

# JASMINEでの精密測光・位置天文に向けた 新しいフラット補正技術と検出器特性精密測定方法の開発

多田将太郎 (総研大 D1), 小谷隆行 (ABC/国立天文台/総研大),  
片坐宏一, 和田武彦, 河原創, 臼井文彦 (宇宙研),  
鹿野良平, 宮川浩平, 郷田直輝 (国立天文台), 他 JASMINE チーム

# 目次

- 背景
  - JASMINE
  - JASMINEでの検出器特性の補正の必要性
- 軌道上フラット補正と地上での精密測定
  - 概要
  - 現在の状況
  - フラット補正の詳細
  - 精密測定の詳細
- まとめ

# JASMINE (Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration)

- 2028年の打ち上げを目指す赤外線位置天文観測衛星

## ■ 銀河系中心領域の位置天文観測

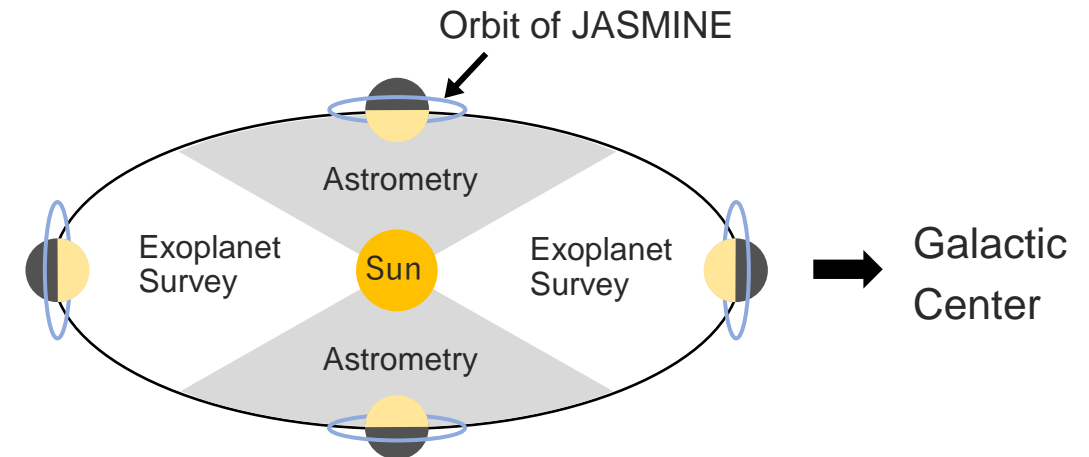
- Gaiaレベルの精度 (~ 25  $\mu\text{as}$ ) で位置天文観測
- 天の川銀河中心領域の構造と形成史を明らかにする
- Gaiaの観測波長 (330-1050 nm) ではダストによる減光の影響が大きく、銀河系中心領域の観測が難しい

## ■ 系外惑星探査

- M型星のトランジット観測
- 地球型惑星の発見を目指す
- トランジットによる減光 ~ 0.1 %
- TESSの観測波長 (0.6-1  $\mu\text{m}$ ) や口径 (10.5 cm) では中期~後期M型星は暗く、地球型惑星の検出が難しい

## 主なパラメーター

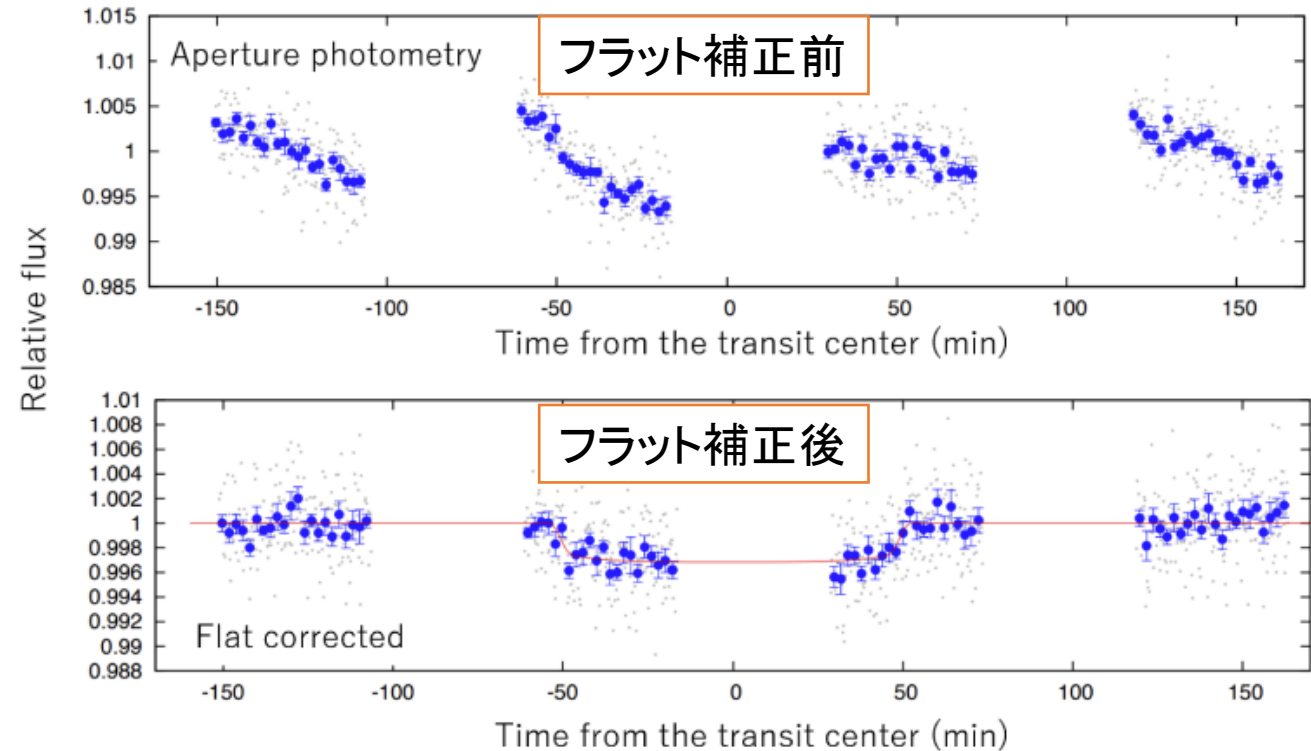
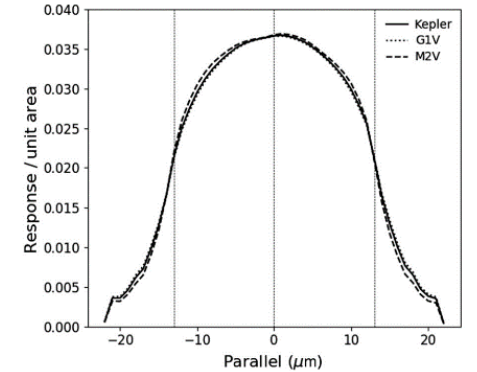
観測波長	1.0 – 1.6 $\mu\text{m}$
望遠鏡直径	36 cm
視野	0.6° × 0.6°
ピクセルスケール	424 mas



# JASMINEでの検出器特性の補正の必要性

- 検出器特性が測光・位置天文の精度に影響
  - ピクセル間・内部の感度むら
  - ピクセルの位置ずれ、サイズのばらつきなど
- 星像位置の変化により見かけの明るさが変動、**測光での系統誤差の原因に**
  - Kepler, TESSは衛星の精密な指向制御により星像位置を検出器上で固定
- JASMINEでは検出器感度むらの補正(フラット補正)が必須
  - 地球型惑星検出には**フラット補正精度0.1%が必要**
  - 位置天文の目標精度 ( $25 \mu\text{as} = 6 \times 10^{-5} \text{ pixels}$ ) 達成にもフラット補正が重要

ピクセル内部の感度むらの例  
(Vorobiev et al. 2019)



JASMINEでのM型星周りの地球型惑星トランジット観測シミュレーション。  
フラット補正前と後。(天文学会2022秋季年会 Z221a 平野さん講演)

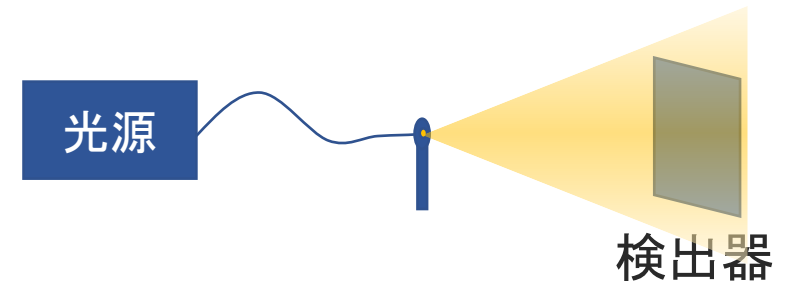
# 検出器特性の補正手法の開発

## ■ シングルモードファイバーを使った軌道上フラット補正

- 経年変化も含めた検出器全面のフラット補正
- 地上での事前測定、恒星を利用したフラット補正と併用
- シンプルな構成で、小型衛星にも搭載しやすい

## ■ 干渉縞を利用した、地上での検出器特性の精密測定

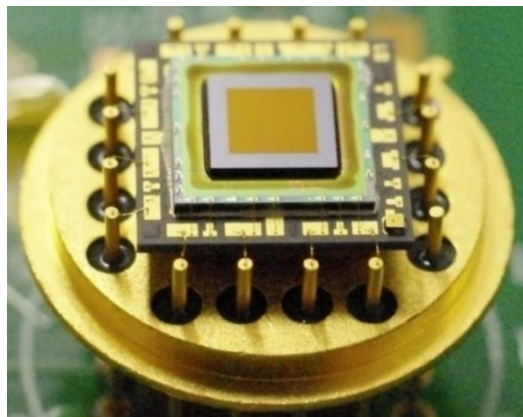
- ピクセルの位置のずれ、サイズのばらつきなどの測定を地上で行う
- 高精度での視線速度測定を目指す高分散分光器の開発にも有効



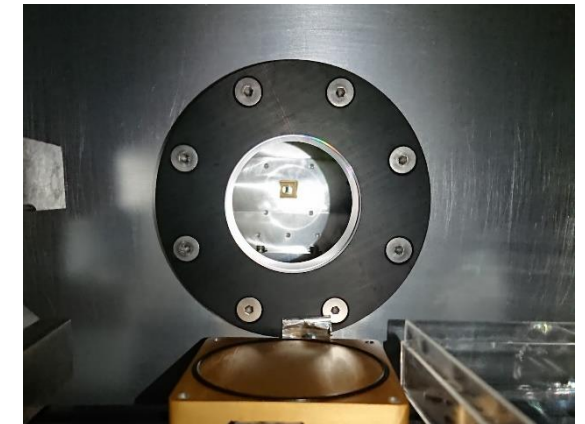
# 検出器特性の補正手法の開発の状況

- 今後、検出器試験と並行してフラット補正や精密測定の実験を行う
- JASMINEに搭載予定のInGaAs赤外線検出器の試験器を使用する

2022	2023
検出器試験の準備 (真空、冷却、読み出しエレキなど)	検出器試験
InGaAs検出器での実験の準備 (解析や装置の検討、可視のカメラでの実験)	InGaAs検出器での実験 フラット、精密測定

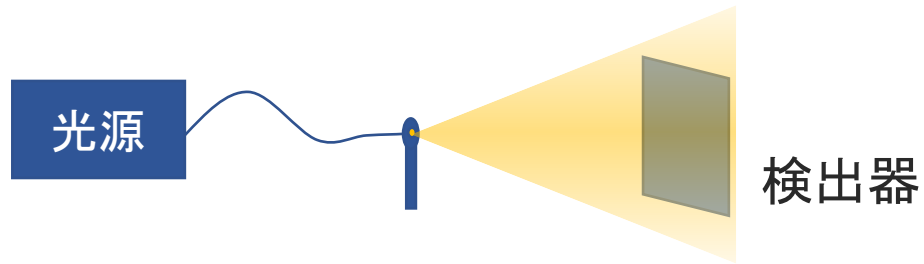


InGaAs赤外線検出器 (Nakaya et al. 2016)

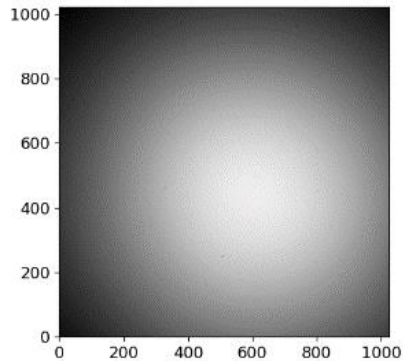


検出器試験の様子

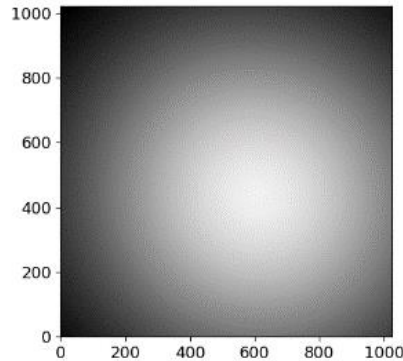
# シングルモードファイバーを使った軌道上フラット補正



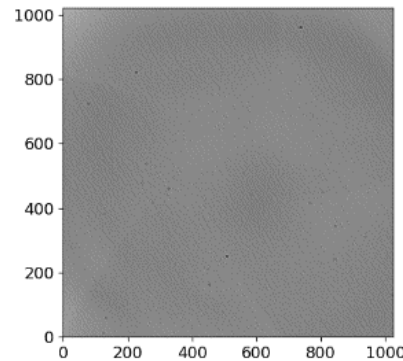
- 光源とファイバーのみで可能
  - 積分球等の一様光源を使用するよりシンプル
- シングルモードファイバーの光出射パターンは既知で極めて安定 (ガウシアンに近い)
- 測定データをモデルでフィットして割る  
→ ピクセル間感度むら(フラット)を取得
- 光源はSLD (Superluminescent diode) かLED
  - 広帯域であり、ゴーストとの干渉を抑えられる



測定データ



モデル

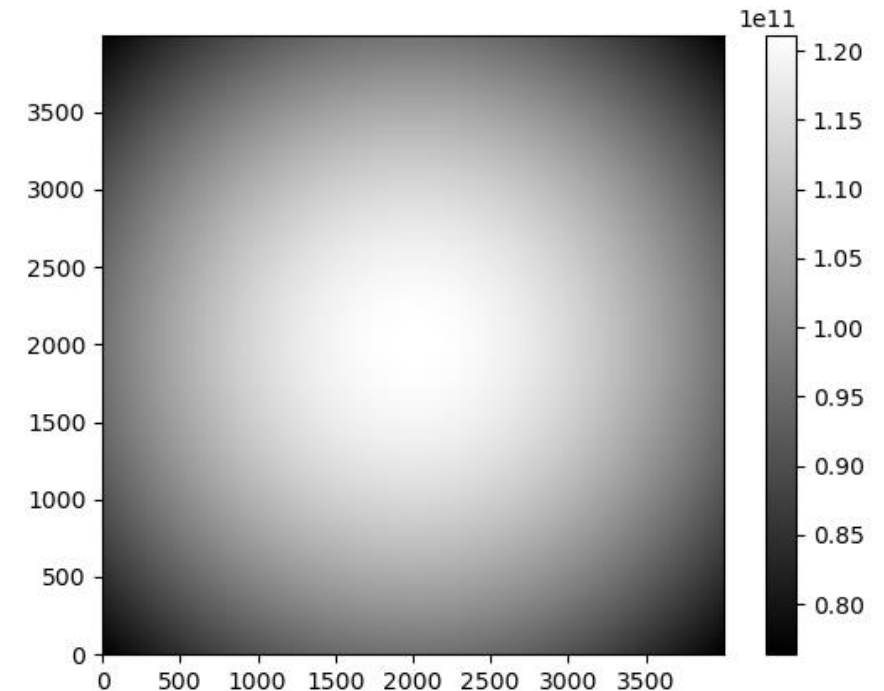
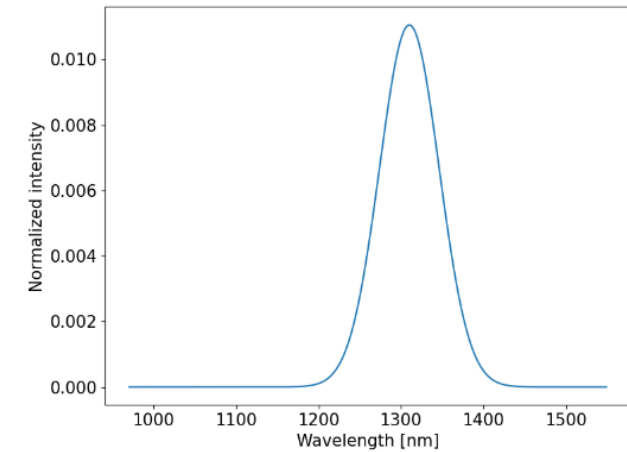


フラット

# フラット補正:光源の明るさについて

- JASMINEでのフラット補正に必要な光量の見積もり
- 1秒で光子が最大15万個/pixel程度の光量が必要
  - 光源のスペクトルはSLD(S5FC1021P)
    - 中心波長1310 nm, FWHM 85 nmのガウシアンを仮定
  - シングルモードファイバーはPM980-XP
    - 波長範囲 970-1550 nm, コア直径 5.5  $\mu\text{m}$ , NA 0.12
  - ピクセルサイズ10  $\mu\text{m}$ , ピクセル数4000\*4000
  - ファイバーの先端は検出器から64 cmの位置
- 検出器効率0.8の場合、必要な光量は $1.55 \times 10^{-6} \text{ W}$ 
  - SLD  $\sim 10\text{mW}$ は明るすぎる
  - LEDでも十分かもしれない
  - LEDからファイバーに光をどれだけ入射させられるか調査する

仮定した光源のスペクトル

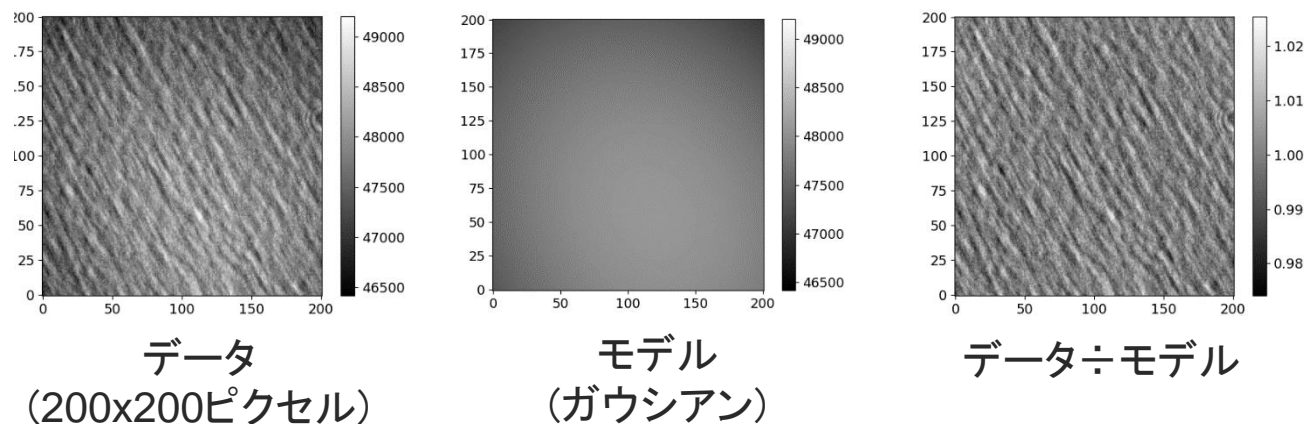


光の全エネルギーが1 Jのときのピクセルごとの光子数  
(検出器効率は考慮していない)

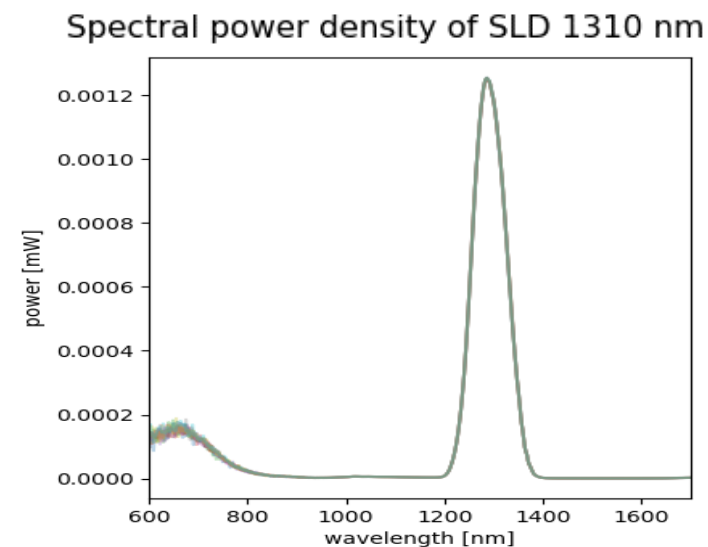
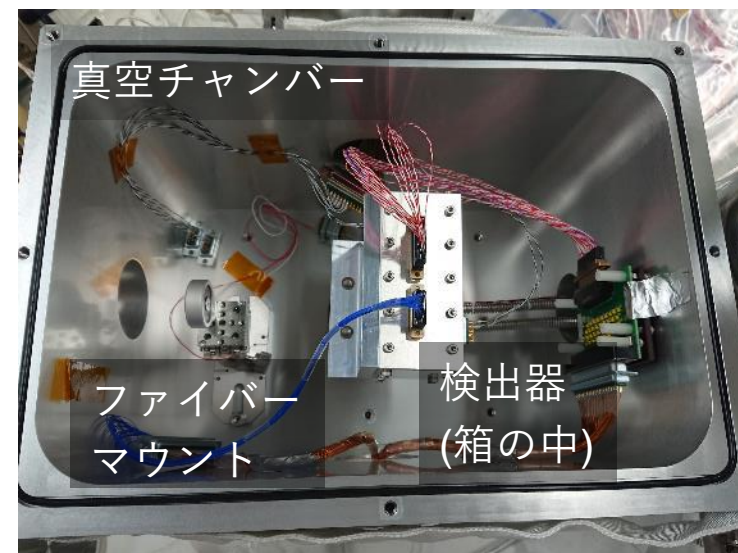


# フラット補正: 現状と今後

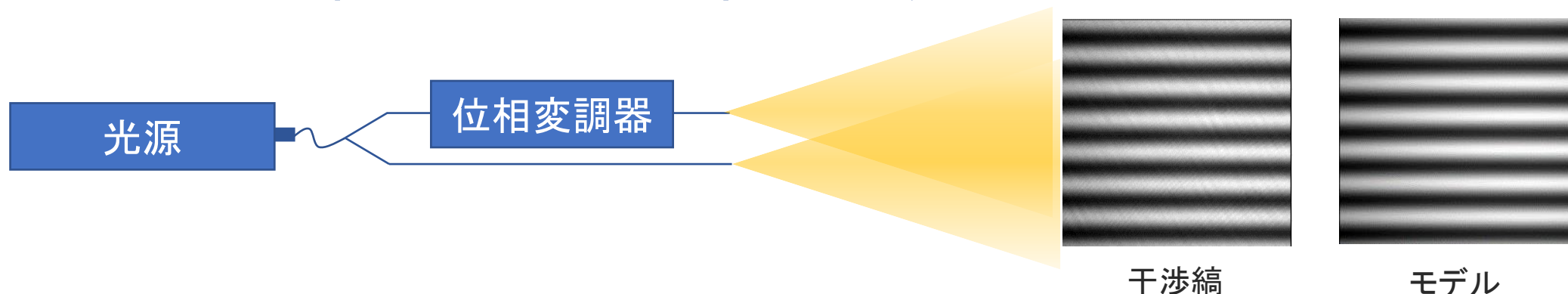
- InGaAs検出器の試験器 (128x128ピクセル) での実験を予定
- 可視のカメラでの実験、光源の特性の調査も進行中



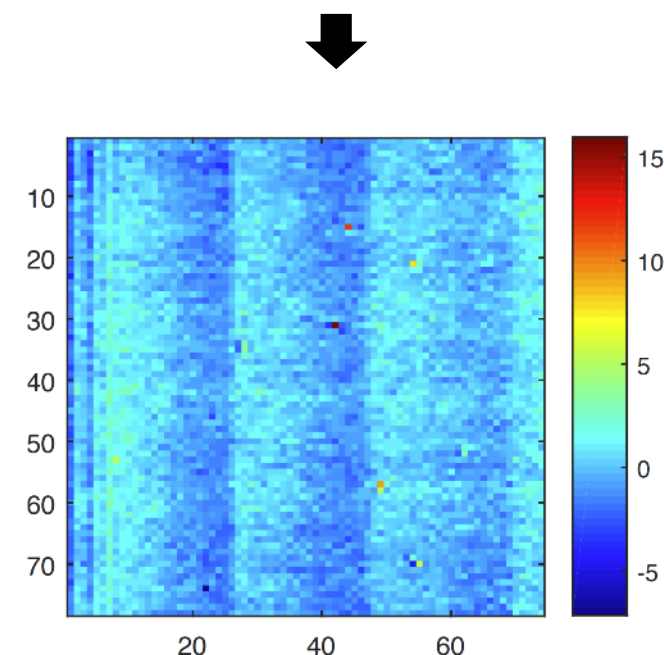
- カメラの封入ガラスによる干渉パターンが見えている
  - JASMINEでもフィルター等で干渉パターンが出るかもしれない
- 解析方法の検討が必要
  - 干渉パターンを取り除くにはファイバーが複数必要
  - ガウシアンプロセスでの干渉パターンのフィットなどを検討中



# 干渉縞を利用した検出器特性の精密測定



- ピクセルの位置ずれ(感度重心のずれ)・サイズのばらつきを調べる
- 2本のファイバーと検出器の間に何もなければ、検出器上には理想的なsin波に近い干渉縞
- 干渉縞の位相や向きを変えた複数の画像が必要
  - 縮退が解け、ピクセルの位置ずれ(感度の重心のずれ)やサイズのばらつきの2次元の情報得られる
- シングルモードファイバーを使用
- 光源はSLD+狭帯域フィルターを検討中
  - ゴーストとの干渉を抑えつつ干渉させる



ピクセルの位置ずれ (Crouzier et al. 2016)

# 検出器特性の精密測定: 理論

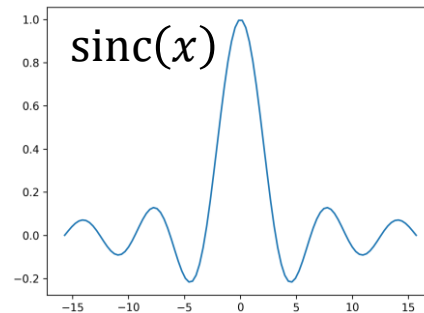
- 干渉縞をsin波で近似 ( $\theta$  は干渉縞の位相)

$$f(x, y) = I_0 + V \cos(k_x x + k_y y + \theta)$$

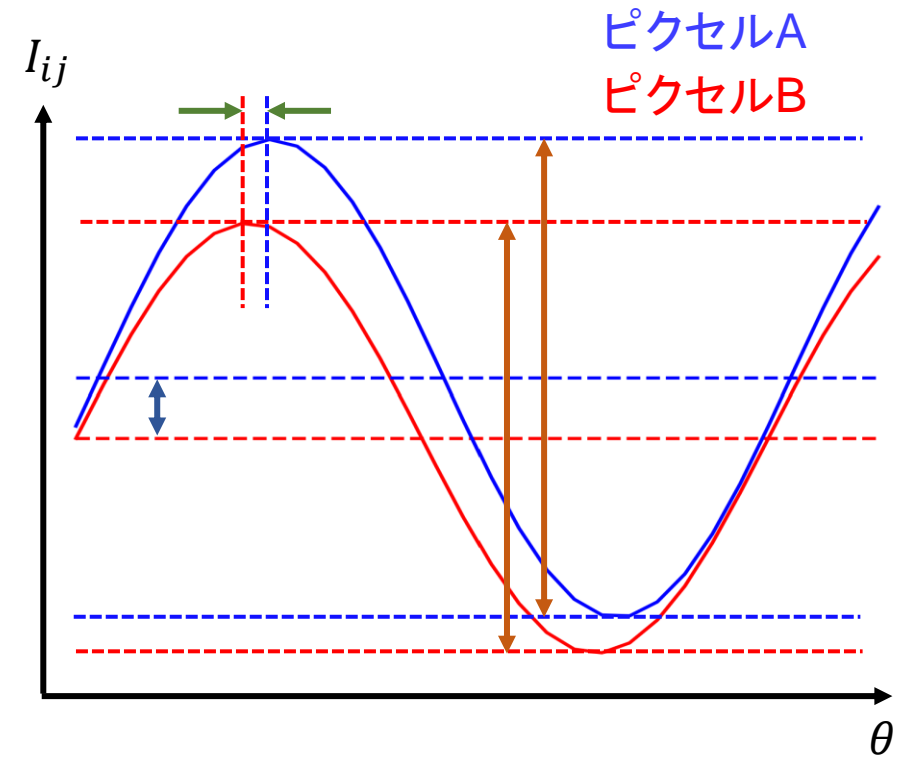
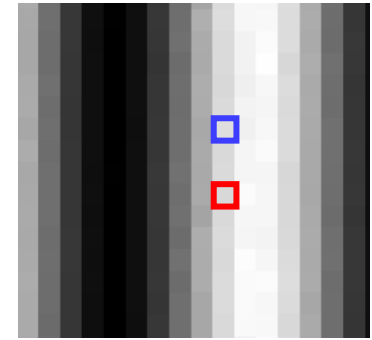
- 感度が一様な矩形のピクセルを仮定
- 中心  $(x_{ij}, y_{ij})$ 、サイズ  $p_x \times p_x$ 、量子効率  $s_{ij}$  のピクセル  $ij$  での測定値  $I_{ij}$  ( $x_{ij} - \frac{p_x}{2} < x < x_{ij} + \frac{p_x}{2}$ ,  $y_{ij} - \frac{p_y}{2} < y < y_{ij} + \frac{p_y}{2}$  で積分)

$$I_{ij} = \underbrace{s_{ij} p_x p_y}_{\text{平均値} \rightarrow \text{相対感度} \times \text{サイズ}} \left\{ I_0 + \underbrace{V \operatorname{sinc}\left(\frac{k_x p_x}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{k_y p_y}{2}\right)}_{\text{振幅(ビジビリテイ)} \rightarrow \text{サイズ}} \underbrace{\cos\left(\frac{k_x x_{ij} + k_y y_{ij} + \theta}{2}\right)}_{\text{位相} \rightarrow \text{位置ずれ}} \right\}$$

- $I_0, k_x, k_y, \theta$  は全体の画像から推定する

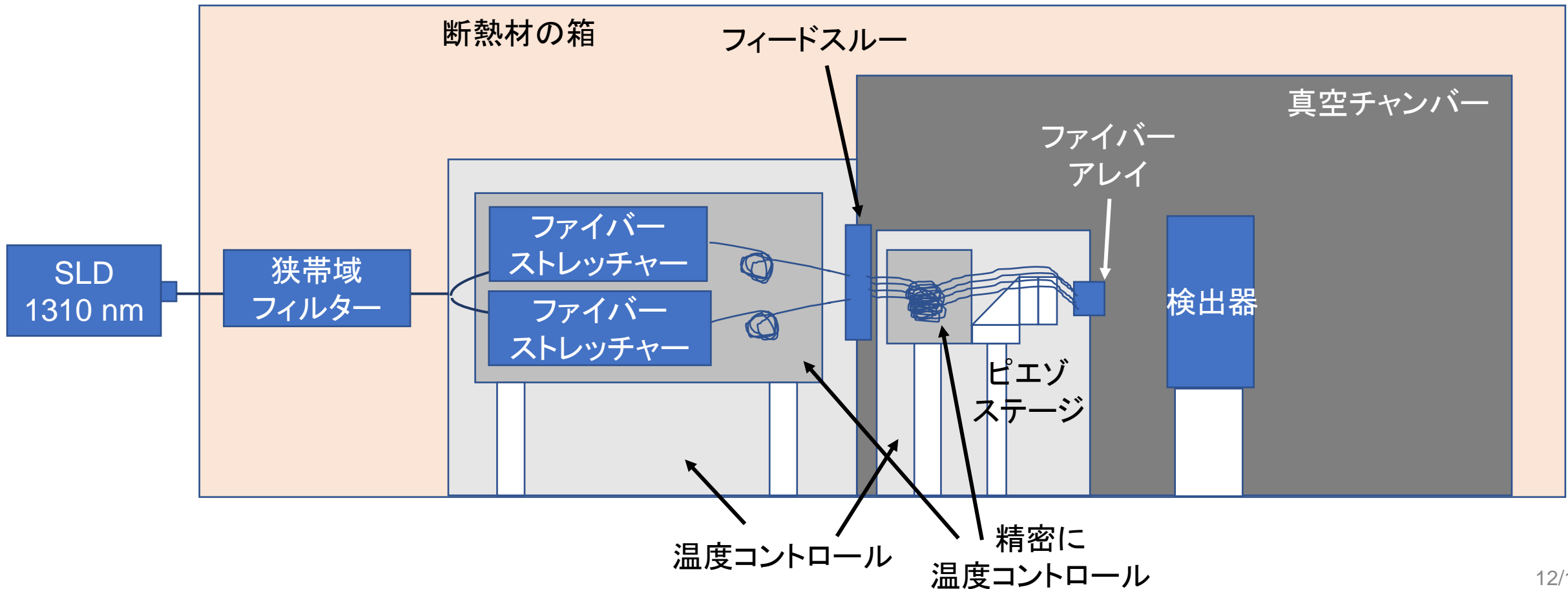


位相をずらしていく



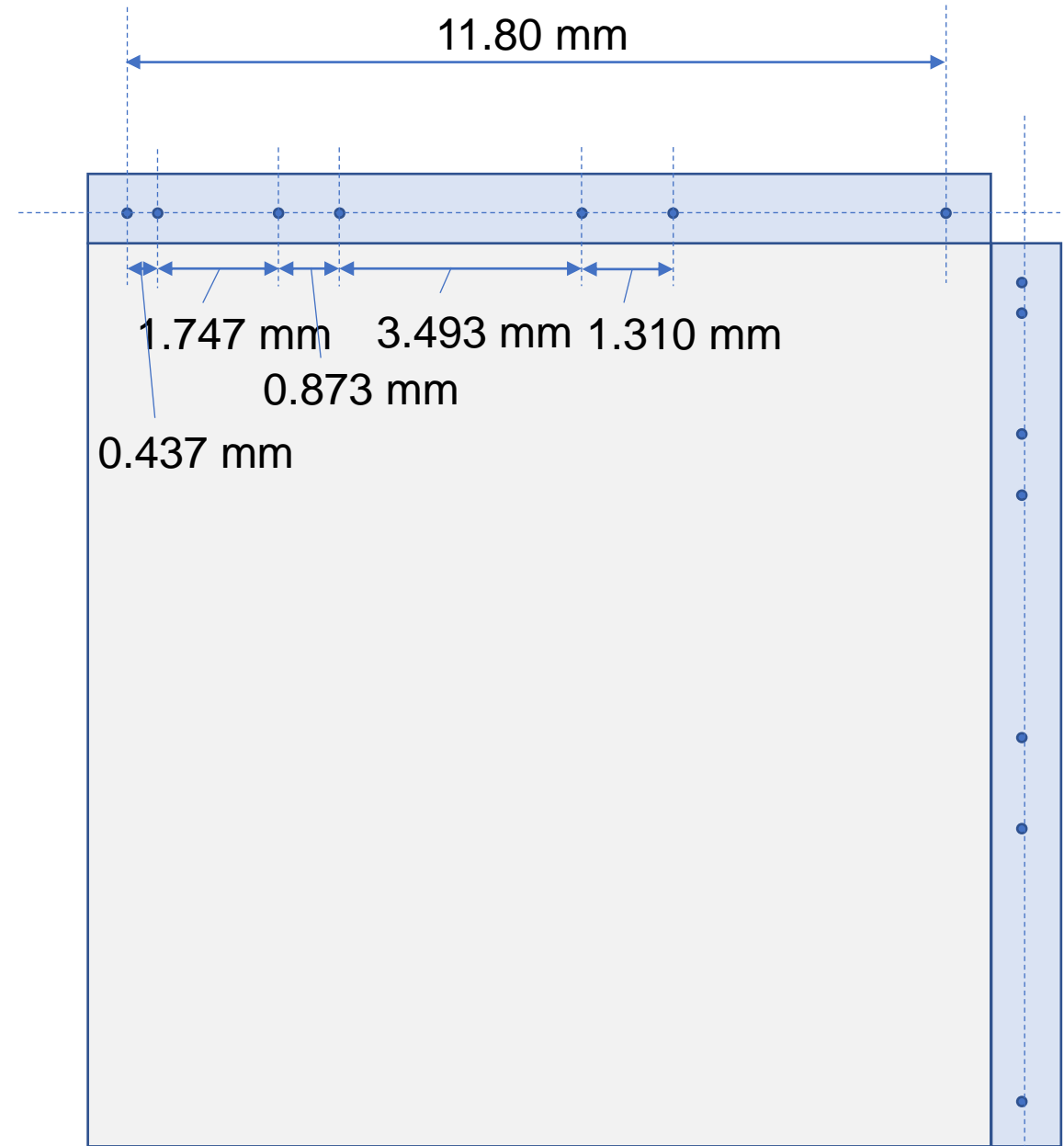
# 検出器特性の精密測定: 装置

- ファイバーストレッチャーで位相変調
- 位相差を安定させるために温度コントロール



# ピクセル内感度むらの測定

- 干渉縞を利用してピクセル内感度むらを測定できるか
  - 基線がたくさん必要
  - 位相の情報を得られるか
- 30  $\mu\text{m}$ を30分割して内部感度むらを測定するために必要な空間周波数:  $1/30 \mu\text{m}$ ,  $2/30 \mu\text{m}$ , ...,  $15/30 \mu\text{m}$ 
  - ピクセルピッチ: 10  $\mu\text{m}$ で $3 \times 3$ ピクセルの領域
- ファイバーアレイは波長1310 nmでこれらの干渉縞を作れるようなものを設計



# まとめ

- JASMINEでは検出器特性の補正が必須
- シングルモードファイバーを使用した軌道上フラット補正手法を開発中
  - 必要な光量を見積もった
  - 干渉パターンの除去方法を検討中
  - 今後、InGaAs 検出器の試験器での実験を行う
- 干渉縞を利用したピクセルの位置ずれ・サイズのばらつきの測定手法を開発中
  - 装置の構成がほぼ固まってきた
  - 今後、InGaAs 検出器の試験器での実験を行う
- 干渉縞を利用したピクセル内感度むらの測定方法を検討中