

# すばる望遠鏡広帯域分光装置 **NINJA** 近赤外分光器の概要

2022/12/21

可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2022

東京大学 天文学専攻 M1 安田彩乃

# OUTLINE

- 観測目標
- 装置概要
- 補償光学
- 光学設計
- 感度計算
- まとめ

# 宇宙における鉄より重い元素の起源説明

## 重元素の起源

鉄までの元素: 恒星内部の核融合で合成されている

鉄より重い元素: r-process (素早い中性子捕獲反応) で合成されている

⇒ r-process が起きている現場の最有力候補: **中性子星合体**

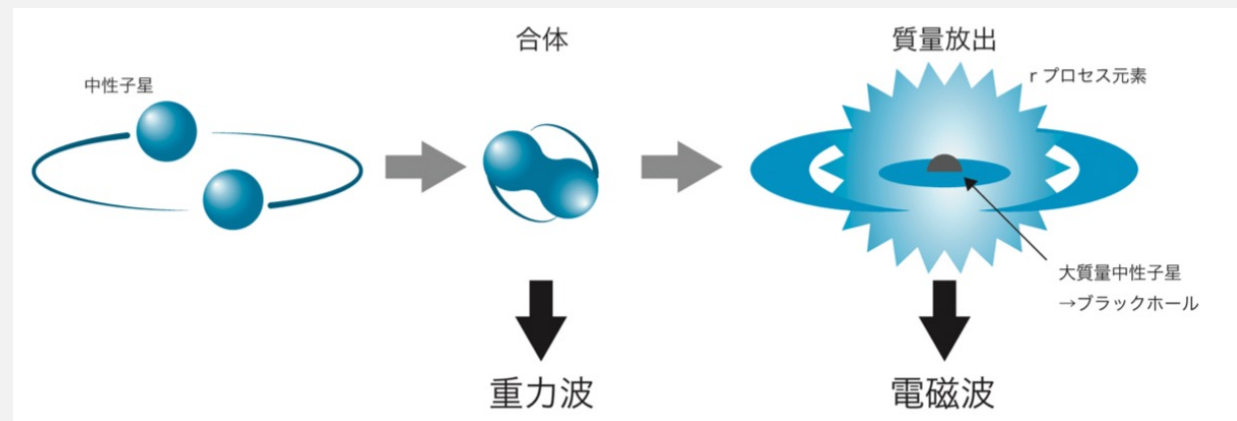
中性子星合体によって合成された重元素が放射性崩壊を起こすことで、可視光や近赤外線の放射「**キロノバ**」を生じる

キロノバは超新星爆発と比較して発生頻度が低く暗い  
→ 通常の突発天体サーベイでは発見が難しい



中性子星合体は有力な重力波源

→ 重力波観測 + 電磁波観測



Tanaka et al. (2021)

# キロノバの初検出

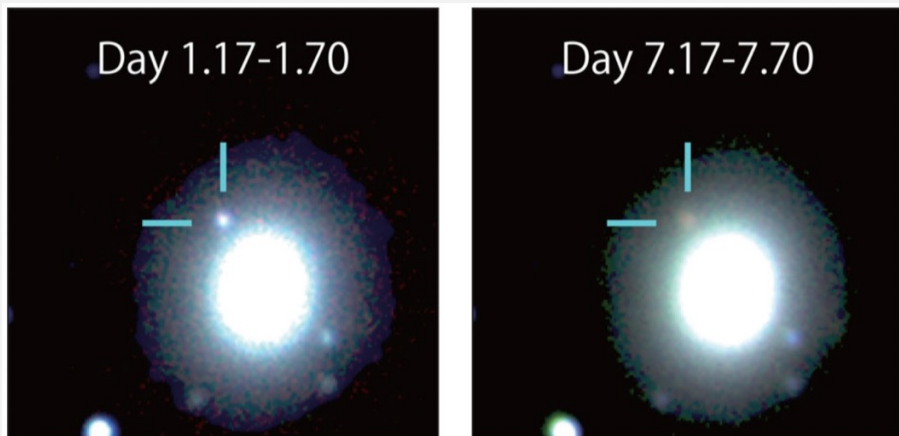
2017年 重力波望遠鏡LIGOとVirgo

中性子星合体からの重力波GW170817が初検出

→重力波源の電磁波対応天体が発見された

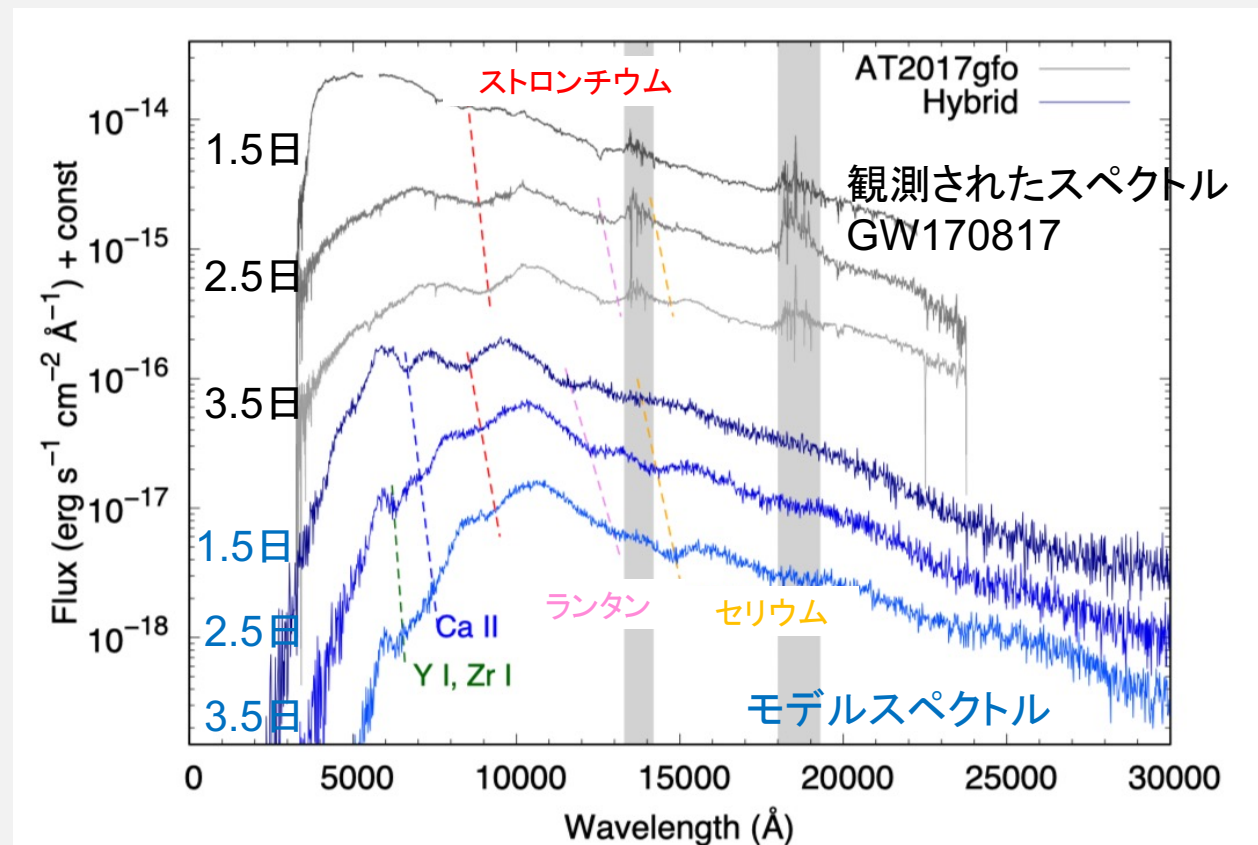
中性子星合体によって  
重元素が合成されているという証拠が得られた

GW170817の電磁波対応天体  
z-, H-, Ks-bandの3色合成画像



Utsumi et al. (2017)

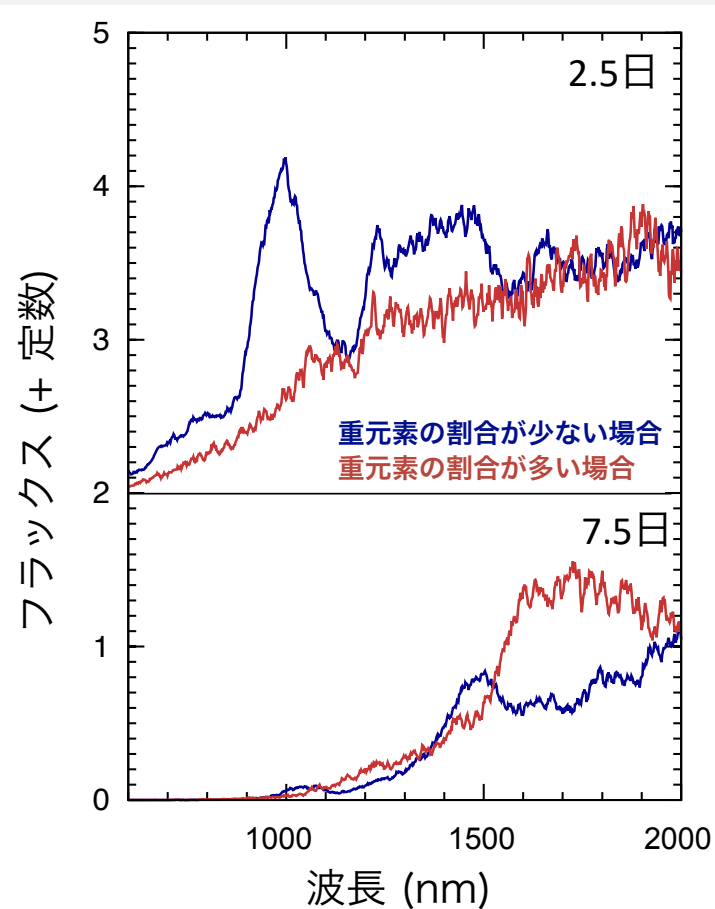
計算によるモデルスペクトルとGW170817で  
観測されたスペクトル



Domoto et al. (2022)

# キロノバのスペクトル

## 中性子星合体の理論スペクトル



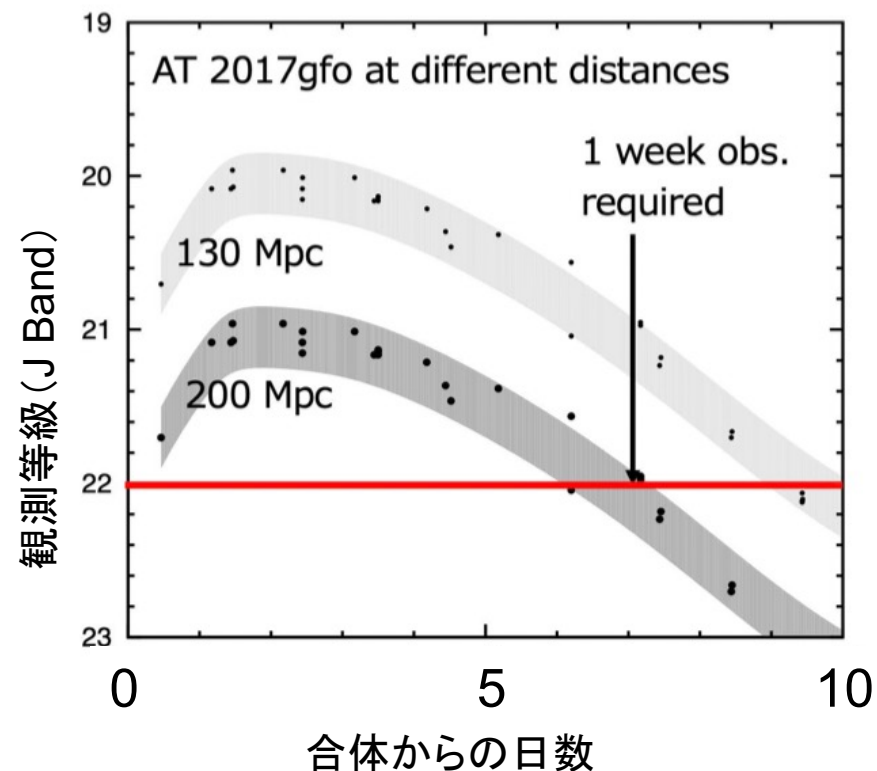
Hotokezaka et al. (2021)

- 中性子星合体によって放出される重元素質量によってキロノバのスペクトルは異なる
  - r-process元素が含まれることで合体後1週間程度の時間スケールで近赤外線で明るくなる
    - 元素合成の全体像を明らかにするためには、可視光から近赤外にかけて1週間以上の分光観測が必要になる
- 一例しか観測例がない
- 一般的にどのような重元素がどれだけ中性子星合体によって合成されているか知るため、より多くの観測例が必要

# 観測目標

- 重力波第五期観測(2025年開始予定)で重力波望遠鏡が目標感度に到達した場合、200Mpc以内の中性子星合体を検出可能になり、全天で年間50イベント、すばる望遠鏡では年間10イベントが観測可能になる予定
  - 距離200Mpcのキロノバを合体後1週間分光観測するため、近赤外線帯(J-band)で**限界等級22mag (S/N=10)**の感度が必要  
そのためには口径8m級の望遠鏡での観測が必要
  - GW170817のキロノバスペクトルを観測したVLT/X-shooterでは感度が足りない
  - 可視から近赤外線までの広帯域中分散分光器はすばる望遠鏡にまだない
- 必要な感度を満たす、  
可視から近赤外にわたる波長分解能~3000の同時分光装置を提案

130 Mpc と 200 Mpc にあるキロノバの J バンド光度曲線予想図

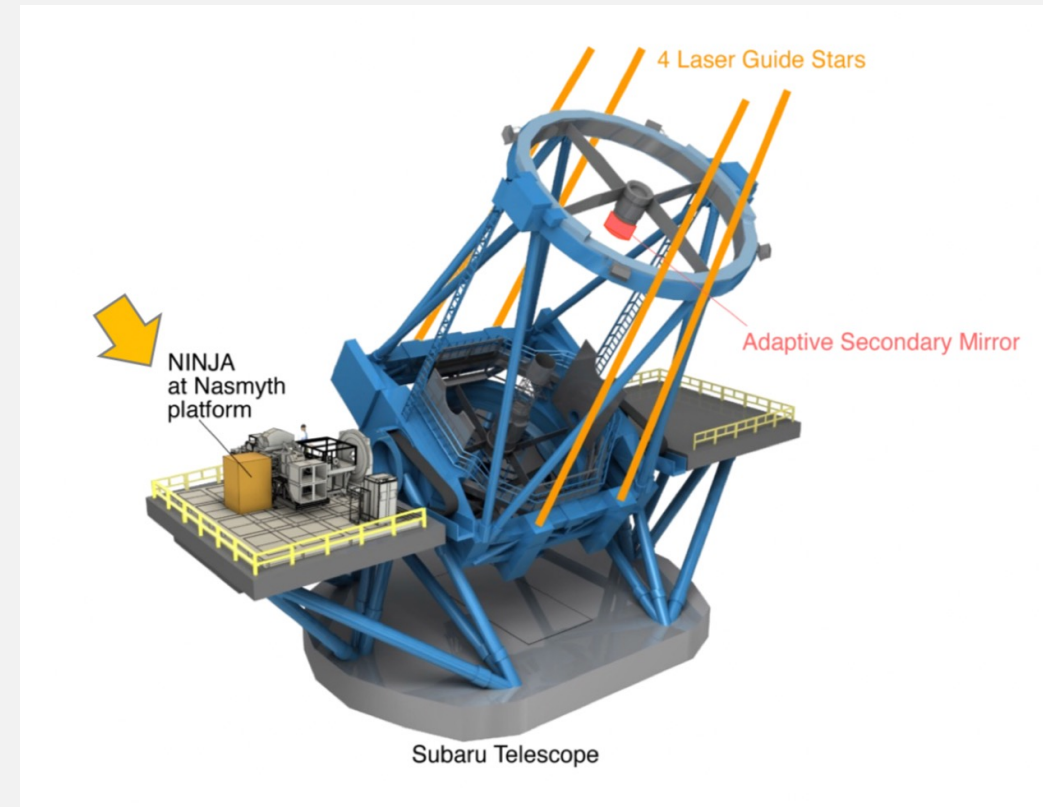


# NINJA概要

## Near-**IN**frared and optical **J**oint spectrograph with **A**daptive optics



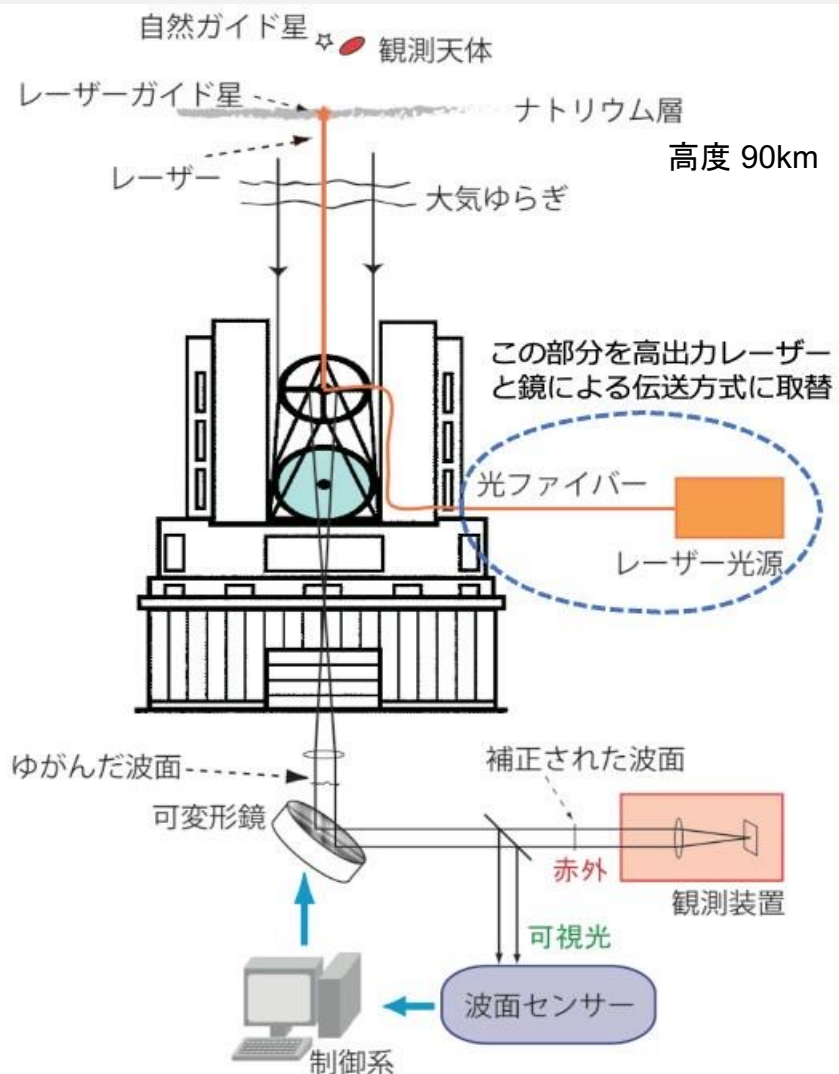
- 可視光から近赤外線までの広帯域分光器
- すばる望遠鏡赤外ナスミス焦点に搭載予定  
(今後導入される予定のナスミスビームスイッチャーに接続)
- すばる望遠鏡に今後導入される予定の、  
レーザートモグラフィ補償光学(LTAO)に最適化
- 2025年 近赤外分光器ファーストライト予定



Subaru Telescope



# ADAPTIVE OPTICS



国立天文台

## ● 補償光学

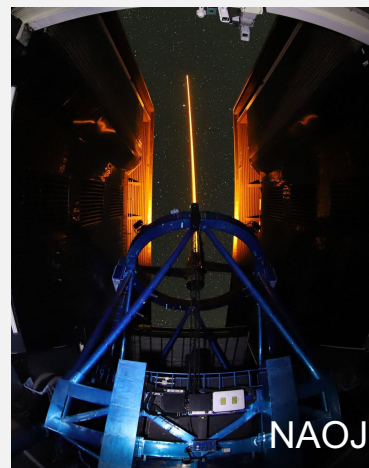
- 観測天体近くの**ガイド星**を波面センサーで観測し、大気ゆらぎによる波面の乱れを測定
- 波面の乱れを打ち消すように可変形鏡を制御する
- 観測天体の光が補正された結果、点光源の広がりを改善できる

## ガイド星

- Natural Guide Star (NGS)  
補正用の星
- Laser Guide Star (LGS)  
地上からレーザーを照射して作る人工的な補正用の星  
地球大気の間層に存在するナトリウム原子の層に波長589 nmのレーザーを照射することで、レーザーによって励起されたナトリウム原子が発光する現象を用いる



# レーザートモグラフィーAO



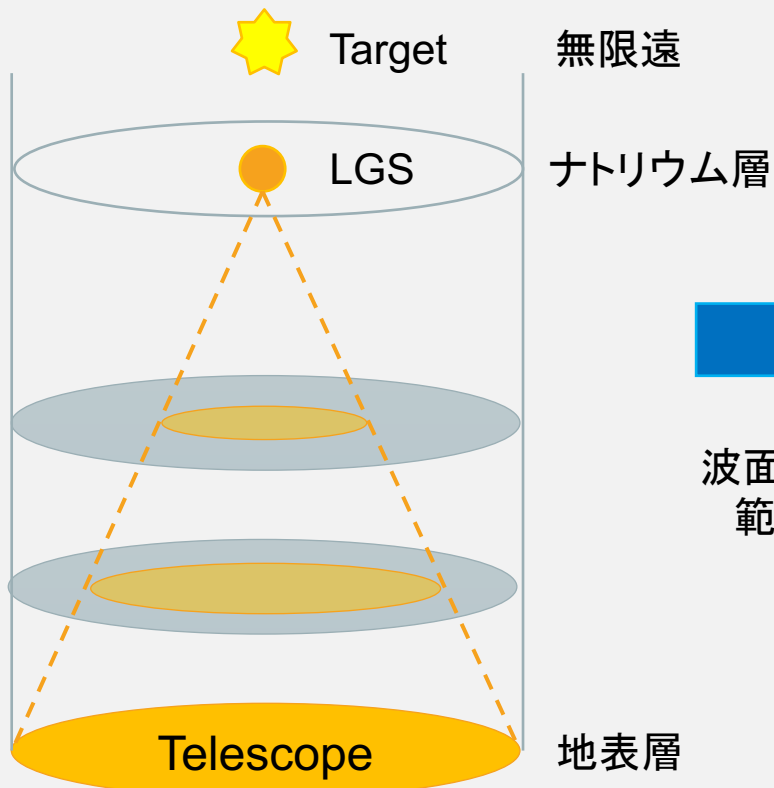
NAOJ

新しいLGS生成システムによるレーザーのファーストローンチ(2022/3)

- SCAO ( single conjugated AO)  
単一LGS構成 (既存)

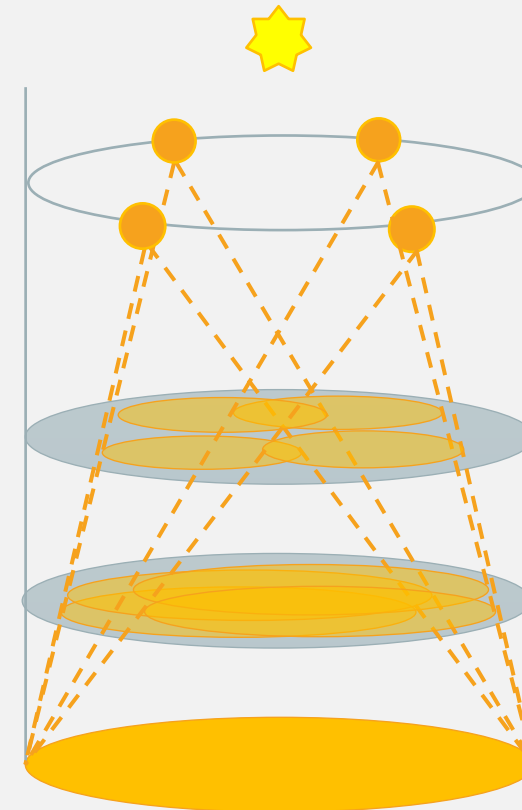
- LTAO ( laser-tomography AO)  
4つのLGS構成 (開発中)

## SCAO (AO188)



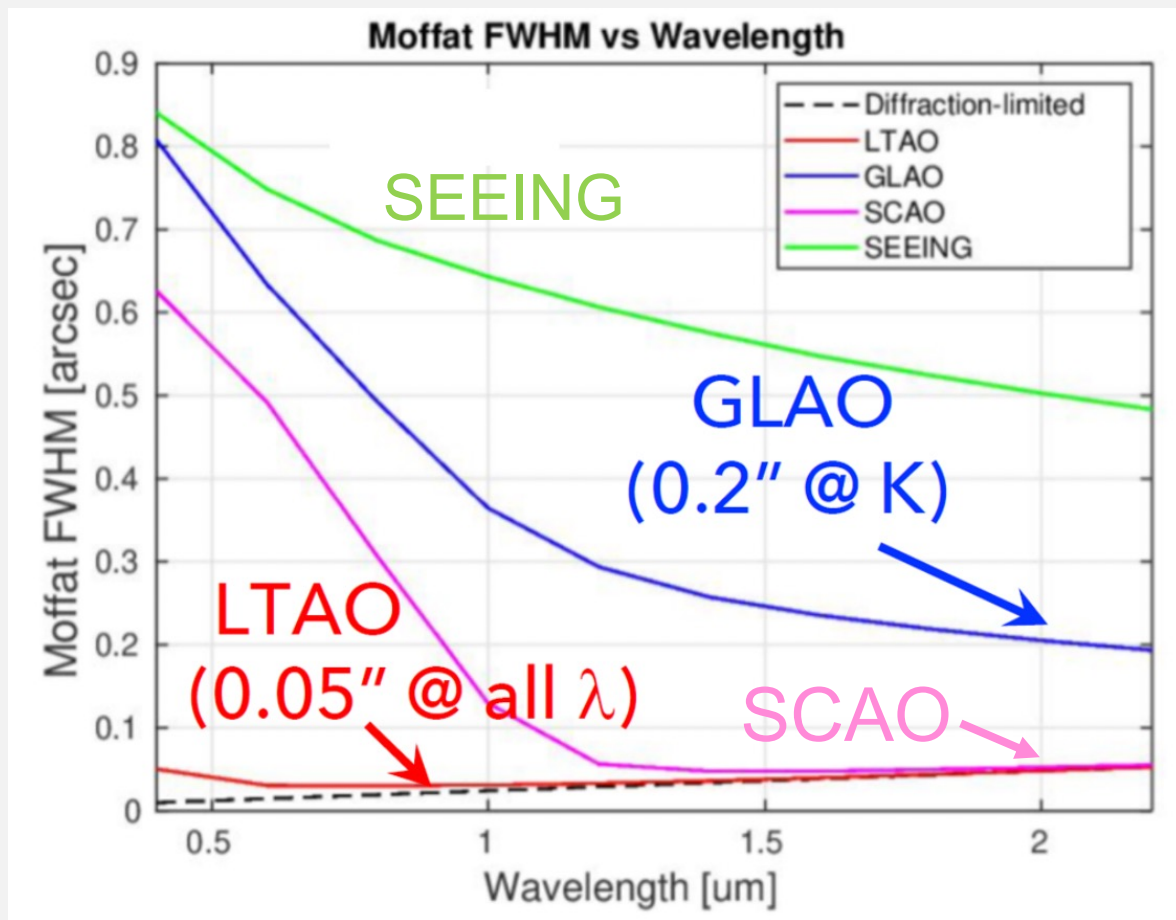
## LTAO

波面を測定できる  
範囲が広がる

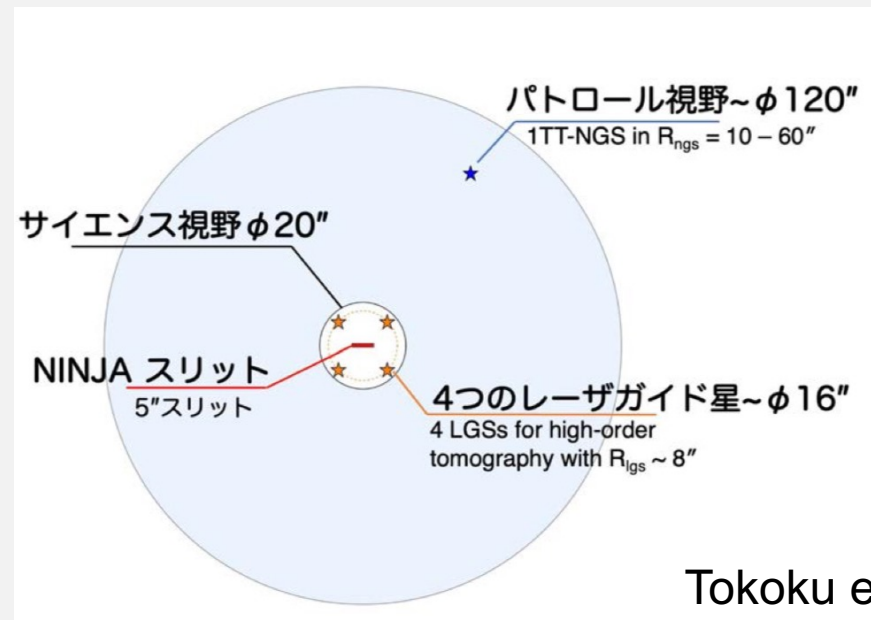


# LTAOによって実現する補償性能

補償光学性能シミュレーションで予想される  
空間分解能



Terao et al. SPIE (2022)



Tokoku et al. 2022

LTAO/NINJAの視野



可視光・近赤外の両方で  
回折限界に近い空間分解能を達成

# NINJA構成

望遠鏡からの光

補償光学  
システム

ナスミス  
ビーム  
スイッチャー

前置光学系

**NINJA**

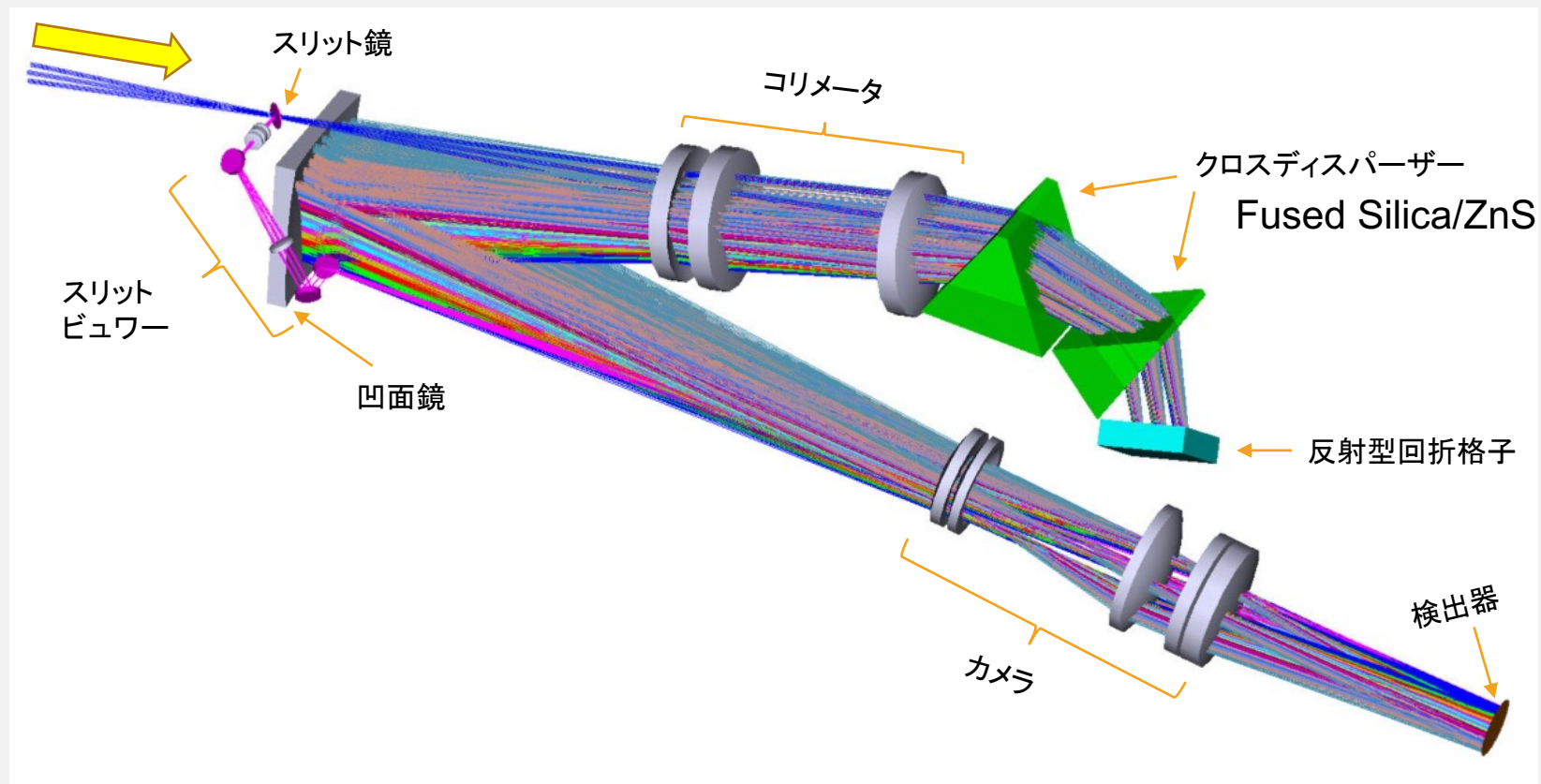
可視分光器

近赤外分光器

# NINJA 近赤外分光器光学系

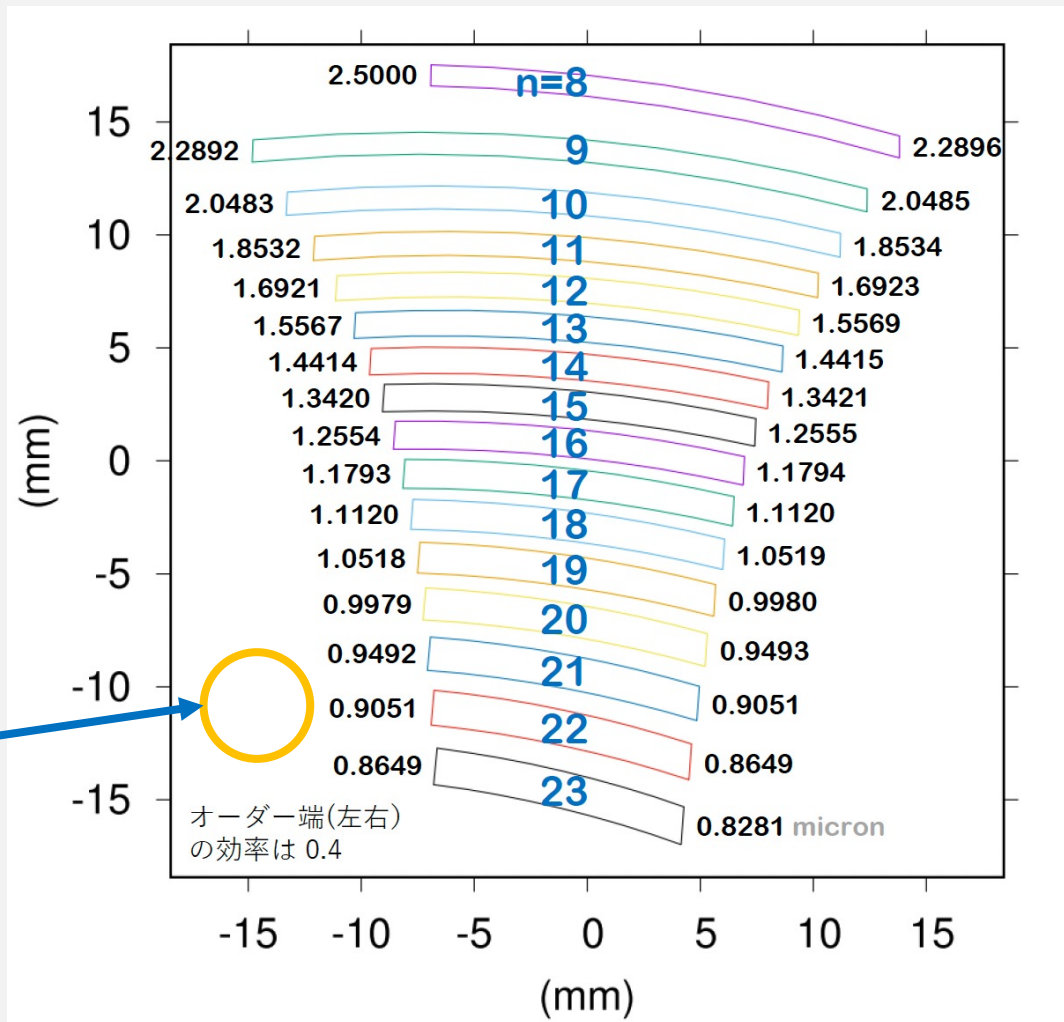
望遠鏡からの光

近赤外分光器 パラメータ	
波長範囲	0.83-2.5 $\mu\text{m}$
F比	13.9
スリット幅	0.35"
スリット長	5"
波長分解能	$\sim 3300$
光学系透過率	0.43
検出器	HAWAII-2RG
画素数	2048 $\times$ 2048 pix
画素サイズ	18 $\mu\text{m}/\text{pix}$



# 検出器上のスペクトル

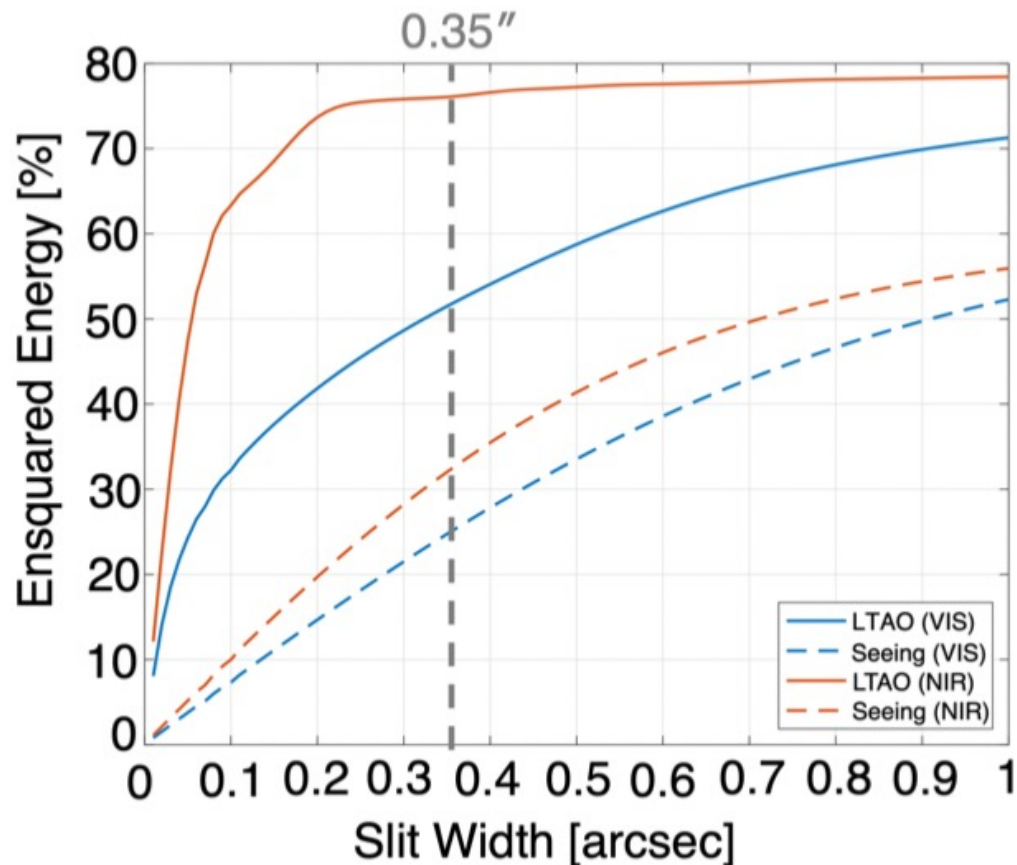
エシェルフォーマット(HAWAII-2RG1枚)



スリットビューアーによる像

# スリット幅の設定

スリット幅に対するエネルギーの割合



Tokoku et al. (2022)

- 観測条件によるLTAOの効率の変動(点光源のエネルギーの割合)に対応するスリット幅の設定

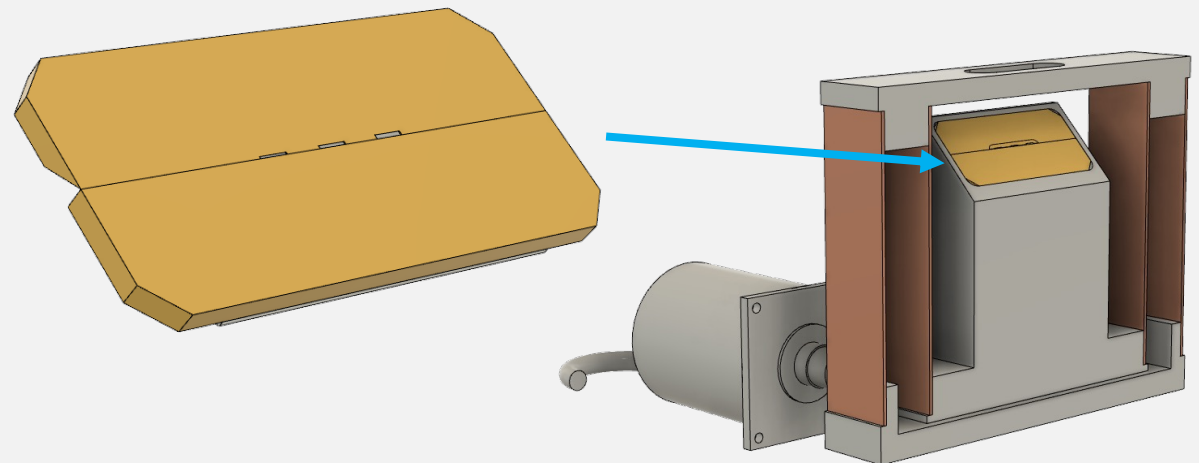
- スリット案(スリット交換機構あり)

0.21" (波長分解能: ~5500相当、最小幅)

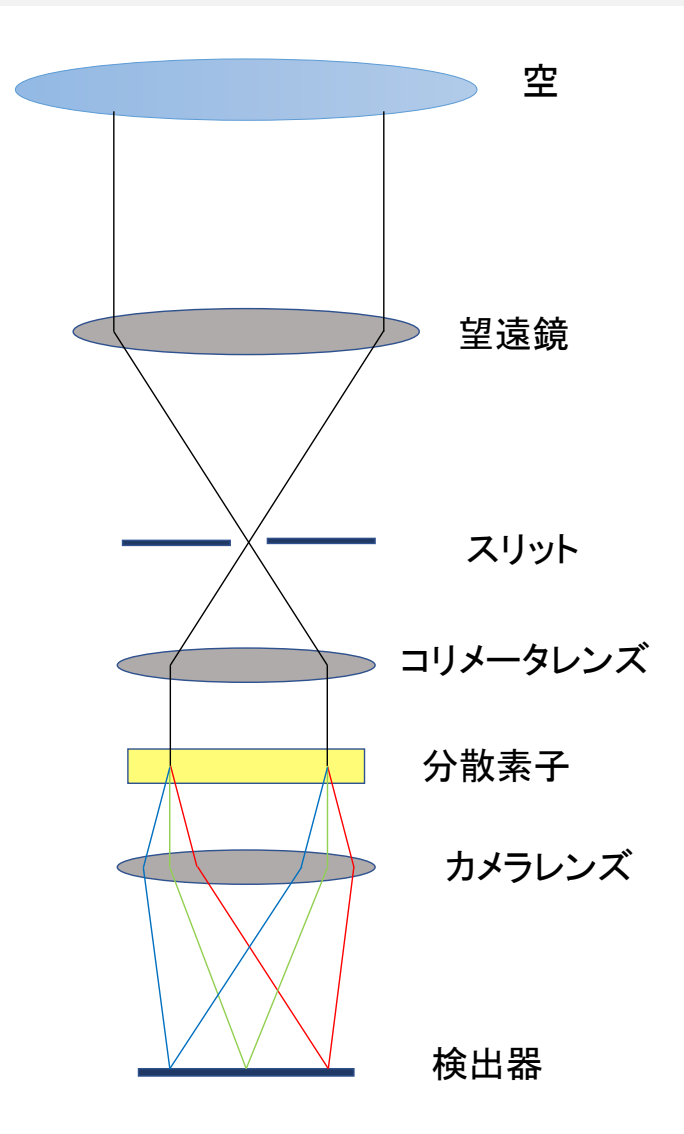
0.35" (波長分解能: ~3300相当)

シーイングサイズ(未定)

ブランク



# NINJAの感度見積もり



## 検出器に入るノイズ源

- スカイからの輻射  
OH夜光 ( $0.8 - 2.4 \mu\text{m}$  程度)  
大気上層のOHラジカルから放射される多数の輝線  
大気からの熱輻射 ( $3 \mu\text{m}$  以上)
  - 望遠鏡の鏡面からの熱輻射
  - 観測装置からの熱輻射 ← 冷却することで抑えられる
- 抑えられない
- スリットマスクの冷却温度の見積り
  - 分光限界等級の見積り



# マウナケアでのスカイからの輻射

## Gemini Sky Background Data

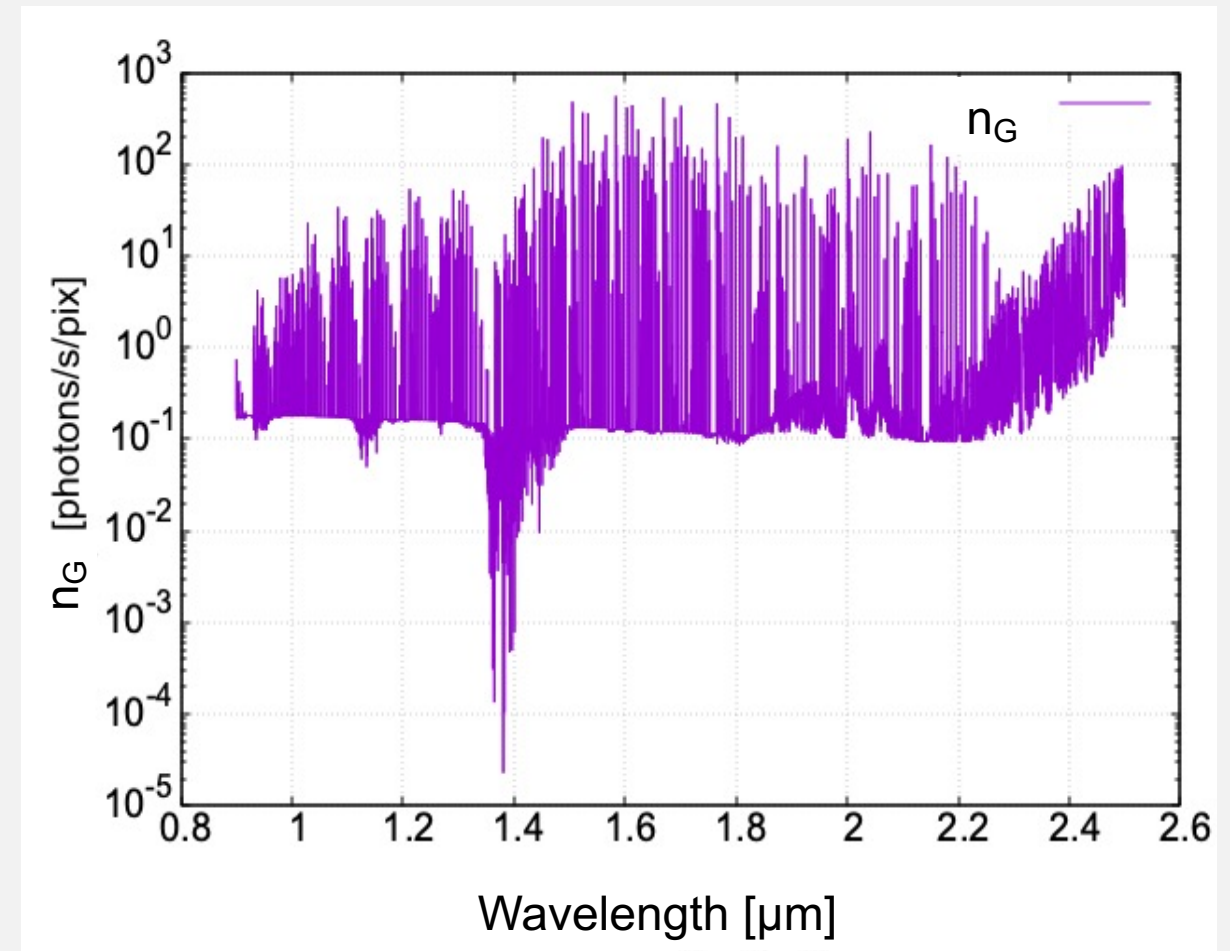
- Air mass 1.0
- Water vapor column 1.0mm
- OH輝線 + O<sub>2</sub>輝線 (@1.3μm) + 連続光成分
- 黒体放射 (@273K)

波長範囲 : 0.9 – 2.5 μm

単位時間あたり検出器の1ピクセルに入る光子数 $n_G$

$$n_G = 2.3 \times 10^{-5} \text{ [photons/s/pixel] @ } 1.38 \text{ } \mu\text{m}$$

Geminiモデルでの大気スペクトル



データはGeminiホームページより

# スリットマスクからの輻射

スリットマスクを黒体と仮定すると、単位時間あたり1pixelに入るスリットマスクからの光子数 $n_{mask}$

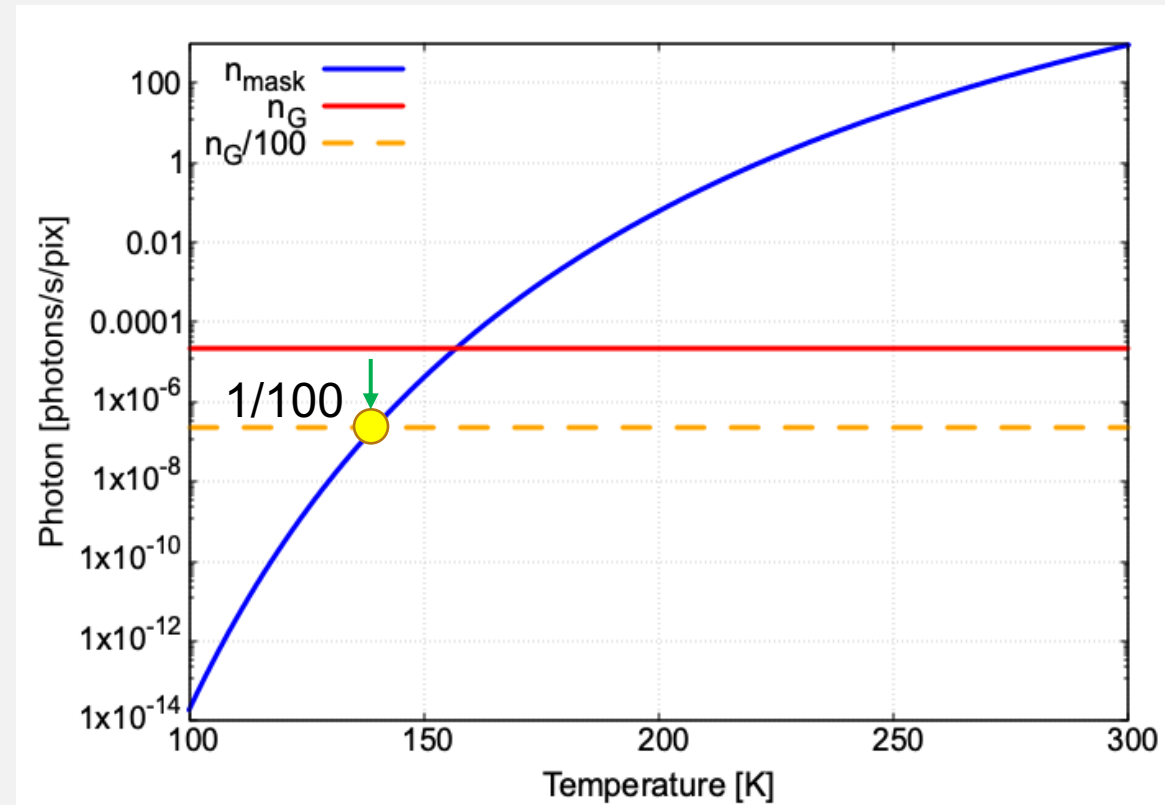
$$n_{mask} = \int \frac{B_{\lambda}\epsilon}{hc/\lambda} \times \Delta\Omega \times A_{mask} d\lambda \text{ [photons/s/pixel]}$$

$A_{mask}$ : スリットマスク上で検出器1ピクセルあたりの面積

スリットマスクからの輻射が、  
スカイからの輻射の1/100になる温度  
→139K

- ✓ スリットマスクの冷却温度を139K以下に設定することで、スカイからの熱輻射が最も小さい場合でも、スカイに比べてスリットマスクからの熱輻射を十分に小さくできる
- ✓ この冷却温度は十分に達成可能である

スリットマスクに入射する輻射の温度依存性



# 分光限界等級の見積り

## 限界等級

波長、露光時間、S/N比などの条件下で決まる、観測可能な最も暗い天体の等級

S/N比、一回の積分時間 $t$ 、総積分時間 $T$ を与えることで天体からの光子数が求まり、等級に換算できる

## S/N比

$$S/N = \frac{\eta s_i \tau T}{N_{noise}} = \frac{\eta s_i \tau T}{\sqrt{\eta s_i \tau T + m \eta n_{sky} T + m n_{dark} T + m \left( \frac{N_{read} T}{t} \right)^2}}$$

- $s_i$  [photons/s] : 天体からの光子数  $s_i = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{h \nu} = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{\lambda \Delta \lambda F_\lambda}{h c}$
- $n_{sky}$  [photons/s/pix] : スカイからの光子数 (Geminiモデルを使用)
- $n_{dark}$  [e<sup>-</sup>/s/pix] : 1ピクセルあたりの暗電流 (0.05 e<sup>-</sup>/s)
- $N_{read}$  [e<sup>-</sup>/pix] : 検出器からの1ピクセルあたりの読み出しノイズ (6 e<sup>-</sup>)
- $m$  [pix] : 信号を検出する画素の数 (12.2 pix)
- $\eta$  : システム効率
- $\tau$  : 大気透過率

# NINJAのシステム効率

## スペクトルのオーダーごとの効率

M1, M2, M3, イメージローター、ナスミスビームスイッチャー、前置光学系、ADC、分光器光学系、検出器  
(AOシステム効率は含まない)

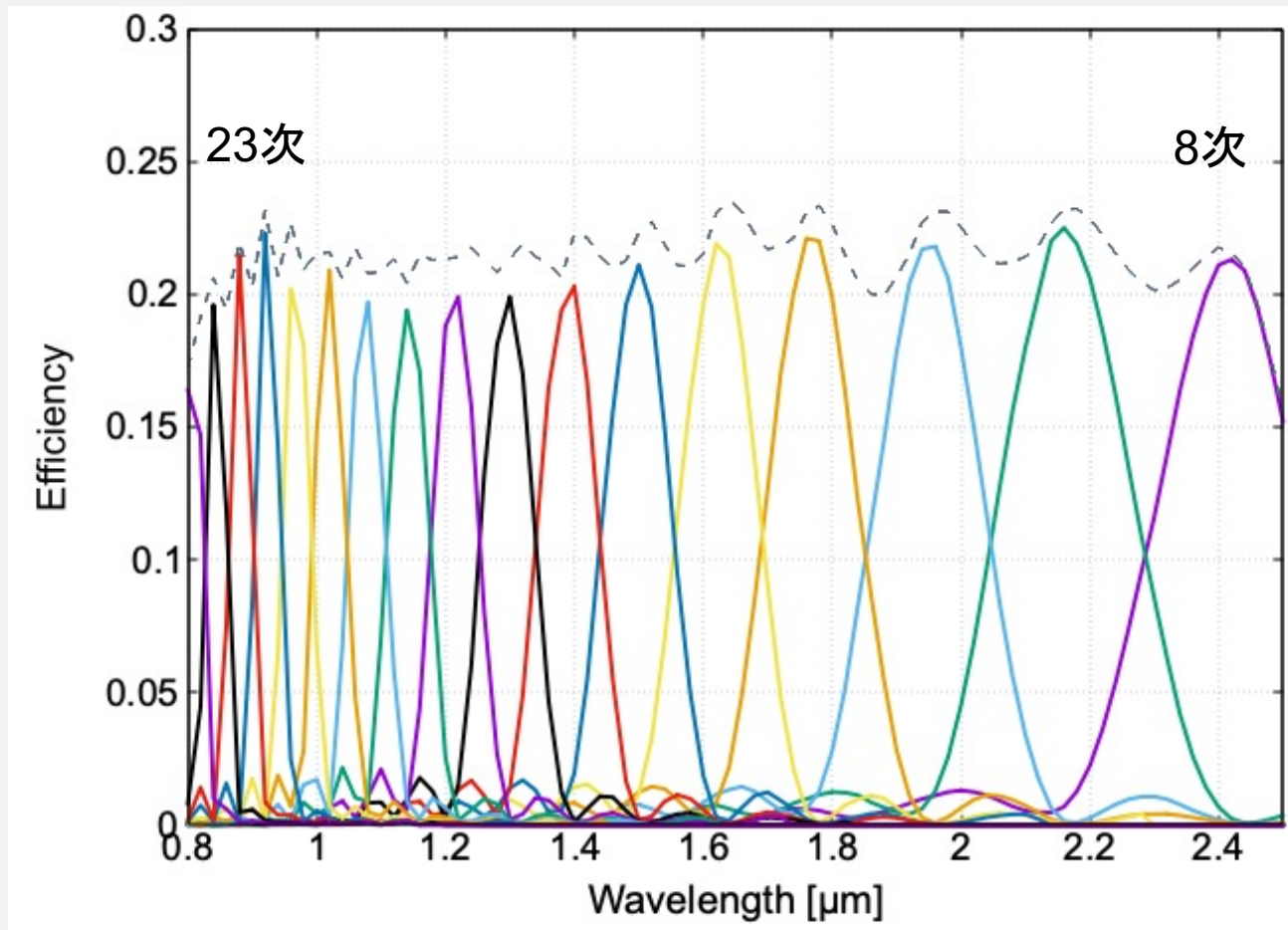
- ARコート反射率1.0%
- 検出器QE70%

隣合うオーダーの効率を足し合わせた、効率の波長依存性を計算に使用(破線)

→読み出しノイズが2倍と仮定

$$N_{read}^2 \times 2$$

NINJAシステム効率

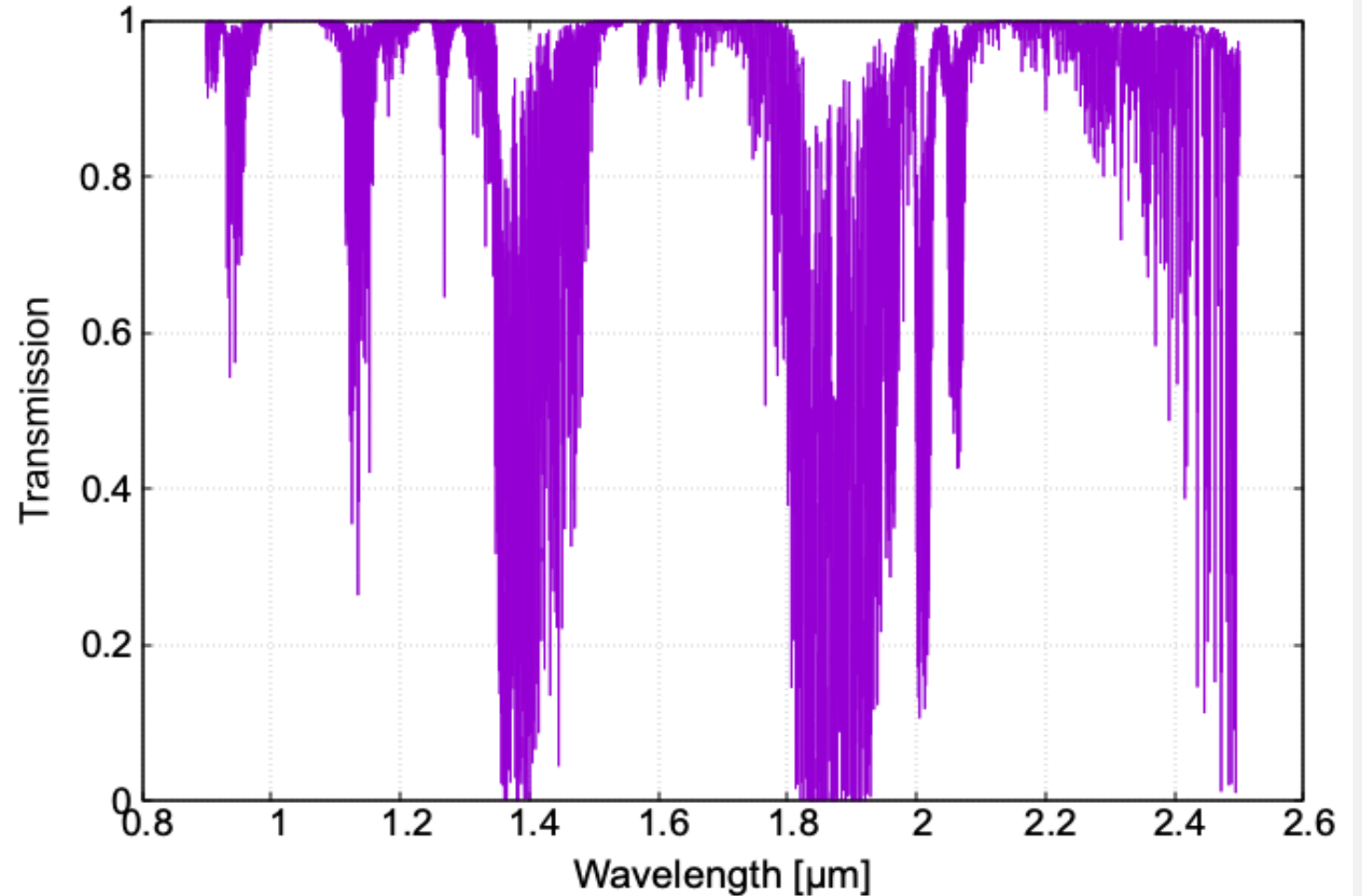


# 大気透過率

マウナケアでの大気透過率スペクトル

## Gemini Data

- Air mass 1.0
- Water vapor column 1.0mm



データはGeminiホームページより

# 分光限界等級

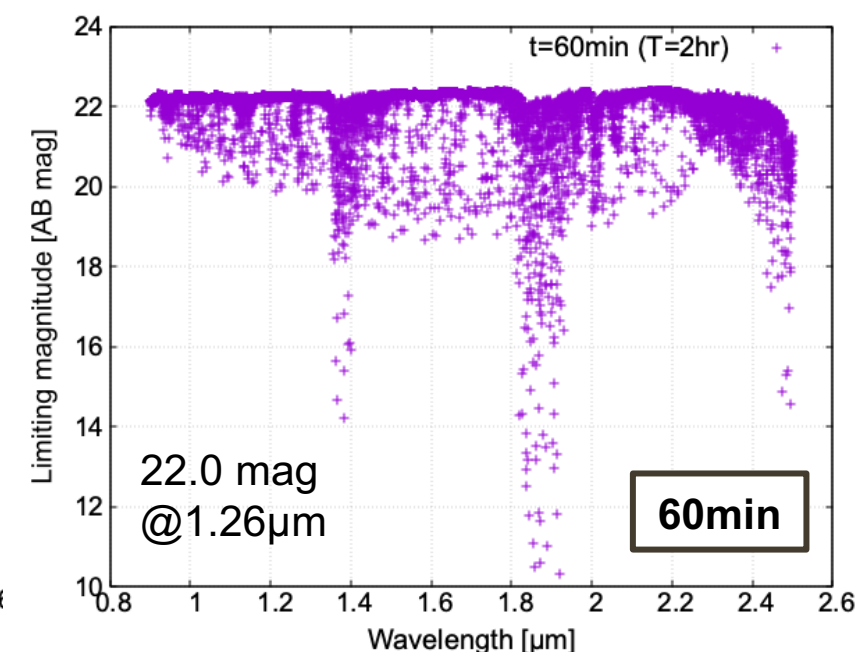
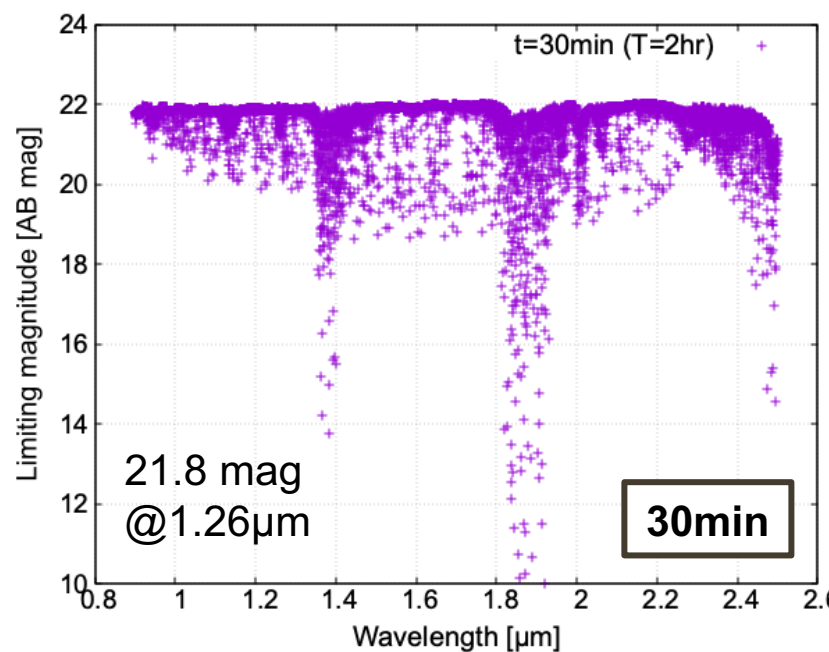
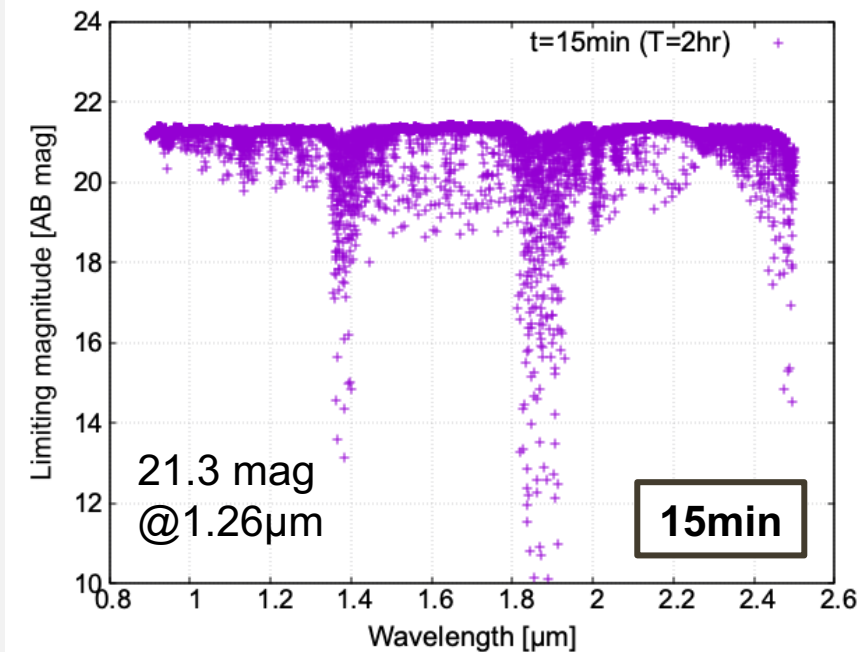
## 条件

- T=2 hours, t=15, 30, 60 minutes, S/N=10
- スリット幅0.35"の時、Ensquared Energy 75%と仮定
- スペクトルのオーダーごとに波長幅を一定にして計算

## 結果

- ✓ 一回の露光時間が長いほど、読み出しノイズ成分の寄与が小さい→限界等級は暗くなる
- ✓ 2時間で限界等級22mag (S/N=10)を達成できる

背景光Geminモデルでの限界等級 (S/N=10, 2時間)



# まとめと今後

## まとめ

- NINJAの紹介
- NINJAの感度計算
  - スリットマスクの冷却温度設定  
→スリットマスクからの熱輻射をスカイからの1/100に抑えるためにはスリットマスクの温度を139K以下にする必要がある
  - 分光限界等級の見積り  
S/N=10, 総積分時間2時間、一回の露光時間1時間の時、  
22.01 mag (@1.26 $\mu$ m)  
→NINJAに要求される限界等級22mag (@J-band)を達成している

## 今後の予定

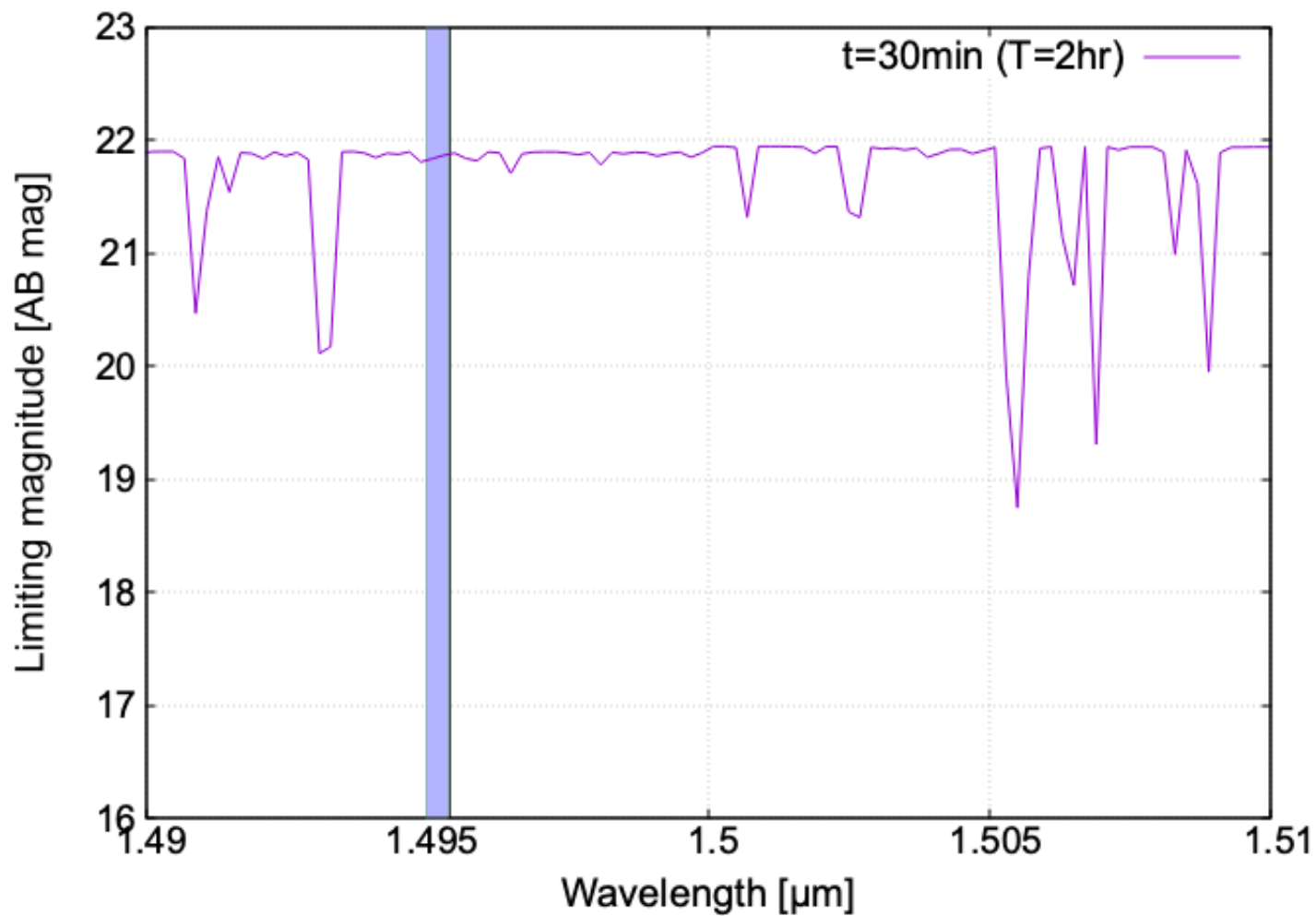
- 限界等級の見積りの精度向上
- 光学素子の温度サイクル試験
- 検出器単体の駆動試験
- 制御系開発 など







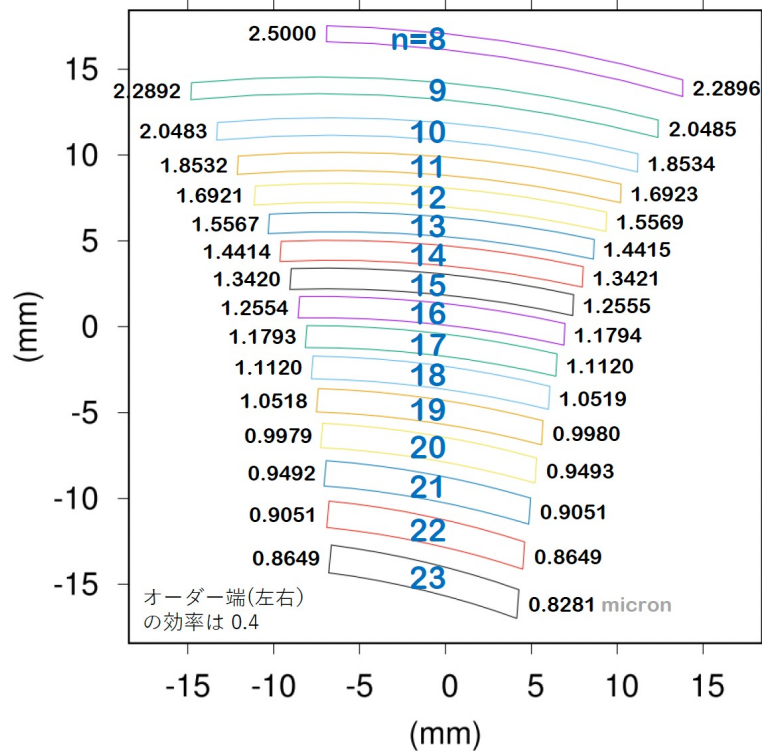
# 分光限界等級



オーダー  $n=13$   
 $\Delta\lambda \cong 3.8 \times 10^{-4} \mu\text{m}$   
 $R \sim 3700$ 相当

# NINJA Echelle Format

※エシェルフォーマット情報は、尾崎さん、山室さん提供。



表：オーダー毎の波長域( $\lambda_0, \lambda_1$ )、ストリップの幅 ( $\Delta H, \Delta V$ )、分散度

n	$\lambda_0$ (micron)	$\lambda_1$ (micron)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta V$ (mm)	分散度 (nm/mm)
8	2.2896	2.5000	20.731	0.938	10.15
9	2.0485	2.2892	27.189	0.987	8.85
10	1.8534	2.0483	24.499	1.029	7.96
11	1.6923	1.8532	22.300	1.067	7.22
12	1.5569	1.6921	20.470	1.103	6.60
13	1.4415	1.5567	18.924	1.137	6.09
14	1.3421	1.4414	17.600	1.172	5.64
15	1.2555	1.3420	16.455	1.208	5.26
16	1.1794	1.2554	15.455	1.246	4.92
17	1.1120	1.1793	14.574	1.286	4.62
18	1.0519	1.1120	13.794	1.330	4.36
19	0.9980	1.0518	13.098	1.379	4.11
20	0.9493	0.9979	12.473	1.432	3.90
21	0.9051	0.9492	11.911	1.492	3.70
22	0.8649	0.9051	11.403	1.560	3.53
23	0.8281	0.8649	10.941	1.637	3.36

スリット幅 0.35", 0.1"/pix  
→検出器上で3.5 pixel

検出器H2RG 18  $\mu\text{m}/\text{pix}$

→ $3.5 \times 18 = 63 \mu\text{m}$

装置に入るエネルギーが持つ波長幅 $\Delta\lambda$ は  
分散度 $[\mu\text{m}/\text{mm}] \times 63 \times 10^{-3} \text{ mm}$   
で決まる

スペクトルのオーダーごとに  
波長幅一定の時の波長分解能

n	dλ	R=λ0/dλ	R=λ1/dλ
8	0.000639	3580.57706	3909.60982
9	0.000558	3674.10995	4105.82011
10	0.000501	3695.86025	4084.50985
11	0.000455	3720.48542	4074.22064
12	0.000416	3744.34824	4069.50457
13	0.000384	3757.13504	4057.39307
14	0.000355	3777.15862	4056.62501
15	0.000331	3788.70179	4049.73143
16	0.00031	3805.0071	4050.20003
17	0.000291	3820.51811	4051.74191
18	0.000275	3829.54711	4048.34717
19	0.000259	3854.32356	4062.10173
20	0.000246	3863.65486	4061.45706
21	0.000233	3882.88288	4072.07207
22	0.000222	3889.11372	4069.87724
23	0.000212	3912.03704	4085.88435

# PFS

## PFS

Wavelength [nm]	Limiting magnitude
993	21.5
1100	21.4
1208	21.2

## 2022/11/03

Wavelength [nm]	Limiting magnitude
992	21.42
1100	21.46
1208	21.28

