

# ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

## Detectors and Instrumentation

### 7 Charged-coupled devices

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/5/17

## ● 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## ● 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## ● 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

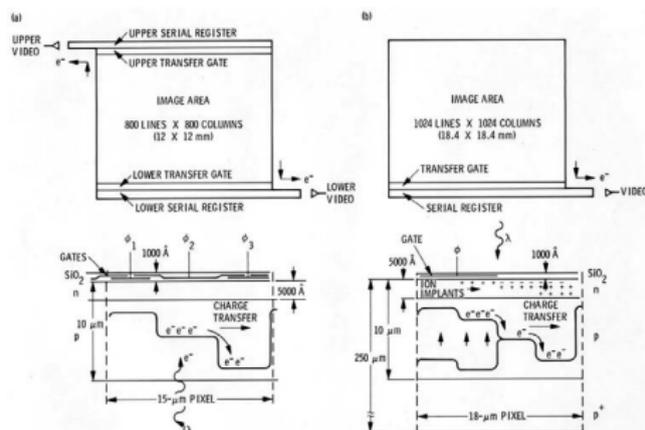
## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.3.5 Backside-illuminated CCDs

- 7.3.4 までの CCD では photon flux はシリコンの depletion region の上にある電極部分を通り抜けなければならなかった  
⇒ 電極で青い光が吸収されてしまう...
- 改善策
  - Virtual-phase CCDs
  - Backside-illuminated CCDs
- Backside-illuminated CCDs
  - CCD をひっくり返して裏側から光を照射
  - 有効にするためには構造的化学的に薄くしなければいけない ( $10\mu\text{m}$  程度)
  - 薄くしすぎると赤い光に感度がなくなる

Fig 1: Mclean 教科書より



## 7.3.5 Backside-illuminated CCDs の欠点

- 薄いので構造的に脆くゆがみやすい
  - ⇒ サポート基板に取り付けられる
- CCD 基盤内やシリコンとサポート基盤の間での多重反射
  - ⇒ 干渉フリンジができる
  - ⇒ 撮像ではコンピュータプロセスやキャリブレーションテクニックで無視できるが、分光では深刻な障害に

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.3.6 CCD での暗電流について

- Si-SiO<sub>2</sub> の界面での表面状態による熱励起が支配的
  - 表面暗電流は CCD の他の部分によるものの  $10^2 - 10^3$  倍
- Si-SiO<sub>2</sub> 界面での暗電流をコントロールする二つのファクター
  - 界面状態の密度
  - 界面状態にいる free carrier の密度
- 電子の密度の観点で...
  - 電子は価電子帯 → 界面状態 → 伝導帯と遷移 ⇒ electron-hole pair (CCD のポテンシャル井戸に捕まる)
  - free carrier は界面状態を埋めて励起を防ぎ、暗電流を減らせる ⇒ CCD の基本操作が逆のことをする。
  - ゲート電極の電圧が Si-SiO<sub>2</sub> 界面での表面ポテンシャルをシリコン基板ポテンシャルより大きくするような CCD では、結果としての depletion が free carrier をすべて追い払う → 暗電流が最大に
- 界面状態の密度のみでコントロール (製作過程でどうにかするしかない)

## 7.3.6 Multi-pinned CCDs

- もし CCD を” 逆の” モードで動かせれば、channel stop region からの hole が inverted gate の下の界面状態に移動して表面暗電流を消す (hopping site を埋める)
- 3 phase CCD ですべて電圧負にするとポテンシャル井戸がなくなる  
⇒ 部分的に反転  
(collecting phase( $\varphi_1 = 3\text{ V}$ )、barrier phase( $\varphi_2 = \varphi_3 = -8\text{ V}$ ))
- Multi-pinned phase CCD
  - 全体的に反転モードで動かせる
  - charge storage capacity のためのオフセットがどこかの phase に必要。
  - 3 phase CCD では phase3 のシリコンにボロンをドーピング (buried channel のリンの効果打ち消し、そのポテンシャルを減らす)  
⇒ phase1,2 は collect region, phase3 は barrier phase
  - phase3 にリンを多くドーピング → phase3 が collect, phase1,2 が barrier
  - ポテンシャル井戸の深さはインプラントによるポテンシャルで決まる (部分的な反転の場合より低い)

## 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs での暗電流注意点

- 過剰な光が溜まりすぎたり、装置が冷えているときに CCD への電源が切れて saturation  
⇒ トラップされていた電荷が一時間ほど暗電流を上げる (ファクターで 2,3 倍)
- inverted potential の場合には hole にも注意
  - inverted gate の場合、hole がその下に集まる (surface-to-substrate ポテンシャルを pinning する)
  - いくつかの hole は Si-SiO<sub>2</sub> interface に捕まり、clock が普通に戻ったときに加速して飛び出し衝突電離を起こす ("spurious charge")
  - それぞれの pixel transfer で spurious charge が生じ、ショットノイズ的に他のノイズよりも大きな影響がある

## 7.3.6 spurious charge による雑音軽減

- 3つの方法

- drive clock の立ち上がり時間をゆっくりにする (RC 回路)
  - ⇒ hole がゆっくり channel stop に帰る
- clock 電圧のふり幅を効率との兼ね合いで可能な限り小さくする
  - ⇒ 電場が小さくなり、加速も小さくなる (spurious charge が生じにくくなる)
- tri-state clocking scheme
  - inverted state と complete charge transfer の間の clock level を挟む
  - inverted → intermediate → complete と変化させることでトラップされた hole がゆっくり酸化物から離れる

## 7.3.6 vertical register と horizontal register

- MPP CCD の vertical register
  - つねに inverted で低暗電流
  - imaging pixel の高い容量 (clock edge をゆっくりにする) により spurious charge を防ぐ
- MPP CCD の horizontal register
  - より素早く clock されて、もし継続的に inverted ならば多くの charge を作り出す
  - 結果として、MPP implant は受けない
  - 反転させたりスイッチする vertical-phase(VP)CCD ではこうではない
- horizontal register での効果で生じた spurious charge が Galileo chips のシステムノイズを制限する

## 7.3.6 MPP technology の他の利点

- 表面に残ってしまう image charge や pixel の不均一性の改善
- 高エネルギー輻射への耐性があがる
- 素早く像を消せるようになる (inverted phase での hole が多いことからトラップされた charge が中和される)
- "anti-blooming"
  - 積分中、 $\varphi_3$  が inverted で barrier phase
  - $\varphi_1, \varphi_2$  の下に光電子がたまる
  - phase1,2 は inverted state と optimum full-well voltage の間を switch する
  - 二つの phase のうち一方が飽和し Si-SiO<sub>2</sub> 界面に charge がトラップされ始めると invert される
  - これによって生じた hole がトラップされた電子を中和
  - 同時に電子がもう一方の phase にたまり、電子は再び酸化物に入りトラップされる
  - phase1,2 は戻され、二つ目の電極下のトラップされた charge が打ち消される

- 7.3 CCD Constructions
  - 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
  - 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs
- 7.4 Astronomical Requirements
  - 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
  - 7.4.2 CCD mosaics
  - 7.4.3 Drift scanning
- 7.5 Special Devices
  - 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
  - 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
  - 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
  - 7.5.4 Customized CCDs

## 7.4.1 slow scanning

- 暗い光源からの charge image を積み上げるために長時間露光が必要
- CCD の読出しを素早くやってはいけない
  - 電荷輸送効率が損なわれる
  - 読み出しノイズが大きくなる
- astronomical CCD はとても遅く読みだされる  
⇒ "slow scan"
- 典型的な読み出し効率は 50,000pixels/s (50kHz) (100 万 pixel の読出しに 20 秒)
- 読み出し中は露光してはいけず長く感じるかもしれないが、露光時間 (1,000s) に比べると短い

## 7.4.1 cooling

- 長時間露光の露光では暗電流も問題に
- 影響を小さくするために CCD は十分に冷やされる ⇒ 霜を避けるために真空チャンバーが使われる
- MPP CCD の発明は冷却の必要性を減らした  
しかし、分光への応用にはさらなる冷却が必要で、観測所の CCD では液体窒素冷却を使っている

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.4.2 mosaic of CCDs

- 多くの pixel を持ったカメラを作る
- CCD を組み合わせて大きなモザイク状にする
  - 三辺が接続していない  $\Rightarrow$  他の CCD と近づけられる
  - 四つ目の辺では接続部分ができるだけ小さく作られている
- 例) MegaCam, Pan-STARRS 1.4-gigapixel camera
- 広域サーベイの効率を表す指標:  $\Omega D^2 q$ 
  - $\Omega$ : 視野立体角
  - $D$ : 望遠鏡直径
  - $q$ : seeing disk が sampling で分解されると仮定する装置の情報処理/量子効率
  - ある領域のサーベイにかかる時間がこの量に反比例する

## 7.4.2 multi-CCD mosaic を作る苦勞

- CCD の packaging やカメラヘッドのデザインなどが大変
- いくつかの wide-field imager は焦点面が曲がっている  $\Rightarrow$  曲面に CCD を並べる or 大きな field-flattening lens を導入する
- 焦点面がフラットでも depth of field(被写界深度 DOF) が問題になる  $\Rightarrow$  DOF が浅い fast optical system で CCD は  $25\mu\text{m}$  よりもよく共通平面内にある必要がある
- 各チップは十分に冷却される必要がある
- 個々のデバイスを取り除いたり交換する容易な方法が必要

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.4.3 Drift scanning

- non-tracking telescope で用いる
- CCD はその column に沿って露光の間ゆっくりと読みだされる
- 移動する charge image に photon image が重なるように mechanical platform が検出器を同じ速度で反対方向に動作させる
- 光源は column のすべての pixel でサンプリングされるため pixel 間の変化が取り除かれる
- 積分時間はスキャン速度と CCD のサイズによる

## 7.4.3 Time-delay integration (TDI)

- TDI は drift scanning と以下の点を除いて似ている
  - CCD が動かない
  - 望遠鏡の動作が切られている
  - 電荷の読み出しが sidereal rate
- column のすべての pixel が関わるため flat fielding では drift scanning と同じ利点
- 積分時間は CCD chip のサイズで決められる  
⇒ scan 方向に  $N$ pixel をもち、それぞれが空の  $\theta$ arcsec に対応するとき (declination  $\delta$  で)

$$t_{\text{int}} = (N\theta/15.04) \cos \delta$$

- TDI では東西に伸びた PSF になる (星の動きは連続だが CCD charge の動きは不連続だから)
- declination の非常に小さな違いの天体は移動速度に違いがある  
⇒ 積分時間に違いが出てくる

## 7.4.3 SDSS

- 30 CCDs(2,048×2,048 pixels), 6 columns×5 rows
- 大圏に沿って TDI スキャン  
→ 2.5° の幅の帯状画像を取る
- row に対して垂直に TDI scan
- それぞれの row では異なる光学フィルター
- 実効的な積分時間は 54s だが、row の間に隙間があるため (not close-buttable)、ある row の始めから次の row までは 72s(time delay)

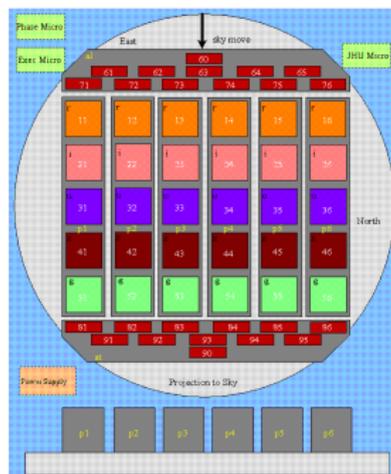


Fig 2: <http://skyserver.sdss.org/edr/jp/sdss/instruments/instruments.asp>

## 7.4.3 imager for Oschin Schmidt telescope

- $122(28 \times 4) \text{CCDs}(600 \times 2400 \text{ pixels}) = 4.6^\circ \times 3.6^\circ$
- CCD の clocking 方向は column 方向で東西にそろえられ、TDI は sidereal rate で起こす
- 四つの row は異なるフィルター
- 望遠鏡は動かない
- 赤道以外の赤緯では星は弧状に動き (南北方向のにじみ)、南北方向の位置の違いで移動速度も違う  $\Rightarrow$  CCD を回転させて弧の接線方向に clocking 方向が一致するようにする (CCD を Invar finger の上に設置)、また column 内で declination の違う位置をスキャンするので少し clocking rate が異なる

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.5.1 L3CCD

- CCDには本質的に生じる読出し noise がある
- *e2v technologies* の新技術 L3CCD (low light level CCD)
  - 読み出しノイズを大幅に減らせる
  - 読み出し速度 (読み出しノイズを引き起こすもの) を上げられる
  - 普通の CCD に extended output register を付けて構成される

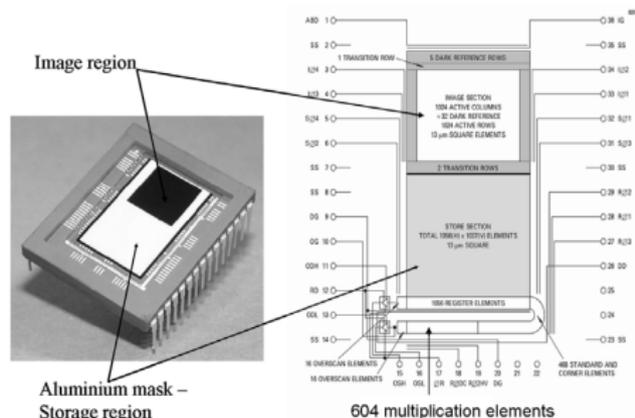


Fig 3: Mclean 教科書より

## 7.5.1 L3CCD extended register の動作原理

- clock が 10V のふり幅なら普通の serial register
- electrode の設計
  - clock が高い電圧 (40V 程度) の時、1-2%の確率でその electrode に輸送された電荷が雪崩増倍によって二つの電荷を発生させる
  - このようなことを起こせる element を多く持っていれば PMT のカスケードのように大きな gain が得られる
  - extended register の最後に普通の増幅器もさらに使える
- readout noise は出力増幅器のトランジスタ内の電圧ノイズ  
⇒ 対応する電子の数  $R$  で表される
- extended register によるゲイン  $G$  のおかげで readout noise は  $R_{\text{eff}} = R/G$  に減る
- 高速読み出しでも普通の slow scanning と同じ readout noise に

## 7.5.1 L3CCD の SN 比

- photon-counting mode で使われ、冷却により暗電流が無視できるとき

$$\text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{2S + (R/G)^2}} \quad (1)$$

- $2S$ : photon shot noise
- pixel で  $S$  の光電子を記録したとすると、増幅後の不確かさは  $\sqrt{2S}$  ( $\sqrt{S}$  ではない)  $\Rightarrow$  高シグナル適用での量子効率のファクター 2 での減少に対応
- この問題は CCD を本物の image photon-counting system として使うことで解決
- L3CCD は何百枚も一秒間で frame を読み出すので photons/pixee/s が相当な量

## 7.5.1 CCD controllers

- L3CCD や EMCCDs(Texas Instrument) では高い pixel rate のためこれまでと違ったコントローラが必要
- 新しいコントローラは高い pixel clocking rate と clock edge の正確なタイミングコントロールが可能でなければいけない
- 非常に速いきれいな波形が必要とされ、signal-processing system は高速度でも CCD のフルダイナミックレンジを使えなければいけない
- 現在のデバイスでは"clock-induced charge"(CIC) が示されることが多い(シャープな clock edge に関わる)

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.5.2 silicon 内部での charge generation の位置

- 波長によって深さが違う
  - front-illuminated CCD
    - 可視光はほぼ depletion region で charge generation をする ⇒ depletion region の電場が charge を buried channel まで運び溜める
    - より長い波長ではより深い場所 (field-free silicon) で charge generation ⇒ この charge はランダムに拡散してしまう
  - back-illuminated CCD
    - 長い波長では front side まで吸収されなかった光が反射して干渉フリンジをつくる
- これらを反射防止膜と CCD の active thickness layer 増加で解決

## 7.5.2 Deep-depletion CCD

- depletion の深さは  $\propto V/N_A$   
 $V$ : channel potential,  $N_A$ : buried channel の下のシリコンのドーパの集中度合
- $N_A$  を小さくして depletion region を深くする (高い抵抗  $\rho$ ):  
Deep-depletion CCD  $\Rightarrow$  赤い光に対する感度も改善、フリッジも消える

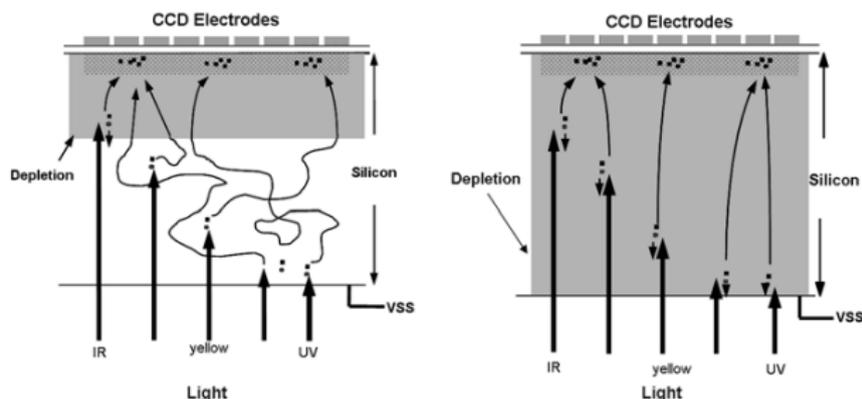


Fig 4: Mclean 教科書より

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.5.3 Orthogonal transfer CCD

- transfer gate が  $90^\circ$  について対称
- charge は垂直方向 (通常方向)、または水平方向に動かせる
- optical image が CCD 状で動くとき、同じ方向に電荷を動かせばよい
- tip/tilt 補正に相当

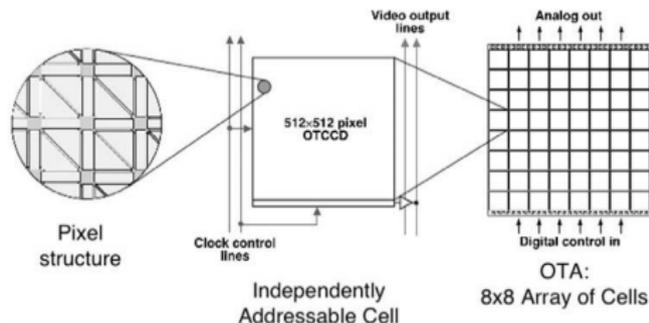


Fig 5: Mclean 教科書より

## 7.5.3 Orthogonal transfer CCD

- 像のにじみの原因
  - 光を受けながら電荷を移動させる  $\Rightarrow$  optical image と collected charge の offset は  $< 0.5\text{pixel}$  なので、1-pixel PSF との convolution
  - charge transfer の不完全性
    - $\Rightarrow$  charge transfer efficiency = 0.99999 なので影響小さい
  - spurious charge  $\Rightarrow$  何千もの shift に比べて影響はない
- Pan-STARRS
  - 焦点面は多くの OTCCD で作られている (64 OTCCD)
    - $\Rightarrow$  適当なガイド星をトラックして、適当なシフトを隣接する OTCCD に適応する
  - 視野が広いので全体で同じ補正ではダメ  $\Rightarrow$  それぞれの領域で補正する

## 7.3 CCD Constructions

- 7.3.5 Backside-illuminated CCDs
- 7.3.6 Multi-pinned phase CCDs

## 7.4 Astronomical Requirements

- 7.4.1 Slow-scanning, cooling, and optimization
- 7.4.2 CCD mosaics
- 7.4.3 Drift scanning

## 7.5 Special Devices

- 7.5.1 High-speed CCDs with on-chip gain
- 7.5.2 Deep-depletion CCDs for no fringing
- 7.5.3 Orthogonal transfer CCDs
- 7.5.4 Customized CCDs

## 7.5.4 その他の特殊な CCD

- charge がその半径方向に中心から clock して行って、速度は円環の関数  $\Rightarrow$  出射軸と主鏡の端の間の大きな間隔で生じるレーザーガイド星の elongation(伸び?離角?) を扱う
- このようなカスタム CCD の主な制限はコスト
- CCD は反射防止コートとともに作られたり、今では internal "electronic" shutter とともに発展している