen

Syksy 2023

Fotometria

Kappaleen sisältö:

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

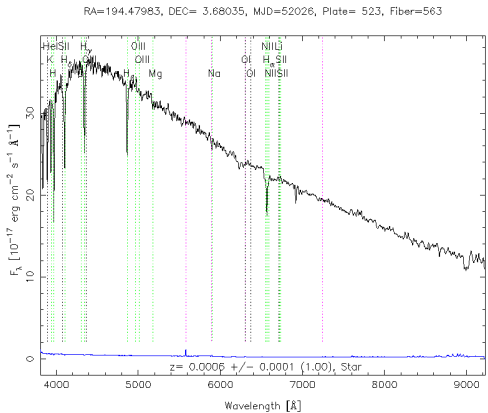
Johdanto

- Fotometriassa mitataan vuontiheys F tietyllä aallonpituuskaistalla $\Delta\lambda$
- $\Delta\lambda$ pienenee $\Rightarrow$ fotometria lähestyy spektrometriaa
- Käytetään kaikkien taivaankappaleiden tutkimiseen
- Usen halutaan kohteen valokäyrä eli sen kirkkauden muutos ajan funktiona $F(t)$

Kertaustehtävä

Miten syntyvät tähden spektrin osat?

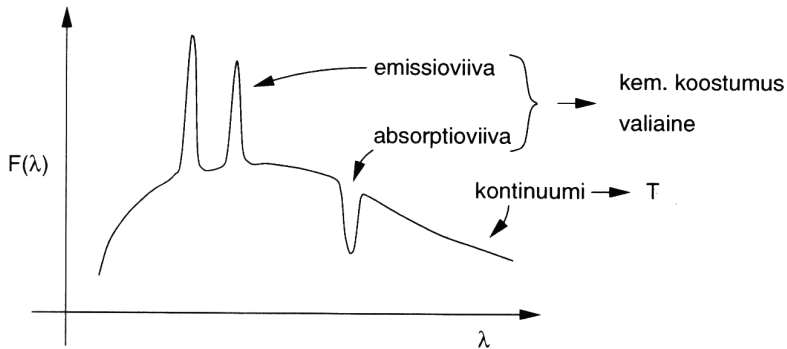
- Absorptioviivat
- Emissioviivat
- Kontinuumi



Tähden spektri (SDSS)

Johdanto

Kohteen spektri



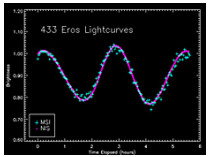
Miksi fotometriaa

Fotometria sisältää vähemmän informaatiota kuin spektrometria tai polarimetria. Sen etuja ovat kuitenkin:

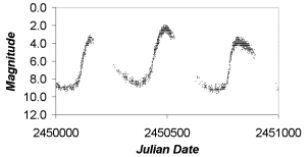
- Korkea S/N lyhemmällä havaintoajalla
- Voidaan tutkia hyvin himmeitä kohteita
- Voidaan hyödyntää pieniä teleskooppeja
- Saadaan kuvattua kohteen ominaisuuksia yksinkertaisella tavalla
- Havaintojen standardointi on suoraviivaista

Fotometrian käyttö

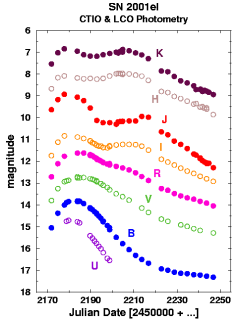
- Asteroidit
  - Pintaominaisuudet ja muoto
- Planeettajärjestelmät
  - Eksoplaneettojen ylikulut
- Tähdet
  - Tähtien etäisyydet
  - Spektriluokitus (HR-diagramma)
  - Muuttuvat tähdet
- Galaksit
  - Galaksien etäisyydet
  - Aktiiviset galaksiytimet
- Kosmologia
  - Gravitaatiolinssit
  - Tyypin Ia supernovat
    - $\Rightarrow$ Maailmankaikkeuden rakenne



Asteroidi Eros



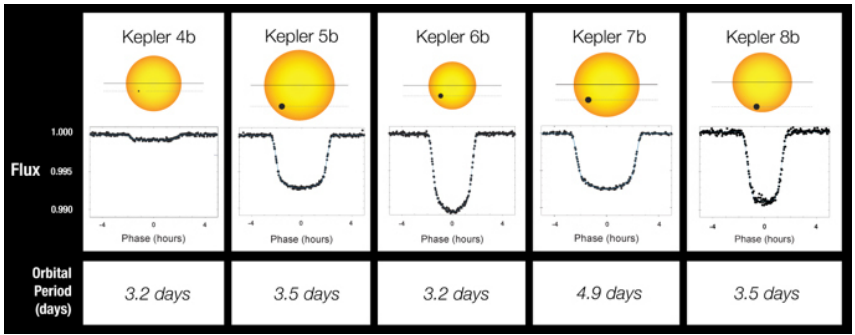
Mira (o Cet)



Supernova SN 2001el
(Krisciunas et al. 2003)

Esimerkki – Planeetan ylikulku

Viisi Kepler-avaruusteleskoopin havaitsemaa eri eksoplaneettojen ylikulkua (NASA)



Fotometrian peruskäsitteitä

- *Vuontiheys* – F
  Kohteesta saapuva säteilyn teho pinta-alayksikköä kohti, $[F] = \mathrm{W/m^2}$
- *Vuo* – L, $[L] = \mathrm{W}$
- Havaintolaite mittaa yleensä saapuvien fotonien määrän tietyllä aallonpituusalueella
- *Intensiteetti* – I
  Kohteen pintakirkkaus
- Havainnoista saadaan suoraan *instrumentaalimagnitudit*
- Reduktion tuloksena saadaan *standardimagnitudit*
- *Absoluuttinen fotometria* – Kohteen kirkkauden määritys absoluttisessa skaalassa
- *Differentiaalifotometria* – Kohteen kirkkauden määritys suhteessa toiseen kohteeseen

Magnitudit

- Kahden kohteen magnitudien m_1 ja m_2 erotus saadaan niiden vuontiheyksien F_1 ja F_2 suhteesta,
$$m_1 - m_2 = 2.5 \lg \frac{F_2}{F_1}$$
- Magnitudi mitataan aallonpituuskaistalla, jonka määrittää käytetty suodin sekä ilmaisimen herkkyys
- Magnitudijärjestelmät on kiinnitetty standardeihin, joiden vuontiheys F_0 vastaa magnitudia $m_0 = 0$, joten
$$m = -2.5 \lg \frac{F}{F_0}$$
- 100-kertainen vuontiheyksien suhde vastaa viiden magnitudin eroa, joten $\Delta m = 1$ magnitudiero vastaa vuontiheyksien suhdetta $F_2/F_1 = \sqrt[5]{100} \approx 2.51$

Magnitudit

- *Absoluuttinen magnitudi* M määritellään kohteen näennäisenä magnitudina etäisyydellä $r = 10\,\mathrm{pc}$ ilman ekstinktion vaikutusta

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

- *Ekstinktiota* kuvataan etäisyysriippuvalla termillä $A(r)$
- Suuretta $m - M$ kutsutaan *etäisyysmoduliksi*

Spektriselektiivisyys

- Havaittu kokonaisvuontiheys kaikkien aallonpituuksien yli on

$$F = \int_0^\infty S(\lambda) f^\star(\lambda) \mathrm{d}\lambda = \int_0^\infty \phi_\mathrm{A}(\lambda)\phi_\mathrm{T}(\lambda)\phi_\mathrm{F}(\lambda)\phi_\mathrm{D}(\lambda) f^\star(\lambda) \mathrm{d}\lambda$$

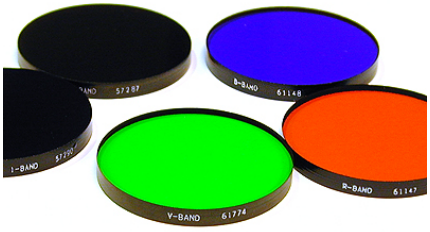
- Tässä $f^\star(\lambda)$ on todellinen vuontiheys aallonpituuden funktiona ja $S(\lambda) = \phi_\mathrm{A}(\lambda)\phi_\mathrm{T}(\lambda)\phi_\mathrm{F}(\lambda)\phi_\mathrm{D}(\lambda)$ on spektriselektiivisyys
- Spektriselektiivisyyteen vaikuttavat tekijät ovat
  - $\phi_\mathrm{A}(\lambda)$ – ilmakehän transmissio
  - $\phi_\mathrm{T}(\lambda)$ – teleskoopin transmissio
  - $\phi_\mathrm{F}(\lambda)$ – suotimen transmissio
  - $\phi_\mathrm{D}(\lambda)$ – ilmaisimen hyötysuhde

Standardijärjestelmä

- Standardijärjestelmässä fotometristen kaistojen spektriselektiivisyydet on määritelty toistettavasti
- Havainnot saadaan instrumentaalijärjestelmässä
- Siirryttäessä standardijärjestelmään havaintojärjestelmän spektriselektiivisyydet muunnetaan vastaamaan standardijärjestelmää
- Muunnoskaavat määritellään standarditähtien avulla

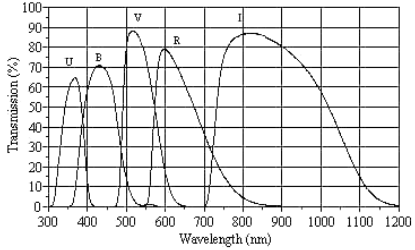
Yleisimmät magnitudijärjestelmät

- Bessel *UBVRI*, Cousins $R_C I_C$
- Strömgren *uvby*
- Thuan–Gunn *uvgriz*
- SDSS $u'g'r'i'z'$
- Suodinten valintaan vaikuttavat:
  - Tieteelliset tavoitteet – Mitä suureita havainnoista halutaan johtaa
  - Historia – Missä järjestelmissä kohdetta on havaittu aiemmin
  - Saatavuus – Mitä suotimia teleskoopilla on ylipäätään käytettävissä
- Suotimet perustuvat yleensä värillisten lasien yhdistelmiin tai interferenssikalvoihin

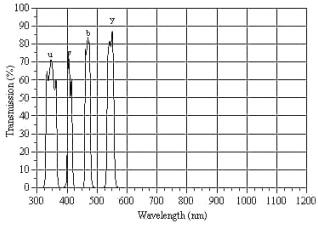


Yleisimmät magnitudijärjestelmät

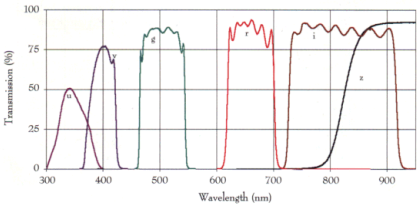
UBVRI



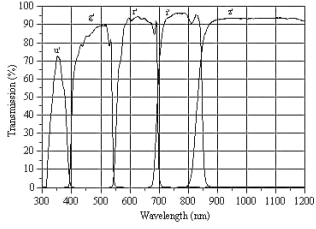
Strömgren *uvby*



Thuan-Gunn *uvgriz*



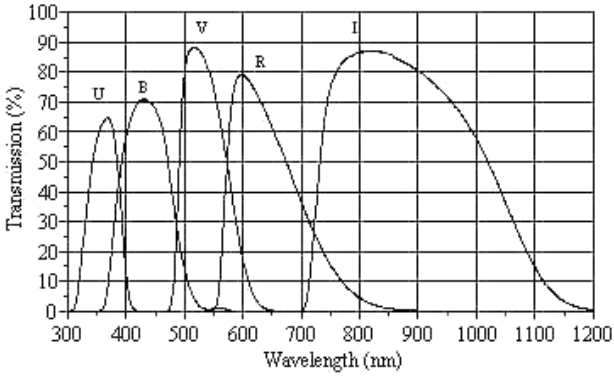
SDSS $u'g'r'i'z'$



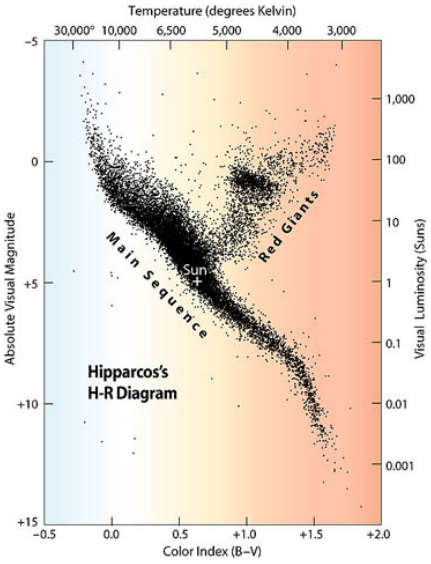
UBVRI

- Alunperin *UBV* (Johnson & Morgan 1953)
  - Nykyään yleisimmin käytetyt R ja I kaistat ovat Cousins R_C ja I_C
- Yleisin käytössä oleva fotometrinen järjestelmä
- Laajakaistasuotimia noin $300-900$ nm alueella
- Alkuperäisen *UBV*-järjestelmän U kaistan sinisen reunan määritteli ilmakehän absorptio ja V kaistan punaisen reunan 1P21-valonmonistinputken herkkyyskäyrä
- Nykyisin kaistat määritellään standardoitujen optisten värilasien mukaan
- Nollakohdat kiinnitetty mm. Vegan avulla (A0-luokan pääsarjan tähtiä), jolla $U = B = V = 0.03$, $R = 0.07$, $I = 0.10$
- Eri kaistojen magnitudieroja, kuten $B - V$, kutsutaan *väri-indekseiksi* tai väreiksi
  - Tarjoavat matalan asteen tietoa kohteen spektrin muodosta

UBVRI



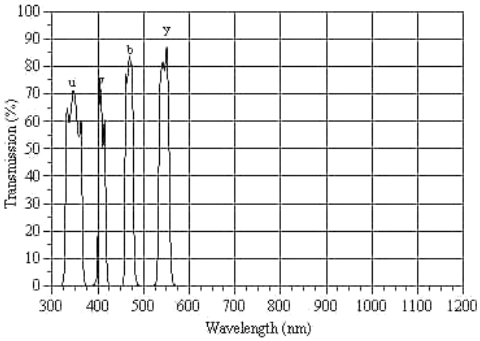
Väri-indeksi $B - V$ on yleisin tapa kuvata tähden spektriluokkaa



Strömgren *uvby*

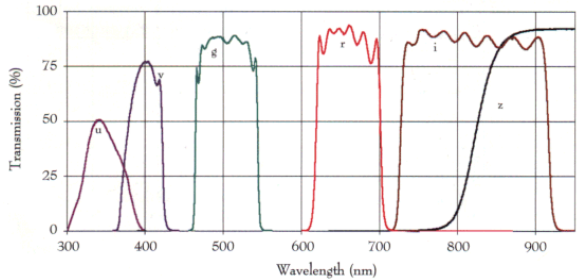
- Kehitetty tähtien ominaisuuksien määrittämiseen
- Kaistat kapeita, toisinaan mukana myös leveä ja kapea H_β-suodin
- Voidaan mitata kolme väri-indeksiä:
  - $b - y$, verrannollinen lämpötilaan, vastaa $B - V$ väriä
  - $c_1 = (u - v) - (v - b)$, verrannollinen Balmerin epäjatkuvuuteen $\Rightarrow$ pintagravitaatio, korkeat lämpötilat
  - $m_1 = (v - b) - (b - y)$, verrannollinen tähden metallisuuteen

  (HUOM! kaava virheellisesti kirjassa)
- Kaistat ovat kapeita, joten kohteiden on oltava verraten kirkkaita



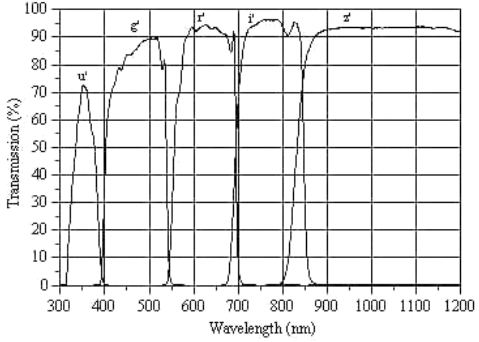
Thuan-Gunn *uvgriz*

- “Kehittynyt UBVRI”
- Voimakkaat taustataivaan viivat jäävät kaistojen väliin, jolloin tausta on himmeämpi
- Kaistojen *g* ja *r* profiilit seuraavat tiettyjen valokuvauslevyjen herkkyyskäyriä, mikä mahdollistaa vanhojen kuvien fotometrisen kalibroinnin
- Alkuperäistä *uvgr*-järjestelmää täydennetty *i* ja *z* kaistoilla

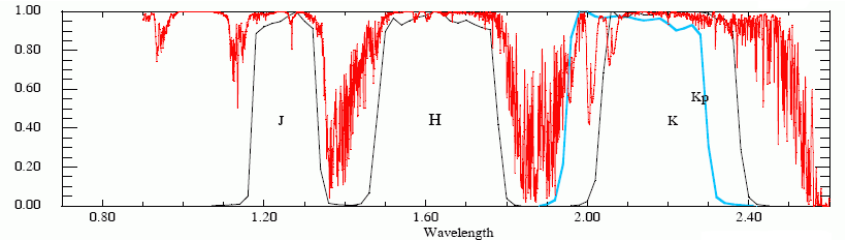


SDSS $u'g'r'i'z'$

- Kehitetty Sloan Digital Sky Survey luetteloa varten
- Kattaa koko näkyvän spektrin ilmakehän UV-absorptiosta piisensorin herkkyysrajaan ($300-1100\,\mathrm{nm}$)
- *UBVRI*-suotimia leveäkaistaisempia
  - $\Rightarrow$ Soveltuvat paremmin himmeille kohteille
- Nollakohdat kiinnitetty AB-järjestelmään, jossa $u' = g' = r' = i' = z' = 0$ vastaa tasaista spektriä, jonka spektraalinen vuontiheys on vakio $F_{\nu,0} = 3631\,\mathrm{Jy}$ (Fukugita et al. 1996)

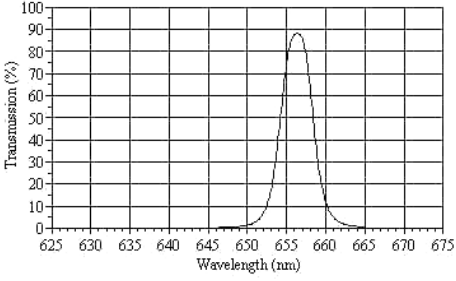


Muut suodinjärjestelmät



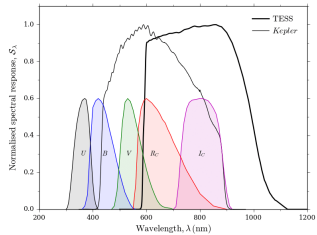
Kuva: astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast536/ast536week01.html

- Infrapunasuotimia kuten lähi-infrapunassa ilmakehän absorptiovöitä mukailevat *JHK*
- Kapeakaistasuotimia kuten H_α tai [OIII]
- Kontinuumisuotimia
- "Order sorters" eli hilaspektroskoopin kertalukuja erottelevia suotimia

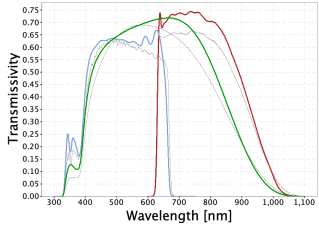


Avaruusteleskooppien suodinjärjestelmät

- Avaruusteleskoopeilla on tyypillisesti omat suotimensa
- Avaruudessa havaintoihin kohdistuu ylimääräisiä häiriöitä kuten hiukkassäteilyä ja Auringon hajavaloa
- Havaintolaitteet optimoidaan tiettyä tarkoitusta varten
- Esim. TESS, Kepler, Gaia



TESS ja Kepler
(Lund et al. 2016)



Gaia DR3 – G, G_{BP} ja G_{SP}
(ESA)

Fotometri

Kohteiden kirkkautta on historiallisesti mitattu:

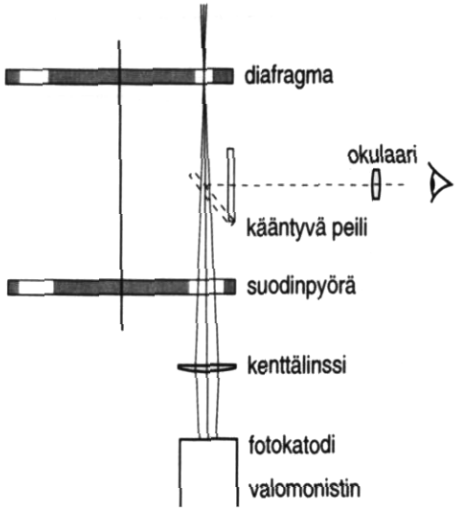
- Silmällä (historiaa)
  - Tosin kirkkaimmista muuttuvista tähdistä saadaan edelleen valokäyriä harrastajien visuaalihavainnoista
- Valokuvauslevyllä (historiaa)
- Fotometrilla (melkein historiaa)
  - Käytetään vielä esim. APT:issa (automated photoelectric telescope)
- CCD-kameralla (nykypäivää)

Tennesseen yliopiston
APT-järjestelmä Arizonassa
(Automated Astronomy Group)

Fotometri

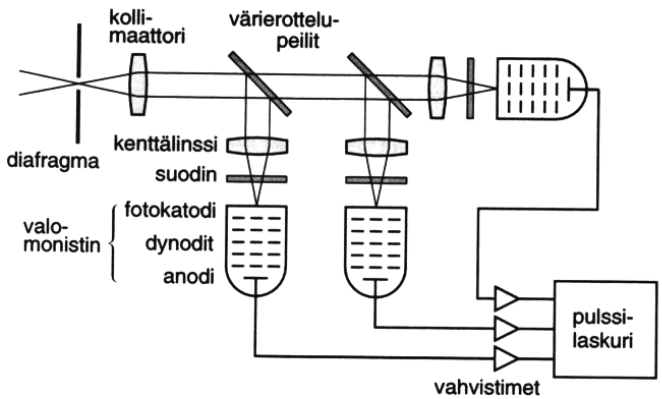
Fotometrin osia:

- Diafragma
- Suodin
- Kenttälinssi
- Valonmonistinputki
- Elektroniikka:
  - A/D-muunnin
  - Integrointi
  - Tallennus



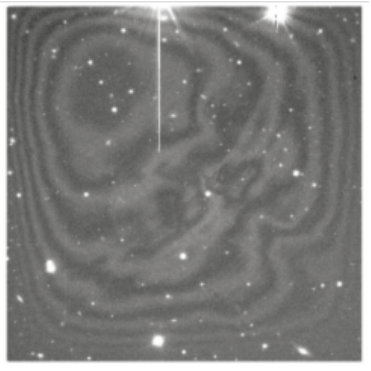
Fotometri

Monivärifotometrin periaate



Fotometria CCD kameralla

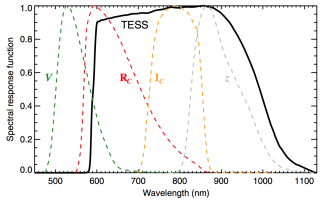
- Yleisin tapa tehdä CCD-haavaintoja
- Yleensä CCD:n edessä käytetään suodinta, minkä seurauksena kuvasta tulee “siistimpi”
  - Valosaaste
  - Interferenssikuviot pitkillä aallonpituuksilla
  - Ilmakehän dispersion vaikutus vähenee
    $\Rightarrow$ Parempi fokus
  - Yleensä seeing paranee kohti pitempiä aallonpituuksia



CCD-kuvan interferenssirakenne
(Snodgrass & Carry 2013)

Avaruusteleskooppien fotometria

- Usein hyvin laaja näkökenttä
- Esim. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS):
  - Neljä CCD-kameraa
  - Kunkin kuvakenttä $24° \times 24°$
  - Havaitsee lähes koko taivaan 2018 – 2023
  - Noin 200 000 kohdetta havaittu 27 päivän jaksoissa 2 min kadenssilla
- Oma optimoitu suodinjärjestelmä



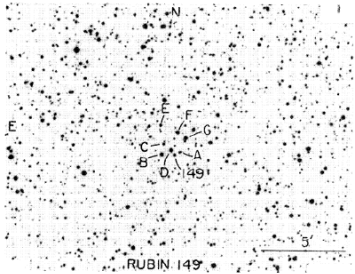
NASA

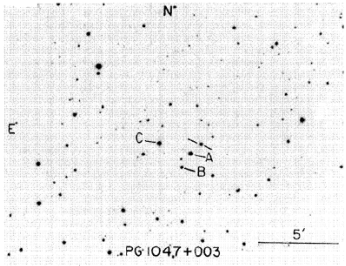
Absoluuttinen fotometria

- Absoluuttisessa fotometriassa kohde havaitaan *fotometrisena* yönä, jona ilmakehän ekstinktio on hyvin vakaa
- Havaitsemalla *standarditähtiä*, saadaan ekstinktio kalibroitua pois ja kohteelle voidaan laskea standardimagnitudi
- Jos kyseessä on muuttuva kohde, on kalibrointi tehtävä joka yö

Standarditähdet

- Optisella alueella käytetyin standarditähtien luettelo on Landolt (1992, AJ 104, 340)
  - https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/Landolt.html
- Myös muita on käytössä ja ne ovat hyödyllisiä etenkin kauempana ekvaattorista





Differentiaalifotometria

- Differentiaalifotometria on hyödyllistä, kun havaintokohde on muuttuva tai sille on muuten hankala määrittää standardimagnitudia
- Määritetään kohdetta lähellä oleville vakiokirkkauksisille tähdille standardimagnitudit ja käytetään niitä kentän standardeina
- Tämä on tarpeen tehdä vain kerran
- Vähemmän herkkä ilmakehän muutoksille, koska standarditähti on kohteen kanssa samassa kuvakentässä

Instrumentaalimagnitudit

- Instrumentaalimagnitudilla tarkoitetaan kuvasta määritettyä "raakamagnitudia"
- CCD-kameralla tehdään aluksi normaali redusointi biastasolle, pimeävirralle ja flat fieldille
- Magnitudi voidaan määrittää kuvasta ainakin kahdella menetelmällä: *apertuurifotometrialla* ja *PSF-fotometrialla*

Apertuurifotometria

- Apertuurifotometriassa mitataan tavallisesti ympyränmuotoisen alueen sisään saapunut kokonaissignaali
- Tästä vähennetään tausta, jolloin saadaan itse kohteesta tullut signaali

$$N^\star = N_{\mathrm{ap}} - n_{\mathrm{pix}} N_{\mathrm{taivas}}$$

  N_{ap} on apertuurista mitattu kokonaissignaali, N_{taivas} on taustataivaan taso yhtä pikseliä kohti ja n_{pix} on apertuurin pinta-ala pikseleissä
  - Suurilla apertuureilla $n_{\mathrm{pix}} \approx \pi r_{\mathrm{ap}}^2$
- Instrumentaalimagnitudi on nyt

$$m_{\mathrm{instr}} = -2.5 \lg N^\star$$

Apertuurifotometria

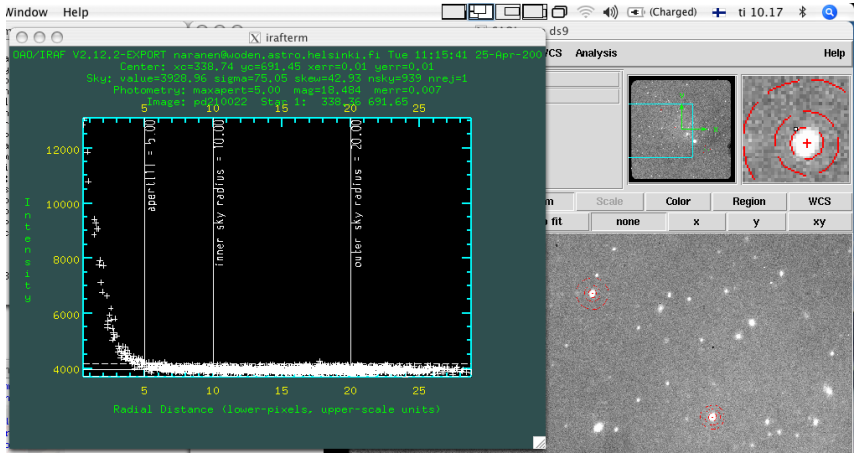
- Apertuurifotometrian signaalikohinasuhde on

$$\frac{S}{N} = \frac{N^\star}{\sqrt{N^\star + n_{\mathrm{pix}}(N_{\mathrm{taivas}} + N_{\mathrm{D}} + N_{\mathrm{R}}^2)}},$$

  missä N_{taivas} on taustataivaan taso, N_{D} pimeävirran taso ja N_{R} lukukohina, kukin yhtä pikseliä kohti

- Optimaalinen apertuuri riippuu kohteen kirkkaudesta, mutta hyvä nyrkkisääntö on $2-3$ kertaa kohteen puoliarvoleveys *FWHM*
  - Himmeillä tähdillä suurempi r_{ap} kasvattaa taustataivaan aiheuttamaa kohinaa nopeammin kuin kirkkailla tähdillä

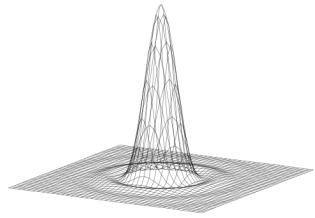
Apertuurifotometria



PSF-fotometria

- Jos kohteet ovat lähellä toisiaan, ei apertuurifotometria enää toimi
- Tällöin on muodostettava kohteen muotoon sopiva malli (point spread function, PSF), jonka korkeus voidaan sovittaa kohteen havaittuun profiiliin
  - Tähdille PSF:n voi muodostaa kentän kirkkaiden tähtien perusteella
- Instrumentaalimagnitudi sadaan sovituksen profiilin korkeudesta h,

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



Havaintojen redusointi standardijärjestelmään

- Eri teleskoopeilla ja instrumenteilla tehdyt havainnot halutaan tavallisesti saattaa keskenään vertailukelpoisiksi
- Tätä varten on korjattava ilmakehän, teleskoopin ja instrumentin aiheuttamat poikkeamat standardista
- Oletetaan, että on mitattu joukko kohteita sekä standarditähtiä UBV-kaistoilla
- Merkitään mitattuja instrumentaalimagnitudeja u, b ja v ja haluttuja standardimagnitudeja U, B ja V. Näiden välillä pätee yhtälöryhmä

$$
\begin{aligned}
(v - V) &= \xi_v + K'_v X + K''_v (B - V) X + \epsilon (B - V) \\
(b - v) &= \xi_{bv} + K'_{bv} X + K''_{bv} (B - V) X + \eta (B - V) \\
(u - b) &= \xi_{ub} + K'_{ub} X + K''_{ub} (U - B) X + \psi (U - B)
\end{aligned}
$$

Havaintojen redusointi standardijärjestelmään

- Nollapiste ξ liittyy teleskoopin ja instrumentin ominaisuuksiin ja vaihtelee ajan myötä
- X on havainnon ilmamassa
- K' on ensimmäisen kertaluokan ekstinktiokerroin
- K'' on toisen kertaluokan ekstinktiokerroin, ns. väriekstinktio
  - Yleensä merkityksetön pienemmillä ilmamassoilla ja punaisemmilla suotimilla
- ϵ, η ja ψ ovat ns. väritermit, jotka kuvaavat mittausjärjestelmän poikkeamaa standardista
  - Ideaalitapauksessa $\epsilon = 0$ ja $\eta = \psi = 1$
  - Käytännössä havaintojärjestelmä on usen lähellä standardia ja väritermit lähellä ideaaliarvoja

Kalibrointi käytännössä

- Termien määrittämiseksi on havaittava eri värisiä standarditähtiä eri ilmamassoilla ja ratkaistava kertoimet pienimmän neliösumman menetelmällä
- Kertoimet K'' ovat yleensä pieniä ja voidaan jättää huomiotta
- ϵ, η ja ψ pysyvät yleensä hyvin vakioina tietylle havaintolaitteen ja suodinten yhdistelmälle ja niille voi olla laiterakentajan ilmoittamat kalibroinnit
- Differentiaalifotometrian tapauksessa:
  - Nollapiste ξ supistuu pois magnitudien erotuksesta
  - Vertailutähti samassa kentässä $\Rightarrow$ sama ilmamassa X
    $\Rightarrow$ K'-termit supistuvat pois magnitudien erotuksesta
  - Valitsemalla vertailutähti niin, että sen väri-indeksi on lähellä havaintokohteen väriä, saadaan myös värikerrointen vaikutus minimoitua

Absoluuttinen kalibrointi

- Jos halutaan tietää kohteen kirkkaus energiayksiköissä magnitudien sijaan, on tehtävä absoluuttinen kalibrointi
- Tämä tarkoittaa annetun kaistan magnitudia $m = 0$ vastaavan vuontiheyden F_0 määrittämistä
- Yleisessä käytössä on kahdenlaisia magnitudeja:
  - Vega-magnitudit, joissa magnitudien nollakohdat on kiinnitetty A0V-luokan tähtien spektreihin
  - AB-magnitudit ("absolute"), joissa nollakohdat on kiinnitetty taajuusyksikköä kohden vakiovuontiheyden spektriin ja $m(\mathrm{AB}) = -2.5 \lg f_\nu - 48.60$, missä $[f_\nu] = \mathrm{erg\,s^{-1}\,cm^{-2}\,Hz^{-1}}$
  - Järjestelmien välille on muunnoskaavoja, esim. $V(\mathrm{Vega}) = V(\mathrm{AB}) + 0.044$ (Frei & Gunn 1995)

Punertuminen

- Tähtienvälisen aineen aiheuttama ekstinktio on väririippuvaista ja näkyy havaitun valon punertumisena eli esim. väri-indeksien $U - B$ tai $B - V$ kasvamisena
- Punertumisen määrää kuvaa *värieksessi* E,
  esim. $E_{B-V} = (B - V) - (B - V)_0 = A_B - A_V$
- Punertuminen riippuu aallonpituudesta ja havaintosuunasta
- E voidaan määrittää selvittämällä tähden ominaisväri sen spektristä ja vertaamalla sitä mitattuihin väri-indekseihin
- Tiheiden pölypilvien ulkopuolella pätee likimain $R_V = A_V/E_{B-V} \approx 3.1$, mistä voidaan arvioida galaktista ekstinktiota, jos tunnetaan E_{B-V}

Tehtävä

Minkälaista teleskooppia, instrumenttia, suodatinta ja menetelmää kannattaa seuraavissa tilanteissa käyttää

1. Tutkitaan $V = 7\,\mathrm{mag}$ tähden valokäyrän kehitystä 30 vuoden ajan
2. Havaitaan suuri määrä eri kirkkauksisia tähtiä tiheällä aikavälillä eksoplaneettojen ylikulkujen löytämiseksi
3. Tutkitaan gravitaatiolinssiä, jossa komponenttina on $g' = 21\,\mathrm{mag}$ kvasaari