

2024せいめいUM 2024/09/09-10@倉敷

超高波長分解能分光観測による 系外惑星探索と恒星活動現象の解明

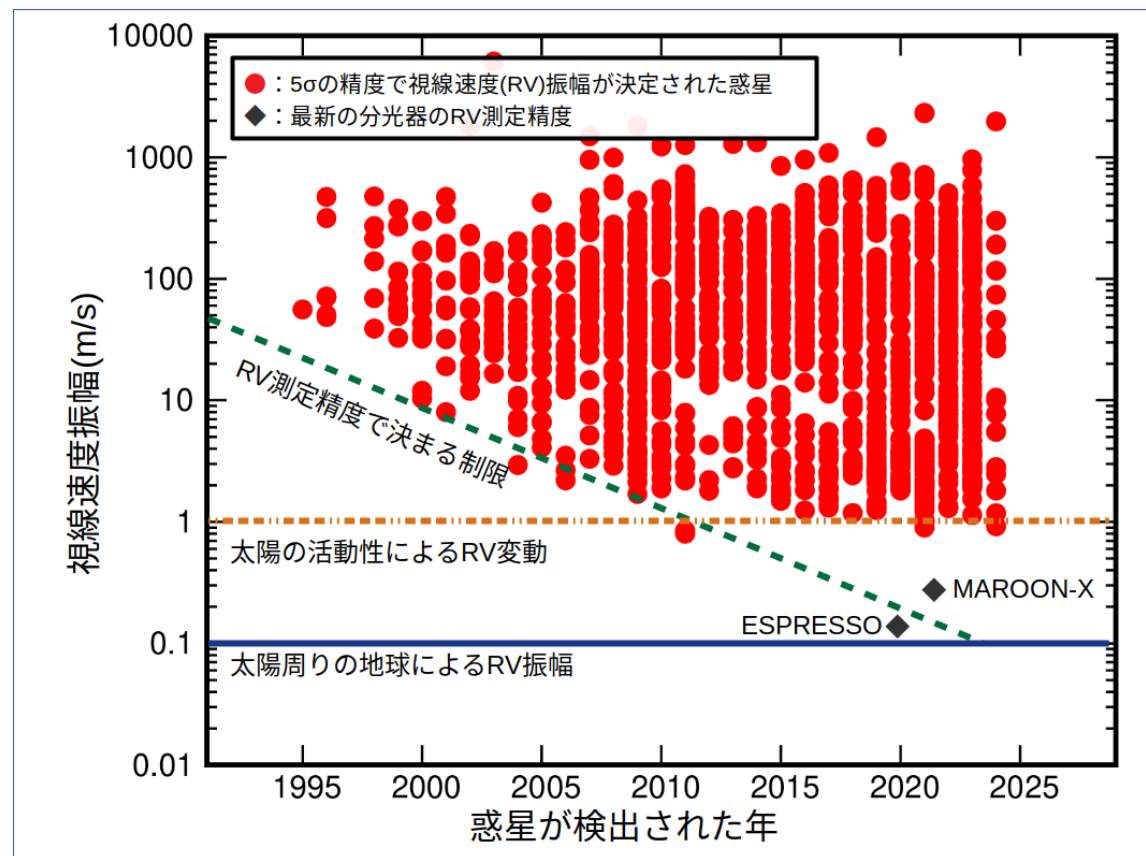
佐藤文衛（東京工業大学）、田實晃人、泉浦秀行（国立天文台）、稲場肇、大久保章（産業技術総合研究所）、寶田拓也（アストロバイオロジーセンター）

研究協力者：堀田英之（名古屋大学）、石川遼太郎（核融合研）、本田敏志（兵庫県立大学）、青木和光（国立天文台）

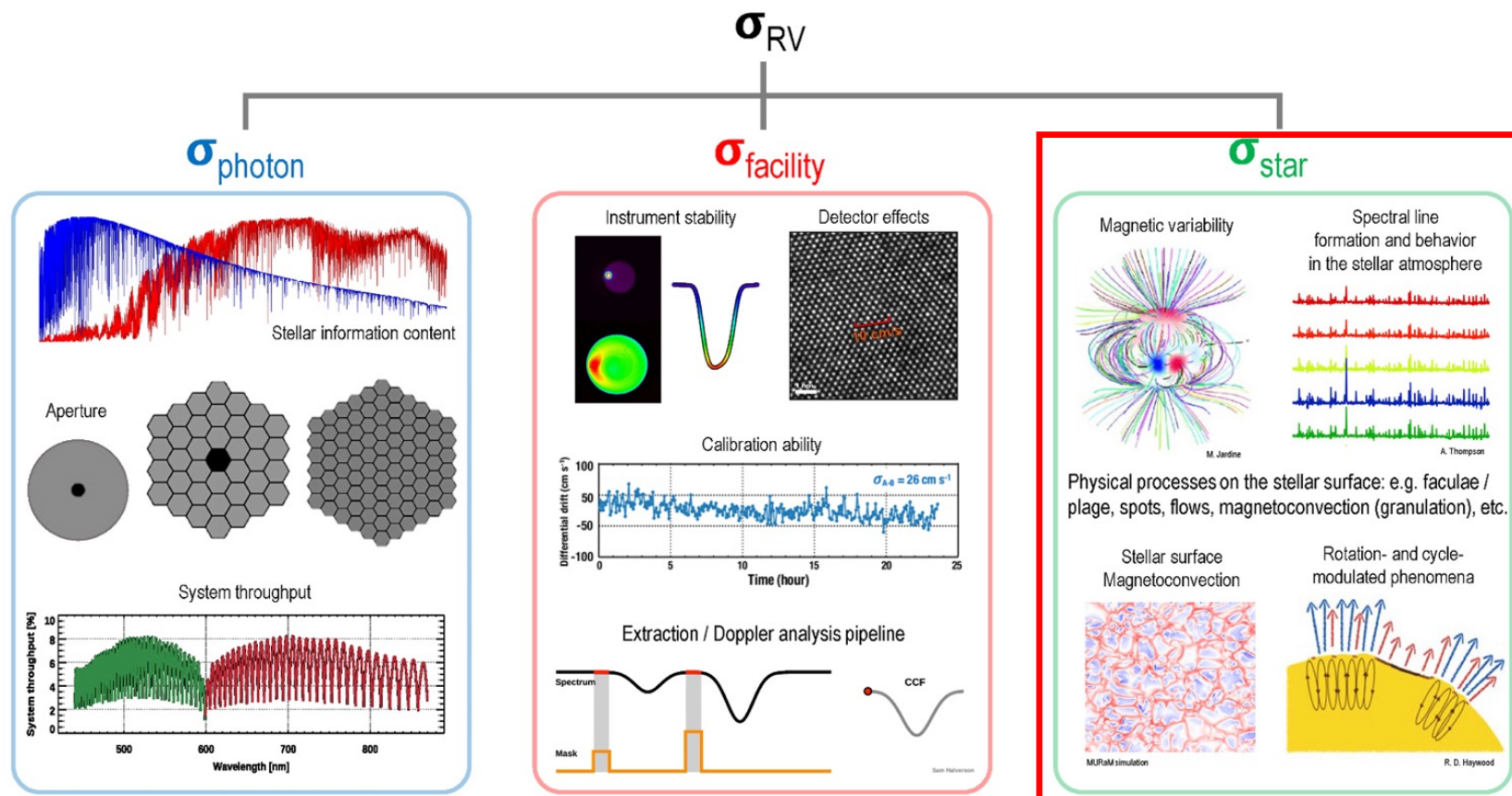
視線速度法による系外惑星検出：測定精度と主星の視線速度振幅

2010年以降、発見された惑星に対応する主星の視線速度振幅は約1m/sで底打ち

最新型の分光器は<30cm/sの精度を達成しているので、装置ではなく恒星自身でリミットされている

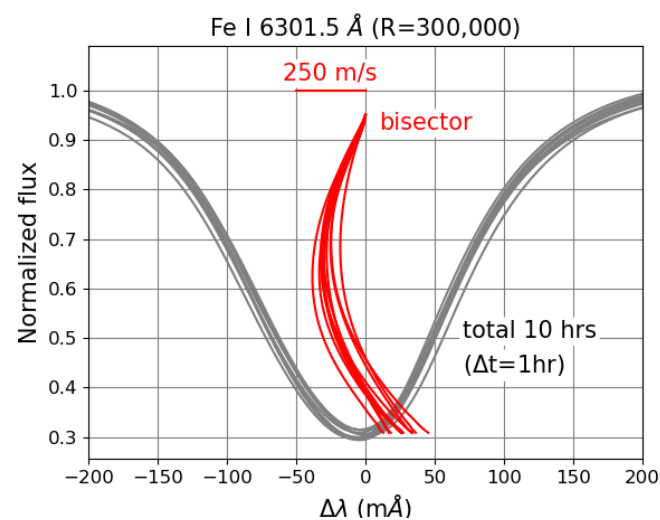
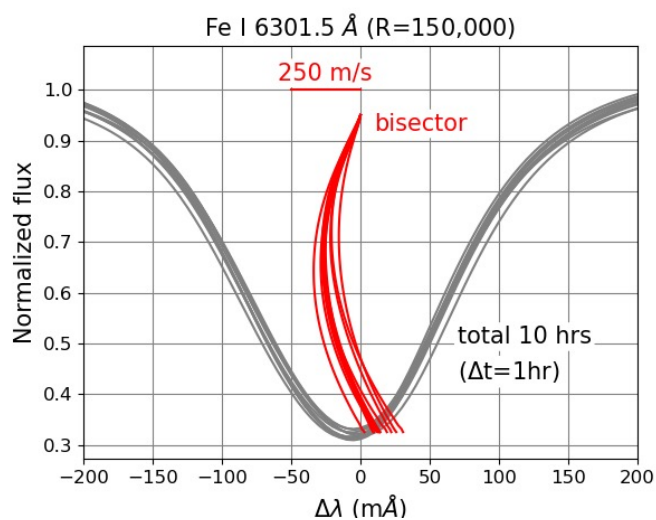
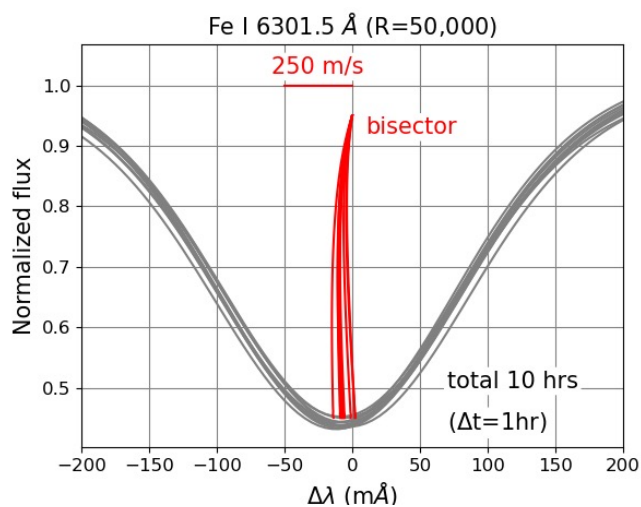


精密視線速度観測におけるノイズ



吸収線形状変動と波長分解能

太陽の一部領域(10Mmx10Mm)の粒状斑数値シミュレーション (10時間分) by 堀田・石川
(見やすさのためバイセクターは拡大、位置を揃えてある)



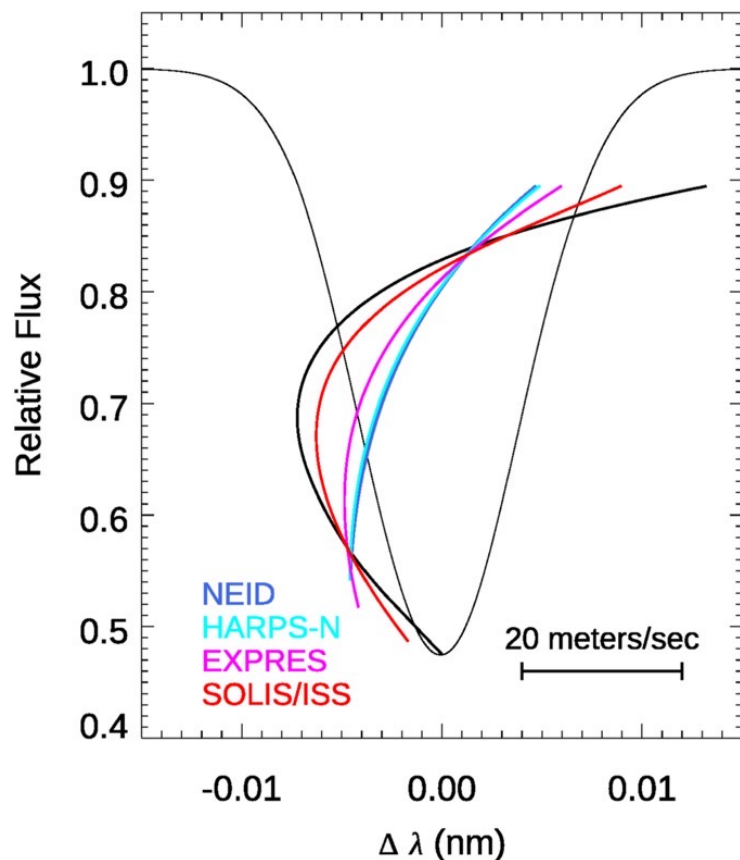
これを太陽全面で積分 (平均化) するとスペクトルの変動は ~ 120 分の1程度になる

$\rightarrow \sim < 1\text{m/s}$

$\rightarrow \sim < 1-1.5\text{m/s}$

$\rightarrow \sim < 2\text{m/s}$

吸収線形状への分光器器械輪郭（波長分解能）の影響



太陽の合成スペクトルとバイセクター

NEID: $R=110,000$

HARPS-N: $R=120,000$

EXPRES: $R=150,000$

SOLIS/ISS: $R=300,000$ (太陽観測用)

$R > 30$ 万あれば、
分光器器械輪郭の影響をほぼ受けず、
恒星自身の吸収線形状を調べられる
(太陽の実データに疑似地球によるRV変動を
埋め込んでバイセクター解析で分離可能;
Deming+ 2024)

恒星自身の変動：吸収線形状が変化
軌道運動による変動：吸収線形状は不変

岡山188cm望遠鏡 + せいめい望遠鏡用 新型高分散分光器：5つの「超」

- **超高波長分解能：比波長分解能30万以上**
 - 超高波長分解能対応のイメージライザーを開発
 - 低速自転晩期型星（主系列星、準巨星、巨星）の吸収線輪郭変動を抽出
- **超高精度波長較正：速度換算で10cm/s以下（ゴール 1cm/s）**
 - 超広波長帯域の次世代超精密波長基準「天文コム」を開発
 - 吸収線輪郭変動測定と超精密視線速度測定の両立
- **超高時間分解能：～秒スケール**
 - CCDカメラに替わりCMOSカメラを使用
 - 恒星、観測環境のあらゆる変動を高いデューティサイクルでモニター
- **超広波長域：400-900nm**
 - 大面積CMOSカメラを使用
 - 400nm以下は別の分光器
- **超大量長期間観測：～年以上**
 - 柔軟な運用が可能な中小口径望遠鏡（特に188cm望遠鏡）を使用
 - 光ファイバーで188cm望遠鏡とせいめい望遠鏡に接続（本体は188cmドーム内か本館に設置）

これらを全て備える分光器は未だかつて存在しない

キーアイテム1：分光器本体

• 超高波長分解能とコンパクトさの両立

- 瞳移行型
- 単一エシェル回折格子：31.6本/mm、ブレイズ角76度、長さ413mm
→ Littrow配置でビーム径100mm
- コリメーター焦点距離1875mm（将来的に超高安定化のため真空槽に入れられる大きさ）
→ スリット幅50 μ m
→ 入射効率維持のためイメージスライサー

• 極めて高い反射率の反射鏡面

- 予備設計（右図）では収差を高度に補正するThree mirror anastigmat (TMA)系

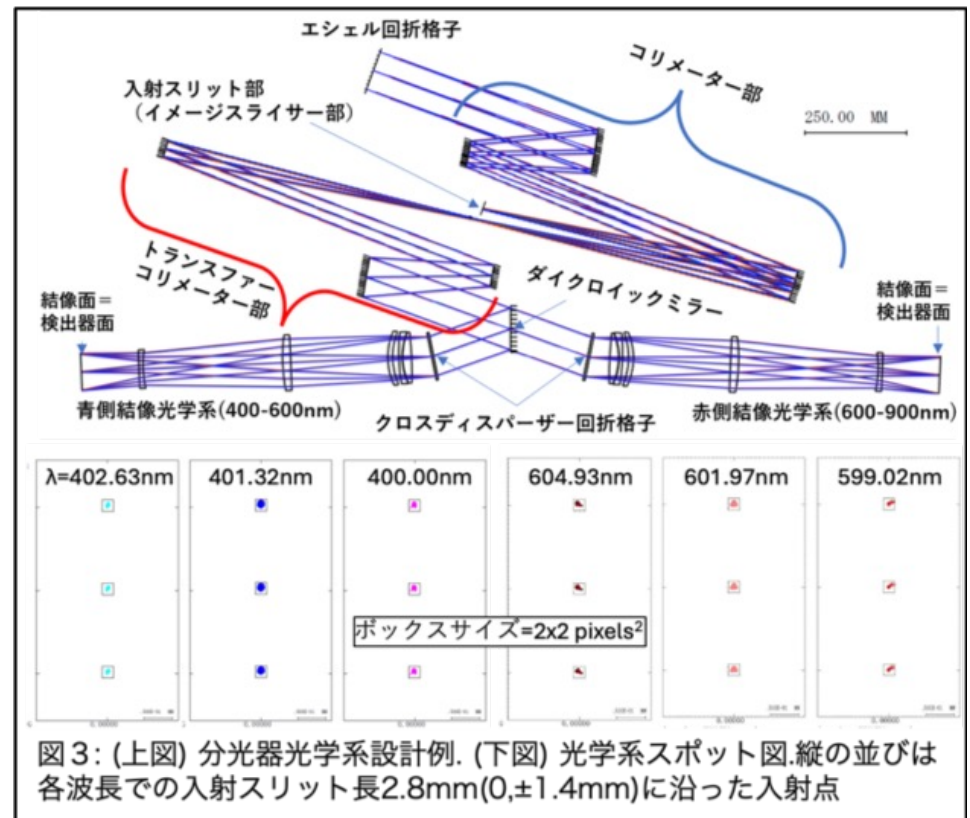
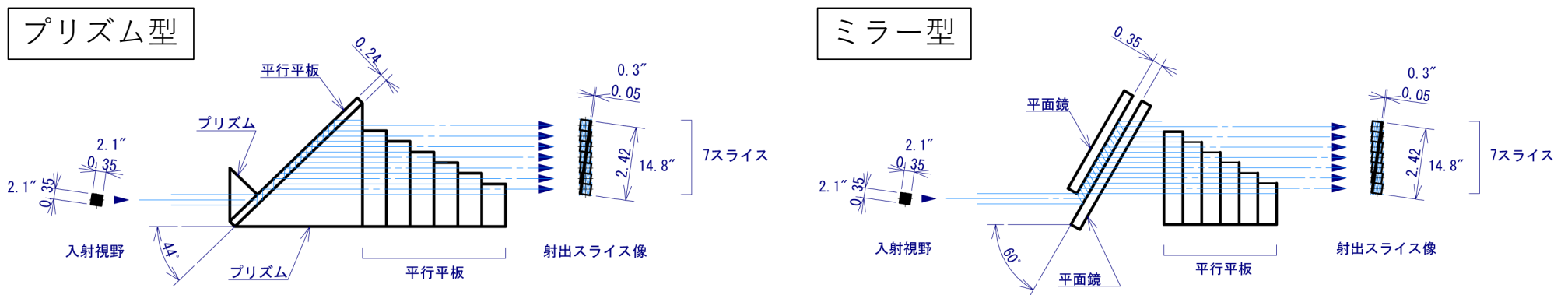


図3: (上図) 分光器光学系設計例. (下図) 光学系スポット図. 縦の並びは各波長での入射スリット長2.8mm(0,±1.4mm)に沿った入射点

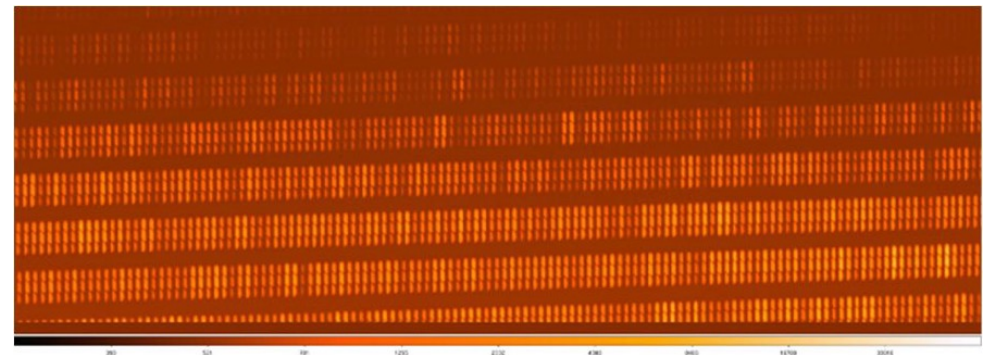
キーアイテム2：イメージスライサー

- スリット幅を狭めつつ効率を失わない
- 本分光器では直径350-550umの光束を50um幅に7-11スライス
- 188cm/HIDES-F・せいめい/GAOES-RV・すばる/HDSで100um幅5スライスまで実績あり
- 従来のプリズム型、新しいミラー型の両方を試みる（下図は予備設計）



キーアイテム 3 : 天文コム

- レーザー周波数コム：時間軸上ではフェムト秒級の超短光パルス列、周波数（波長）軸上では等しい周波数間隔の輝線列
- 岡山HIDES-F/すばるHDS用の天文コム（産総研独自開発）で実績あり（繰り返し周波数30GHz；比波長分解能10万対応）
- 新分光器（比波長分解能30万）対応のコムを開発
 - 繰り返し周波数10GHz
 - **輝線の幅1/3 + 輝線の本数3倍**
 - 可視波長域で切れ目なく発生
 - **一桁以上（理論的には1cm/sまで）の較正精度向上**



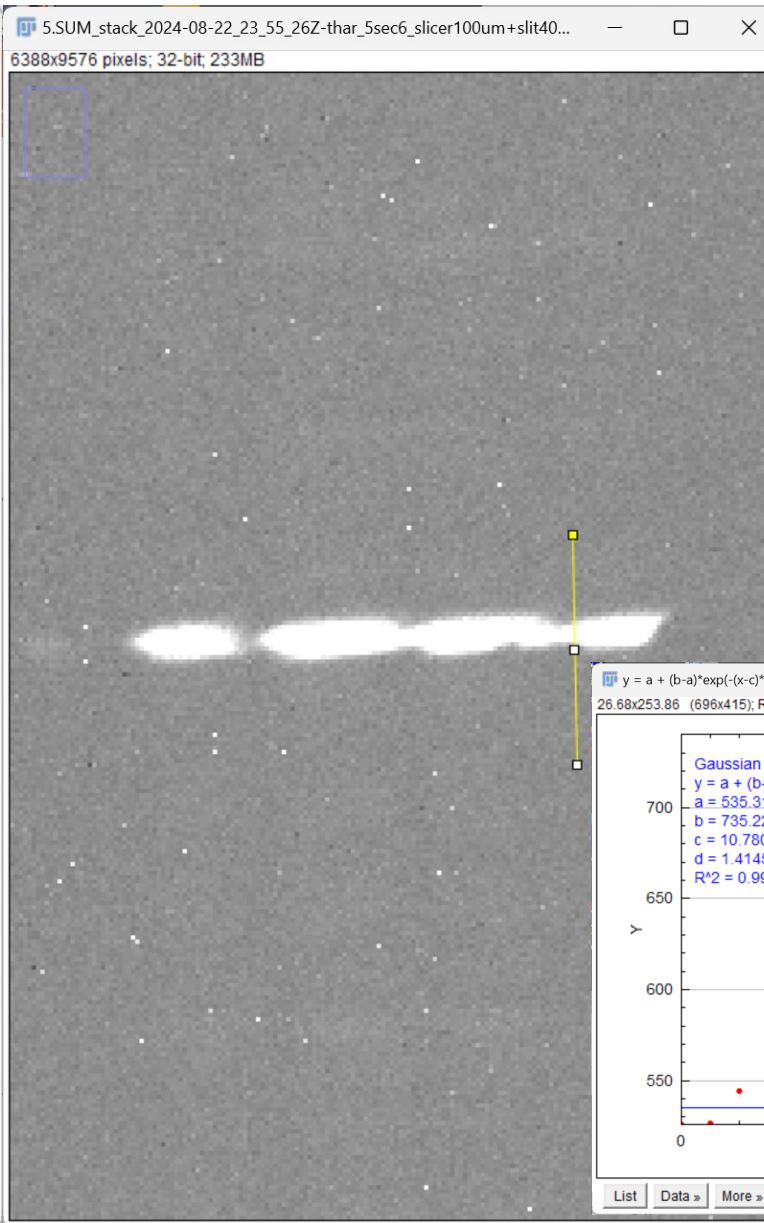
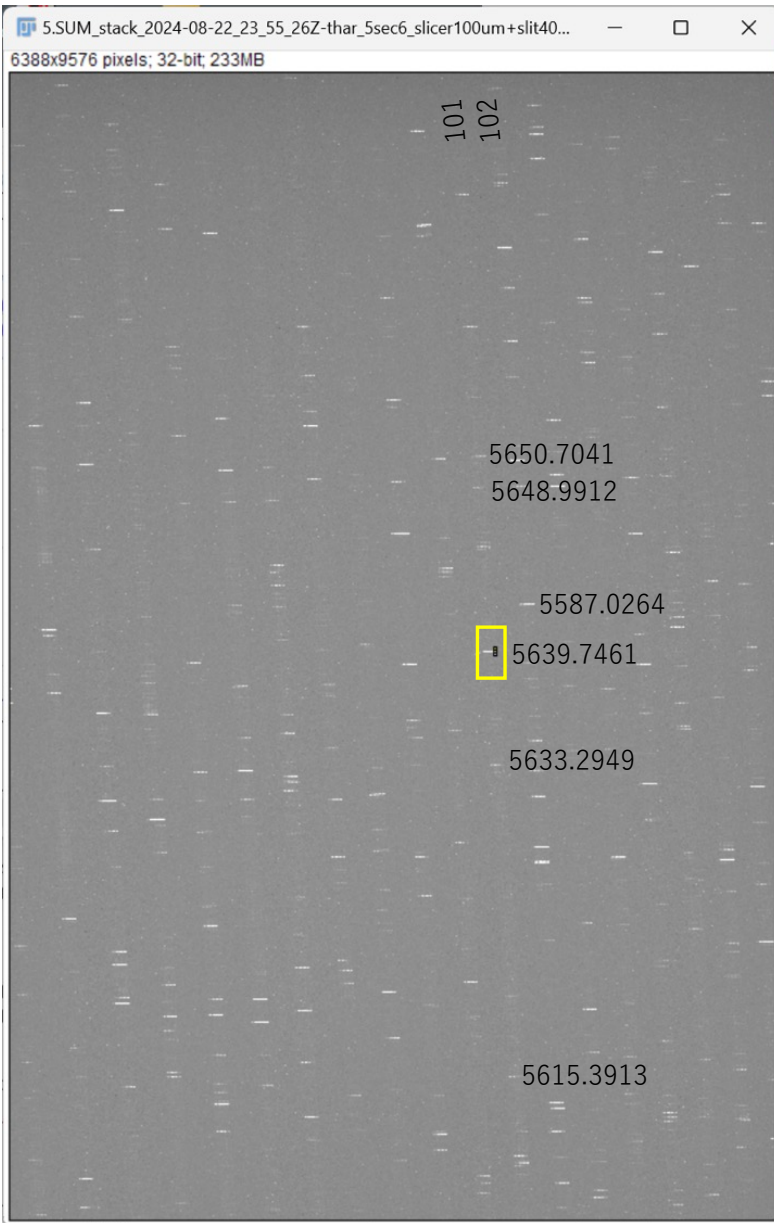
188cm望遠鏡/HIDES-Fの天文コムスペクトル

キーアイテム 4 : 検出器

- **高感度・広波長域・大面積・小ピクセルサイズ・高速読み出し**
 - CCD：大型のものはあるが、読み出し時間が長く、デューティサイクルがあげられない（デッドタイムを短くできない）
 - CMOS：近年、大型のものが入手可能に(例：Teledyne COSMOS-66 (10 um pitch, 8100×8100 pixels))
- **恒星スペクトルと天文コムスペクトルを時間的に密に交互に取得**
 - 恒星スペクトル変動と視線速度変化をリアルタイムで計測しつつ、分光器の時間的変動に起因する波長校正の誤差を低減する方法を開発
- **CMOSカメラの高分散分光観測への本格導入**
 - 測光観測では既に導入が進んでいる
 - 超精密レベルで大面積CMOSカメラの特性を理解

岡山188cm望遠鏡/HIDES-Fを用いた超高波長分解能スペクトル取得実験

- HIDES-Fの性能
 - スリット幅100um, 2ピクセルサンプリング(13.5um/pix)でR=11万
 - 光学系の結像性能自体は、光軸近傍ではスポット像5um以下
 - スリット幅40um、5um以下のピッチでサンプリングすればR=30万に到達
- 小ピクセルサイズCMOSカメラ(3.76 um pixel, 9,576 × 6,388 pixels)を導入し、超高波長分解能スペクトル取得試験を実施
 - 2024年度TMT戦略基礎開発研究経費
 - 予備的結果 (2024年9月現在)
 - イメージスライサー100um + スリット幅40umで**全体的にR=18万程度 (予想の6割)**
 - Th-Arの**スライス像の最も狭いところではR~25-28万程度**が確認できている
 - 20umピンホールで非点収差を確認 → 像伸びと直角方向の幅は分解能40万相当
 - 像が丸くなる位置で見て8.2um程度のブラーリングとなる
 - 光路上に挿入されていたフォトンカウンター用ガラス板によるものか
 - **He-Neレーザー (632.816nm) を直接40umスリットに入れると、R~30万を達成**
 - HIDES本体ではR~30万を達成可能なことを確認
 - 先の測定でR~18万どまりだったのは非点収差かイメージスライサーの影響か
 - 今後原因を究明し、スリット幅40umでR=30万での定常観測を目指す



Th-Ar
100 um slicer
+40um slit

Position (4052, 4828)

$$5648.9912 - 5633.2949 = 15.6963 \text{ Ang}$$

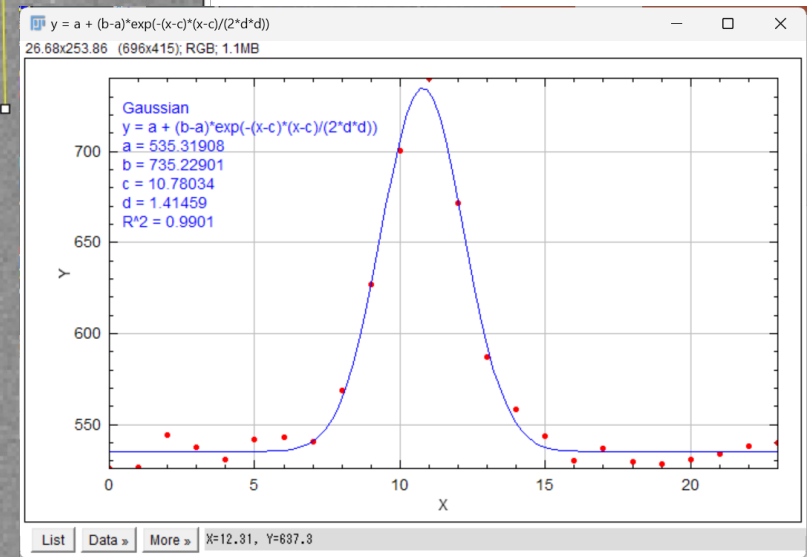
$$2591.63 - 263.63 = 2328 \text{ pixel}$$

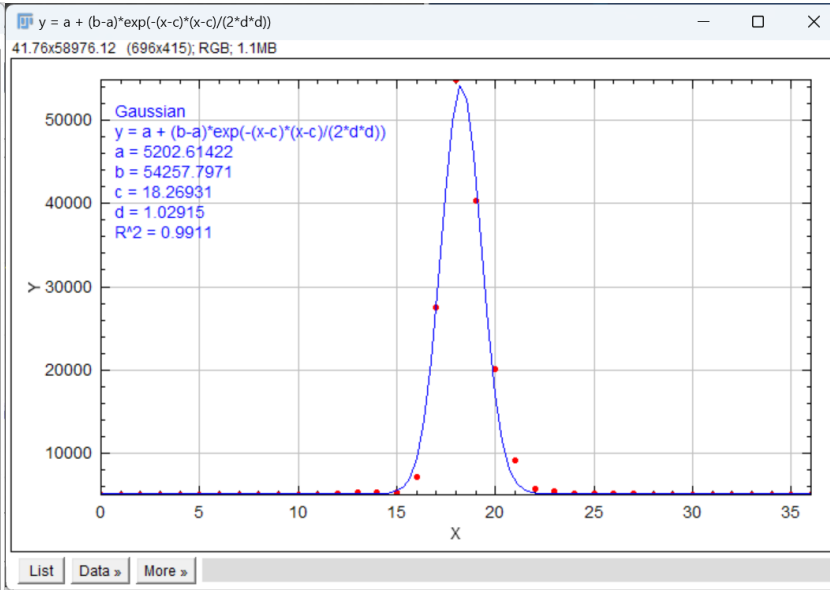
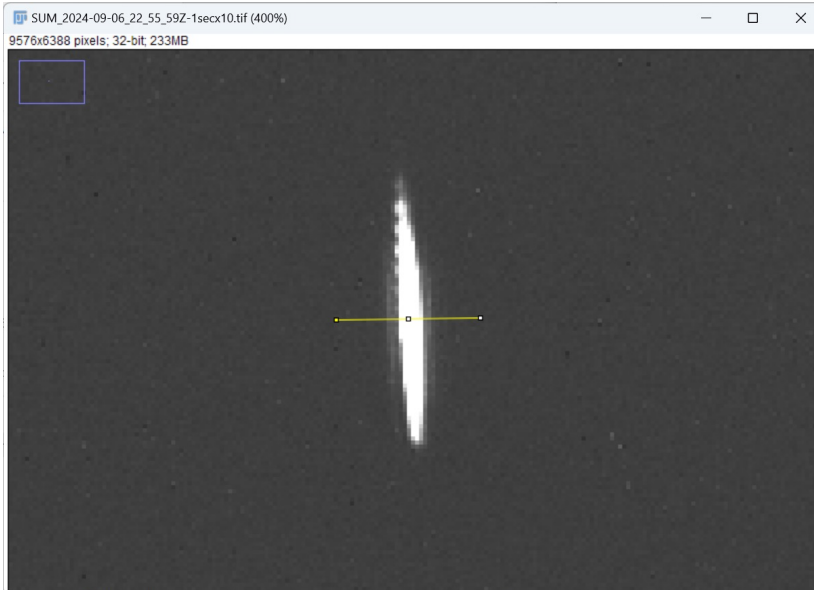
$$0.0067424 \text{ A/pix}$$

$$\text{FWHM} = 3.3311 \text{ pix}$$

$$\text{WL} = 5639.7461 \text{ A}$$

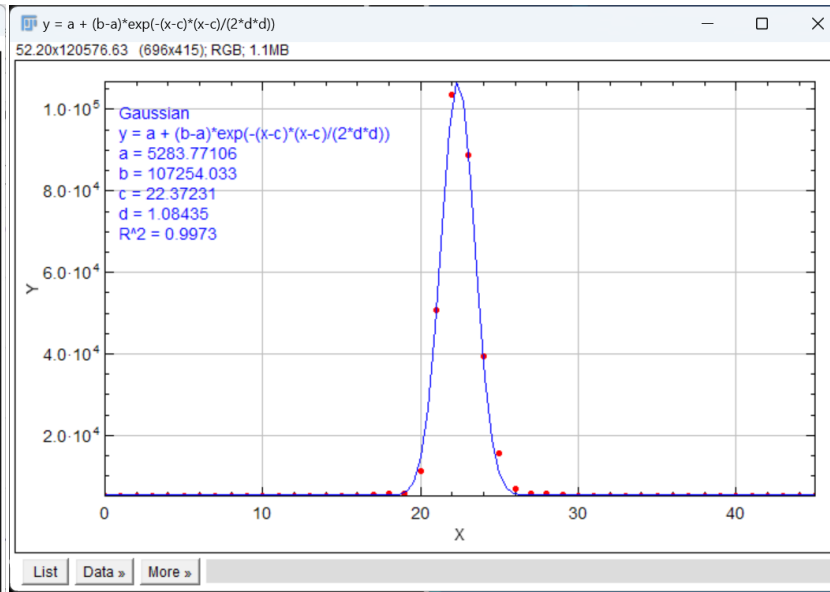
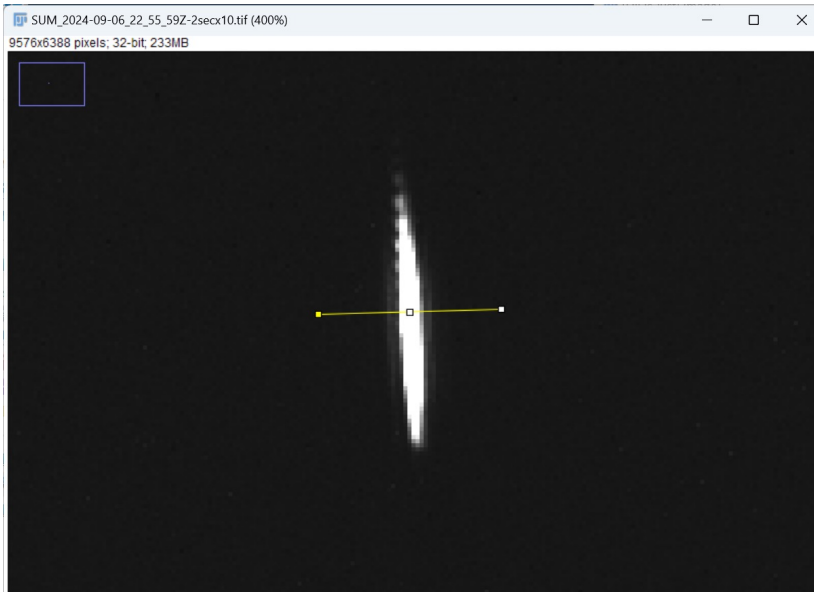
$$\lambda / \Delta \lambda = 251106 \sim 25 \text{ 万}$$





ND8
 10 x 1sec
 $d = 1.02915$
 $\theta \text{ FWHM} = 2.3548 d$
 $= 2.423 \text{ (pixels)}$

He-Ne Laser
 波長632.816nm
 +40um slit



ND8
 10 x 2sec
 $d = 1.08435$
 $\theta \text{ FWHM} = 2.3548 d$
 $= 2.553 \text{ (pixels)}$

90次、波長632.816nm
 FWHM ~ 2.6pix
 → 0.019554A
 $\lambda / \Delta \lambda = 323,631$

すばる3・TMT時代へ向けて

• 将来の観測装置に応用可能な観測技術・経験の獲得

- 効率を保ちつつ超高波長分解能・広波長域を実現する分光器設計とイメージスライサー
- 可視光波長全域に渡って満遍なく稠密に輝線スペクトルを発生する天文コム装置
- 超精密レベルでの大面積CMOSカメラの特性理解
- すばる/HDSの超高波長分解能化も

• 中小口径望遠鏡での独自のサイエンスと大口径望遠鏡との連携

- 様々な時間尺度での恒星表面変動現象の観測的理解
- 太陽近傍の明るい太陽型星における「第二の地球」探索
- 大望遠鏡での観測ターゲット選定のための予備観測
- 超高波長分解能・高時間分解能分光観測のさらなる展開（例：星間物質同位体比測定）