

# 超広視野天文観測用 CMOSカメラの検討

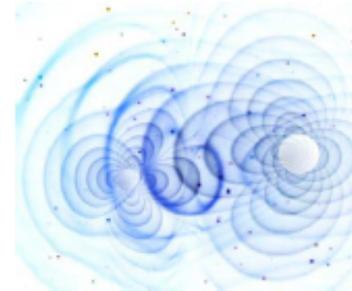
東京大学 M1

西嶋颯哉

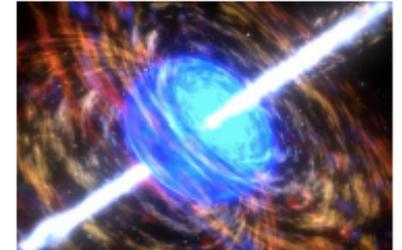
酒向重行、本原顕太郎、土居守

# 超広視野天文学

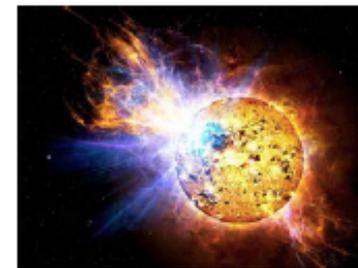
- 超広視野天文学の研究課題
  - 重力波対応天体の探査
  - 超新星の爆発直後の現象
  - スーパーフレア現象
  - ガンマ線バースト
  - 系外惑星トランジット
  - 深宇宙の探査



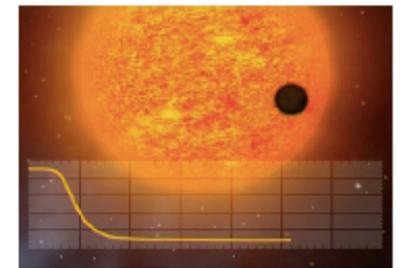
Gravitational wave



Gamma ray burst



Super flare



Planet transit

多くが、**稀な時間変動現象**

「**超広視野**」+「**高速観測**」の要請

# 超広視野高速カメラに求められるスペック

- e.g.1: 重力波対応天体
  - 重力波望遠鏡「KAGRA」
    - 2016年完成予定
  - 重力波検出のエラーサークルは直径~5deg
- e.g.2: 超新星の爆発直後の現象
  - KISSサーベイ:  $\Delta t \sim 1 \text{ hour}$
  - 時間分解能を100倍にして  $\Delta t \sim 10 \text{ sec}$  とすることで新しいサイエンスが開ける可能性

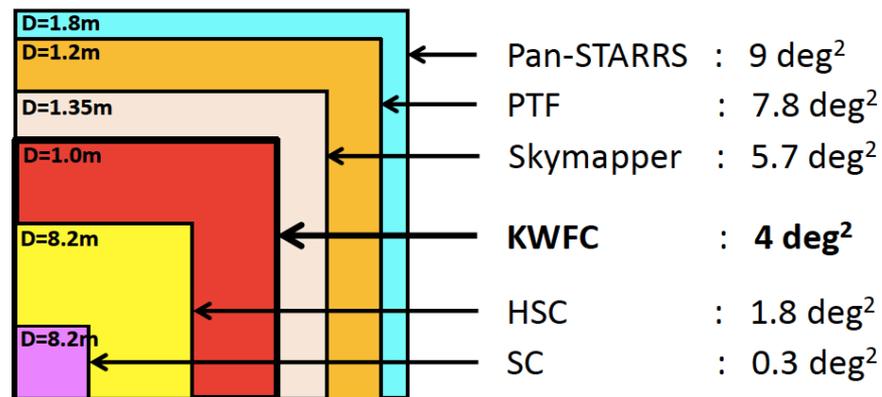
# 次世代超広視野高速カメラ

- 超広視野

- 現在、世界に存在する広視野カメラ( $<5\text{deg}^2$ )では不足

→さらに一桁広い視野  
( $>30\text{deg}^2$ )=**超広視野カメラ**

- 稀な現象の統計的な議論
- 高いサーベイ能力による探査



現在の広視野カメラ

- 高速観測

- 現在、広視野カメラの時間分解能は $>10\text{sec}$
- 10sec以下の広視野撮像は未知の領域

# 木曾シュミット望遠鏡

- KWFCでは広視野を生かしきれていない
  - KWFCの次世代観測装置が必要
  - 全視野は6deg×6deg
    - 全視野を覆えば、現状より1桁上のサーベイ能力をもつポテンシャルあり
- 世界的に見ても第一級の超広視野カメラになりうる

→写真乾板全域を覆うような

「**次世代超広視野観測装置**」の要請



木曾観測所HPより



36cm×36cm写真乾板

# CMOSセンサ

- 高速撮像
  - 電荷転送なし  
→30frame/secの読み出しが可能  
(市販のビデオカメラなどで利用)
  - ローリング読み出しによるデッドタイムなしの高効率観測



➤ 大規模アレイを構築し、超広視野カメラを作ることが可能か？

→「世界初の超広視野高速CMOSカメラ」の開発可能性を検討

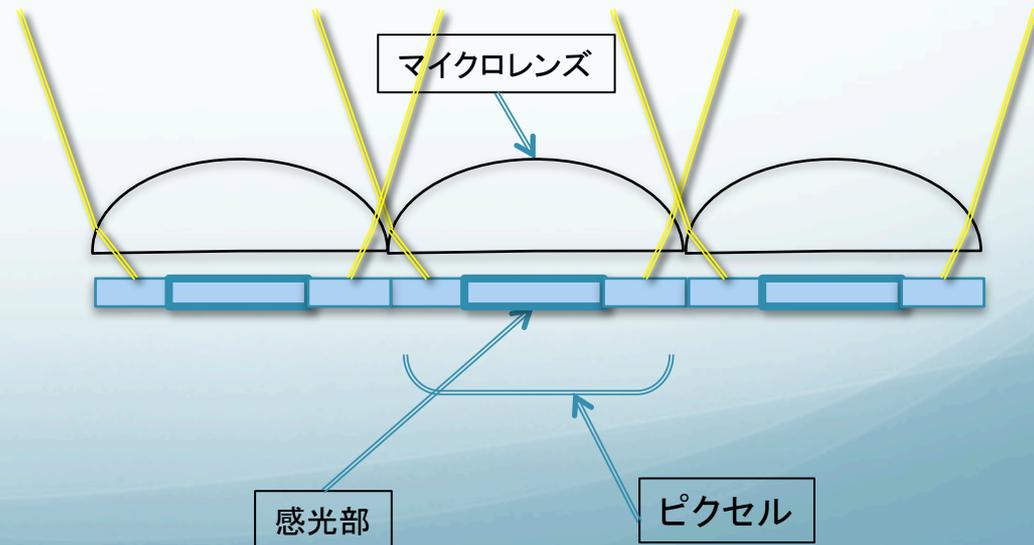
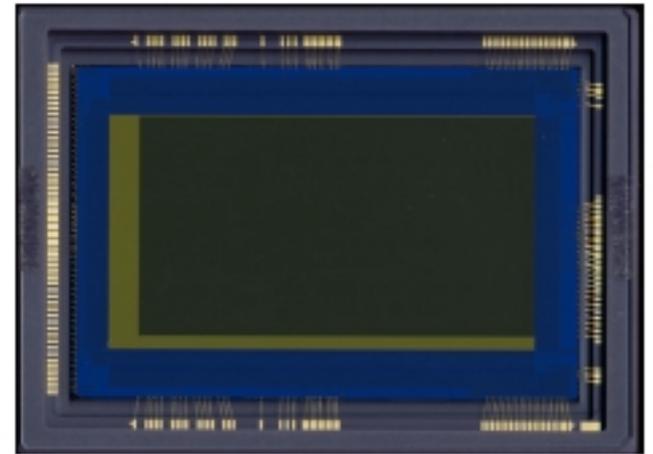
高速観測を目指さないCCDでの超広視野カメラは検討されている(Palomar/ZTF)

# 市販のCMOSセンサの天文観 測への応用の検討

西嶋(2012年度課題研究)

# 検討に用いた市販のCMOSカメラ

- 産業用に開発されたCMOSセンサ
  - 国内メーカー製
  - 35mm Full HD規格
    - 1920×1080pix<sup>2</sup>
  - 表面照射型
  - マイクロレンズアレイ

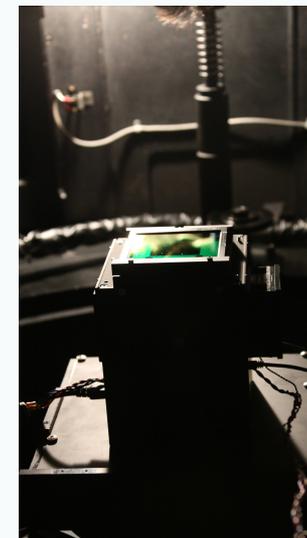


# 木曾シュミット望遠鏡での試験観測

- 試験観測
  - 2012/12/16~17
  - V, R band
  - センサ温度30°C
  - 視野 40'×20'
- 評価内容
  - 読出ノイズ
  - 暗電流
  - リニアリティ
  - 量子効率
  - システム効率
  - クロストーク
  - ヒステリシス
  - 星像サイズ

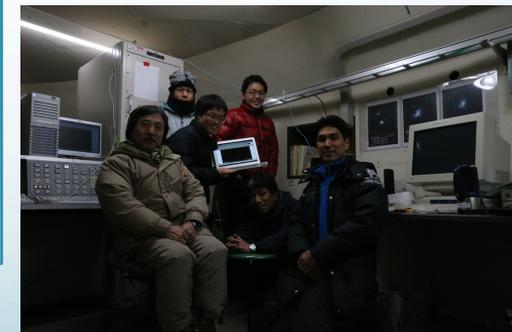


Long integration image  
NGC891 nearby edge-on galaxy  
2 sec x 100 frames x 5 dithers  
V band



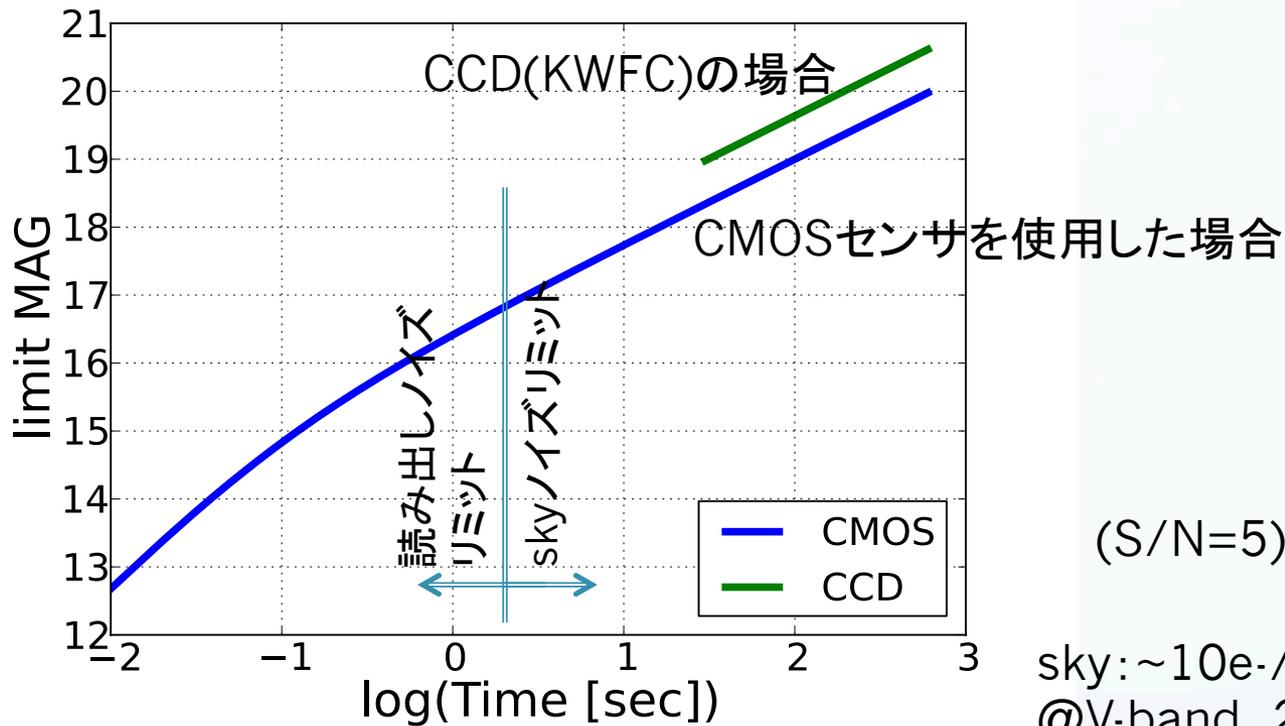
望遠鏡焦点への取り付け

- ✓ CCDと同等の性能を持つことを確認
- ✓ 量子効率はCMOSセンサが劣る



First Light !

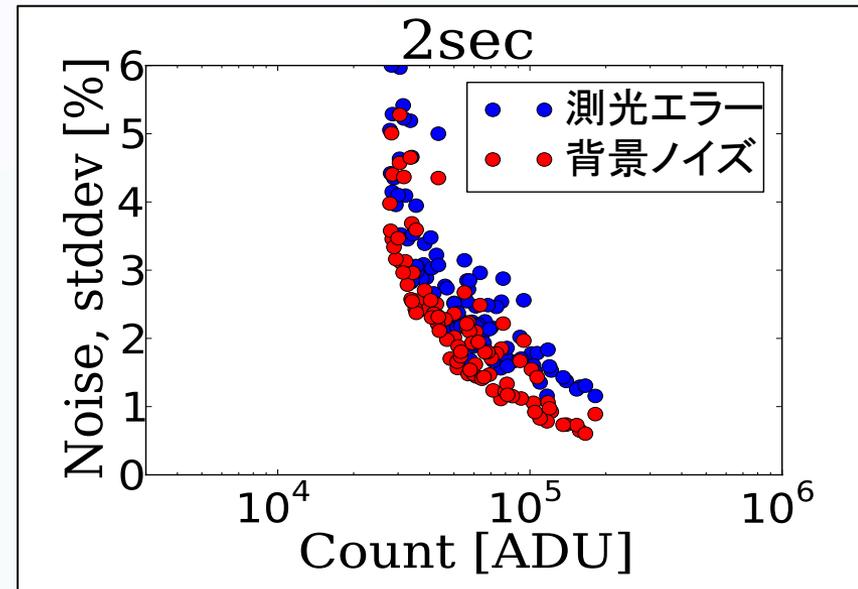
# 限界等級



- QE差によりCCDより0.5mag劣る結果
- 1-10sec読み出しでskyノイズリミットな観測が可能 (CCDに対する優位点)

# 表面照射型における測光エラー

- 表面照射型センサ
  - 感度の低い領域による測光精度への影響はあるか？
  - FWHM=3pixでのアパーチャ測光
- 100frame連続読み出しによる測光エラーと、背景ノイズによるばらつきを比較
- 背景ノイズより有意に大きい測光エラーはなし
- 表面照射型による測光精度への影響はなし



# 木曾シュミット次世代超広視野 カメラの検討

# 木曾超広視野CMOSカメラのコンセプト

- 世界初の超広視野高速CMOSカメラ
- 木曾シュミットの全視野6deg×6deg
- 総重量 <30kg
  - シュミット望遠鏡に搭載可能にするため

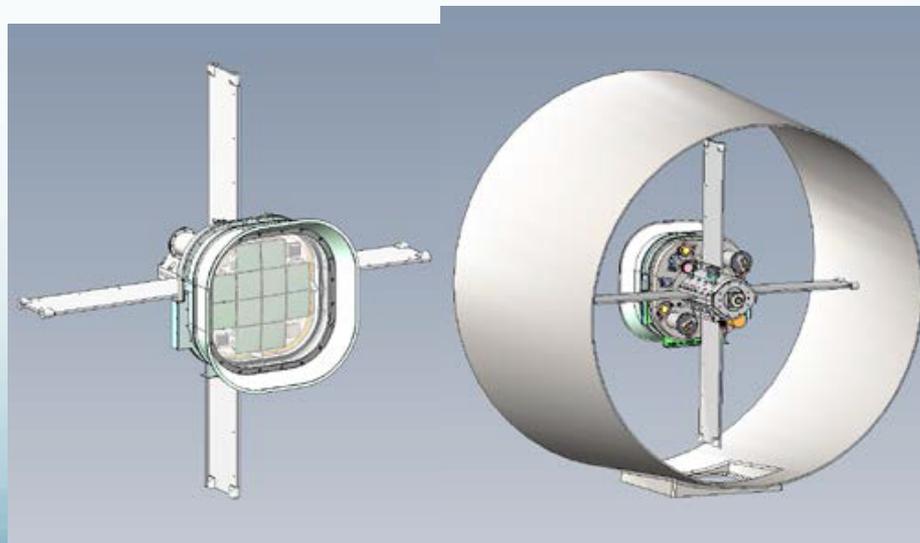
# CMOSセンサの想定スペック

	目標性能	コメント
ピクセルサイズ	15-20 $\mu$ m/pix	
ピクセルフォーマット	>2K $\times$ 2K pix <sup>2</sup>	モザイク化のため
量子効率	>0.8 @ $\lambda$ =400-800nm	開口率込み
読出ノイズ	<2e <sup>-</sup>	
暗電流	< 1e <sup>-</sup> /sec/pix	0°Cのとき
読出速度	0.3-100sec/frame	
ダイナミックレンジ	14bit精度	
線形性	14bit精度	
駆動温度	>-10°C	
イメージ領域率	>80%	モザイク化のため
読み出し方法	ローリング読み出し	デッドタイムなし
読み出し機能	非破壊読み出し	マルチサンプリングのため

# カメラ設計の検討 ①モザイク化

- $36\text{cm} \times 36\text{cm} = 1300\text{cm}^2$
- $15\ \mu\text{m}/\text{pix}$ ,  $2\text{K} \times 2\text{K}\ \text{pix}^2/\text{frame}$ を仮定
  - $30 \times 30\text{mm}^2/\text{frame}$
- $12 \times 12\text{frame}^2 = \mathbf{144}$ 枚で視野を覆うことが可能
- 35mm Full HDでも同程度の枚数が必要

ZTFの設計外観:  
これと同様の外観になる?



# カメラ設計の検討 ②筐体

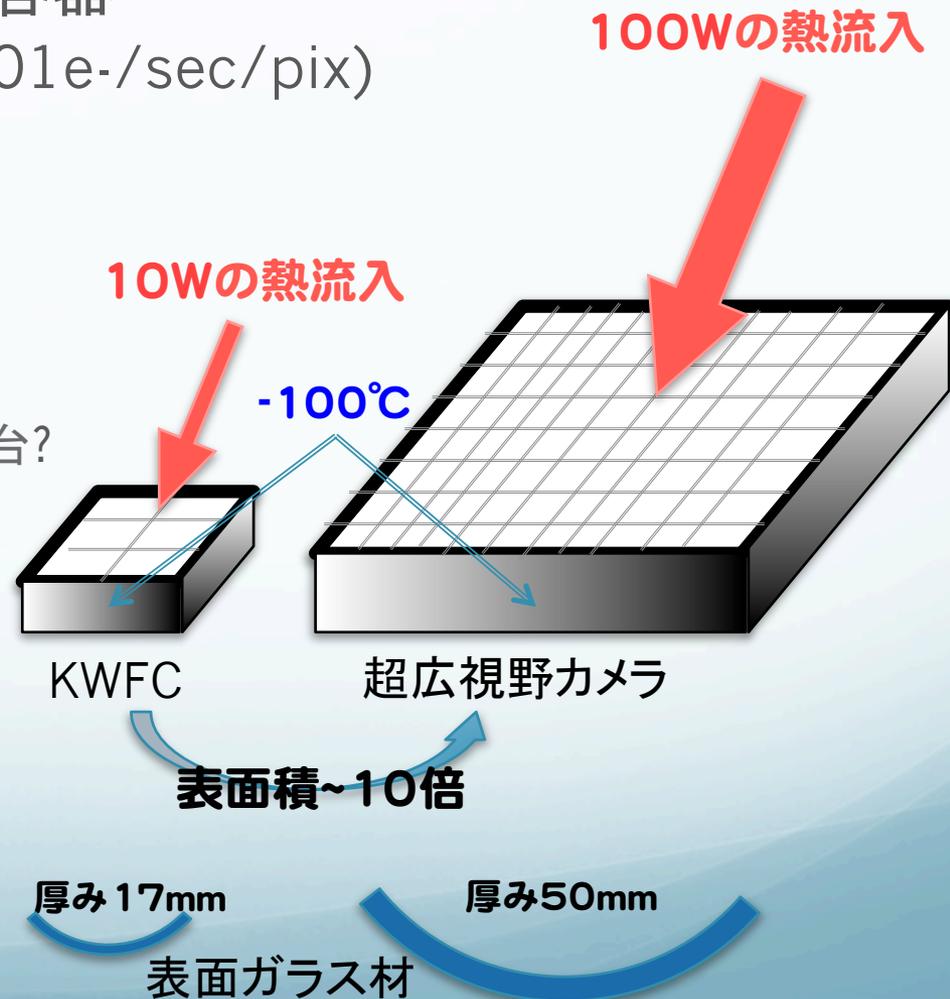
- デザインA:  $-100^{\circ}\text{C}$ の冷却容器
  - 暗電流は抑えられる( $\ll 0.01\text{e}^-/\text{sec}/\text{pix}$ )

- 熱流入

- KWFCの10倍=100W
- 大規模な冷却器が必要
  - KWFC搭載の冷却器が10台?

- 真空

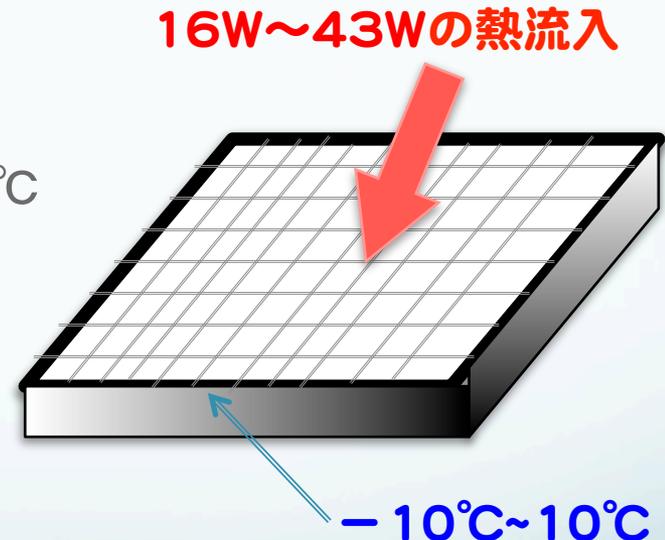
- $\sim 1\text{E}-6\text{torr}$ (=KWFC)
- デュワーが必要
- 表面ガラス材の厚み
  - KWFCの3倍=50mm



# カメラ設計の検討 ②筐体

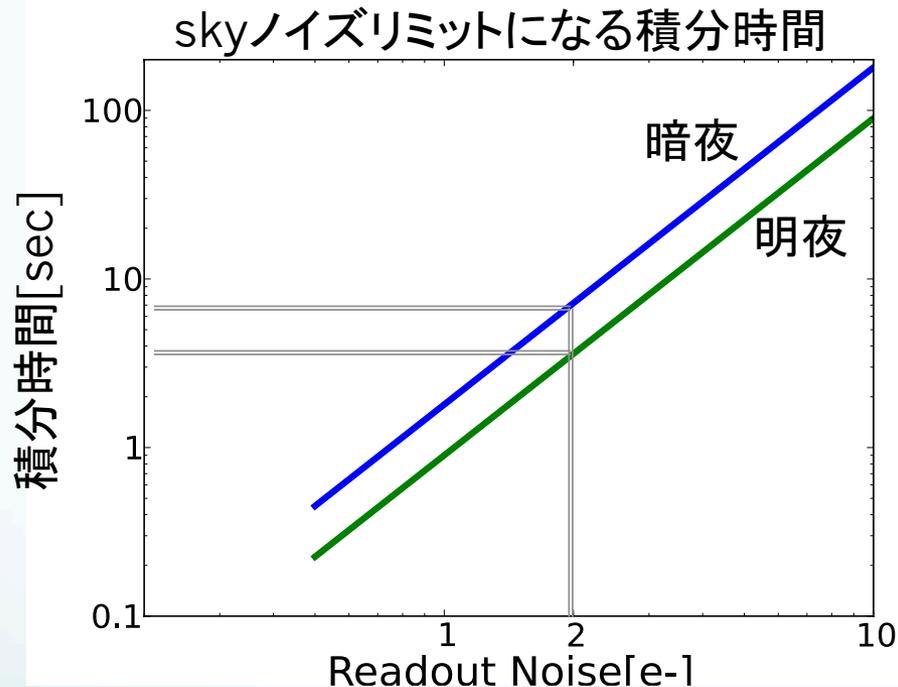
- デザインB:  $-10^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ 程度の常温付近で駆動
  - 暗電流は $\sim 1\text{e}^-/\text{sec}/\text{pix}$ 程度
    - sky背景光が $\sim 5\text{e}^-/\text{sec}/\text{pix}$ (暗夜)であることを考えると、それほど効いてこない

- 熱流入
  - 外気 $20^{\circ}\text{C}$ で $43\text{W}@-10^{\circ}\text{C}$ ,  $16\text{W}@+10^{\circ}\text{C}$
  - 冷却はペルチェ素子で制御可能?
- 常圧設計が可能
  - 表面ガラス材の強度はそれほど必要なし
  - 軽量( $<30\text{kg}$ )設計が可能
- 断熱
  - 表面ガラス材が曇らないようにする必要あり
  - 断熱材程度で十分?



→2013年度はこの方針で筐体の検討を進める

# カメラ設計の検討 ③読み出し速度



- skyノイズリミットまでの積分時間
  - CMOSセンサの読み出しノイズ $2e^-$ で~5sec
- 10secを切る積分時間でも高効率な観測が可能

- (skyノイズ) $>$ (読み出しノイズ) $\times 3$ になるまでの時間をプロット
- システム効率は0.5を仮定

# カメラ性能の検討 ④データ処理

- データ速度
  - $24K \times 24K \text{ pix}^2 = 580\text{Mpix}$
  - データを16bit=2Byteで生成
  - 1.2GB/frame

読み出し速度	データ速度
1sec/frame	1.2GB/sec
10sec/frame	120MB/sec
100sec/frame	12MB/sec

- 読み出しが早すぎるとデータ転送・処理が追いつかない?
  - ボード上でデータを逐次スタックするような仕組みを考える
  - 専用の読み出しボードが必要
- 大量のデータの保存方法についても検討が必要

# カメラ性能の検討 ⑤周辺機器

- 総重量<30kgの軽量化がコンセプト
- シャッター機構は搭載しない
  - CMOSセンサの電氣的シャッターで代用可能
  - ローリングシャッターが使用できる
- フィルタ交換機構は搭載しない
  - フィルタも36cm×36cmと巨大になり、技術的・物理的に困難
  - 観測中は交換せず、昼間に交換する

# 今後の展望

- 目標スペックを満たすCMOSセンサの共同開発
  - 木曾シュミット望遠鏡での試験観測
- カメラ筐体の設計・製作
  - 常温・常圧方式を採用
- 高速センサ読み出し回路の開発
  
- 超広視野カメラで得られる科学成果の検討

# まとめ

- ✓ 次世代の超広視野天文学では、 $>30\text{deg}^2$ の高速カメラが求められている
- ✓ CMOSセンサの高速性能に注目
- ✓ 木曾シュミット望遠鏡次世代観測装置として、「**世界初の超広視野高速CMOSカメラ**」を開発する
- ✓ 市販のCMOSセンサの性能評価と試験観測を実施
  - ✓ 量子効率以外では、天文用CCDと遜色ない性能を確認
  - ✓ 高速カメラとしてはCMOSセンサが最適であることがわかった
- ✓ 超広視野高速カメラの製作可能性を検討
  - ✓ 常温駆動を採用することで現実的な筐体設計が可能になる
  - ✓ 高速読み出し用の読み出し回路の検討