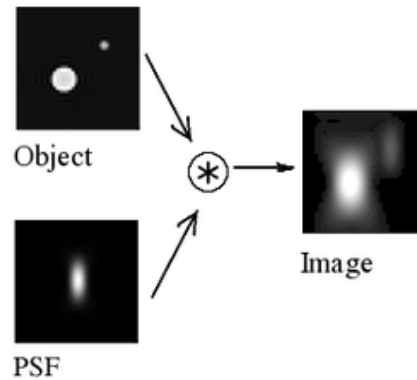


Havaitsevan tähtitieteen peruskurssi I, syksy 2023
Mallit 4

1. Selitä lyhyesti seuraavat käsitteet:

(a) *Point spread function (PSF)*

Laitefunktio, joka kertoo, miltä äärettömän terävä pistemäinen valonlähde näyttää teleskoopin ja instrumentin kuvaamana. Pintakohteesta saatava kuva on kohteen itsensä kirkkausjakauman ja PSF:n konvoluution.



Kuva: Wikipedia (Point spread function)

(b) *Dekonvoluutio*

Konvoluution käänteisoperaatio. Jos tunnetaan havaitun kuvan PSF, voidaan kohteen alkuperäinen kuva rekonstruoida havaitun kuvan ja PSF:n dekonvoluutiona. Havainnoissa oleva kohina käytännössä tarkoittaa, ettei täydellistä dekonvoluutiota voida suoraan laskea, vaan sille on etsittävä approksimaatio numeerisena inversio-ongelmana.

(c) *Integrointi-aika*

Aika, jonka instrumentin sensori käyttää signaalin keräämiseen. Jos instrumentin suljin on auki ja se pääsee keräämään valoa, voidaan tätä kutsua myös valotusajaksi.

(d) *Lucky imaging*

Käyttäen nopeasti luettavaa CCD:tä voidaan ottaa kohteesta lyhyellä valotusajalla (< 10 ms) suuri määrä kuvia. Osassa kuvissa ilmakehän häiriöt jäävät pieniksi ja yhdistämällä parhaat kuvat voidaan kohteesta saada kuva, jonka terävyys on lähellä teleskoopin diffraktion rajoittamaa erotuskykyä.

(e) *Standarditähti*

Eri fotometriset järjestelmät on kiinnitetty standarditähtiin, joiden magnitudit tunnetaan tarkasti. Näiden avulla saadaan kalibroituja muiden kohteiden vuontiheydet ja magnitudit.

(f) *Fotometrinen järjestelmä*

Sarja suotimia, joiden läpäisy spektrit on standardoitu hyvin. Fotometriset järjestelmät mahdollistavat vertailukelpoisten magnitudien mittaamisen useilla toisistaan riippumattomilla instrumenteilla. Yleisimmin käytetty optisen alueen fotometrinen järjestelmä on UBVR1.

2. Haluat havaita kääpiögalaksia MB 3 Extremely Large Telescope (ELT) kuvantamisella (imaging). Kohteen näennäinen magnitudi V-kaistalla on 19.8 ja sen näennäinen säde on 0.03° .
<https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.NAME=ELT+INS.MODE=swimaging>

- (a) Arvioi tarvittava valoitusaika jos jos haluttu signaali-kohinasuhde on 100 ja kohdetta havaitaan V-kaistalla 45° korkeudella pimeissä olosuhteissa.
 Jos avaamme ELT-imaging sivun (Fig. 1) näemme että sivu pyytää tiettyjä määreitä.

The screenshot shows the ELT ETC web form with the following sections and annotations:

- Target Input Flux Distribution:**
 - Target Brightness:** Vega mag is set to 19.8. Spectral Type is set to AB. A handwritten note "Magnitudi" is next to it.
 - Source Geometry:** Extended Object is selected with a radius r_1 of 108000.0 mas. A handwritten note "r = degr -> mas" is next to it.
- System Configuration:**
 - Observatory Site: Paranal (6853 m)
 - Telescope Diameter: 39 m
 - Observation Band: V (handwritten note "V-kaista")
 - Airmass: 1.40 (handwritten note "a = 1/cos(z)")
 - Pixel Scale: 50 mas/pxel
 - AO Mode: Seeing Limited (108000.0)
- Results:**
 - DIT: 3600.000 seconds + 0.000 hours
 - S/N ratio: 100 (handwritten note "Haluttu S/N")
 - Exposure Time: NDI =

Kuva 1: Kuvakaappaus ELT-hakusivusta.

- **Target Brightness:**

Voimme käyttää Vega-magnitudijärjestelmää (oikeissa havainnoissa tietäisimme tarkat magnitudit tms.) **Spectral type**-osiota ei käytetä, koska teemme V-kaistan havaintoja.
 $V = 19.8$

- **Source Geometry:**

Havaitsemme galaksia, toisin sanoen valitsemme **extended object**- geometrian. Sivusto pyytää half-light radius- arvoa, voimme olettaa että tämä vastaa näennäistä sädettä, jonka muutamme mas (milliarcsecond, millikaarisekunnit).

$$r = 0.03^\circ \cdot \left(\frac{3600''}{1^\circ}\right) \cdot \left(\frac{10^3 \text{mas}}{1''}\right) = 108000.0 \text{ mas}$$

- **System Configuration**

Tässä osioissa meidän täytyy huomioida vain kaksi muuttujaa:

- **Observation Band:** Tämä on oletuksena V-kaistalla, joten sitä ei tarvitse muuttaa mutta on hyvä tarkistaa.
- **Airmass:** Meille on annettu kohteen korkeus havaintoaikana, $E = 45^\circ$. Tämän voi

muuttaa ilmamassaksi viime viikolta tutulla yhtälöllä:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{\cos(z)} \\
 |z &= 90^\circ - E \\
 |z &= 45^\circ \\
 \Rightarrow a &= \frac{1}{\cos(45^\circ)} \\
 &= 1.414213562373095 \\
 &\approx 1.41
 \end{aligned}$$

• **Results:**

Tässä vaihdamme vain halutun S/N arvon, eli **S/N = 100**

Taulukot 1 ja 2 näyttää tulokset (mallien lopussa). Tehtävälle tärkeät arvot on **Exposure Time (s)**- rivi.

Normaalitilanteessa (Average Sky) tarvittu havaintoaika on

$$t = 18\,000\text{ s} = 300\text{ m} = 5\text{ h}$$

(Huom: Tähän lisäksi tulee n.s. overhead-aika, eli kalibraatiokuvat, teleskoopin liikkuminen, tms.)

- (b) *Miten tulokset muuttuvat (jos muuttuvat), jos havainto tehdään täyden kuun aikaan (Bright Sky)?*

Bright Sky- tilanteessa tarvittu havaintoaika on $t = 172\,800\text{ s} = 48\text{ h}$

Toisin sanoen en lähtisi hakemaan havaintoaikaa tälle kohteelle kuun ollessa kirkas.

- (c) *Mistä mahdollinen muutos johtuu?*

Kuusta.

Täyskuun näennäinen magnitudi on -12.6, ja aiheuttaa paljon hajavaloa ilmakehään. Tämän näkee myös hakutuloksissa, mm. Sky background- avot normaalitilanteessa on $267\,739\text{ e-}/\text{pixel}$, mutta kirkkaan taivaan kohdalla $2.7524\text{e}+06\text{ e-}/\text{pixel}$, eli noin 10 kertaa kirkkaampi. Täten signaalia kohteesta tarvitsee kerätä huomattavasti pidemmän ajan saadakseen yhtä hyvän S/N-suhteen.

Erot tarvittavissa valotusajoissa voidaan matemaattisesti selittää tarkastelemassa signaalikohinasuhteen kaavaa

$$\frac{S}{N} = \frac{N_\star}{\sqrt{N_\star + n_{\text{pix}}(N_S + N_D + R^2)}}$$

Suuremmilla taustataivaan kirkkauksilla N_S lausekkeen nimittäjässä kasvaa, jolloin nähdään, että signaalikohinasuhteen arvo pienenee, eli saman signaalikohinasuhteen saavuttamiseksi vaaditaan pitempi valotus.

3. Tähtienväliselle ekstinktiolle ja värieksessille pätee suhde $R_V = A_V/E_{B-V} = 3.1$.

- (a) *Tähden kirkkaudeksi havaitaan $V = 15.1$ ja $B = 18.9$. Tähdän etäisyys on 4200 parsekia ja ekstinktio V -kaistalla on $a_V = 0.0015\text{ mag}/\text{pc}$. Laske tähden absoluuttinen magnitudi V -kaistalla (M_V) sekä sen ominaisväri $(B - V)_0$.*

Tähden absoluuttinen magnitudi on:

$$\begin{aligned}V - M_V &= 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + a_V r \\M_V &= V - 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} - a_V r \\&= 15.1 - 5 \log \frac{4200}{10 \text{ pc}} - 0.0015 \cdot 4200 \\&\approx -4.32.\end{aligned}$$

Ominaisväriä varten tarvitaan värieksessi

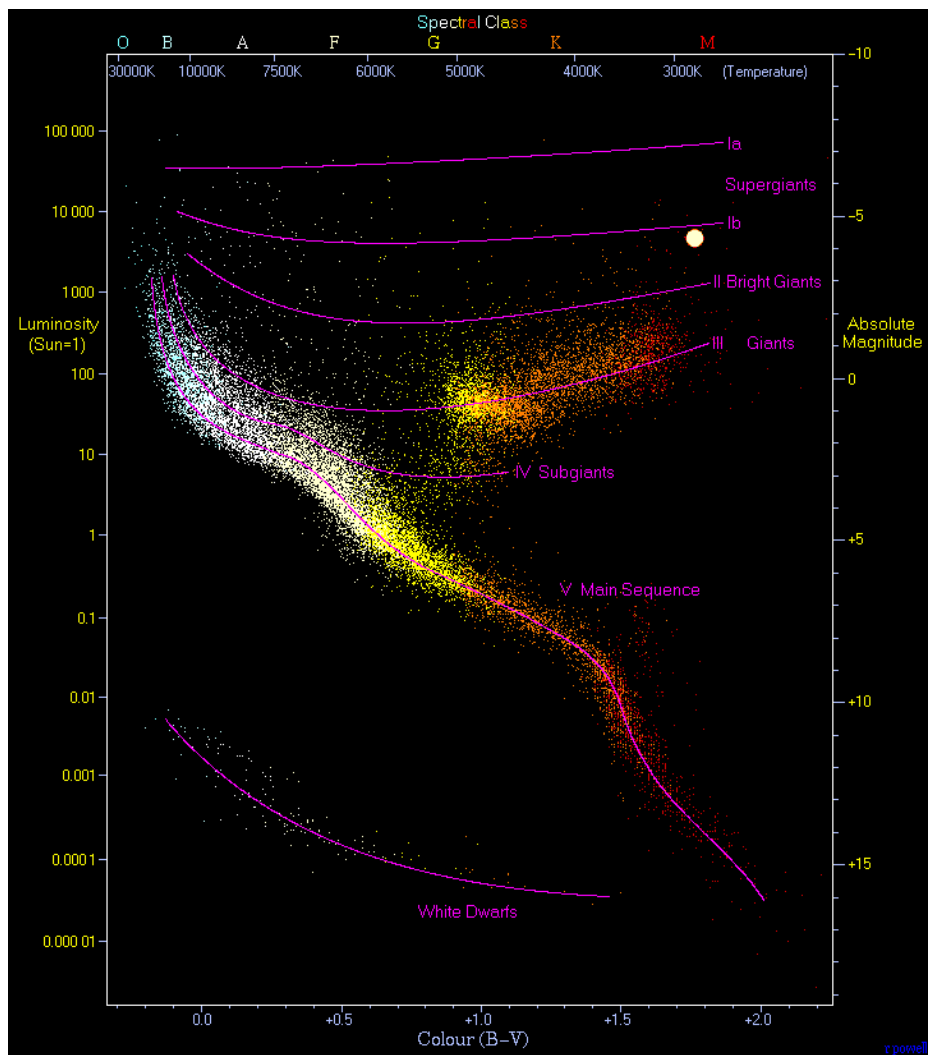
$$\begin{aligned}E_{B-V} &= A_V/3.1 \\&= (a_V \cdot r)/3.1 \\&\approx 2.03,\end{aligned}$$

jolloin ominaisväriksi saadaan

$$\begin{aligned}(B - V)_0 &= (B - V) - E_{B-V} \\&\approx 1.77.\end{aligned}$$

(b) *Kuuluuko tähti pääsarjaan?*

Ei. Tähti on hyvin punainen ($B-V \approx 3.8$), ja sen ominaisväri on suuri. Tämä sekä hyvin kirkas absoluuttinen magnitudi sijoittavat tähden Ib-tyypin ylijättiläiseksi (ks. suuri piste kuvassa).



4. Tarkastellaan yhtä pikseliä CCD kuvassa. Raakakuvassa tämän pikselin arvo on $R = 29\,333$. Siinä on myös redusoidut master-bias (B), master-dark (D) ja master-flat-field (F) kuvat, joissa tämän pikselin arvo on $B = 11\,520$, $D = 2325$ ja $F = 1.3$. Valotusajat kuville ovat $t_R = 600$ s, $t_B = 0.002$ s, $t_D = 300$ s ja $t_F = 16.3$ s. Mikä on tämän pikselin arvo lopullisessa, redusoidussa kuvassa?

Kaikki kalibroitikuvat ovat useasta kuvasta yhdistettyjä master-kalibroitikuvia. Ne on siis kaikki redusoitu valmiiksi niin, että dark-kuvasta on vähennetty bias-taso ja flat-kuvasta on vähennetty bias- sekä dark-tasot ja sen keskiarvo on skaalattu arvoon $\langle F \rangle = 1$. Raakakuvan redusoiduksi siitä on vähennettävä bias-taso sekä sen valotusaikaa vastaava dark-taso ja se on sitten skaalattava flat-kuvalla.

Koska CCD:n pimeävirta kasvaa lineaarisesti integrointiajan funktiona, voidaan raakakuvaa vastaava dark-taso laskea skaalaamalla havattua dark-kuvaa raakakuvan ja dark-kuvan integrointi-aikojen suhteella,

$$D_R = D(t_R/t_D).$$

Lopullisen tiedekuvan pikseliarvoksi saadaan siten:

$$\begin{aligned} T &= \frac{R - B - D_R}{F} \\ &= \frac{R - B - D(t_R/t_D)}{F} \\ &= \frac{29\,333 - 11\,520 - 2325(600/300)}{1.3} \\ &= 10\,125.4. \end{aligned}$$

5. Olet tekemässä havaintoja tähtitornilla, jonka kaukoputkeen on kiinnitetty CCD-kamera havaintojen tekemistä varten. Kerro omin sanoin mitä missäkin vaiheessa iltaa ja yötä tarvitsee tehdä. Voit itse valita havaittavan kohteesi tai kenties useammankin kohteen.
- Havaintojen suunnittelu: Päätetään mitä havaitaan. Myös tavoitteena oleva tarkkuus on hyvä päättää etukäteen. Laaditaan aikataulusuunnitelma eri toimenpiteisiin käytettävistä ajoista. Etenkin karkea arvio valotusajoista on hyödyllistä hahmottaa. Isommilla putkilla tämä tehdään usein jo hakemusvaiheessa.
 - CCD:n jäähdytys: Aloitetaan viimeistään päivällä ennen havaintoyötä (jos tämä työ kuuluu havaintosijalle)
 - Pistetään seuranta ja mahdolliset oheislaitteet päälle. (c.5: Keitetään kahvia koska yöllä on kylmää ja väsyttää)
 - Kalibroitikuvat: Dark, Bias ja Flat field -kuvat otetaan auringonlaskun aikaan. Flat field -kuvat otetaan erikseen jokaiselle käytettävälle instrumentille ja eri suotimille. Joskus saataan tarvitta kalibroitikuvia myös kohteiden havaintojen välissä. Kalibroitikuvat voidaan ottaa myös havaintoyön aikana tai aamulla, mutta järkevintä ne on hoitaa alta pois ennen havaintotunteja. Jos havainnot kestävät pitkään, otetaan kalibraatiokuvia usein esim. parin kohde-havainnon välissä (esim: on-target 2.5 h, sitten kalibrointi, jne.)

- (e) Teleskoopin fokusointi: Tehdään heti kun taustataivas on riittävän tumma ja sopiva tähti löytyy. Fokus muuttuu mikäli vaihdetaan filttieriä tai instrumenttia ja lisäksi se on lämpötilan funktio. Joissakin teleskoopeissa jälkimmäinen korjataan automaattisesti.
- (f) Kohteiden havaitseminen. Tämä riippuu merkittävästi siitä, mitä havaitaan, ja havaintotyy-
pistä (optinen/radio/spektrometria/kontinuumi/observatorion käytännöistä (Oletko yksin?
Paikan päällä? Etänä? Onko observatorion henkilökuntaa paikalla?))
- (g) Suljetaan teleskooppi: Pysäytetään seurantamoottori, asetetaan teleskooppi lepoasentoon,
katetaan peili ja apuputket, suljetaan kupu, sammutetaan valot ja lukitaan torni.
- (h) Suoritetaan analyysi sopivana aikana käyttäen kalibrintikuvia ja valotettuja kuvia.

Tehtävä 2: taulukot

ELT Transmission Model:

S/N within the half-light radius		103.584
Observed half-light radius (rh(PSF)=365.5 mas)	r_h	108000.0 mas
Number of pixels in reference area $A_{\text{pix}} = \pi * r_h^2 / \text{pixScale}^2$		14657415 pix
Detector Integration Time for one exposure	DIT	3600.000 s
Number of detector integrations (decimal value)	NDIT	5
Total exposure time	NDIT·DIT	18000.000 s
Total object signal over reference area	(per DIT)	91770235.498 e-/DIT
Total background signal over reference area	(per DIT)	3924362983145.971 e-/DIT
Max. intensity at central pixel per DIT	(e-, object+sky)	267745.353 e-/pixel/DIT
Detector saturation (e-)		120000 e-
Transmission of telescope & instrument		50.000%
Transmission of the atmosphere		86.688%
Limiting magnitude (S/N=3)		V(Vega) = 23.645 V(AB) = 23.668
BLIP integration time		0.054 s

Taulukko 1: ELT transmission model- tulokset average sky- tilanteelle.

	Average Sky	Bright Sky	Dark Sky
Moon Days =	7	14	0
Sky Magnitude: V(Vega)	20.54	18.033	21.83
Sky Magnitude: V(AB)	20.563	18.056	21.853
Exposure Time (s)	18000	172800	7200
Sky background (e-/pixel)	267739	2.7524e+06	81604.1
Max. intensity at central pixel (e-)	267745	2.75241e+06	81610.3
Signal to Noise	103.584	100.101	118.659
Limiting V(Vega) Magnitude (S/N=3)	23.6454	23.6083	23.793
Limiting V(AB) Magnitude (S/N=3)	23.6685	23.6313	23.816
BLIP integration time (s)	0.0537837	0.00523179	0.176462

Taulukko 2: Tulokset ELT-hausta