

6. CCD-kamera

Lauri Jetsu
Fysiikan laitos
Helsingin yliopisto

Yleistä (kuvat: @www.astro.virginia.edu)

- + Kvanttitehokkuus:

– Valokuva:

Lineaarinen

– Valokuva:
Resiprositeetti ...

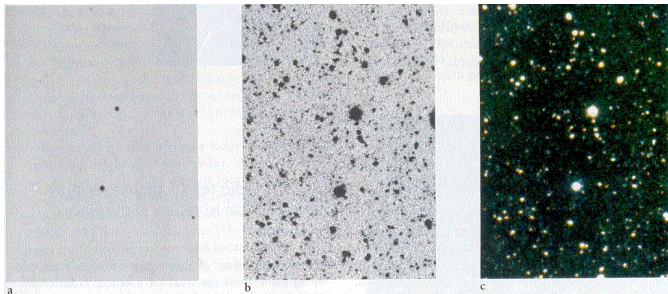
+ Havainto:
Digitaalinen ...

– Valokuva:
Kehitys ...

- ▶  Kuvakenttä:
Pikselit/Koko

– Valokuva: Laaja, ei “palikoita”

► (a) Valokuva: 45 min, (b) CCD: summa 15 x 500 s, (c) CCD: summa 6 h & filterit



CCD-sirun rakenne ja toiminta

CCD-sirun rakenne ja toiminta (kuvat: @ursa: havaitseva tähtitiede)

► Pikseli

Valmistus: p-tyypin piikide $\Rightarrow$ höyrystetään päälle eristyskerros
 $\Rightarrow$ eristekerroksen päälle metallielektrodi

Toiminta: Elektrodin positiivinen jännite V_g synnyttää $\Rightarrow$

1: Tyhjennysalueen: p-aukot poistuneet eli ei vapaita varauksia

2: Potentiaali kuopan: e^- varauksille

Fotoni tyhjennysalueeseen $\Rightarrow$ Piin valenssivyöltä e^- johtavuus-
vyölle $\Rightarrow e^-$ vapaa liikkumaan $\Rightarrow V_g$:n luoma sähkökenttä:

1: Estää e^- :n rekombinaation takaisin p-aukkoihin

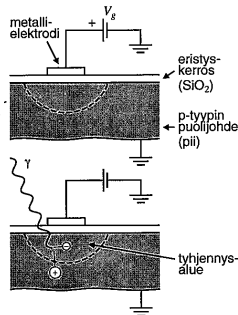
2: Siirtää syntyneen p-aukon ulos tyhjennysalueesta

Lopputuloks: e^- jää "yksin" tyhjennysalueelle

► **Mittaus:** n_e = kertyneiden e^- määrä $\propto$ Tyhjennysalueeseen osuneiden fotonien määrä

► n_e kasvaa $\Rightarrow V_g$:n aiheuttama sähkökenttä heikkenee
 $\Rightarrow n_e$ mittauskapasiteetilla yläraja $n_{\max}$

- ▶ $n_{\max} \propto V_g$ & pikselikoko (7–24 μm)
 $\Rightarrow 80\,000 \times e^- < n_{\max} < 350\,000 \times e^-$

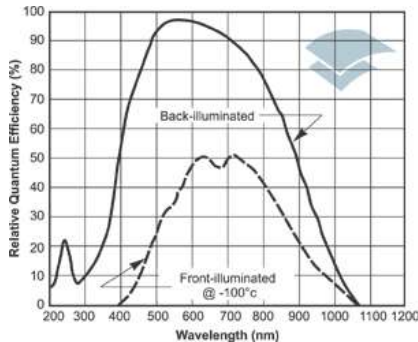


CCD-sirun rakenne ja toiminta

CCD-sirun rakenne ja toiminta

(kuva: @www.andor.com)

- ▶ **Si:** $E > 1.14 \text{ eV} \equiv \lambda < 1100 \text{ nm}$
 - ⇒ Valenssivyön e^- johtavuusvyölle
 - ⇒ “Läpinäkyvä”: $\lambda > 1100 \text{ nm}$
 - Maksimi $QE(\lambda)$ noin 600–700 nm
 - Elektrodit “läpinäkymättömät”
 - ⇒ $QE \rightarrow 0$, kun $\lambda < 400 \text{ nm}$
 - “Frontside” = Elektrodit valon edessä
- ▶ “Backside” = Elektrodit pois edestä
 - Puolijohde valon edessä
 - ⇒ Parempi QE pienillä λ
 - Fotonien päästävä tyhjennysalueelle
 - ⇒ Puolijohdepinta hyvin ohut ($10 \mu\text{m}$)
 - ⇒ Valmistus vaikeaa
 - Etu- ja takapinta heijastuksia pitkillä λ (engl. fringes)
- ▶ Sirulle fosfori-kalvo ⇒ UV luminenssi ⇒ UV säteily siirtyy havaittavaksi pidemmille λ



CCD-sirun rakenne ja toiminta

CCD-sirun rakenne ja toiminta

(kuvat: @ursa: havaitseva tähtitiede)

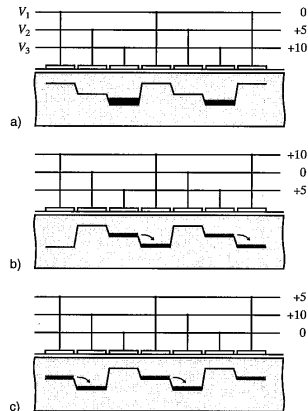
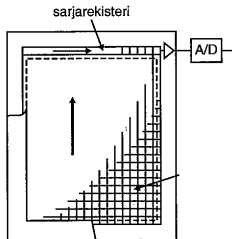
► Mittaaminen

- Valotus päättyy $\Rightarrow$ Pikselien e^- varaukset mitataan
- $\Rightarrow e^-$ siirretään rivi kerrallaan **sarjarekisteriin**
- $\Rightarrow$ Siirretään e^- :t pikseli kerrallaan **lukuelektroniikkaan**

► Siirtotapa: Animaatio

www

- Pkselissä kolme elektrodia jännitteillä V_1, V_2, V_3
 - Valotuksen aikana V_1, V_2, V_3 ei muutu
 - ⇒ Luovat aiemmin kuvatun tyhjiennysalueen
 - Valotus loppuu
 - ⇒ Vaihdeltaan V_1, V_2, V_3
 - ⇒ Potentiaalikuoppa siirtyy
 - ⇒ e^- :t siirtyvät
 - ⇒ V_1, V_2, V_3 vaihdot a)b)c)
 - ⇒ e^- :t pikseli eteen päin
 - Rivivälit eristetty
 - ⇒ e^- :t pysyvät siirroissa omalla rivilläään
-
- The diagram illustrates the internal structure of a CCD sensor. At the top, a horizontal bar is labeled 'sarjarekisteri' (serial register). Below it is a grid of electrodes. An upward-pointing arrow indicates the direction of electron movement. The grid is divided into columns and rows, with labels 'a)', 'b)', and 'c)' indicating different states or phases of the clocking process. The bottom of the grid is labeled 'Rivivälit eristetty' (row intervals isolated).



CCD-sirun rakenne ja toiminta

CCD-sirun rakenne ja toiminta

(kuvat: @www.thermoscientific.com)

► Varausten lukeminen

– Pikseli kerrallaan

– Kaikki e^- varaukset, $Q = n_e \times e^-$,
siirretään **kapasitanssiin, C** www

⇒ Syntyy jännite $U = Q/C$

⇒ U vahvistus $\rightarrow U'$

⇒ A/D-muunnin: $n_e \equiv U' \rightarrow I_{CCD}$

⇒ I_{CCD} = Pikselin "kirkkaus" $\propto n_e$

⇒ I_{CCD} arvo muistiin

► $[I_{CCD}] = \text{ADU} = \text{Analog to Digital Unit}$

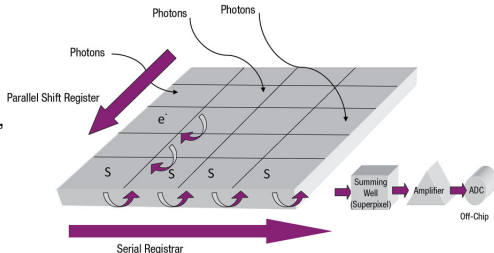
► **Vahvistuskerroin** = $G = n_e / I_{CCD} \equiv$ Kuinka monta e^- per yksi ADU

► Tyypillinen skaala 16 bittiä: $0 \leq I_{CCD} \leq 2^{16} = 65536$

⇒ Pikselin varastoima maksimi e^- määrä elektroneita = $\max[n_e] = 100\,000 \times e^-$

⇒ $G = \max[n_e] / \max[I_{CCD}] = 100000 / 65535 = 1.52 \, e^- / \text{ADU}$

► G valittu $\Rightarrow$ AD-muuntimessa $n_e \equiv U' \rightarrow I_{CCD}$ muunnoksen säätö

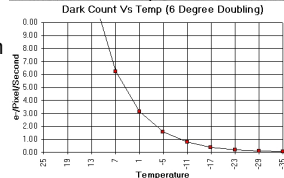
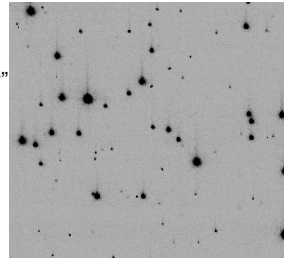


CCD-sirun rakenne ja toiminta

CCD-sirun rakenne ja toiminta

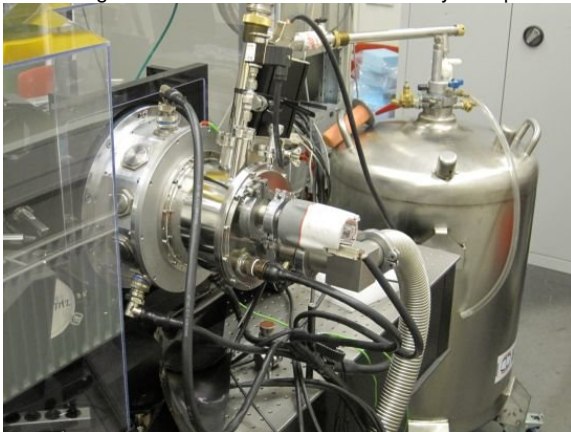
(kuvat:@www.stsci.edu, @www.ccd.com)

- ▶ Elektronien siirto pikselistä toiseen $\Rightarrow$ **Paljonko siirtyy?**
- ▶ Varaussiirtotehokkuus = CTE = "Charge Transfer Efficiency"
- ▶ **Huono** CTE=99.9% $\equiv 0.999 \Rightarrow N = 1000$ siirtoa
 $\Rightarrow$ Jäljellä $CET^N = 0.999^{1000} = 0.368 \equiv 36.7\%$
 $\Rightarrow$ Taakse jääneitä elektroneja
 $\Rightarrow$ **Tähdillä "häntä" (yläkuva)**
- ▶ **Hyvä** CTE=99.999% $\equiv 0.99999 \Rightarrow N = 1000$ siirtoa
 $\Rightarrow$ Jäljellä $CET^N = 0.99999^{1000} = 0.990 \equiv 99.0\%$
- ▶ **Pimeävirta** (engl. Dark current): Atomien lämpöliike
 $\Rightarrow$ Vapaita e^- ja p -aukkoja $\Rightarrow$ Kohinaa kohteiden signaaliin
- ▶ Puolijohde & eriste rajapinnassa paljon energiatiloja valenssi- ja johtovyön välillä $\Rightarrow$ Suurin pimeävirran lähde
- ▶ **Si:** Muutos $\Delta T = -10C^\circ$
 $\Rightarrow \sim 1/3$ pienempi pimeävirta (**alakuva**)
- ▶ **Jäähdytys** $\Rightarrow$ Pimeävirta heikkenee $\Rightarrow$ Nestemäinen tyyppi ($-140 < T < -90C^\circ$)
- ▶ CCD suljetaan **kryostaattiin** $\Rightarrow$ Detektorin paino kasvaa



Kryostaatti

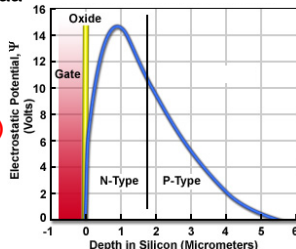
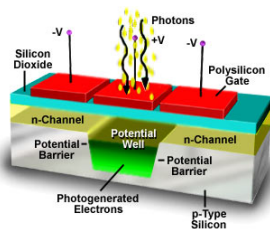
Painava kryostaatti sijoitetaan kiinteään paikkaan Coude tai Nasmyth fokukseen. Kuvassa näkyy ESO Standard Continuous Flow Cryostat (Roelfsema et al. 2010, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7735)



CCD-terminologiaa

CCD-terminologiaa (kuvat: @www.olympusmicro.com)

- ▶ Kaikissa CCD: e^- vangitaan & luetaan
 - Paljon erilaisia teknisiä ratkaisuja: Ei vakiintuneita s
- ▶ **Frontside illuminated** (elektrodit edessä) versus **Backside illuminated** (elektrodit takana $\Rightarrow$ ohut)
- ▶ **Buried channel CCD**
 - Yleisimmin käytetty CCD konstruktio
 - **Aiempi konstruktio:** vangitut e^- lähellä eristepintaa $\Rightarrow e^-$ siirto $\Rightarrow$ osa tarttuu eristepinnan kidevirheisiin $\Rightarrow$ CTE huononee
 - **Buried channel konstruktio:** n-tyyppin Si kerros eristeen ja p-tyyppin Si kerroksen väliin (**yläkuva**) $\Rightarrow$ Potentiaalinimi kauemmas eristeestä (**alakuva**) $\Rightarrow$ $\boxed{+}$ CTE paranee $\Rightarrow$ $\boxed{-}$ $\max[n_e]$ pienenee hiukan
- ▶ **Frame transfer & Interline CCD**
- ▶ – Kuvailtu **täällä** www kohdassa "Figure 5"
 - Videotajuus (25kuvaa/s) $\Rightarrow$ Ei tähtitieteessä



CCD-terminologiaa

CCD-terminologiaa

(kuva: @www.te-les-koop.nl, @www.ccd.com)

► Antiblooming

- Kapasiteetti $\max[n_e]$ ylittyy
 ⇒ Elektroneja vuotaa viereisiin pikseleihin
 ⇒ Ongelma kirkkaiden kohteiden lähellä
 ⇒ Läheiset himmeät vaikea havaita

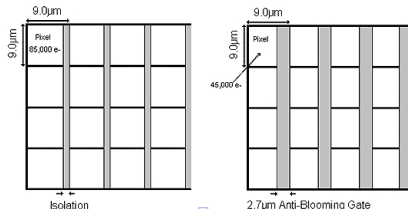
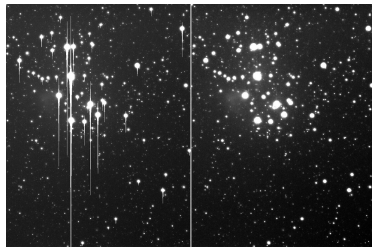
► Ratkaisuja

- **Summataan useampi lyhyt valotus**
 ⇒  Antiblooming poistuu
 ⇒  Summataa kuvien lukukohina

Antiblooming gate

- Ylimääräinen varaus voidaan purkaa
 ⇒  Antiblooming poistuu
 ⇒  QE pienenee

- Loputtomasti termejä: **“Multiphase pinned (MPP) mode”** 
“RGB” 



Kohina

Kohina (kuva: @lj)

- **Kohina:** Pikseliarvojen satunnaista vaihtelua
 - Eräs laajempi **kuvaus** [www](#)
 - Lähteitä: Statistikka (mm. Fotonikohina), CCD (mm. Lukukohina), Ulkoisia (mm. Kosmiset säteet)
- **Fotonikohina:** “photon noise”, “**shot noise**” [www](#)
 - Fotonien saapumisajat satunnaiset
 - Saapumiset ajassa tasajakautuneet
 $\equiv$ Keskimääräinen fotonivuo: $\mathbf{N} = [\text{fotonia/s}]$
 $\equiv$ Poisson jakauma
 - **Tapahtuma A: Ajassa t mitataan n fotonia**

$$P(A) = p(n, t) = [(\mathbf{N} t)^n e^{-\mathbf{N} t}] / n!$$

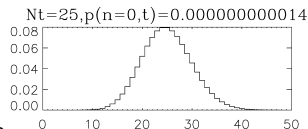
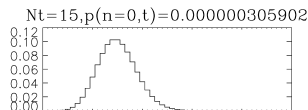
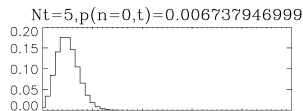
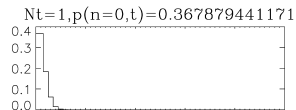
$N = \mathbf{N}t$ = Mitattujen fotonien määrä $\Rightarrow$

Poisson jakaumalle $\sigma_{\text{rms}}(N) = \sqrt{N}$

$N = \mathbf{N}t \geq 15 \Rightarrow p(n, t) \rightarrow$ **Normaalijakauma**

– Esim: Mitattu $N = 2000 \Rightarrow$ Virhe $\sqrt{2000} = 44.7 \equiv 2.2\%$

Fotonikohina $\equiv$ “Minimi kohina” $\equiv$ Mahdoton eliminoida



Kohina

Kohina (kuva: @www.astrobites.org)

► Fotonikohinasta:

– **Signaali kohina suhde**

(engl. Signal to Noise ratio)

$$= "S/N" = N / \sigma_{\text{rms}}(N)$$

$$= N / \sqrt{N} = \sqrt{N} \text{ paranee pidemmillä } t \text{ arvoilla}$$

– B = "Lyhyt t , Paljon fotoneja"

$$\equiv p(n \rightarrow \infty, t \rightarrow 0) > 0$$

– C = "Pitkä t , Ei fotoneja"

$$\equiv p(n = 0, t \rightarrow \infty) > 0$$

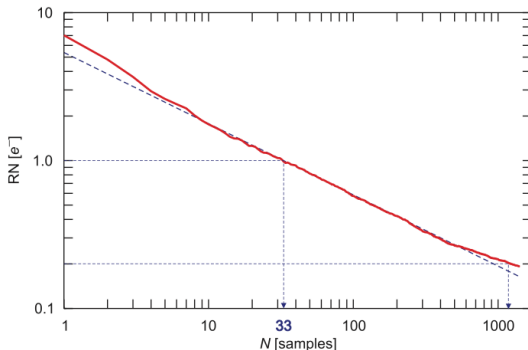
– B ja C mahdollisia, mutta epätodennäköisiä

► Lukukohina (engl. readout noise)

– AD-muunnin: $n_e \equiv U' \rightarrow I_{\text{CCD}} \Rightarrow$ Tyypillisesti $\sim 5 \times e^-$, Parhaat CCD: $1 \times e^-$

– Mahdoton eliminoida havaintojen jälkeen

– **Kuvan** [www-osoitteessa](http://www.astrobites.org) selitetään, kuinka lukukohina voidaan vähentää, jos käytetään kuvien summan **keskiarvoa**



Kohina

Kohina (kuva: @www.astro.uni-bonn.de)

► Pimeänvirran kohina

(engl. dark noise)

- Integrointi ajassa t pimeävirta “valottaa”
- Pimeävirta vaihtelee pikselistä toiseen
- Suurin osa: pieni pimeävirta = $[N_D] = e^-$
- Pieni osa: kirkkaat pikselit $\equiv$ Suuri pimeävirta = $[N_D] = e^-$
- **Ominaisuus pysyvä**
 - $\Rightarrow$ “dark-kuvia”
 - $\Rightarrow$ Vähennetään N_D
 - $\Rightarrow$ Jää kohina $\sqrt{N_D}$



► **Pimeänvirran kohina** $\equiv \sqrt{N_D}$

- Oletus: N_D vähennetty

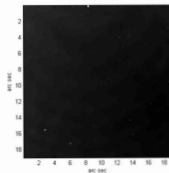
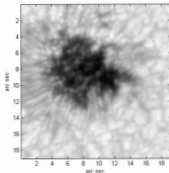
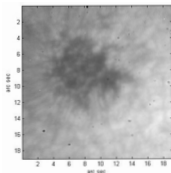
Kohina

Kohina (kuva: @www.intechopen.com, @www.photometrics.com)

► Pikselien herkkyysvaihtelut

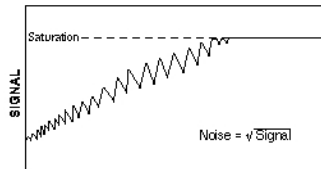
– Herkkyyss vaihtelee ⇒ Havaitaan tasaista taustaa ⇒ **“Flat-field correction”**

www



► Muut kohinalähteet

- **Kosmiset säteet:** Tuhansia e^- ⇒ Piikkejä
- **Blooming/Antiblooming:** Paljon e^- ⇒ Vuotavat viereisiin pikseleihin
- **Saturaatio:** AD-muuntimen skaala ylittyy
⇒ “Noise clipping” (alin kuva)
- **Epälineaarisuus:** Lähellä saturaatiota
osa e^- karkaa tyhjennysalueesta
- **Deferred charge:** Vähän e^- ⇒ Jäävät siruun
⇒ Jäävät lukematta ⇒ Ei ongelma uusissa CCD



Kohina

Tärkeä muistaa!!!

- CCD kohina laskut suoritetaan **AINA** $[n_e]$ **yksiköissä**
- Tehdään siis alussa kaikille muuttujille muunnos

$$[n_e] = G [\text{ADU}]$$

- Kun kaikki laskut on tehty, voidaan kaikille muuttujille tehdä muunnos

$$[n_e]/G = [\text{ADU}]$$

- **Gaussin jakauma:**

$$\rightarrow f(A, B, C..)$$

$$\rightarrow \sigma_f^2 = \left[\frac{\partial f}{\partial A}\right]^2 \sigma_A^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial B}\right]^2 \sigma_B^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial C}\right]^2 \sigma_C^2 + \dots$$

- **Esimerkit taululla:**

$$f(A, B) = A + B$$

$$f(A, B) = A - B$$

$$f(A, B) = AB$$

Kohina

Kohina

- ▶ Tunnetaan: G (vahvistuskerroin) ja R (lukukohina) $\Rightarrow$ Arvio CCD-havainnon kokonaiskohinasta $\Rightarrow$ Havainnot suunniteltavissa etukäteen
- ▶ $A \pm \sigma_A$ ja $B \pm \sigma_B$ satunnaismuuttujia $\Rightarrow$ Summan $C = A + B$ virhe on $\sigma_C^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2$
- ▶ Kohinalähteiden A, B, C,... **kohinalaskut suoritetaan yksiköissä $[e^-]$** $\Rightarrow$
 $X = A + B + C + \dots \Rightarrow$ Summan virhe $\sigma_X^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2 + \dots$
- ▶ **Oletus: Poisson $\Rightarrow$ Gauss $\Rightarrow$ Summattavissa & Vähennettävissä!**
- ▶ **Esimerkki 6.1.** Havaitaan tasaisesti valaistua kohdetta (esim. iltataivas)
 - 1. Oletus: Pimeävirta = $N_D = 0$ ja herkkyyssvaihtelut flat-field korjattu
 - 2. Oletus: Lukukohina = R tunnettu ja annettu $[e^-]$ yksiköissä
 - 3. Oletus: Havaitaan $I_{CCD} = N$ **ADU**, missä vahvistuskerroin G tunnettu
- Kysymys:** Mikä on kuvan rms-kohina ("root mean squared"=kokonaiskohina) σ_N ?
- Oletus 1. $\Rightarrow$ Kuvassa **vain fotonikohinaa** ($\sigma_A = \sqrt{I_{CCD}}$) ja **lukukohinaa** ($\sigma_B = R$)
- Muunnos $I_{CCD} = N$ **ADU** = $G N e^- \Rightarrow$ Yksiköissä e^- : $\sigma_A = \sqrt{I_{CCD}} = \sqrt{G N}$
- Kokonaiskohina yksiköissä e^- : $\sigma_N^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 = (\sqrt{G N})^2 + R^2 \Leftrightarrow \sigma_N = \sqrt{G N + R^2}$
- Kokonaiskohina yksiköissä **ADU**: $\sigma_N = [\sqrt{G N + R^2}]/G$

Kohina

Kohina

► Esimerkki 6.2.

- Summataan kaksi tasaisen taustan kuvaa, joiden keski-intensiteetit N_1 ADU ja N_2 ADU. Mikä on summatun kuvan rms-kohina, jos muut oletukset ovat samat kuin edellisessä esimerkissä 6.1.?

Yksiköissä e^- : Kuvan 1 kohina $\sigma_1 = \sqrt{R^2 + GN_1}$

Yksiköissä e^- : Kuvan 2 kohina $\sigma_2 = \sqrt{R^2 + GN_2}$

Yksiköissä e^- : Summatun kuvan kohina $\sigma_{1+2}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 2R^2 + G(N_1 + N_2)$

Kokonaiskohina yksiköissä e^- : $\sigma_{1+2} = \sqrt{2R^2 + G(N_1 + N_2)}$

Kokonaiskohina yksiköissä **ADU**: $\sigma_{1+2} = \frac{\sqrt{2R^2 + G(N_1 + N_2)}}{G}$

Yleistys summattaessa M kuvaa, joilla intensiteetit $N_1, N_2, \dots, N_M$ saadaan

kokonaiskohina yksiköissä **ADU**: $\sigma_{1+2+\dots+M} = \frac{\sqrt{MR^2 + G(N_1 + N_2 + \dots + N_M)}}{G}$

- Kaavat 6.4: Efektiiviset G_{eff} ja R_{eff} annettu/johdettu epäselvästi. Esimerkiksi oletus **“Poisson $\Rightarrow$ Gauss $\Rightarrow$ Summattavissa & Vähennettävissä!”** ei toimi mediaanille $\Rightarrow$ Ei huomioida **esimerkkiä 6.3.**

Signaalin ja kohinan suhde

Signaalin ja kohinan suhde (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

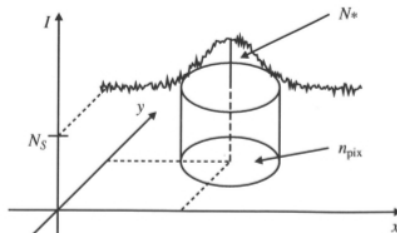
- ▶ S/N = Signaali kohina suhde
- ▶ S/N riippuu tilanteesta: **Mitä ja miten mitataan**
- ▶ Kuvan CCD esimerkki: pistemäinen kohde
- ▶ Kohteesta havaitaan N_* elektronia e^-

Ideaalitapaus

- 1. Ei instrumentaalista kohinaa
- 2. Vain fotonikohinaa
- 3. Tausta tumma ($N_S = 0$)
- 1 & 2 & 3. totta $\Rightarrow S/N = N_*/\sqrt{N_*} = \sqrt{N_*}$

Todellisuus

- Instrumentaalikohinaa ei voi eliminoida
- Taustaa on aina maan päällä tehdyissä havainnoissa
- Muita virhelähteitä: kosmiset säteet, pikselien herkkyyssvaihtelut, ...



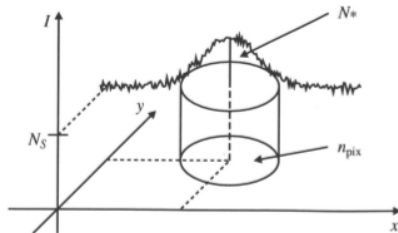
► Arvio ylärajalle (S =Signal, N =noise)

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

$$R = \text{lukukohina } [e^-]$$

- ▶ “Tämä kaava antaa yliarvion tarkkuudesta”
- ▶ N_D ei ole vakio kaikissa n_{pix} ?
- ▶ Pikseliherkkyys vaihtelun korjaus (flat-field)?
- ▶ $N_\star$ arvon määrittäminen?

Kysymys: Mistä/miten tämä kaava on johdettu?



Signaalin ja kohinan suhde

Signaalin ja kohinan suhde (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

- **Oma “arvaukseni”:** Yksiköt [e^-] $\Rightarrow$ **“Poisson $\Rightarrow$ Gauss $\Rightarrow$ Summattavissa & Vähennettävissä!”**

- **Mitattu** $N = N_\star + n_{\text{pix}}(N_S + N_D + R)$

$$\begin{aligned}\sigma_N^2 &= \sigma_{N_\star}^2 + n_{\text{pix}}(\sigma_{N_S}^2 + \sigma_{N_D}^2 + \sigma_R^2) \\ &= (\sqrt{N_\star})^2 + n_{\text{pix}}[(\sqrt{N_S})^2 + (\sqrt{N_D})^2 + R^2] \\ &= N_\star + n_{\text{pix}}[N_S + N_D + R^2]\end{aligned}$$

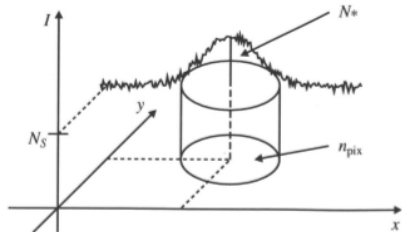
- **Noise** = $N = \sigma_N = \sqrt{N_\star + n_{\text{pix}}[N_S + N_D + R^2]}$

- **Signal** = $S = N_\star$, **jos mitatusta** N poistetaan termi $n_{\text{pix}}(N_S + N_D + R)$

- Tämä selittäisi edellisen sivun tuloksen

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

- Termin $n_{\text{pix}}(N_S + N_D + R)$ poisto vaatii mm. taustan (N_S) mittaamisen ja vähentämisen $\Rightarrow$ Lisää kohinaa $\Rightarrow$ **“Yläraja” S/N :lle**



Signaalin ja kohinan minimointi

Signaalin ja kohinan minimointi (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

▶ Jos edellisen sivun kaava totta

⇒ S/N paranee, kun nimittäjä

$\sqrt{N_{\star} + n_{\text{pix}}(N_S + N_D + R^2)}$ pienenee

▶ n_{pix} pienentäminen: seeing, optiikka, seuranta, pikselikoko versus f ...)

▶ N_S pienentäminen: hyvä havaintopaikka

▶ N_D pienentäminen: CCD:n jäähdytys

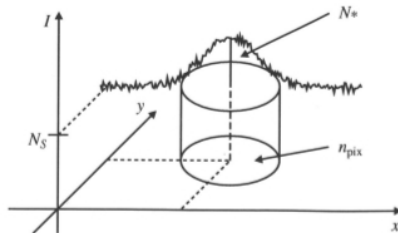
▶ R pienentäminen: hyvä lukuelektroniikka

▶ Fotonikohinan $N_{\star}$ pienentäminen: pidempi valotusaika tai suurempi teleskoopin D

▶ **Tausta rajoittaa:** $N_S \gg R^2 \Rightarrow$ Yksi pitkä valotus tai monta lyhyempää integrointia $\Rightarrow$ Sama tulos

▶ **Lukukohina rajoittaa:** $R^2 \gg N_S \Rightarrow$ Yksi pitkä parempi $\Rightarrow$ Ei summata lukukohinaa

▶ **Päätettävä:** Monta lyhyttä "onnistunutta" **versus** pitkiä & vähemmän & osa epäonnistuu (mm. kosmiset säteet)



CCD-havainnot

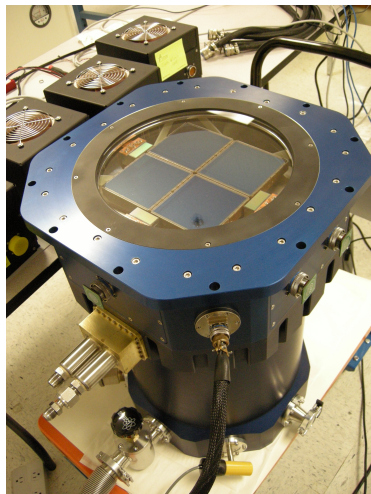
CCD-havainnot

(kuvat: @www.sta-inc.net, @www.opticstar.com)

► Yleiskuvaus vaiheista

1. Kameran jäähdytys

- Ennen havaintoja
- Lämpötila ehtii stabiloitua
- Nestemäinen tyyppi $\Rightarrow$
 $T \approx -110\text{C}^o$
- Sähköinen jäähdytys $\Rightarrow$
Ympäristön $T - 30\text{C}^o$



CCD-havainnot

CCD-havainnot

(kuvat: @www.astro.uni-bonn.de, @www.atscope.com.au,

@www.mirametrics.com)

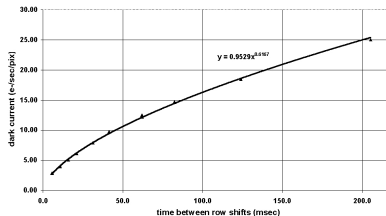
2. Pimeänvirran mittaus

- CCD-kuvia suljin kiinni
- Tehtävissä päivällä
- **Useita integrointiaikoja** $\Rightarrow$ Tarkat $N_D(t)$ arvot
- Stabiilin T :n merkitys!

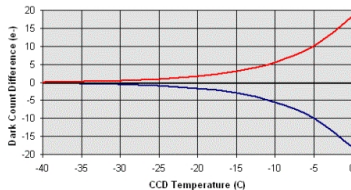
Effect of Temperature on Dark Current



CCD42-20 NIMO
TDI dark current @-30C



Dark Count Difference for $\pm 0.2^\circ\text{C}$ Variation.
300 sec exposure, KAF-0400 CCD, 9 micron pixels.



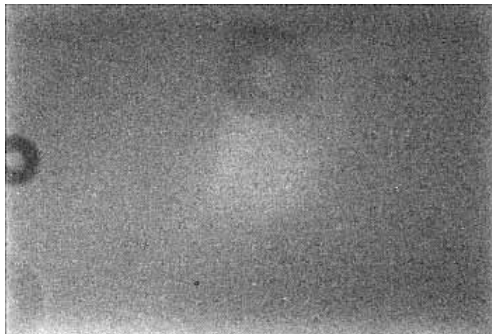
CCD-havainnot

CCD-havainnot

(kuva: @starizona.com)

3. Flat-field kuvat

- CCD-kuvia tasaisesta taustasta
- “A typical flat field image showing slight vignetting as well as dark halos from dust ...”
- Iltataivas: Lyhyt valotus
- Ei saturoidu $\Rightarrow$ Tallenna
- Joka filterille omat valotukset
- Herkkyys: Esim. U, B, V, ...
- Tähdet näkyy $\Rightarrow$ Lopeta
- Havaintokuvat jaetaan redusointaessa flat-field kuvilla
 $\Rightarrow$ Eliminoi pikselien herkkyysvaihtelut



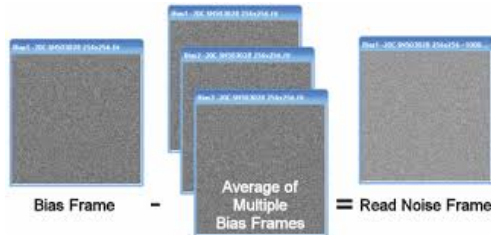
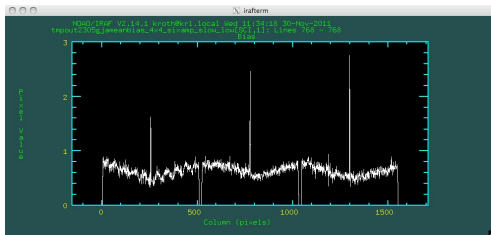
CCD-havainnot

CCD-havainnot

(kuvat: @qsimaging.com, @www.gemini.edu)

4. Bias-kuvat

- **Selitetään vasta seuraavassa kappaleessa (kuva 7.2)?**
- Lukukohina R leikkaa heikkommat signaalit
- Ratkaisu: lisätään vakio tason signaali $\Rightarrow$ Ei leikkaudu
- **Ennen digitointia**
lisätään vakio bias-jännite
- Ei havaintoa & vain bias-jännite $\Rightarrow$ Bias-kuva
- Vähennetään bias pois kuvia redusoidessa
- Useita bias-kuvia yön aikana
- Keskiarvoista arvio lukukohinalle R



CCD-havainnot

CCD-havainnot

(kuvat: @starizona.com, @my.starstream.net)

5. Fokusointi

- Taivas tumma
⇒ fokusoidaan teleskooppi
- Kirkas tähti: 5–10 s
⇒ Seeing mitattu
- Huono fokusointi (yläkuva)
⇒ “Munkkirinkeli”
- Hyvä fokusointi (alakuva)
⇒ “Seeing kiekko”
- Filtteri ⇒ Eri polttopiste?
- Öinen lämpötilan muutos
⇒ Muuttuuko polttopiste?

6. Varsinaiset havainnot & tallennus

7. Aamuhämärä: Lisää flat-field?

8. Suljetaan torni

