

Characterization of Skipper CCDs for Cosmological Applications

ABSTRACT

We characterize the response of a novel 250 μm thick, fully-depleted Skipper Charged-Coupled Device (CCD) to visible/near-infrared light with a focus on potential applications for astronomical observations. We achieve stable, single-electron resolution with readout noise $\sigma \sim 0.18 \text{ e}^- \text{ rms/pix}$ from 400 non-destructive measurements of the charge in each pixel. We verify that the gain derived from photon transfer curve measurements agrees with the gain calculated from the quantized charge of individual electrons to within $< 1\%$. We also perform relative quantum efficiency measurements and demonstrate high relative quantum efficiency at optical/near-infrared wavelengths, as is expected for a thick, fully depleted detector. Finally, we demonstrate the ability to perform multiple non-destructive measurements and achieve sub-electron readout noise over configurable sub-regions of the detector. This work is the first step toward demonstrating the utility of Skipper CCDs for future astronomical and cosmological applications.

Background

近傍の地球型太陽系外惑星の直接撮像or分光、暗い星や銀河の多天体分光などの低信号(かつ低背景)領域や、短時間の過渡現象の観測ではnoise budgetで読み出しノイズが支配的になる。

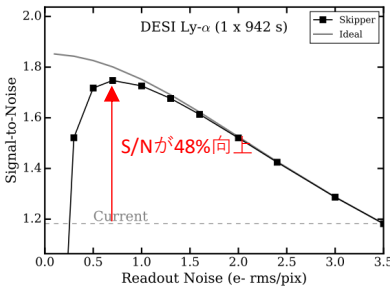
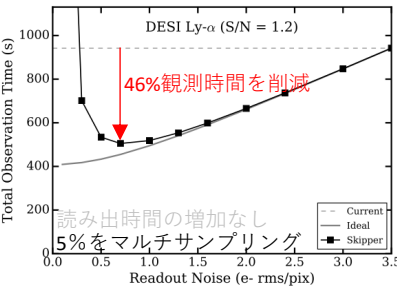
⇒Skipper CCDでsub-electronの読み出しノイズを実現し、S/Nを向上

Motivation

Skipper CCDを使えば読み出し回数を変化させることによって読み出しノイズを任意のレベルまで低減することが可能(読み出し回数に応じて読み出し時間はほぼ線形に増加)

⇒積分時間を伸ばすことでS/Nを向上させることも可能

⇒AB等級がg=22のクエーサーでLyman- α の森を観測するとき、Skipper CCDで読み出しノイズを $\sim 0.5 \text{ e}^- \text{ rms/pix}$ にすれば最も効率よくS/Nを稼げる(全画素の5%のみマルチサンプリングする場合)。



S/N一定の場合 観測時間一定の場合

Characterization

実験1

データ：50行x450(prescan:8+physical:362+overscan:80)列の低照度画像を400サンプル読み出し

手法

オーバースキャンがシリアルレジスタにシフトされるまでに収集される電荷を用いて読み出しノイズ、コンバージョンゲイン等を測定

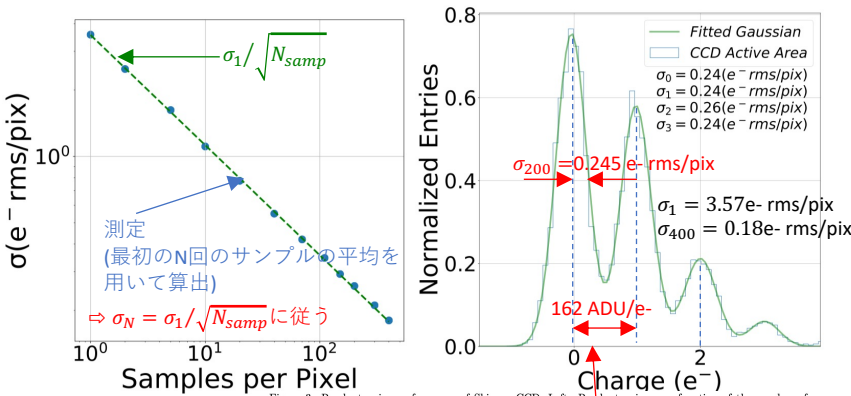


Figure 3: Readout noise performance of Skipper CCD. Left: Readout noise as a function of the number of samples for the Skipper CCD (blue points). Performance closely follows the $1/\sqrt{N_{\text{samp}}}$ predicted from the central limit theorem (green dashed line). Right: Histogram of pixel values calculated from the average of 200 measurements per pixel (blue histogram). Single-electron resolution is clearly achieved with a readout noise of $\sigma_{200} \sim 0.25 \text{ e}^- \text{ rms/pix}$. The peaks in the distribution are well-fit by a multi-Gaussian model (green line). The gain of the CCD can be directly measured from the spacing between peaks.

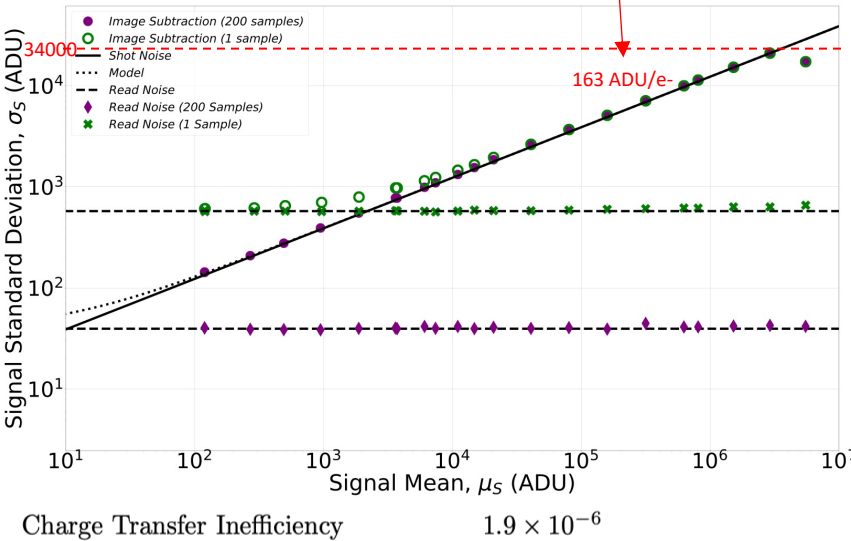
実験2

データ

600nmの波長の光を3種のNDフィルター、1-128sの露光時間の組み合わせで2枚ずつ撮影

手法

差分画像から標準偏差を求め、フォントランスファーカーブを作り、EPER(Extended Pixel Edge Response)法(McLean8章参照)からCTIを求めた。



通常の厚い完全空乏CCDのフルウェル容量は>150000e-今回の結果よりも非常に大きい
⇒希少粒子を観測するために偽信号を減らそうとし、水平レジスタのクロック電圧を下げたことに起因する可能性がある
⇒大きなフルウェル容量が必要な応用のために調整することは可能

実験3

データ：CCDに照射される光を400nmから1100nmの間で20nmステップでスキャンし、各波長設定に対してCCDを5秒間露光。その際に校正済みのフォトダイオードを用いて積分球からの光による電力も測定

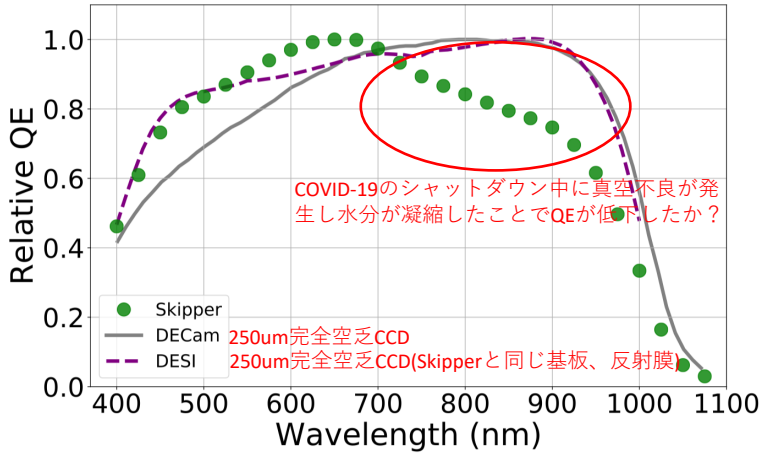
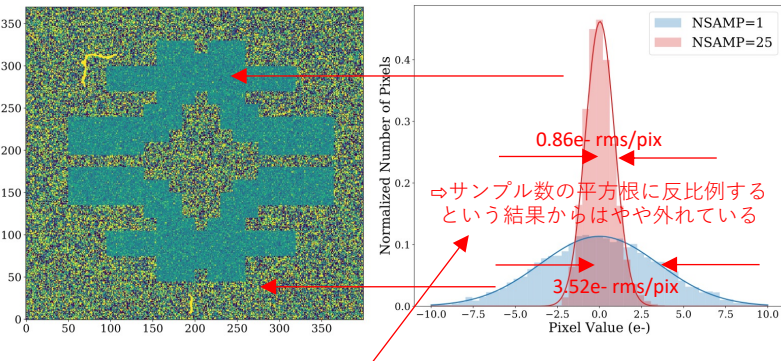


Figure 5: Relative quantum efficiency of Skipper CCD (green circles) compared to the relative quantum efficiency of a DECam CCD (gray line) [30] and a DESI CCD tested at Fermilab (purple dashed line).

実験4

データ：CCDを15x15の領域に分割し、その領域内の読み出し回数を選ぶことができるため、下図の青緑色の領域を25回サンプル、その他を1回サンプリングで26回の露出を非常に暗い中で行った。クロッキングシーケンスの変更によるベースラインのずれは26枚のマルチサンプル画像からマスターバイアスフレームを生成し、補正した。



非常に暗い条件下とはいえ、光子によって分布が広げられたか(実際、上の赤いヒストグラムはやや正に偏っている)
マスターバイアスの統計的ノイズがピクセル値の分布を広げた可能性がある
⇒もっと多くの画像からマスターバイアスを構築する必要がある