Havaitsevan tähtitieteen peruskurssi I, syksy 2023
Mallit 3

1. *Selitä lyhyesti seuraavat käsitteet:*

   (a) **Kvanttihyötysuhde**
   Todennäköisyys sille, että ilmaisimeen osunut fotoni rekisteröidään, eli se aiheuttaa havaittavan signaalin.

   (b) **Signaalikohinasuhde**
   Datan sisältämän signaalin S ja satunnaiskohinan N suhde S/N. Yleinen mittari havaintojen laadulle, joskin se mittaa ainoastaan satunnaisvirheiden voimakkuutta ja jättää systemaattiset virheet huomiotta.

   (c) **Antiblooming**
   Lisäämällä CCD-kennon pikseleihin ylivuotoelektrodi (*antiblooming gate*) voidaan estää elektronien vuotamista ylivalottuneista pikseleistä niitä ympäröiviin pikseleihin. Tällä tavoin voidaan rajoittaa kirkkaiden kohteiden ylivalottumisesta aiheutuvia artefakteja kuvissa. Haittapuolena on että ylivuotoelektrodit vaativat kennolta tilaa, mikä pienentää pikseleiden valoherkkää pinta-alaa.

   (d) **Bias-korjaus**
   Digitoitu CCD-kuva sisältää ainoastaan epänegatiivisia pikseliarvoja. Koska satunnaiskohina saa kuvan himmeimmillä alueilla aikaan myös negatiivisia jännitteitä, lisää CCD:n lukuelektroniikka pikseleihin vakio- eli bias-jännitteen, jotta digitointi ei leikkaisi tätä kohinaa nollasta. Bias-korjaus tarkoittaa tämän nollatason vähentämistä kuvasta. Se voidaan määrittää joko lukemalla koko CCD-kenno 0 s valotuksen jälkeen tai lukemalla kuviin ylimääräisiä pikseleitä siirtämättä kennolta yhtään jännitettä lukuelektroniikalle (ns. overscan-alueet).

   (e) **Flat-field-korjaus**
   CCD-kennot (kuten muutkaan kuvantamissensorit) eivät kerää koko alueellaan yhtä tehokkaasti valoa. Tämä johtuu sekä kennon pikseleiden välisistä herkkyyseroista että niin optiikan kuin pölyhiukkasten aiheuttamista varjostuksista kuvatasolla. Flat-field-korjauksessa nämä vaihtelut korjataan ottamalla valotus kirkkaasta tasaisesti valaistusta pinnasta (hämärän ajan taivas tai lampulla tasaisesti valaistu pinta), joka bias- ja dark-korjataan samaan tapaan kuin tiedevalotus ja sitten normalisoidaan keskiarvoltaan ykköseen. Tämän jälkeen korjattu tiedevalotus jaetaan korjatulla flat-field-kuvalla.

2. *Tarkastele signaalin ja kohinan suhteen kaavaa (oppikirjan kaava 6.7, CCD-luennon kalvo 17). Selitä tämän perusteella mitä hyötyä on hyvästä seeingistä. Missä tilanteessa voi taas olla hyötyä saada kohteen kuva suuremmaksi, eli käytännössä defokusoida teleskooppia?*

   Oppikirjan kaava 6.7:

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

   jossa N_* on kohteesta tuleva signaali, n_{pix} on kohteen peittämien pikselien lukumäärä, N_S taustataivaan signaali pikseliä kohden, N_D pimeän virran signaali pikseliä kohden ja R lukukohina. Hyvä seeing tarkoittaa että apertuuria n_{pix} voidaan pienentää, jolloin taustataivaan, pimeän virran ja lukukohinan (N_S, N_D ja R) vaikutukset pienenevät. Vastaavasti $\frac{S}{N}$ nousee suhteessa valotusaikaan.

   Liian pientä n_{pix} ei kuitenkaan voi käyttää, koska silloin vaarana on että kohteen kuva osuu huonolle pikselille, tai kosminen säde pilaa havainnon. Lisäksi, jos kohde on hyvin kirkas, vaarana on nopea ylivalottuminen. Näissä tapauksissa teleskooppia kannattaa defokusoida, eli n_{pix} kasvatetaan.

3. *Havaitaan teleskoopilla Sirius-tähteä (α CMa; etäisyys $d = 2.67$ pc, säde $R = 1.71R_\odot$) seeingin ollessa $0.7''$. Kuinka monta kertaa suurempi seeing-kiekon halkaisija on suhteessa tähden näennäiseen halkaisijaan?*

   Siriuksen etäisyys on $d = 2.67\ \text{pc} = 8.239 \cdot 10^{16}\,\text{m}$ ja halkaisija $D = 2 \cdot 1.71R_\odot = 2.379 \cdot 10^9$ m. Tarkastellaan kolmiota, jonka virittävät havaitsija ja tähden kiekon vastakkaiset reunat. Koska havaitsijaan osoittava kulma on hyvin pieni, voidaan kolmiota approksimoida hyvin suorakulmaisella kolmiolla, jonka sivut ovat d ja D. Tähden näennäisen halkaisijan kulmaksi saadaan tällöin

$$\begin{aligned}
\tan\theta &\approx \frac{D}{d} \\
\theta &\approx \frac{D}{d} \\
&\approx 2.89 \cdot 10^{-8}\text{rad} \\
&\approx 0.006''
\end{aligned}$$

   Tässä on käytetty tangentille pienen kulman approksimaatiota $\tan\theta \approx \theta$. Seeingin ollessa $s = 0.7''$ on seeing-kiekon ja tähden näennäisen halkaisijan suhde $s/\theta \approx 116.666...$.

4. *Havaitaan vakiokirkkauksista kohdetta CCD-kameralla. Lähtien signaali-kohinasuhde-kaavasta (tehtävä 2), osoita että jos taustataivaan, pimeän virran ja lukukohinan vaikutus on pieni ja t on valotusaika, niin $S/N \propto t$ on hyvä approksimaatio.*Kaava on vieläkin

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

   Tasaisesti loistavalla tähdellä $N_* = n_* t$, jossa n_* on havaittu lukema aikayksikköä kohden ja t valotusaika.

Taustataivaan, pimeän virran ja lukukohinan vaikutukset pieniä

$\Rightarrow n_{\text{pix}}(N_{\text{S}} + N_{\text{D}} + R^2) \ll N_* \Rightarrow \frac{S}{N} \approx \frac{N_*}{\sqrt{N_*}} = \sqrt{N_*} = \sqrt{n_*}\sqrt{t}$

Saamme $\underline{\frac{S}{N} \propto \sqrt{t}}$.

5. *CCD:llä havaitaan tasaisesti valaistua pintaa eri valotusajoilla. Kustakin kuvasta mitataan sen keskimääräinen kirkkaus I ja kirkkauden keskihajonta σ_I (yksikköinä ADU), jotka on ilmoitettu alla olevassa taulukossa. Olettaen, että kuville on tehty valmiiksi bias-, dark- ja flat-field-korjaukset, ja että CCD:n lukukohina on häviävän pieni, laske mittausten perusteella CCD-kameran vahvistuskerroin eli gain G.*

Tehtävänä on laskea CCD:n vahvistuskerroin G, kun on havaittu tasaisesti valaistua pintaa ja mitattu siitä kirkkauden keskiarvo I ja keskihajonta σ_I yksiköissä ADU. Tehtävä perustuu siihen, että kohinalaskut on suoritettava elektronien yksiköissä ja, kun ADU:issa tehdyt mittaukset muunnetaan elektroneiksi skaalauksilla $N = GI$ ja $\sigma_N = G\sigma_I$, saadaan vahvistuskerroin ratkaistua havainnoista.

Koska havainnot on ilmoitettu täysin korjatuiksi, on niiden kohina elektroneissa lukukohinan ja fotonikohinan neliösumma,

$$\sigma_N\ [e^-] = \sqrt{\sigma^2_{\text{lukukohina}} + \sigma^2_{\text{fotonikohina}}}.$$

Lukukohina on ilmoitettu häviävän pieneksi, kun taas fotonikohina on elektroneissa ilmaistuna $\sigma_{\text{fotonikohina}} = \sqrt{N}$. Ilmaistuna ADU:issa mitatun signaalin I avulla saadaan siis

$$\begin{aligned}\sigma_N\ [e^-] &= \sqrt{\left(\sqrt{N}\right)^2} \\ &= \sqrt{N} \\ &= \sqrt{GI}.\end{aligned}$$

Muunnetaan kohinan yksikkö elektroneista ADU:iksi,

$$\begin{aligned}\sigma_I\ [\text{ADU}] &= \frac{\sigma_N}{G} \\ &= \frac{\sqrt{GI}}{G} \\ &= \sqrt{\frac{I}{G}},\end{aligned}$$

mistä saadaan

$$G = \frac{I}{\sigma_I^2}.$$

Mitatuilla lukuarvoilla saadaan yksittäismittauksille

I	σ_I	G [e^-/ADU]
5012	46.8	2.29
12006	73.1	2.25
23608	102.0	2.27
38220	120.2	2.65
45550	139.6	2.34
55128	155.0	2.29

Vahvistuskerrointa voidaan arvioida esimerkiksi näiden arvojen keskiarvona ($\langle G \rangle \approx 2.35$). Tarkempi arvio saadaan kuitenkin sovittamalla dataan suora $[\sigma_I^2, I]$-tasossa, jolloin vahvistuskerroin on tämän suoran kulmakerroin, $G = 2.34\ e^-/\mathrm{ADU}$.