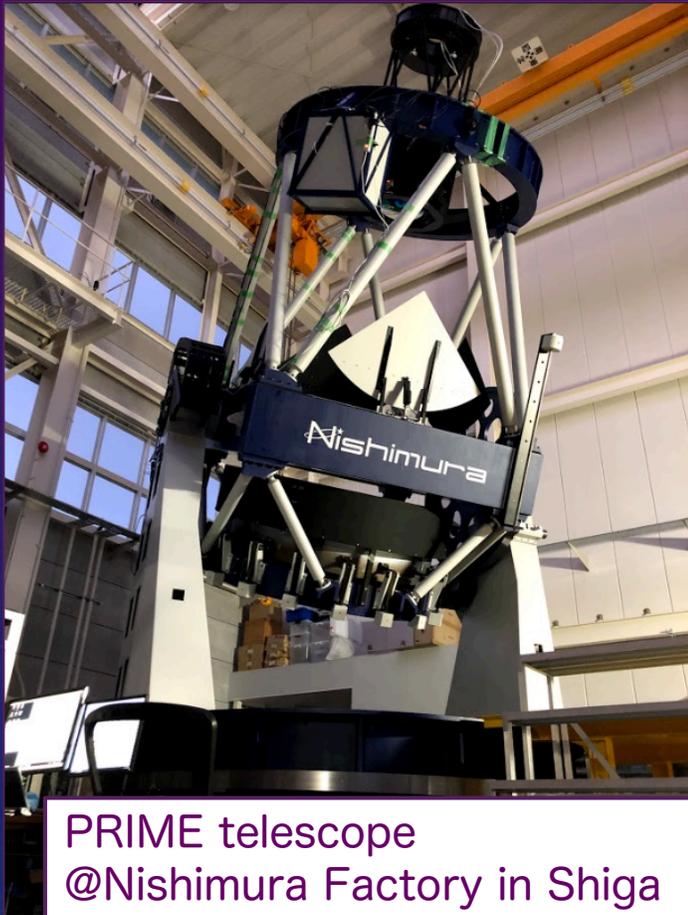


近赤外広視野重力マイクロレンズ サーベイ望遠鏡PRIMEの開発

大阪大学D2, MOA コラボレーション
PRIME コラボレーション
宮崎 翔太



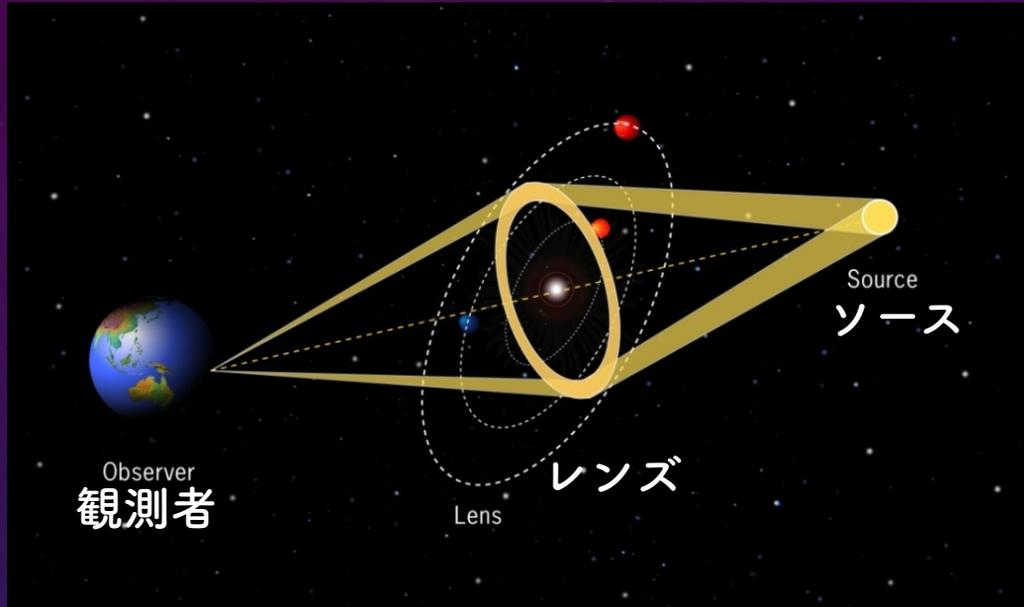
PRIME telescope
@Nishimura Factory in Shiga



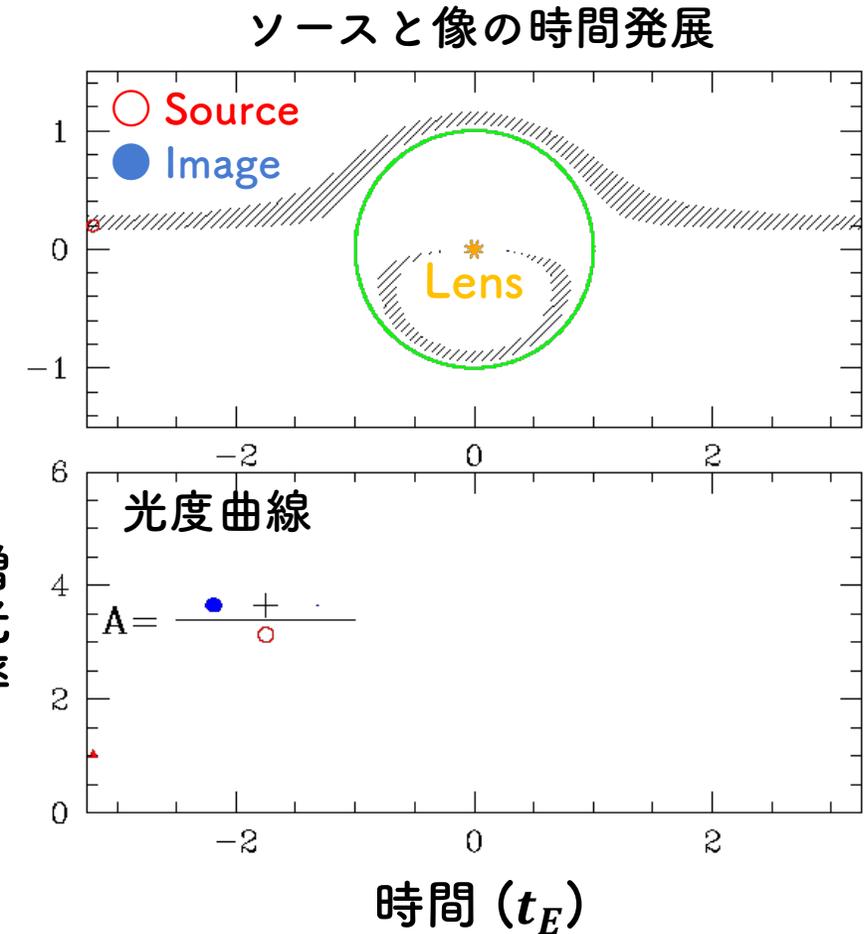
OUTLINE

- 重カマイクロレンズ
- MOAグループ
- PRIME計画
- PRIME望遠鏡の概念設計・開発
- 日本での光学調整
- 展望・スケジュール

重力マイクロレンズ(Gravitational Microlensing)



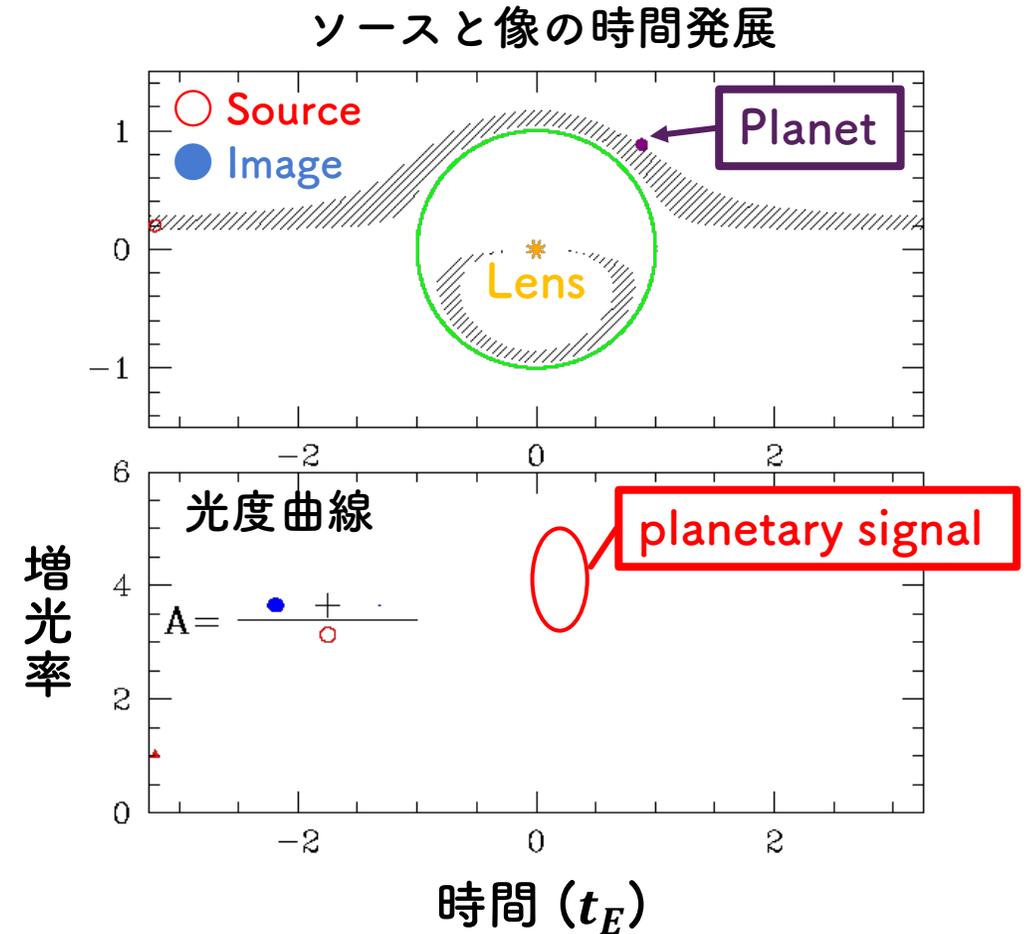
- 像の分離角が小さく分解できないが、**光度曲線の増光**として観測される
- 起こる確率が非常に低く、星密度が高い銀河中心領域でも $\sim 10^{-6}$



Planetary Microlensing

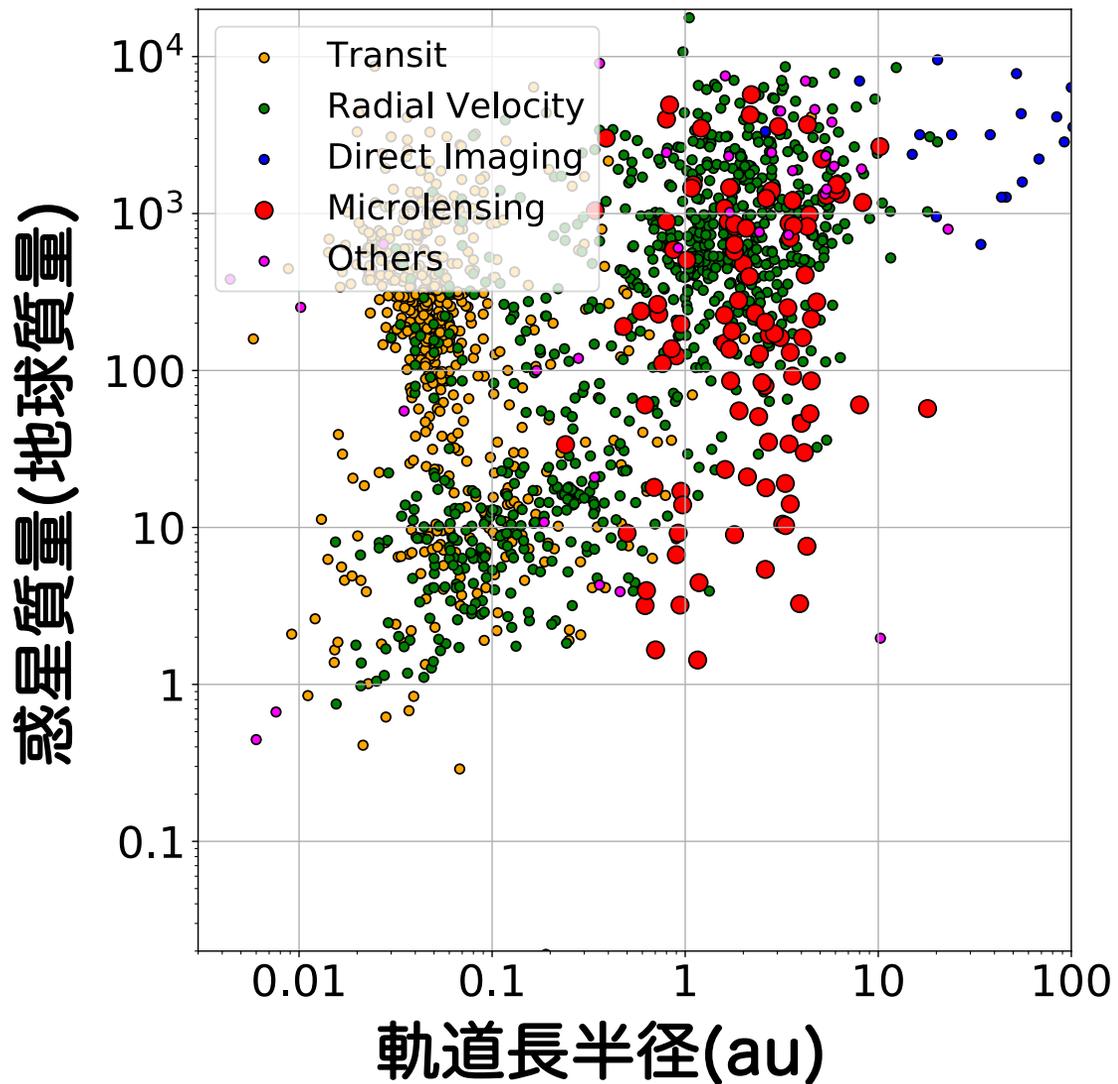
- レンズ惑星による光度曲線のズレを観測、**トランジェントシグナル**
- R_E (~数au) 付近の冷たく軽い惑星にまで検出感度を持つ
- 惑星シグナルのタイムスケール
木星質量 -> **数日程度**
地球質量 -> **数時間程度**

広視野かつ高頻度な
モニター観測が求められる



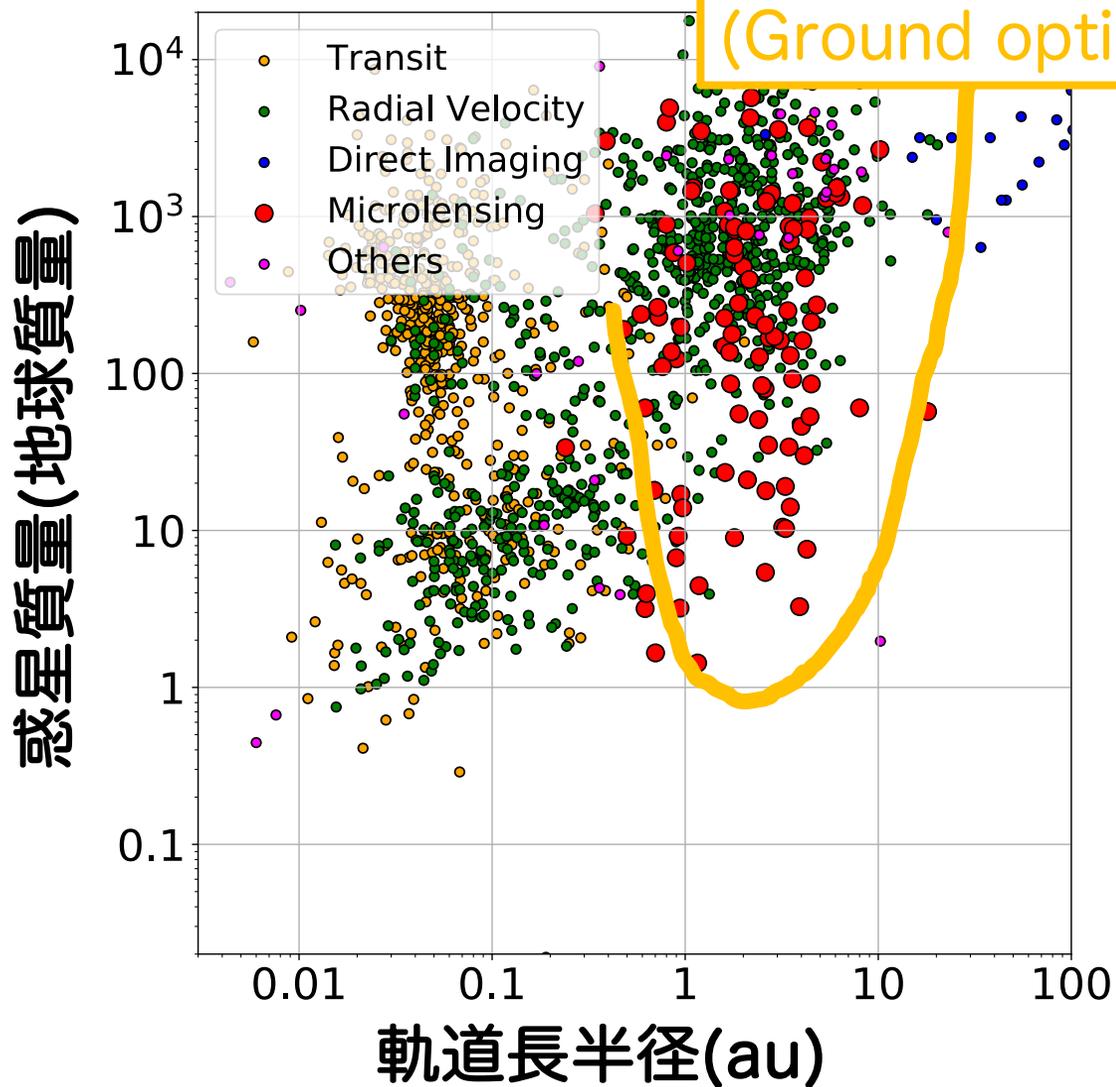
重力マイクロレンズの検出感度・惑星分布

発見された惑星分布



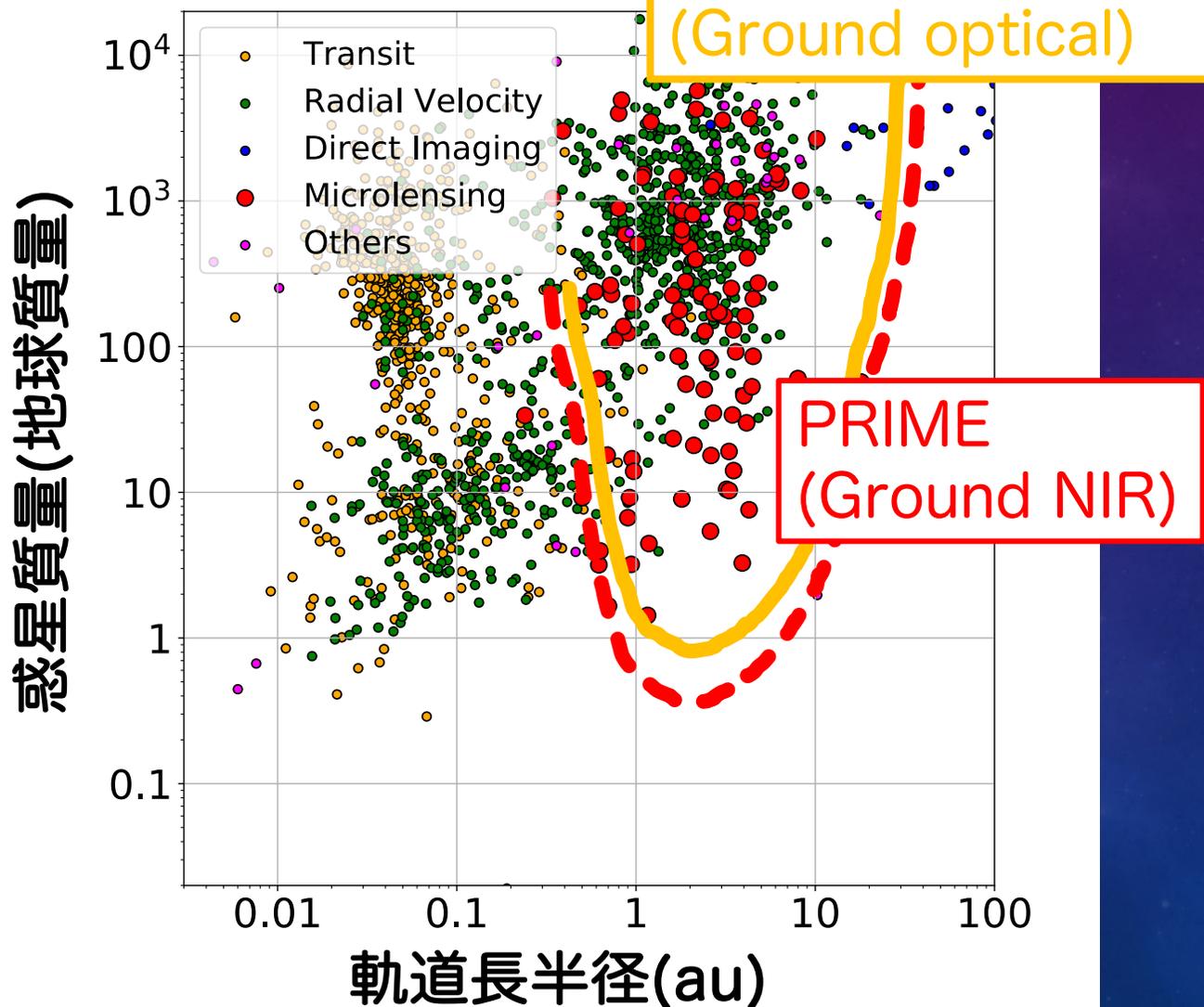
重力マイクロレンズの検出感度・惑星分布

発見された惑星分布



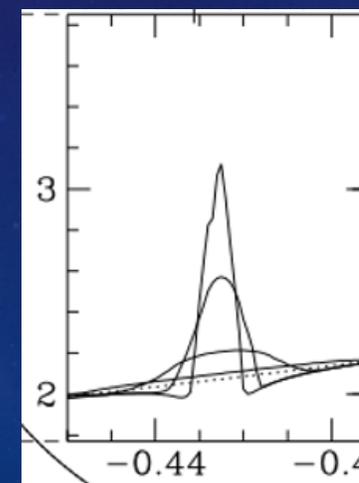
重力マイクロレンズの検出感度・惑星分布

発見された惑星分布



近赤外線で低銀緯領域を観測

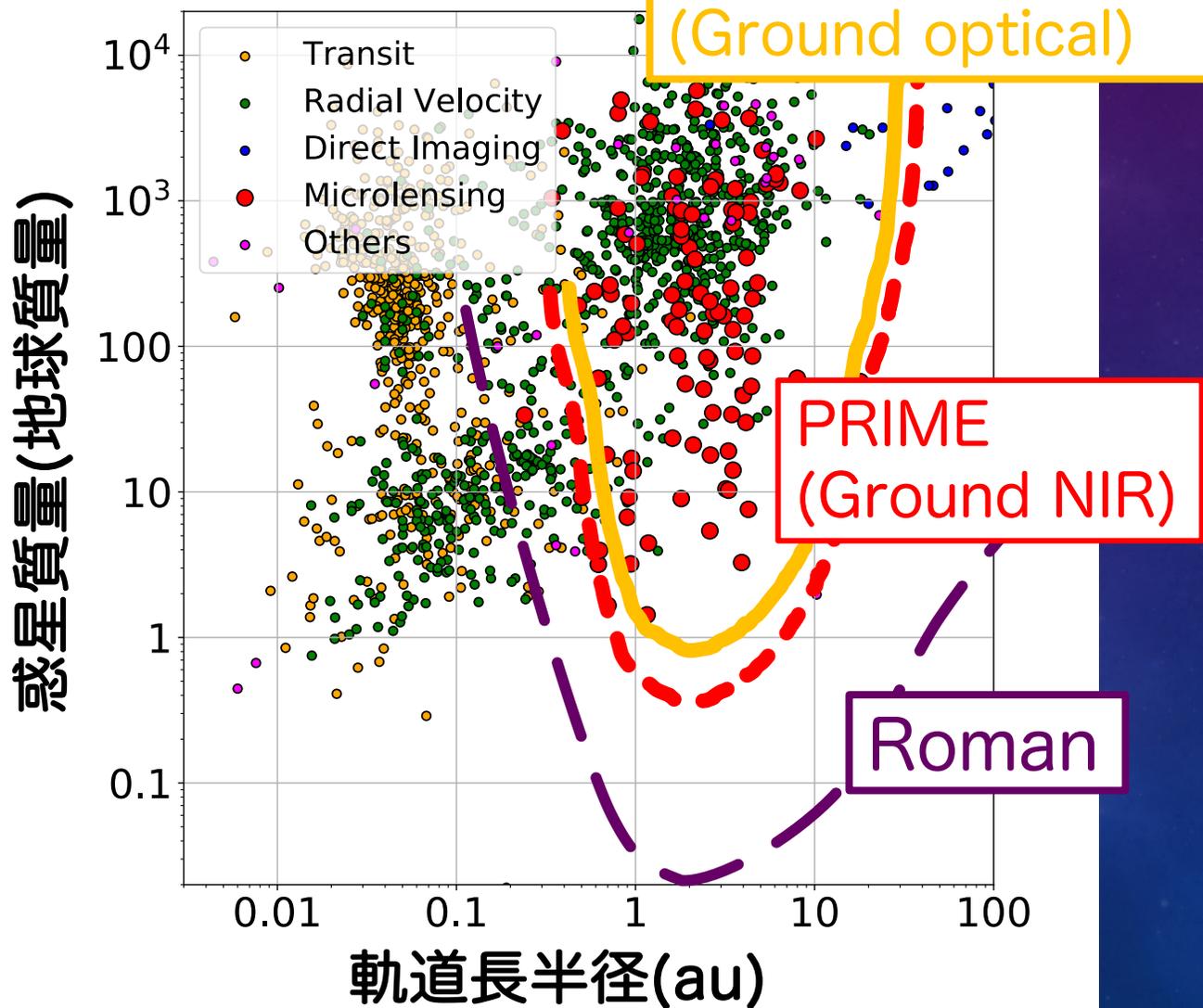
- 星密度が高いので、
イベント検出増、惑星イベント増
- 惑星検出感度の高い主系列星ソース
をモニター観測 => 検出感度増



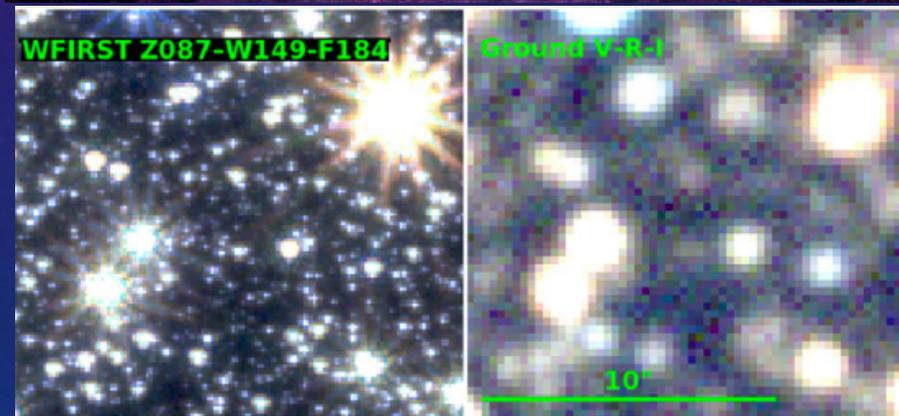
Bennett & Rhie (1998)

重力マイクロレンズの検出感度・惑星分布

発見された惑星分布



The Nancy Grace Roman Space Telescope



Penny+2019

サーベイ観測期間約一年でマイクロレンズ惑星を約1400個発見する。

OUTLINE

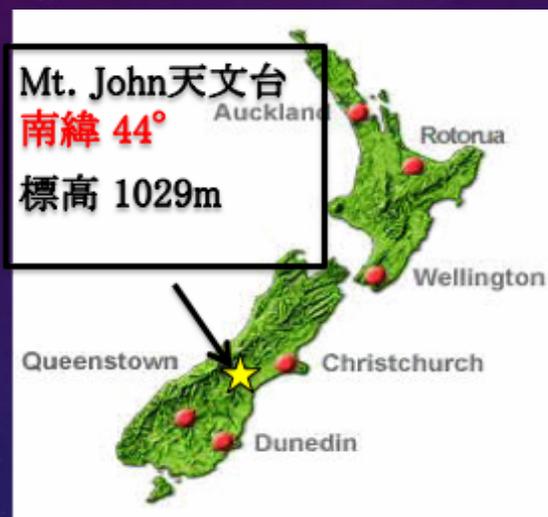
- ~~重カマイクロレンズ~~
- MOAグループ (PRIMEの前身・可視光)
- PRIME計画
- PRIME望遠鏡の概念設計・開発
- 日本での光学調整
- 展望・スケジュール

MOA

(Microlensing Observations in Astrophysics)

JPN. N.Z. U.S.の国際グループ

銀河系バルジ領域のマイクロレンズサーベイ観測・系外惑星探査



MOA-II telescope

主鏡 : 1.8m (F=2.91)
CCD : 8k × 10k pixels
視野 : 2.2 deg²
Pixel scale: 0.58"/pix (15um/pix)



MOA-IIの観測

銀河系バルジの広視野高頻度観測
50平方度の約5000万個の星々を
毎晩モニター観測する

銀河中心

イベント数 ~500/year

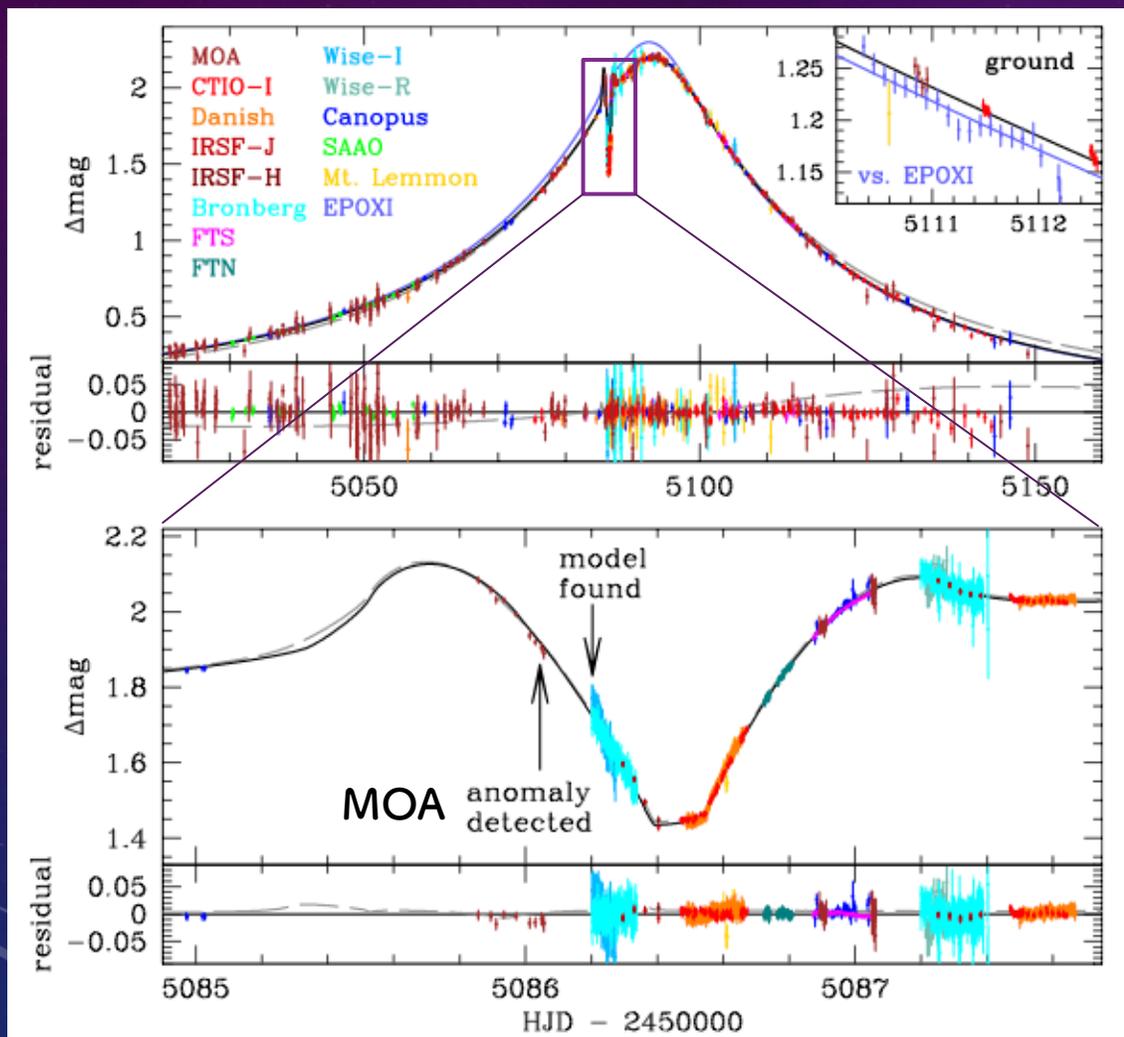
領域毎の観測頻度

-  1 obs./night ($>M_{\text{Jup}}$)
-  1 obs./90min. (M_{Jup})
-  1 obs./45min. (M_{Nep})
-  1 obs./15min. (M_{\oplus})

年間3-5個の惑星を発見

MOAによるマイクロレンズ惑星の発見例

MOA-2009-BLG-266Lb (Muraki+2011)



MOAのサーベイ観測から
惑星シグナルを検出。

主星/惑星質量比 $q \sim 10^{-5}$

主星質量 ~ 0.6 太陽質量

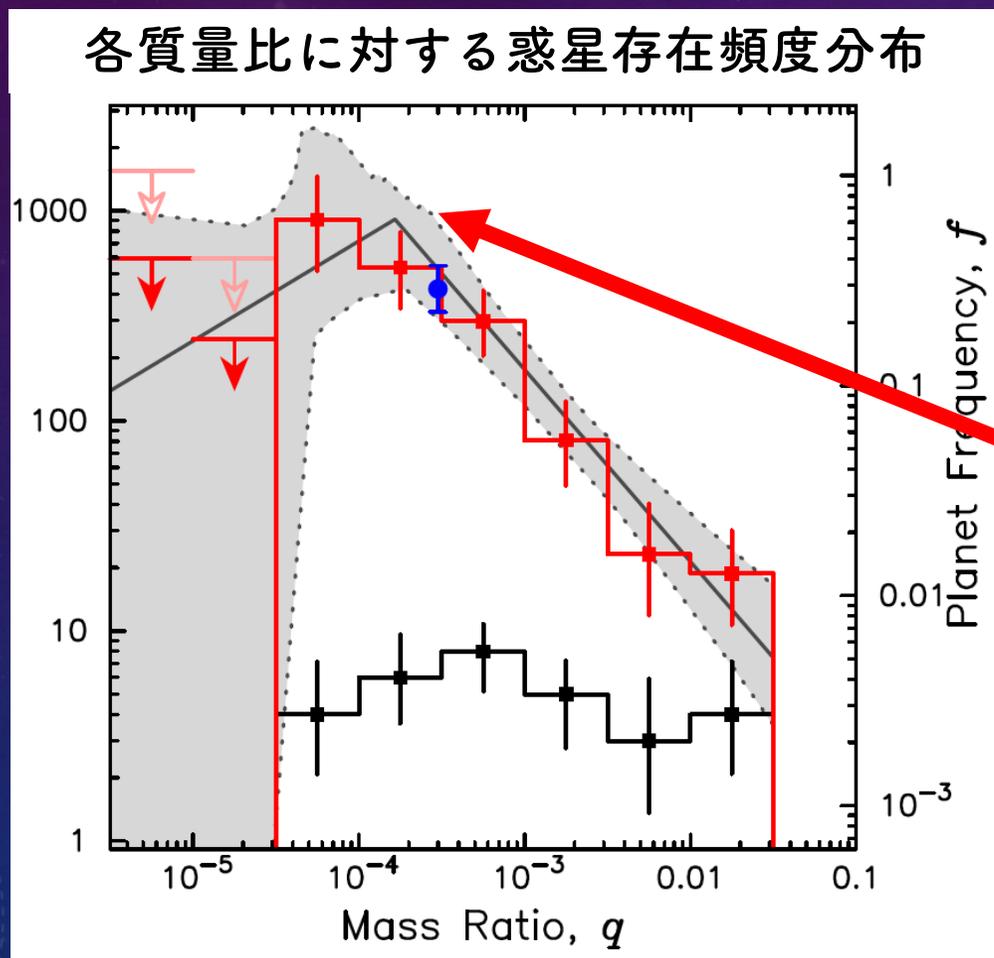
惑星質量 ~ 10 地球質量

軌道長半径 ~ 3 au

~ 3 kpc先の冷たいスーパーアースの発見

MOA-II望遠鏡による主な研究成果

- 6876個の μ lens イベント、40個以上の系外惑星の検出に貢献。
- 銀河系における自由浮遊惑星の存在量を推定 (Sumi et al. 2011)
- **Snow line 以遠の惑星存在率の質量比関数を導出 (Suzuki et al. 2016)**



2007~2012年にMOA-II望遠鏡で観測された惑星サンプルの数をサーベイ観測の惑星検出効率で補正し、Snow line 以遠の惑星存在頻度を推定

海王星質量比の惑星が最も存在頻度が高い

Daisuke Suzuki
(Osaka Univ.)

OUTLINE

- ~~重カマイクロレンズ~~
- ~~MOAグループ(PRIMEの前身)~~
- PRIME計画
- PRIME望遠鏡の概念設計・開発
- 日本での光学調整
- 展望・スケジュール

PRIME

PRime-focus Infrared Microlensing Experiment

funded by JSPS

Main Science

低銀緯領域の重力マイクロレンズサーベイ(~50%)

- Snow line以遠の低質量惑星探査
- 銀河中心領域の質量関数(BH~planet)
- Roman(WFIRST)のマイクロレンズ観測領域の最適化
- Romanとの同時観測による自由浮遊惑星の質量観測

他のサイエンス for off-bulge season(~50%)

- 近赤外分光器(SAND)による系外惑星探査
- Narrow-band サーベイ観測
- GWトランジェント観測 etc...

P.I. Takahiro Sumi
Osaka Univ.

Collaborators

- Osaka Univ.
- ABC
- NASA GSFC
- SAAO
- Univ. of Tokyo
- Kyoto Univ.
- Massey Univ.
- etc..

低銀緯領域におけるマイクロレンズサーベイの意義

Optical view



Galactic Center

可視光ではソース天体がモニターできない

低銀緯領域におけるマイクロレンズサーベイの意義

Optical view

Galactic Center

可視光ではソース天体がモニターできない

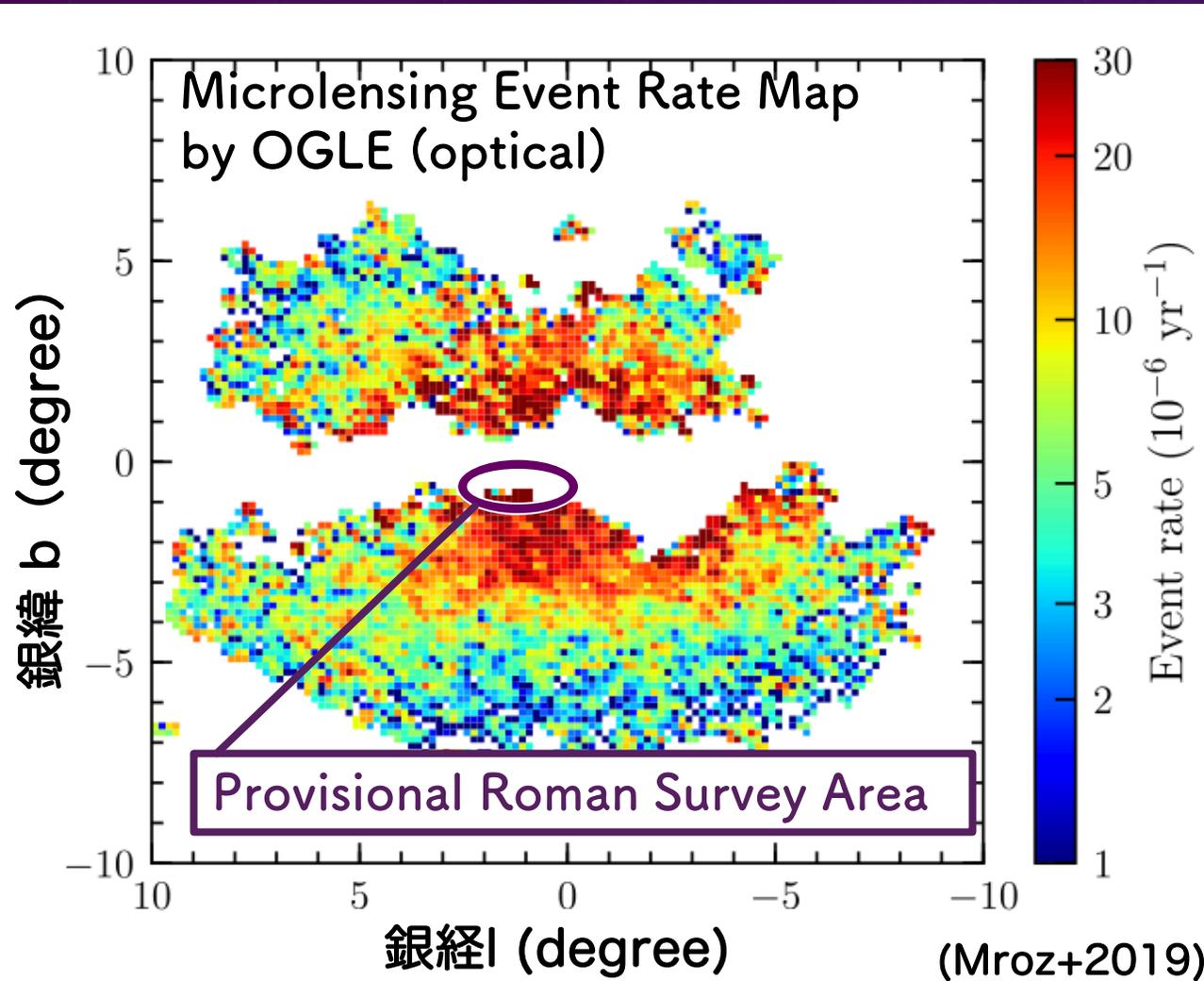
NIR view

近赤外観測により
星密度の高い低銀緯領域が観測可能に

- More events -> More planet detections
- 銀河中心の質量関数(planet~BH)
- 可視光観測の結果との比較から質量関数、惑星存在率等の銀河内環境依存性を調べる

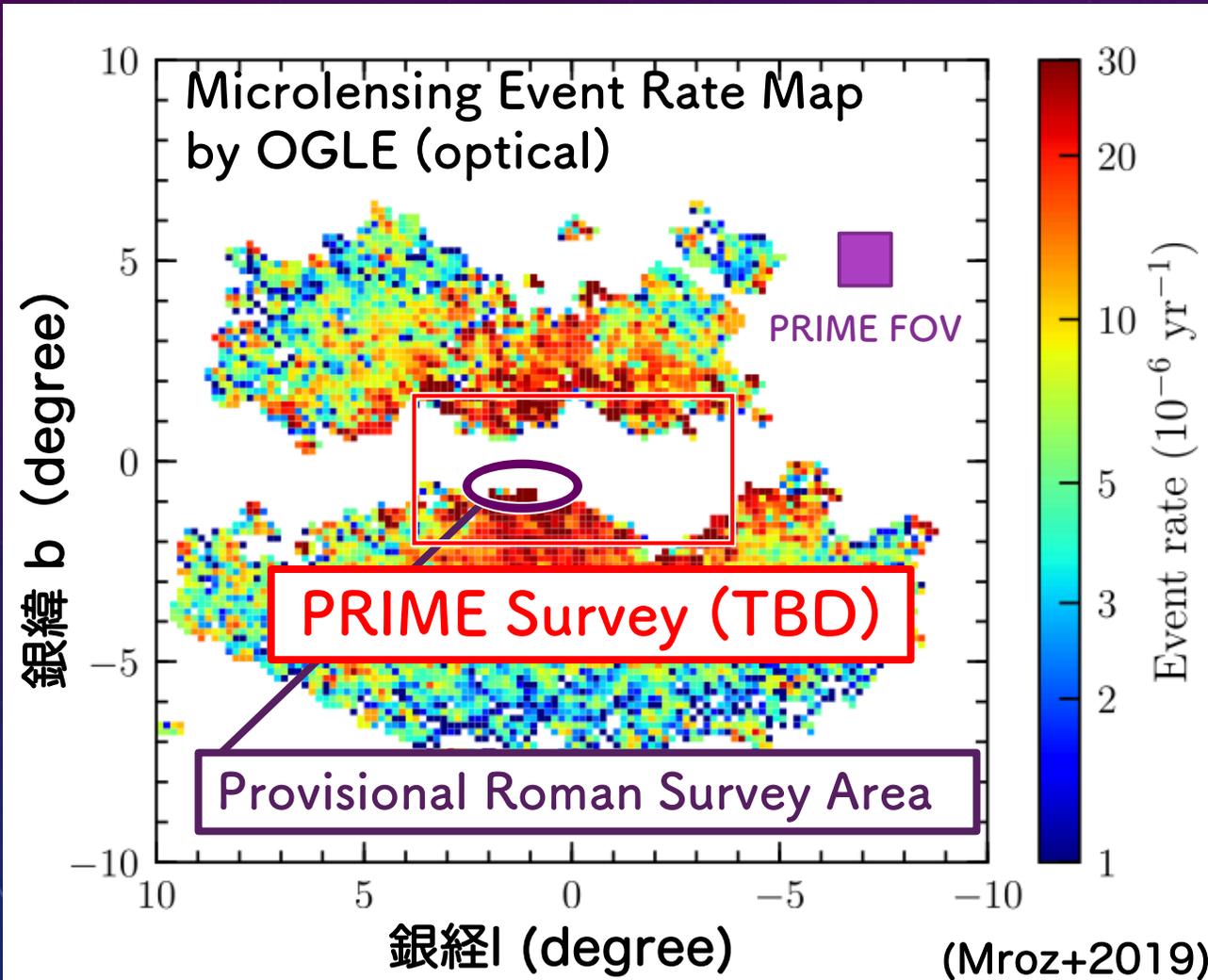
Roman衛星のサーベイ観測の最適化

2025年打ち上げ予定のRoman衛星も低銀緯近赤外マイクロレンズサーベイを行う。PRIMEは地上でその事前観測を行う。



Roman衛星のサーベイ観測の最適化

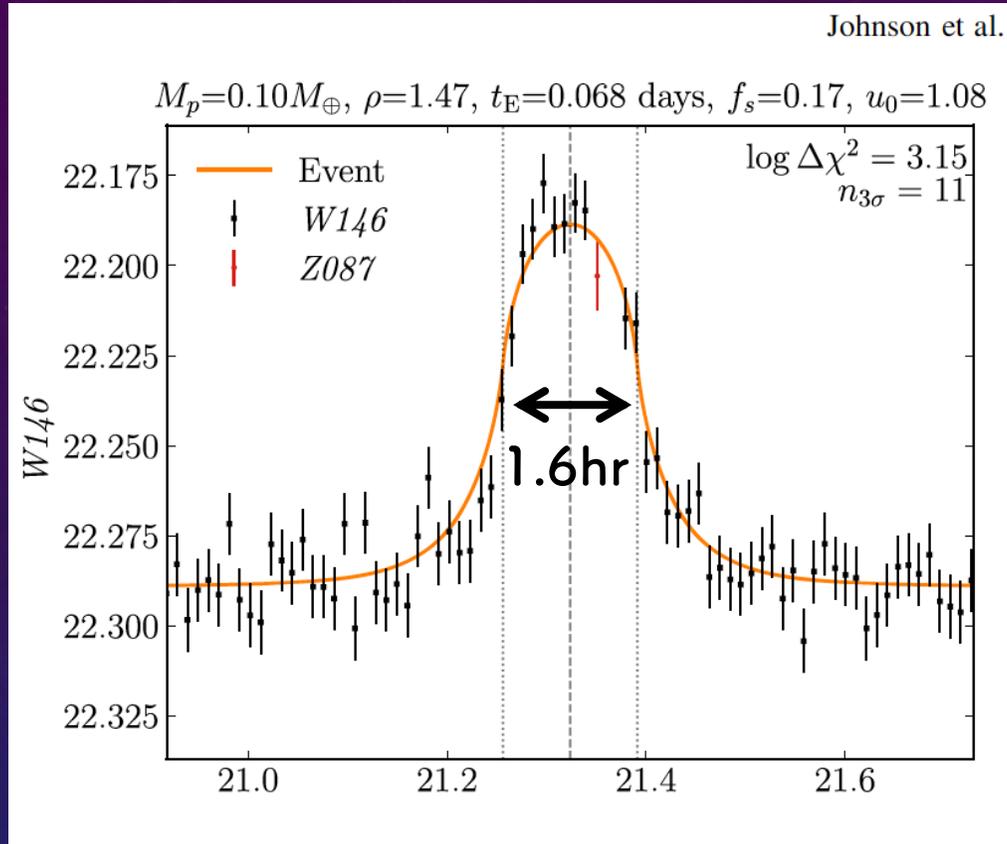
2025年打ち上げ予定のRoman衛星も低銀緯近赤外マイクロレンズサーベイを行う。PRIMEは地上でその事前観測を行う。



低銀緯領域のマイクロレンズイベントレートマップを作成

PRIMEのサーベイ観測で
外挿なしでRomanの観測戦略を最適化する

自由浮遊惑星によるマイクロレンズイベント



Romanは自由浮遊惑星によるマイクロレンズイベントを多く検出し、その存在量に強い制限を与える。非常に短いイベント。

主な観測量

- イベントタイムスケール

$$t_E(M_L, D_L, v)$$

- ソースの大きさ

$$\rho(M_L, D_L, D_S)$$

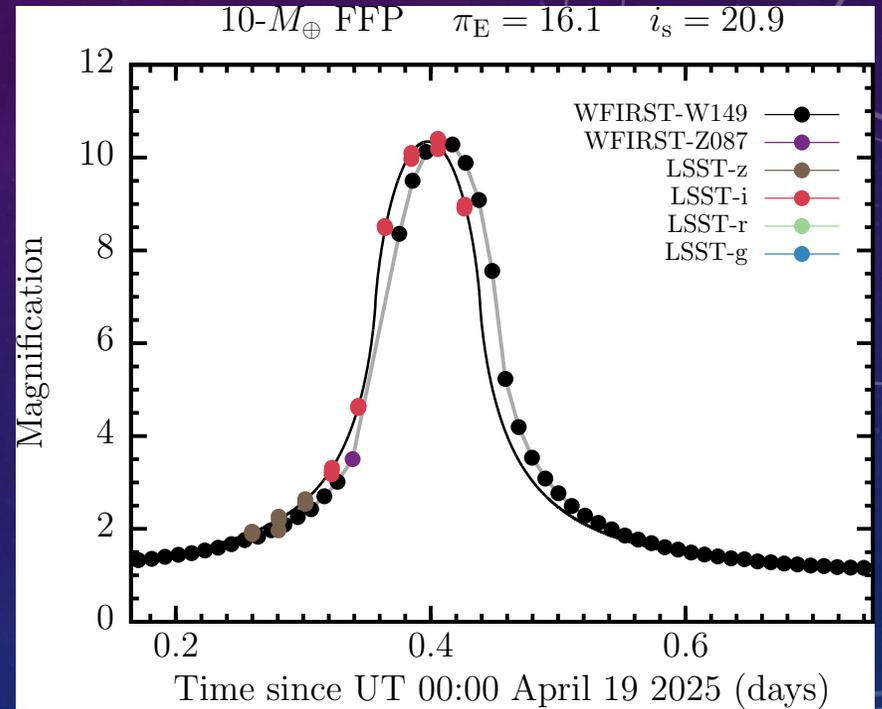
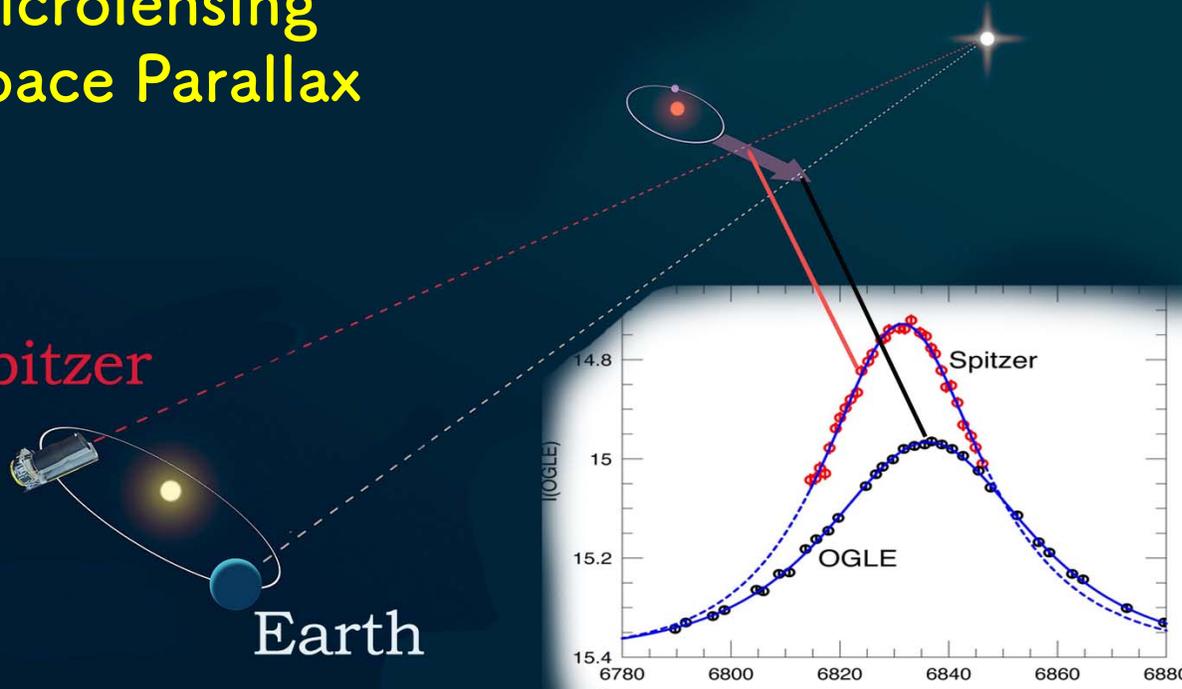
自由浮遊惑星(FFP)による
マイクロレンズイベント

レンズの物理量(質量・距離)が観測量の中で縮退しており、一意に決めることができない。

Roman衛星との同時観測によるレンズ天体の物理量決定

Microlensing Space Parallax

Spitzer



地上&宇宙望遠鏡の同時観測で**視差**を観測して、
レンズの物理量を一意に決定する。

地球~*Spitzer* : ~1au, ~15 day offset
PRIME & Roman : ~0.01au, ~3 hr offset

自由浮遊惑星に対する
唯一の質量決定手法

OUTLINE

- ~~重カマイクロレンズ~~
- ~~MOAグループ~~
- ~~PRIME計画~~
- **PRIME望遠鏡の概念設計・開発**
- 日本での光学調整
- 展望・スケジュール

PRIME 1.8m telescope

口径: 1.8m (f/2.29, prime-focus)

FOV: $(1.25\text{deg})^2 = 1.56\text{deg}^2 (0.5''/\text{pix})$ (満月6つ分)

限界等級: $\sim 18.7\text{mag}@H\text{-band}, 5\sigma, 100\text{s exp.}$

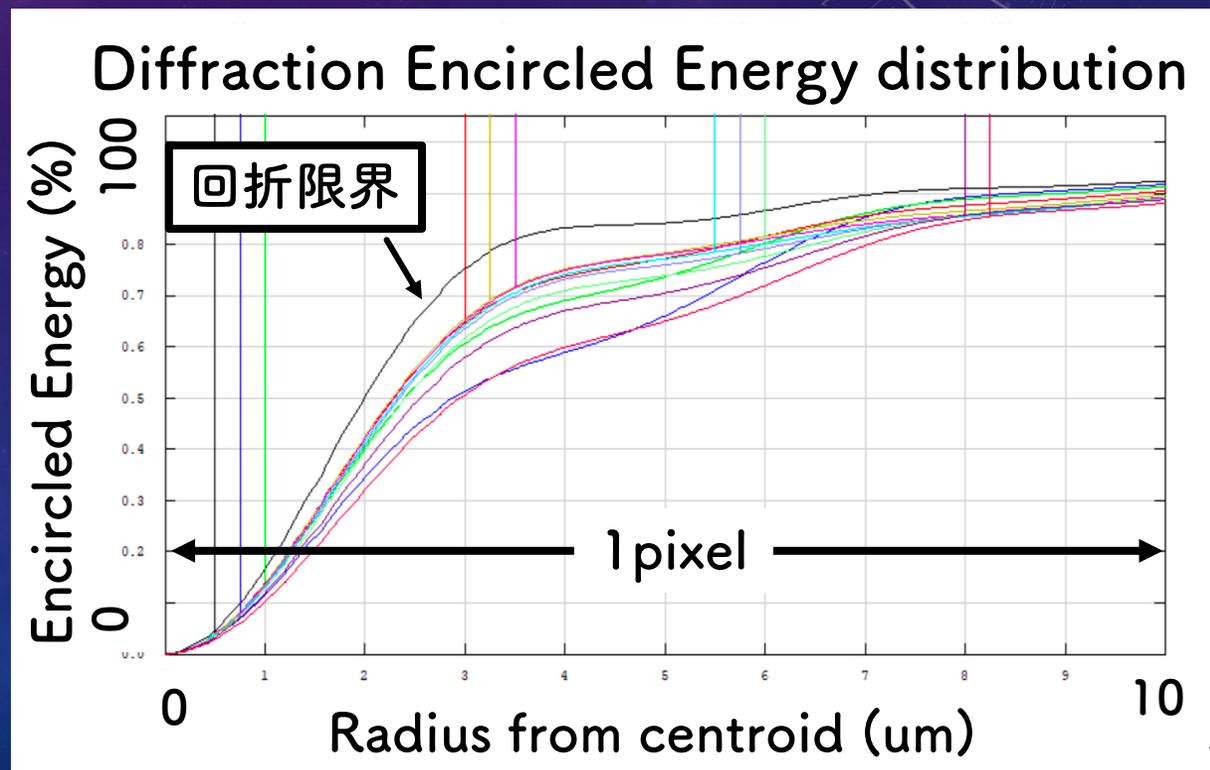
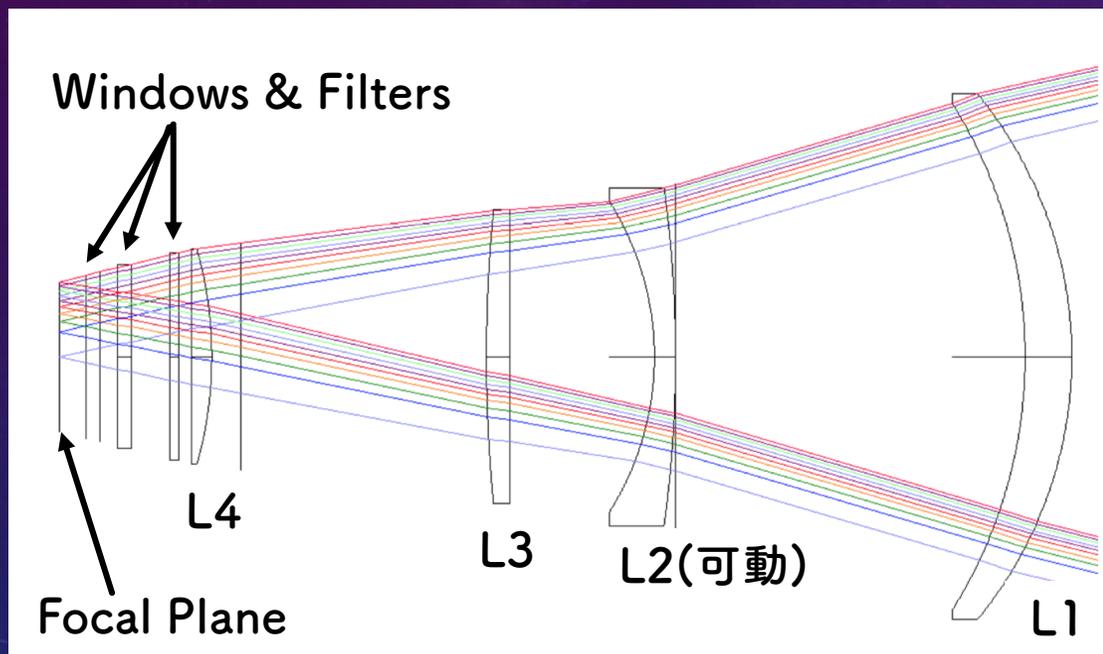
近赤外(H-band)で世界最大級広視野望遠鏡



光学設計

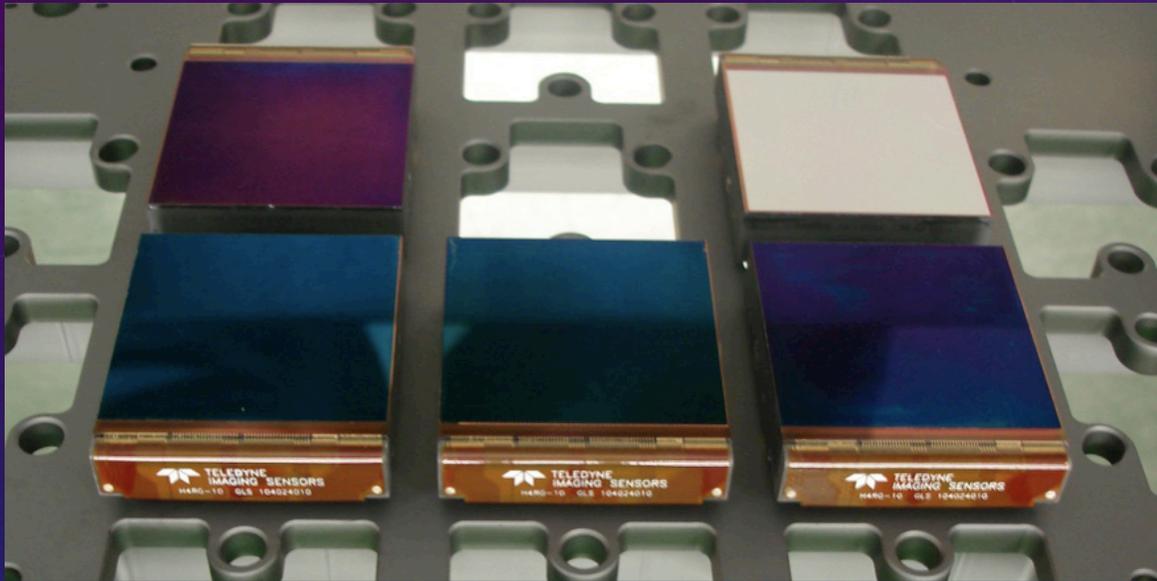
designed by Andrew Rakich

- FOV $(1.25\text{deg})^2 = 1.56\text{deg}^2$ (f/2.29), pixel scale (0.5"/pix)
- 収差補正用の4つの球面レンズ(熔融石英), High throughput ($\sim >90\%$)
- 80% Encircled Energy diameter $\sim 14\mu\text{m}$
収差が現地シーイング($\sim 1.4''$)以下に十分収まるように設計

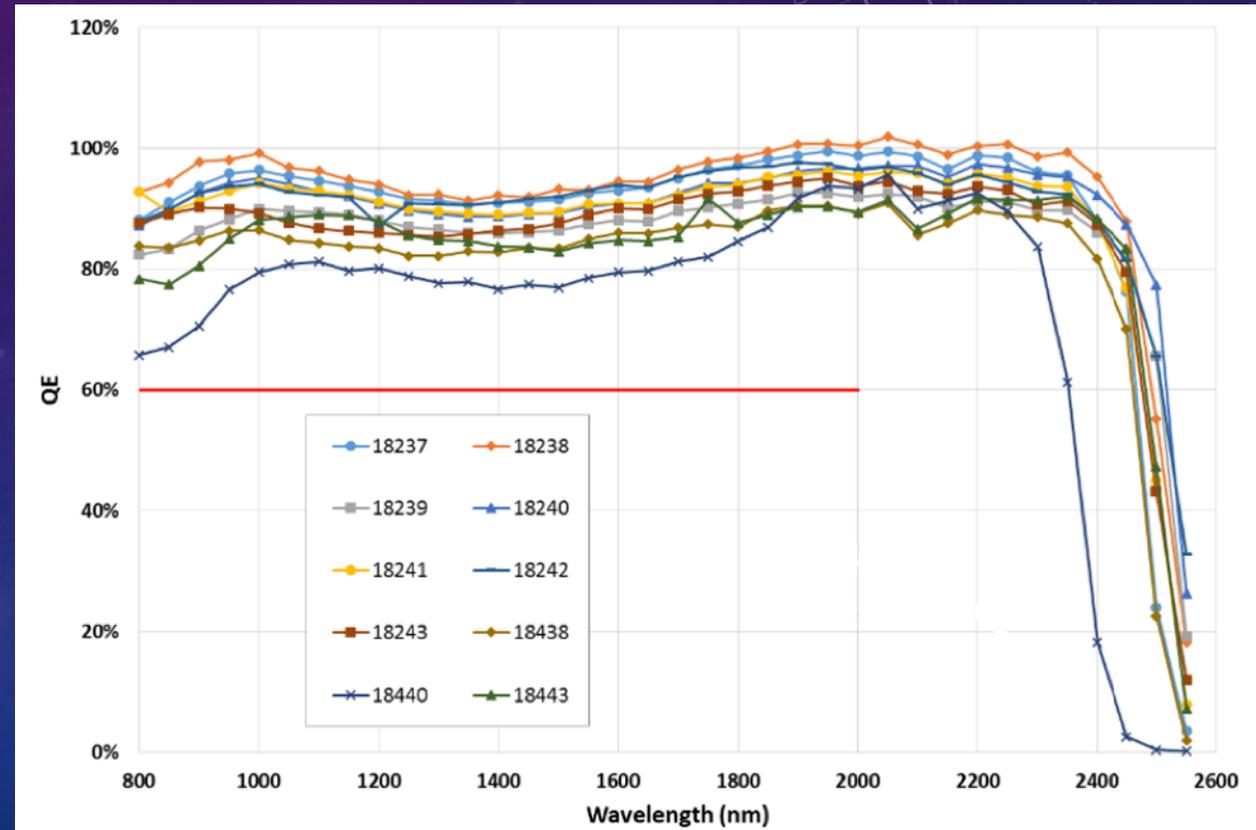


広視野近赤外観測を可能にする検出器

RomanチームからTeledyne社製 **4k×4k H4RG-10** を**4枚**借用。
メリーランド大学(米)が主導でカメラ製作を行う@GSFC



H4RG-10 のサンプル画像



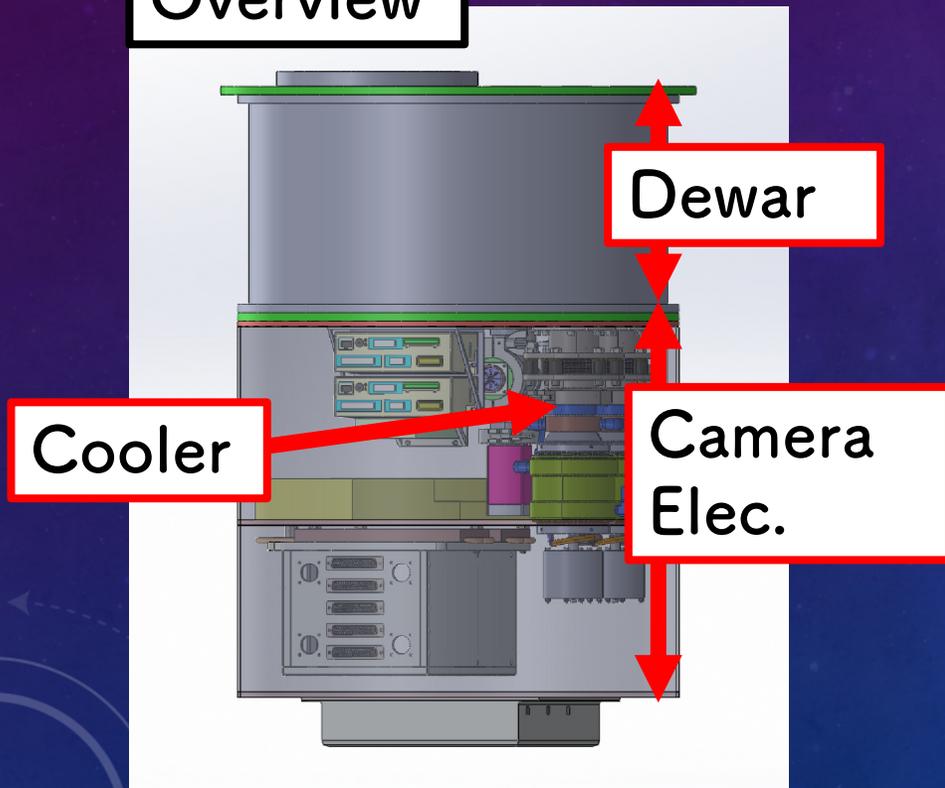
可視~近赤外(~**3.0um**)まで高いQEを持つ

カメラ設計・開発

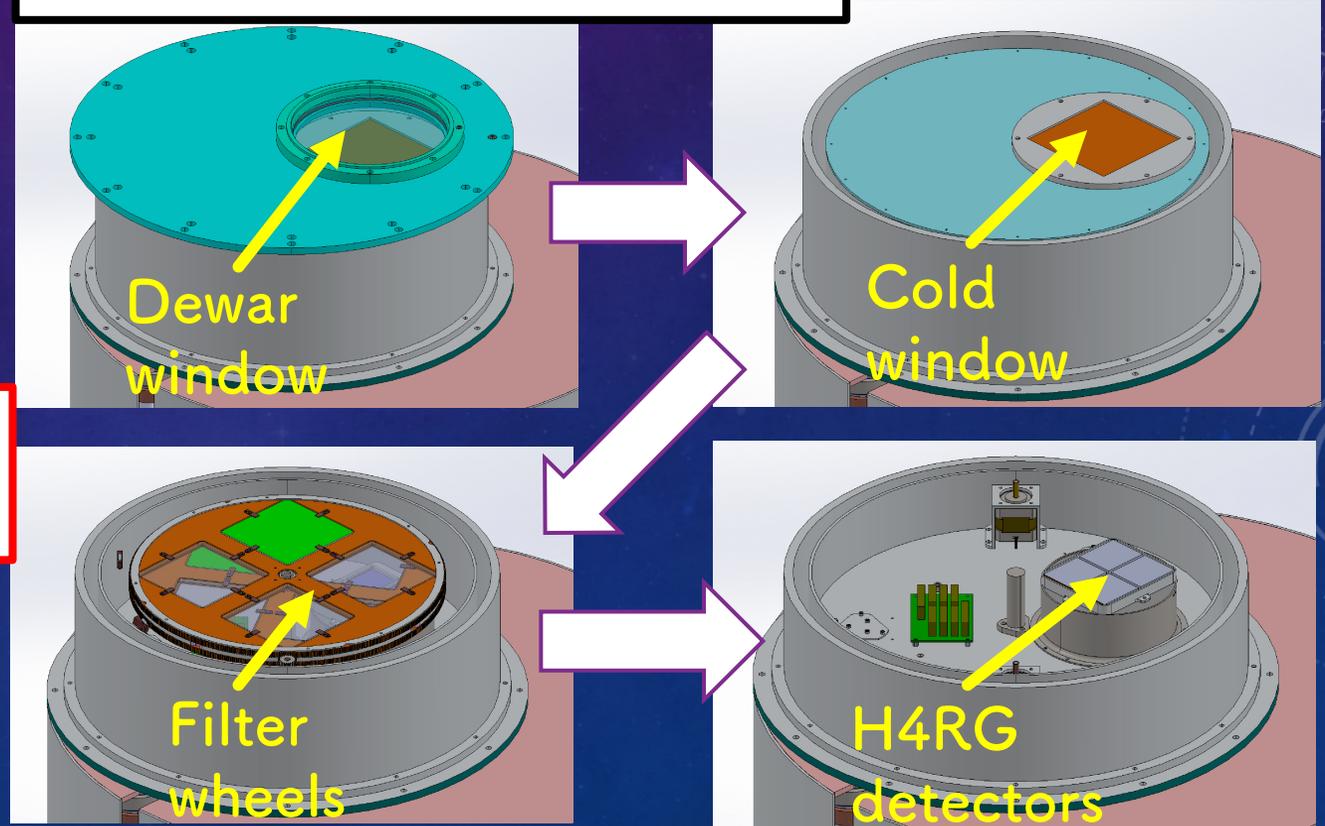
Alexander Kuttyrev (NASA/GSFC, メリーランド大学)
平尾 優樹 (大阪大学 D3/GSFC)らが、NASA/GSFCで設計

Yuki Hirao
(Osaka Univ.)

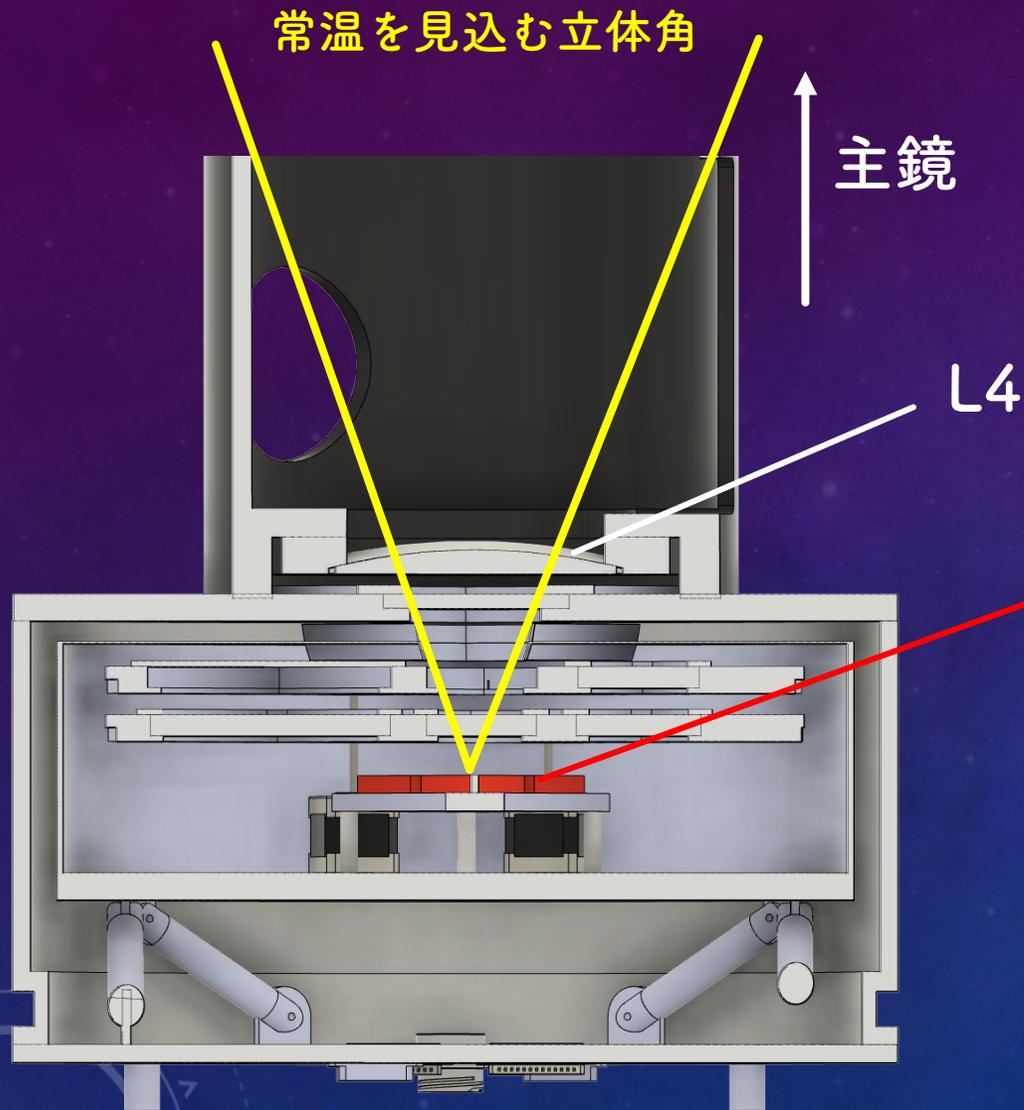
Overview



Section views of the dewar



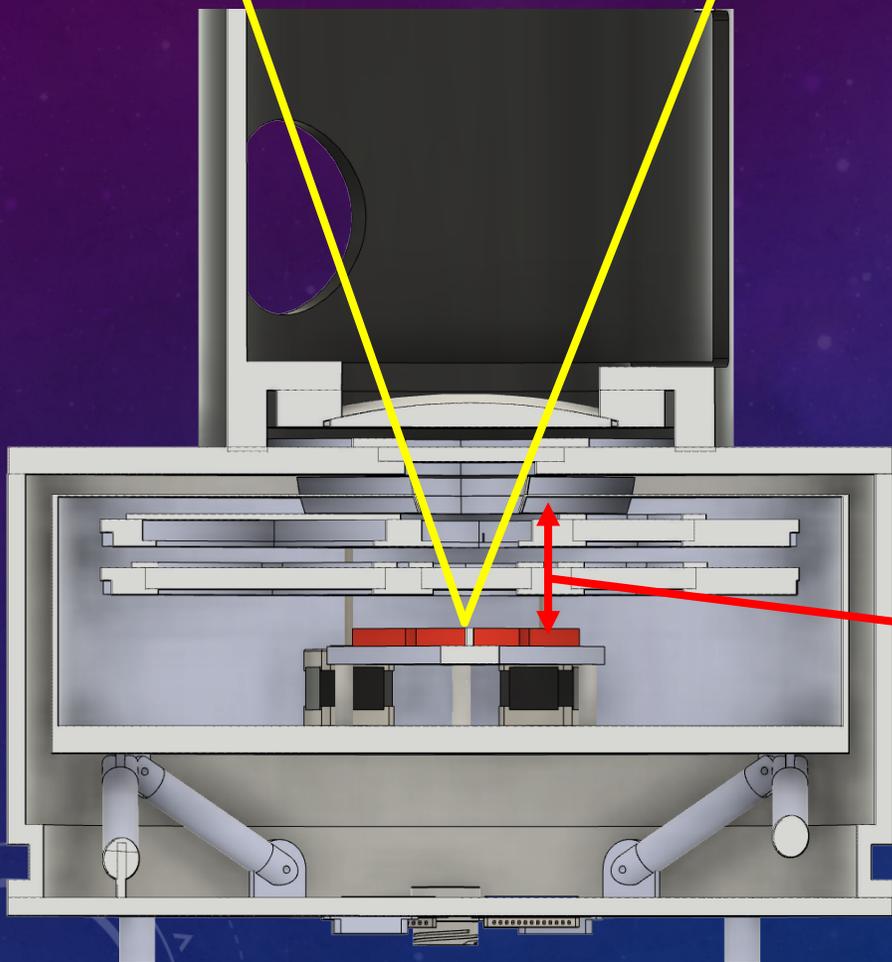
視野外からの熱的輻射を考慮した光学設計



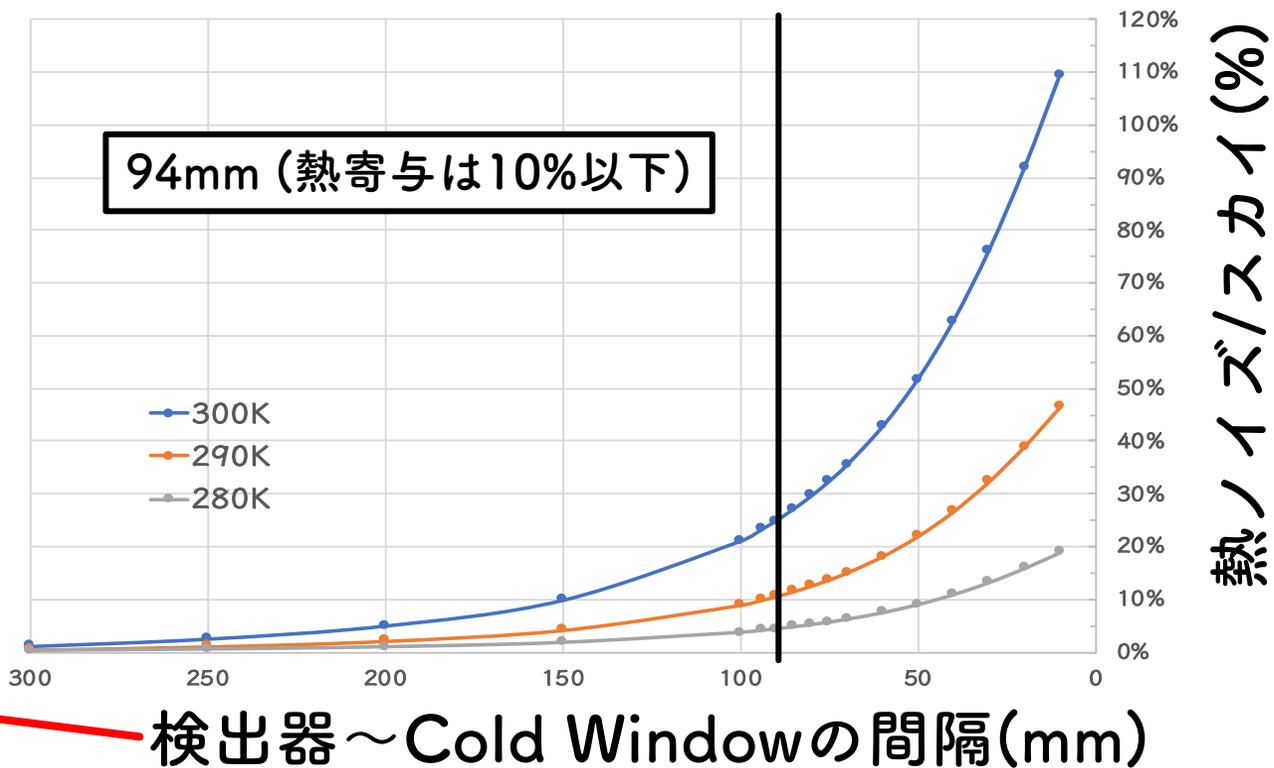
光学系のF値が小さく
コールドストップがないために、
常温を見込む立体角成分からの
赤外放射がノイズになる。

視野外からの熱的輻射を考慮した光学設計

常温を見込む立体角



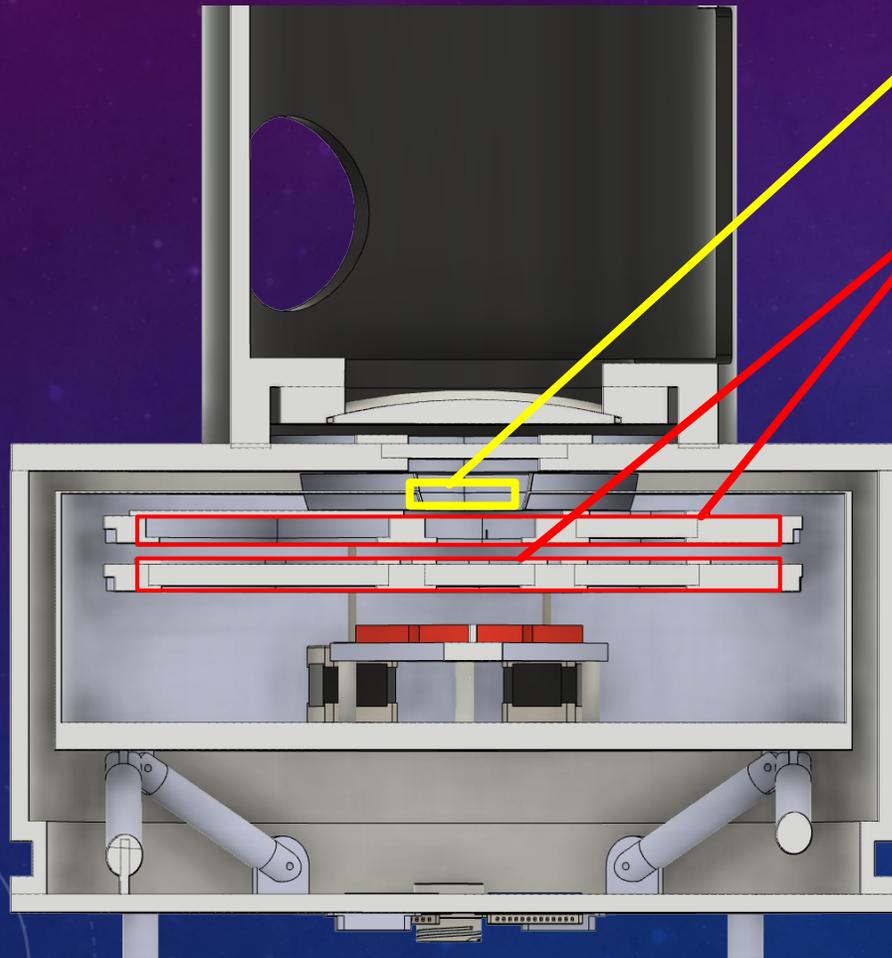
スカイに対する熱的背景光の割合



検出器～Cold Window間の距離を広げて、
できるだけ見込む立体角を小さく設計

光学フィルター

- 視野外からの赤外放射を抑えるCold Window
- Broad band (Z,Y,J,H) + Narrow band (1.06um, 1.24um, 1.63um)

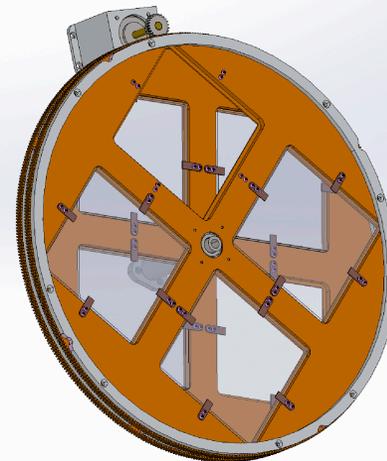


Cold Window (BK7, <180K)

2000nm以上の赤外放射を抑えるコーティング(<OD5)

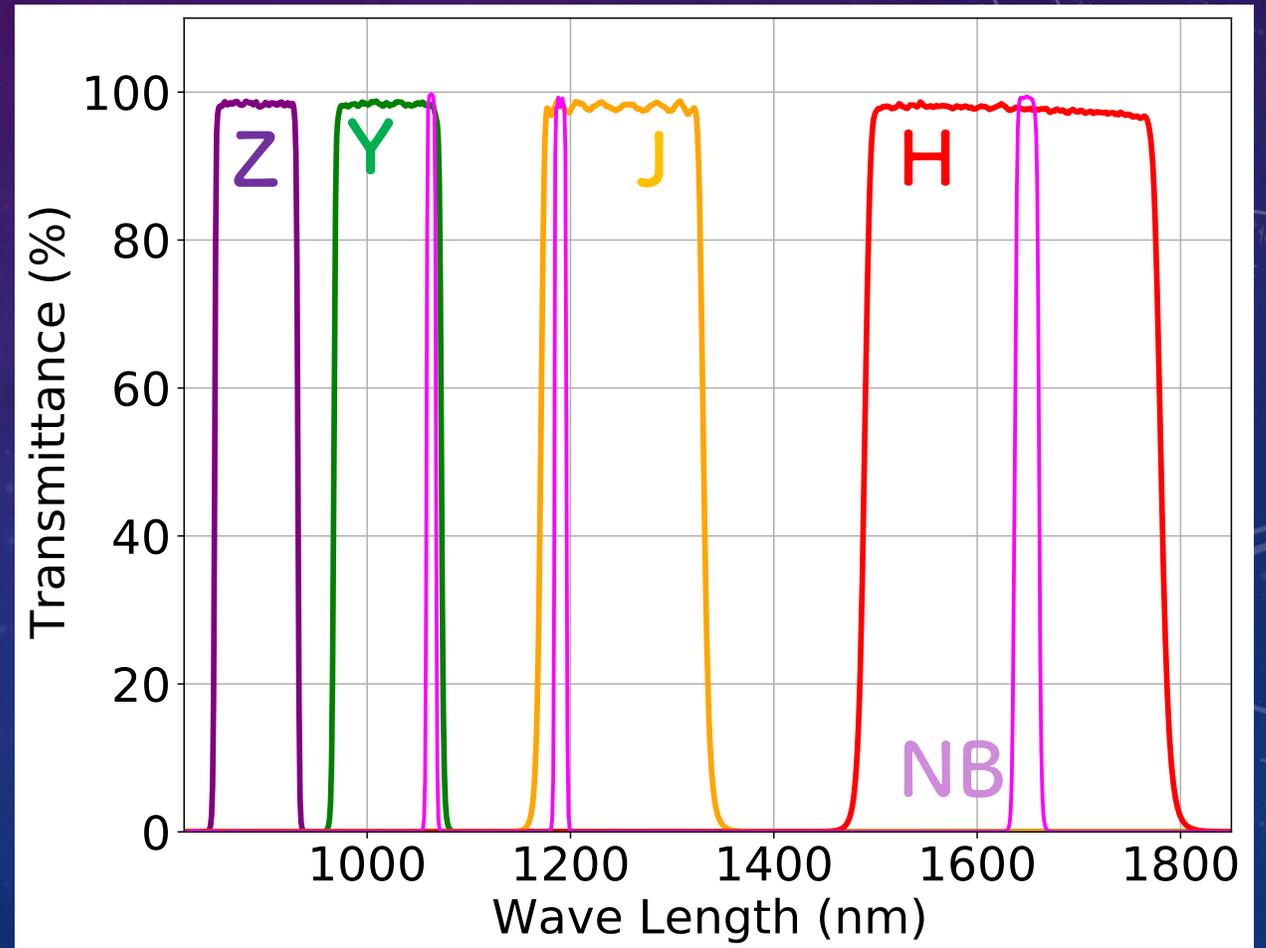
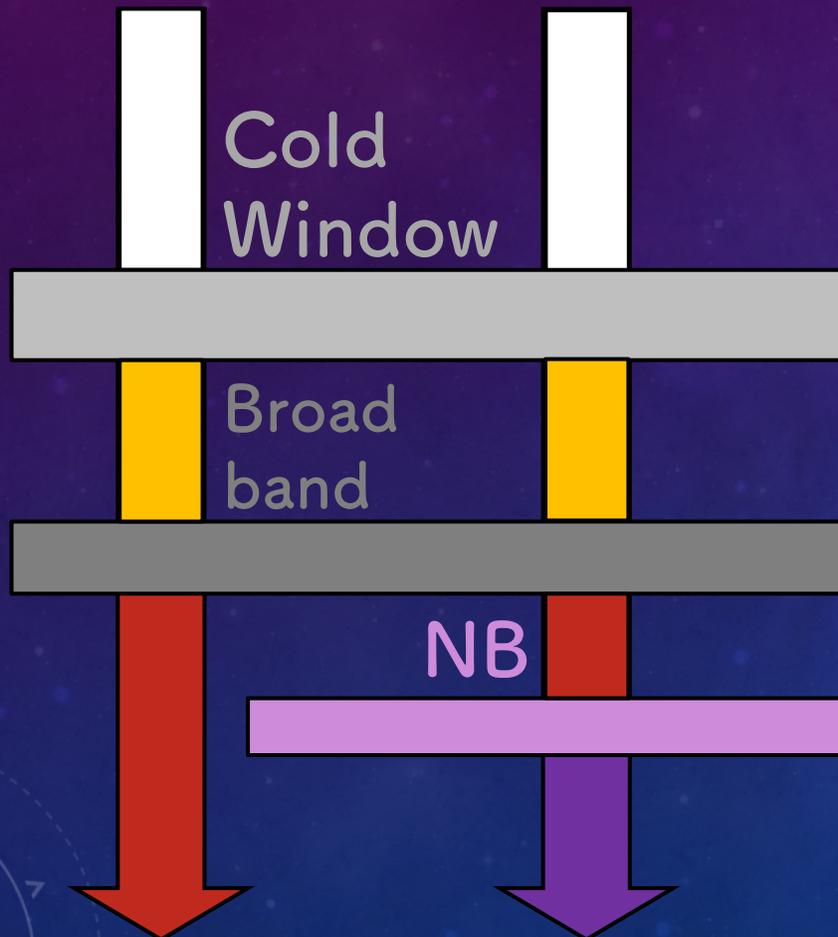
Filter wheel x 2 (~90K)

- 4枚のBroad band (Z, Y, J, H)
- 1枚のNarrow-band (1.06um, 1.24um, 1.63um)



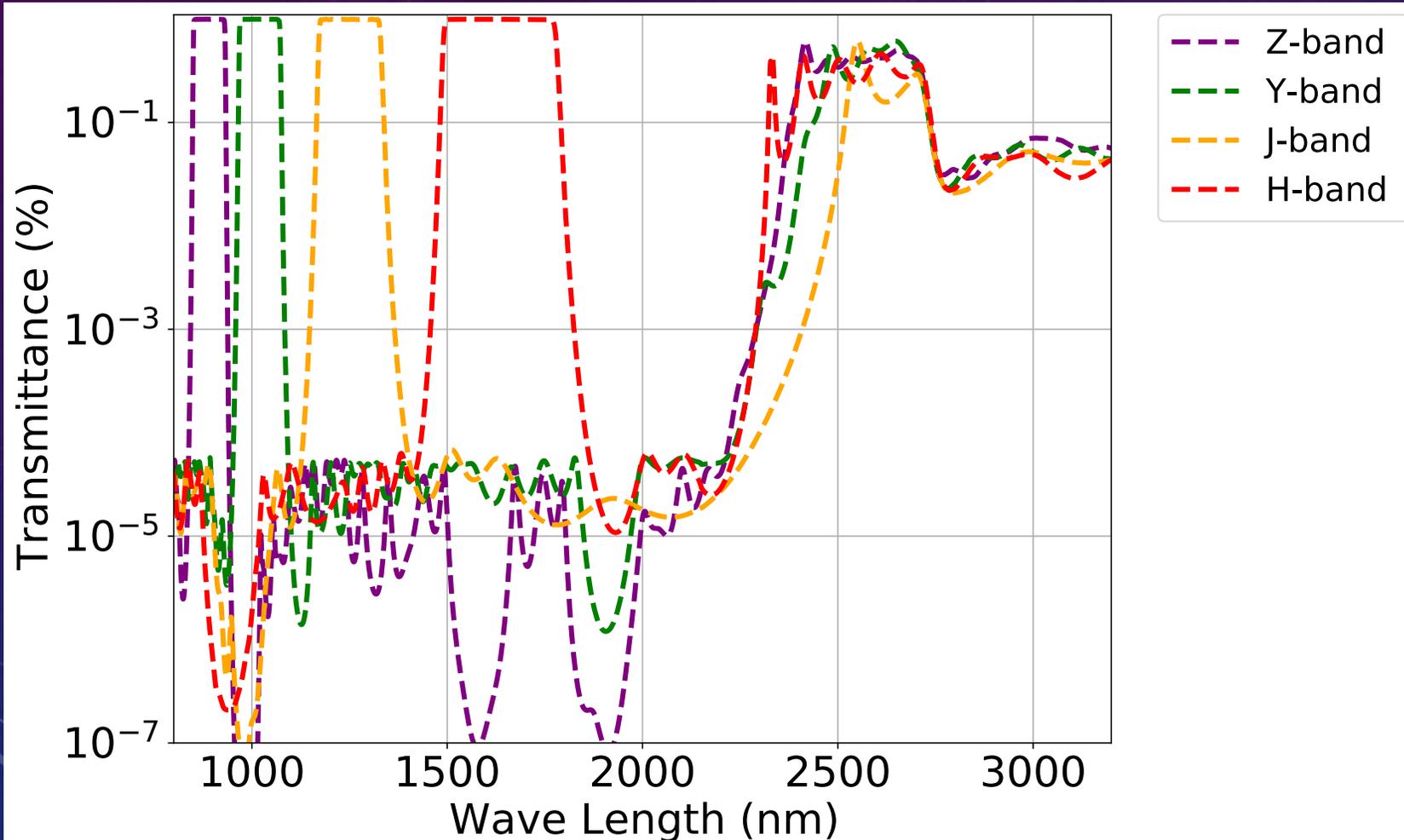
光学フィルター

- 視野外からの赤外放射を抑えるCold Window
- Broad band (Z,Y,J,H) + Narrow band (1.06um, 1.24um, 1.63um)



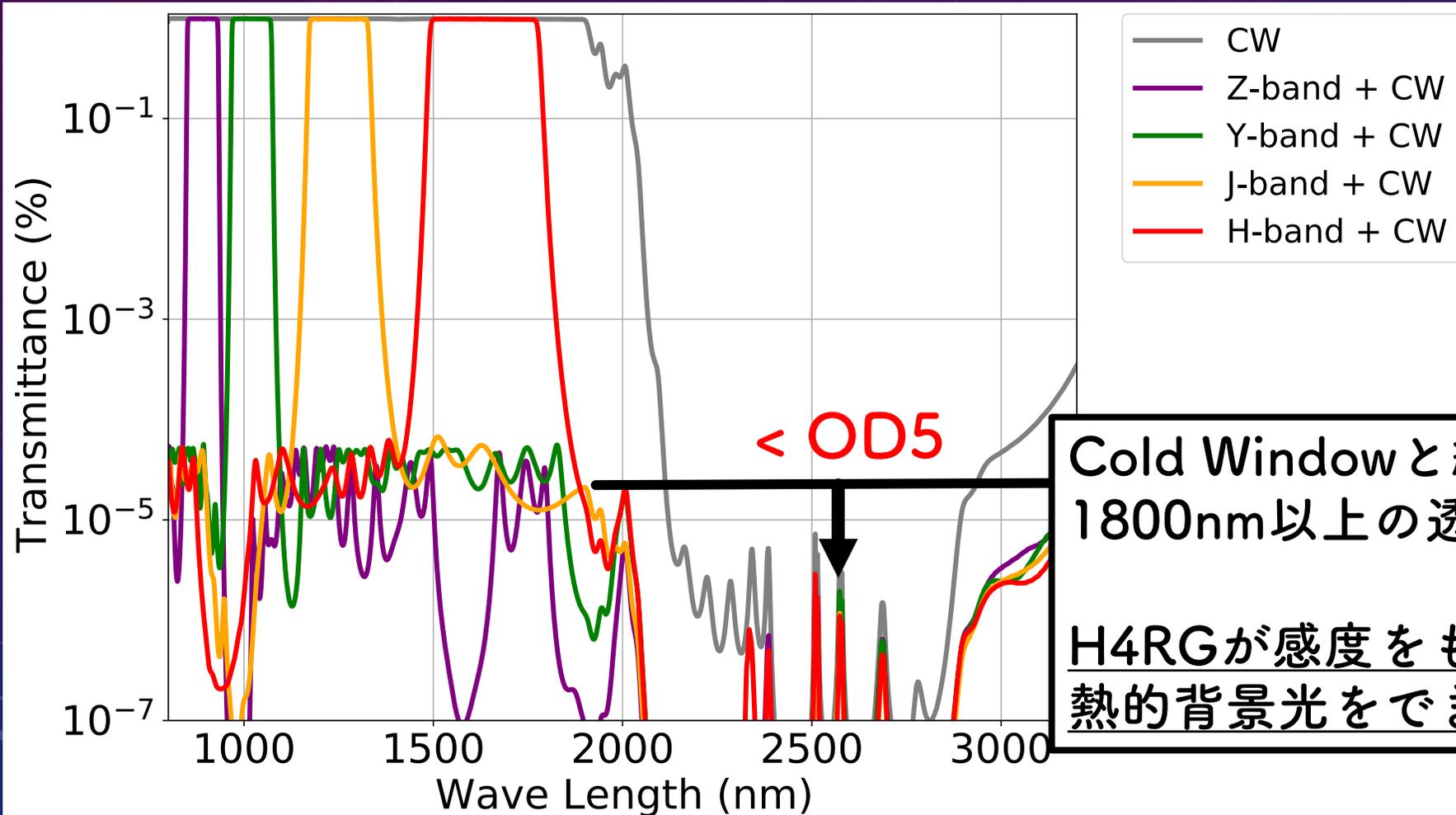
光学フィルター

- 視野外からの赤外放射を抑えるCold Window
- Broad band (Z,Y,J,H) + Narrow band (1.06 μm , 1.24 μm , 1.63 μm)



光学フィルター

- 視野外からの赤外放射を抑えるCold Window
- Broad band (Z,Y,J,H) + Narrow band (1.06um, 1.24um, 1.63um)



Cold Windowと組み合わせて、
1800nm以上の透過率をOD5以下に

H4RGが感度をもつ長波長側の
熱的背景光をできるだけ減らす

OUTLINE

- ~~重カマイクロレンズ~~
- ~~MOAグループ~~
- ~~PRIME計画~~
- ~~PRIME望遠鏡の概念設計・開発~~
- 日本での光学調整
- 展望・スケジュール

日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

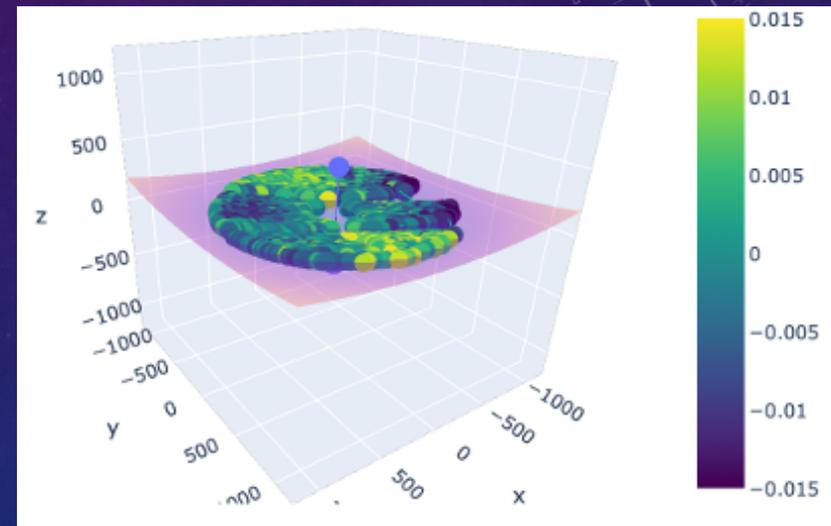
- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整(粗調整)
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整



レーザートラッカー
(三次元測定器)



反射器(SMR)で
鏡表面の三次元データ
を計測



得られたデータ点を放物面フィット

主鏡軸を~10秒角精度で計測

日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整(粗調整)
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整



主焦点ユニット(レンズ)
の光軸も計測



主鏡についての参照点

参照点を主鏡と主焦点ユ
ニットに設置

参照点を測るだけで各光軸
の三次元的な位置が導ける
ように準備する。

日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

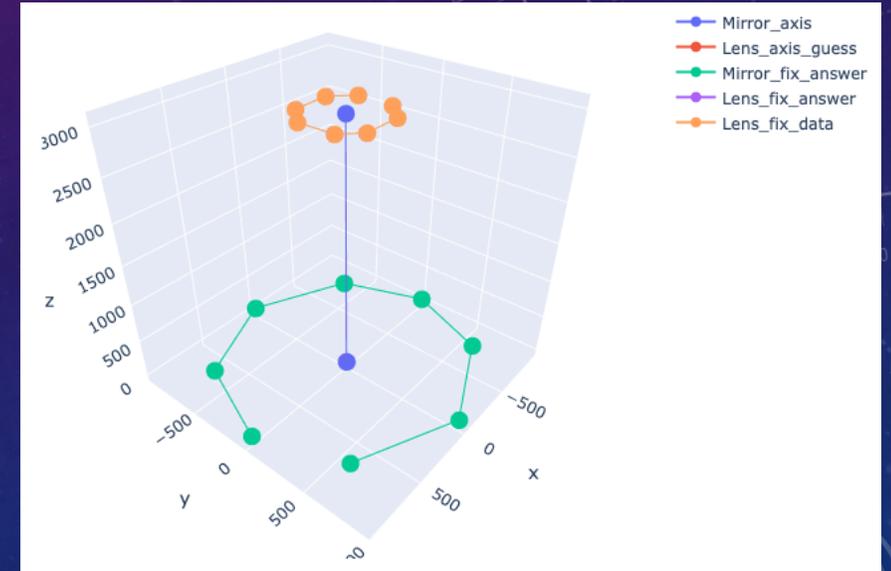
- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整(粗調整)
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整



参照点を測定
各軸を計測から導出



スパイダー部を調整
tip, tilt, decenter



- FAROの位置測定精度は~10um
- 粗調整段階での光学系の軸ずれは最終位置に対して~50秒角程度

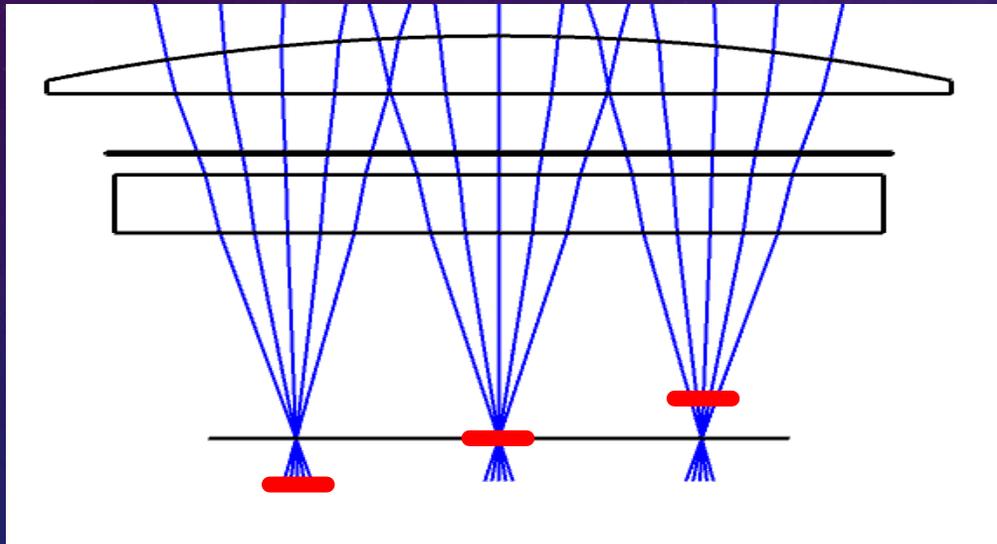
=> 十分微調整の範囲内だった

日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整

本番用のカメラとは別に、光学調整用のテストカメラを製作。
広い視野全体で光学系を最適化できるようなカメラ設計

Tsubasa Yamawaki
(Osaka Univ. M2)



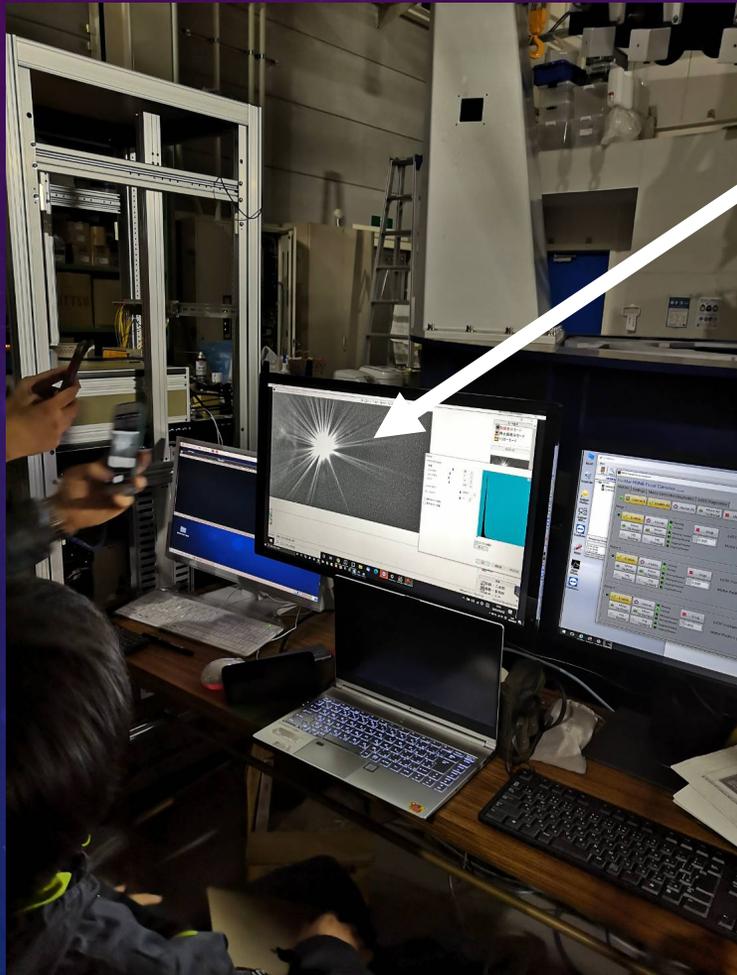
検出器面で視野毎に高さの異なる
3つの検出器(z-band)を配置。



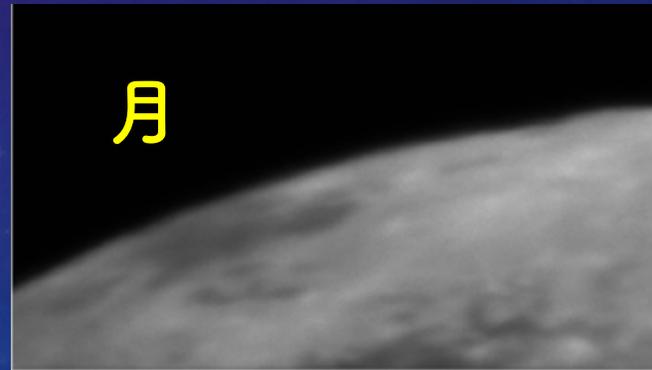
テストカメラ実機

日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整



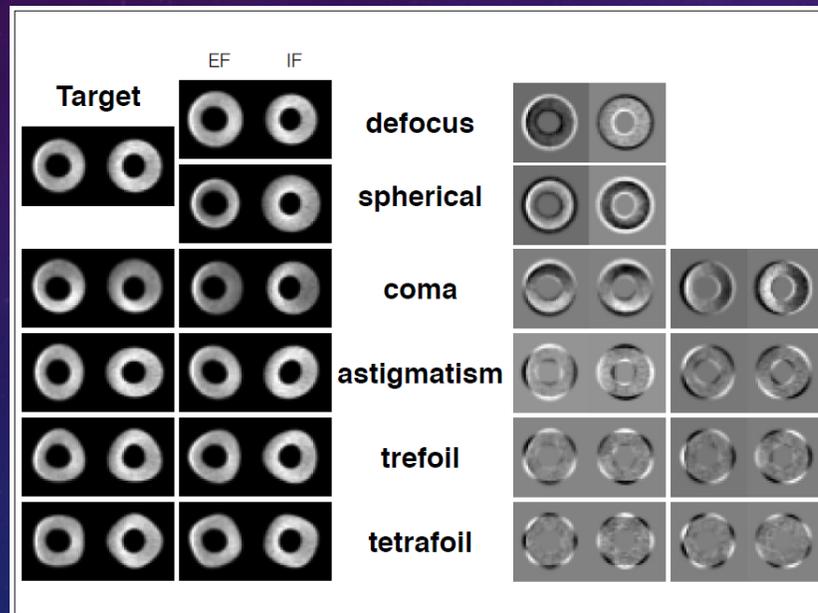
初めて撮ったデネブの画像
テストカメラのファーストライト
望遠鏡として機能した！



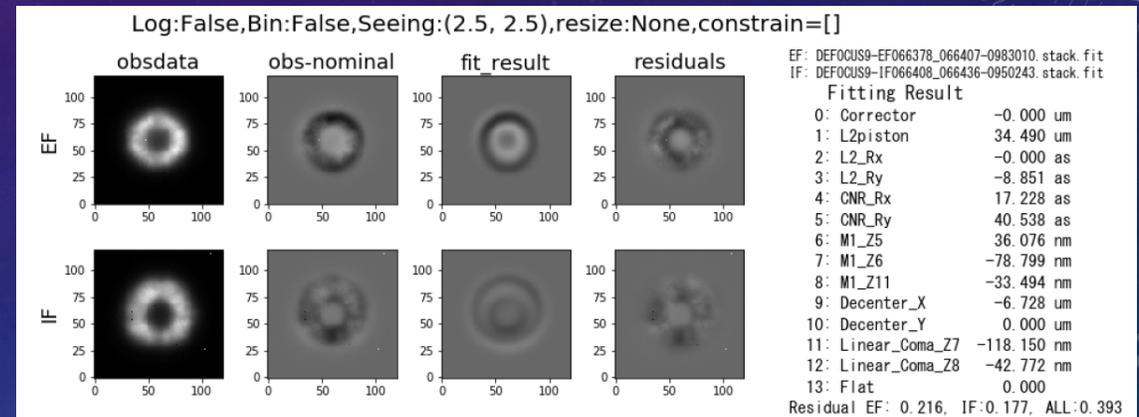
日本での光学調整 (9月下旬~11月上旬)

- レーザートラッカーによる主鏡と主焦点ユニットの光軸調整
- テストカメラ(z-band)による広視野光学調整

あえてデフォーカスした像を撮影。得られた収差パターンをモデルと比較し、光学系の相対位置を解析的に推定する(Kuijken+04)



解析的に得られたデフォーカス像



光学調整中に実際に撮られたデフォーカス像

最終的に視野中心でハルトマン定数
0.28'' (<< 1.4'')を達成

PRIME計画のスケジュール

- 2016 詳細デザイン設計
- 2017~2020 製造、組み立て・光学調整(日本国内)、**輸送**
- 2021 現地インストール、ファーストライト、**観測開始**
- ~
- 2023 銀河中心のイベントレートマップ作成
- 2025 *Roman* 衛星 打ち上げ
同時観測開始
- 2030~ *Roman* 観測が続くまで観測を継続



Ground breaking @ SAAO
2020/10/26

まとめ

- PRIMEは近赤外重力マイクロレンズサーベイ観測を行う広視野望遠鏡、観測サイトはSAAO サザerland
- 銀河系内の系外惑星分布を研究する
- Romanの観測領域・戦略を最適化
- Romanとの同時観測によりFFPの物理量を観測
- 近赤外線分光器(SAND)、NBサーベイ、transients..
- 2021年度内にインストール・観測開始