

3.8m望遠鏡用・高精度視線速度測定
高分散分光器について

太陽系外惑星探査プロジェクト室
小谷隆行、田村元秀

概要

- IRDのHeritageを生かした3.8m望遠鏡用・高精度視線速度測定用高分散分光器の提案
 - 地球型惑星検出のための赤外線高分散分光器
Infrared Dopplerの紹介
 - 装置提案

Infrared Dopplerの紹介

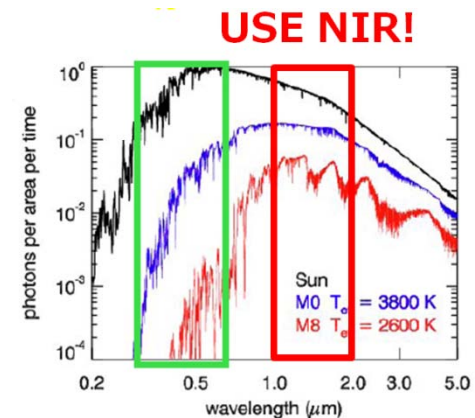
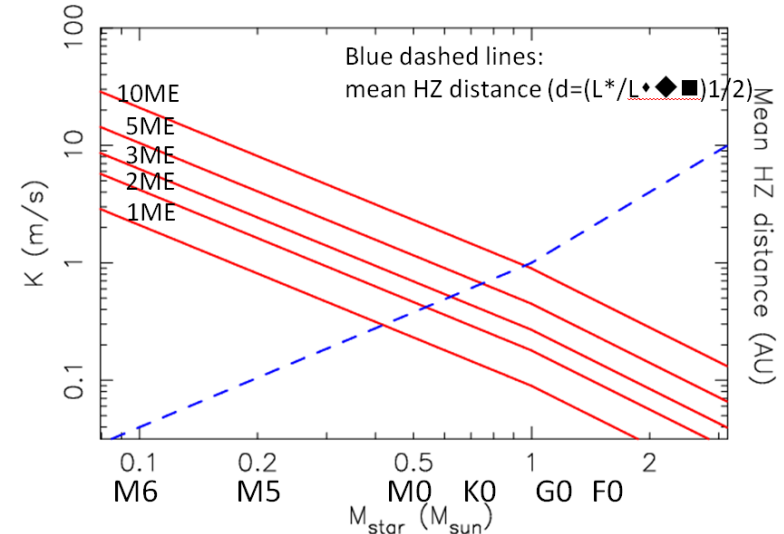
- すばる望遠鏡用に開発中の赤外線高分散分光器
(PI. 田村元秀)
- 視線速度法によるM型矮星周りの低質量惑星探索が
主目的
- 近赤外線(0.97-1.75 μm)で恒星の視線速度を極めて高
精度(1m/s)で測定するための装置
- 2014年ファーストライト予定

すばるは赤外ドップラー装置で地球型惑星を狙う

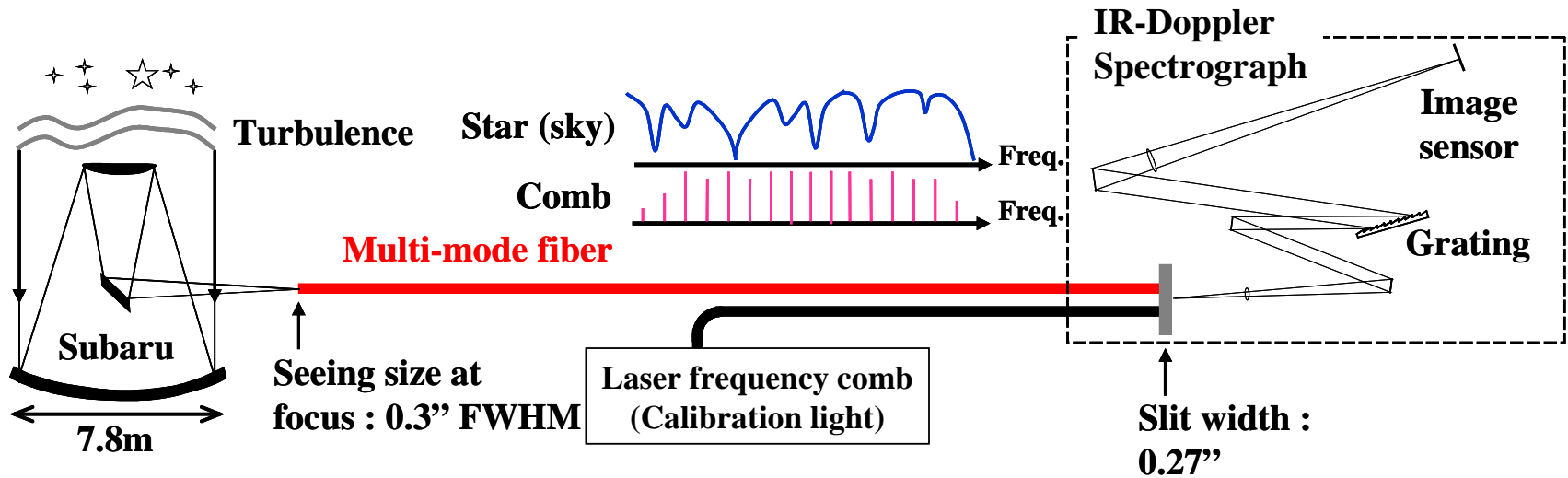
赤外線ドップラー法によって1地球質量の惑星をM型星のハビタブルゾーンに多数検出

- 従来の可視光ドップラー法の限界と赤外線の利点
 - 太陽型恒星(F,G,K)の探査がメイン。地球型惑星探査は今より10倍高精度が必要でいずれ限界に達する
 - (数多い)軽い星の周りの地球型惑星探査は赤外線が有利
- 小さくて軽い惑星が見つけやすい
 - 中心星が小さくて軽い
 - ドップラー、トランジットともに有利
- ハビタブルゾーンにある惑星が見つけやすい
 - 中心星の光度が小さく、ハビタブルゾーン(HZ)が中心星に近い
 - HZ: $\sim 0.04\text{AU}@0.1M_{\text{sun}}$, 1MEarth 中心星視線速度振幅 $\sim 2\text{ m/s}$
- 中心星が可視で暗い
 - 可視RVでは $0.3M_{\text{sun}}$ が限界
 - 赤外RVが効率的

RV amplitude of central star imparted by an orbiting habitable zone planet



装置の概念図



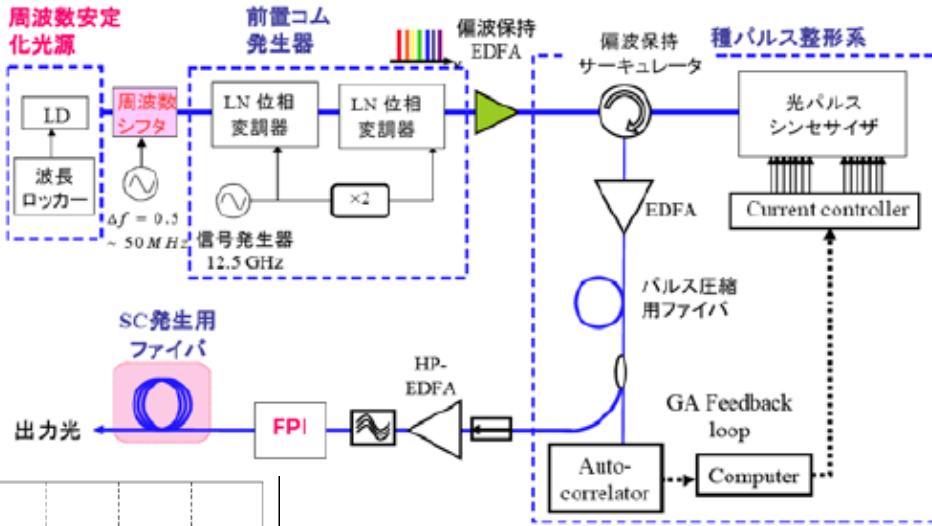
IRDのスペックまとめ

- 波長域: 0.97-1.75 μm
短波長側(0.97-1.1 μm)も重要 (based on simulations using model M star spectra)
- 波長分解能: ~ 70,000 @ 1480nm (3pixel sampling)
- ピクセルスケール: 0.09 arcsec/pixel
- スリット: 0.27 x 3 arcsec
- ファイバー: star + comb
- 分散素子: Echelle (high Blaze angle)
& VPH-Grating (order sorting)
- 視線速度測定精度: 1 m/s w/ laser frequency comb
- 検出器: Hawaii 4RG 4096x4096
- 冷却: 検出器温度 60K
光学系温度 80K ~ 200K
低振動機械式冷凍機 (Pulse-tube cooler)
- Tip-Tilt: Rlimit=18 & 0.27arcsec slit usable

IRD開発の現状

- 装置の基本仕様の決定
- クリティカルコンポーネント開発を推進中
 - 検出器、光学設計、Grating、周波数コム、ファイバー
- Conceptual Design Reviewを開催(2012/09)
 - レビューコメントを受けて詳細仕様の確定
- 2014年ファーストライト予定

オリジナル周波数コム(東京農工大黒川研との共同開発)



近赤外域には波長の基準に使える適当なガスセルがない
 極めて波長安定性の高いレーザー周波数コムを用いる

Spectrometer Resolution
 分光器の分解能 3 [GHz]@1500 nm

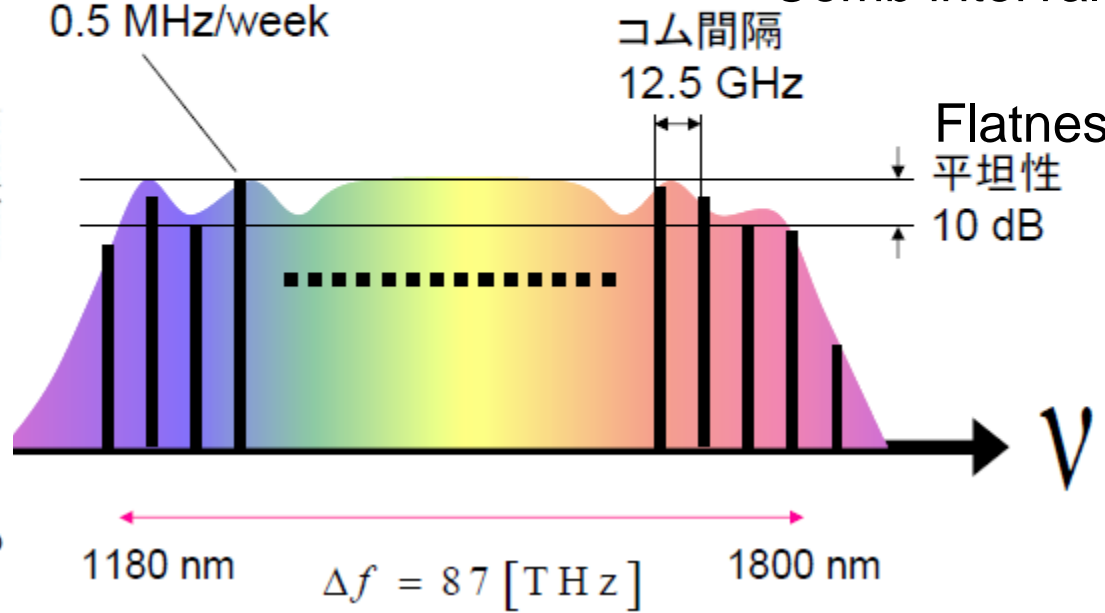
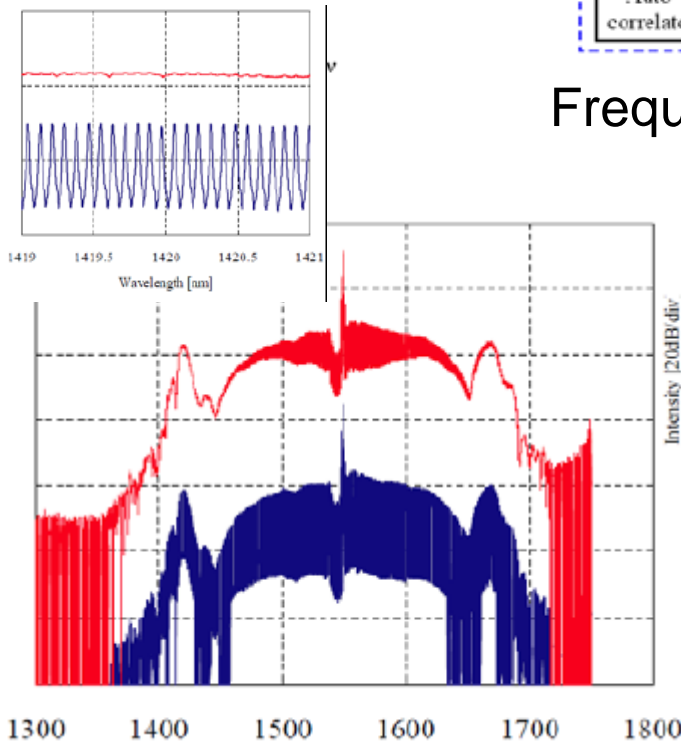
About 7000 lines of comb
 約7000本のコム

Frequency stability
 周波数安定性
 0.5 MHz/week

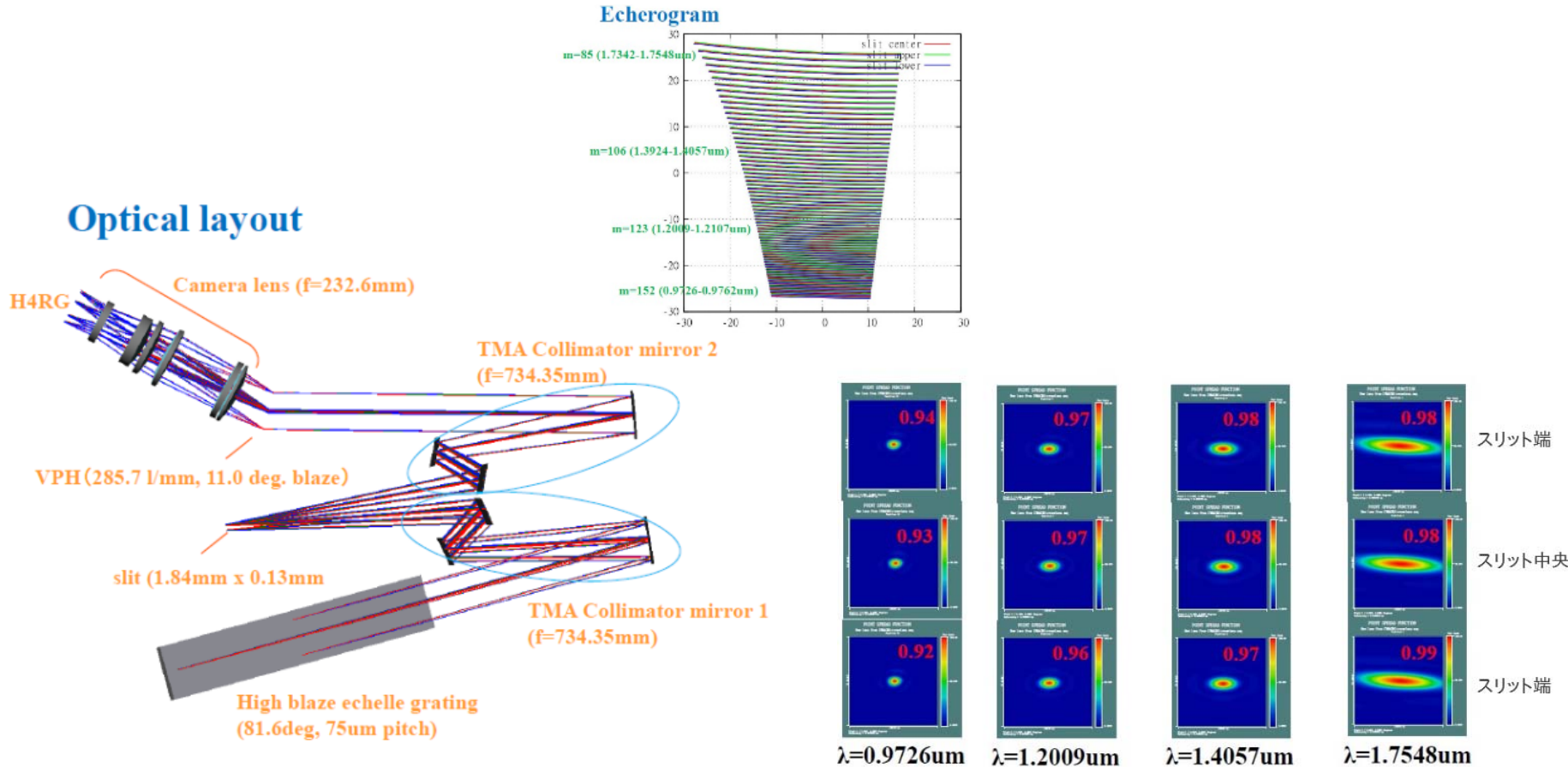
Comb interval

コム間隔
 12.5 GHz

Flatness
 平坦性
 10 dB



分光光学系設計



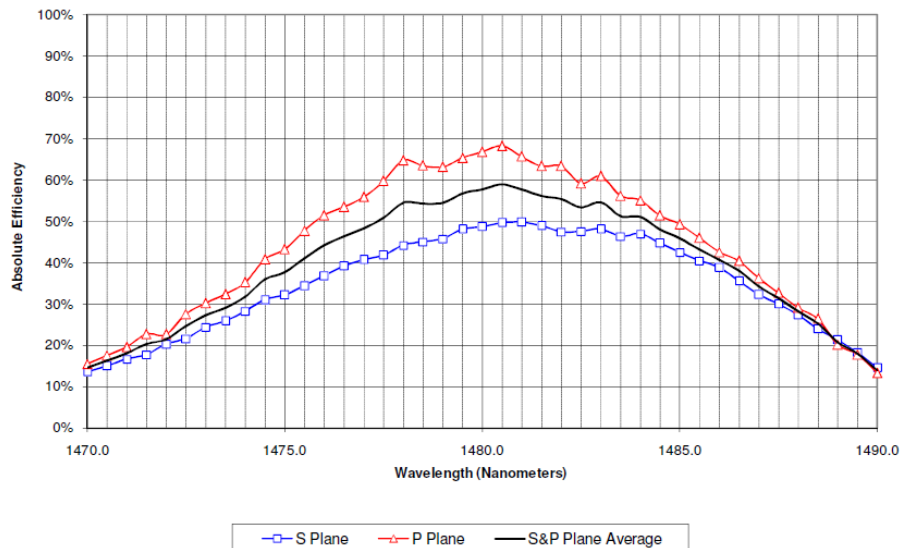
- 非球面鏡を用いた**Three Mirror Anastigmat (TMA)** 系
- 全波長域(0.97-1.75um)において高ストレール比(>0.8)の回折限界像を達成可能な設計

Echelle Grating

- Echelle Grating
- マスターGratingの製作に成功 (Richardson Gratings Corp.)
- 50%以上の高い効率



Diffraction Grating Efficiency

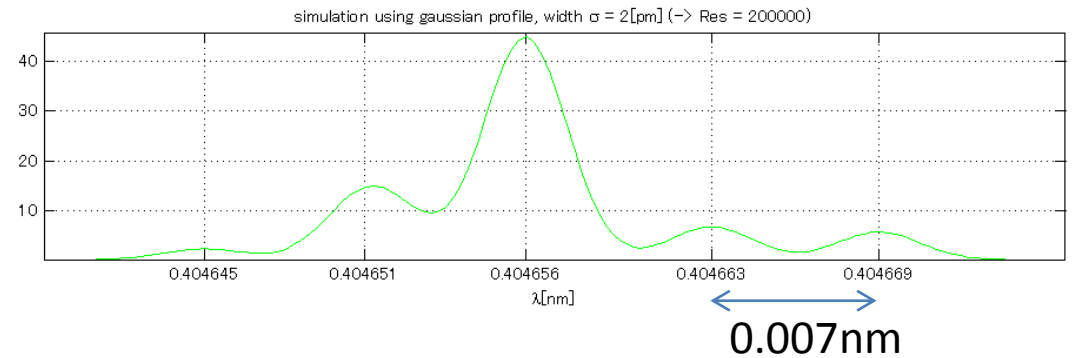
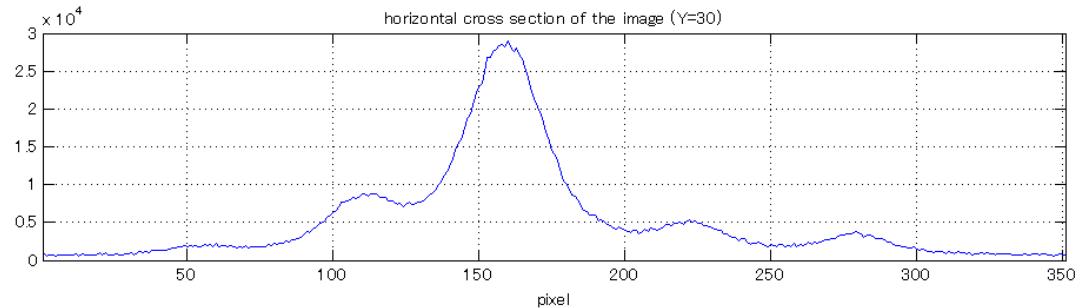
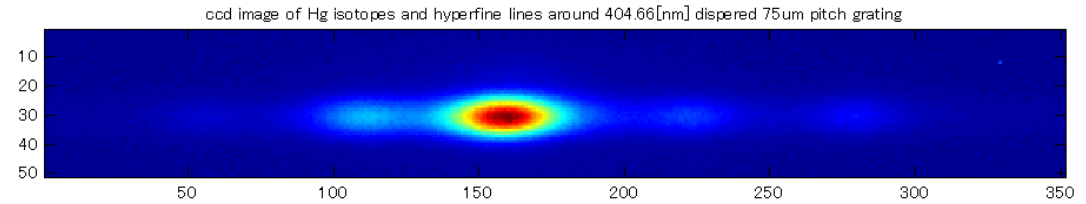


Specifications

- 13.3 grooves/mm
- Nominal blaze angle of 80.7 deg
- Substrate size: 70x420x74 mm
- Absolute average efficiency at 1480 nm (100th order) with 81.6 deg angle of incidence is about 50%
- Substrate material: Zerodur, a surface is aluminum coated

試作グレーティング

- 本番と同じ光学パラメーター
- サイズ: 100mm角 (1/4)
- グレーティングピッチ: 75 μ m
- Blaze angle = 81 deg
- 回折効率: $\sim 50\%$
- 基盤面精度: $\sim \lambda_{633\text{nm}}/10$
- グレーティングの波長分解能は約200000
- 3.8m望遠鏡用に使えないか？

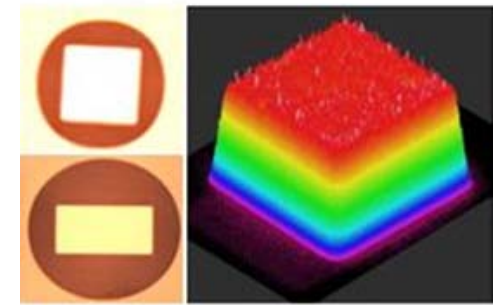
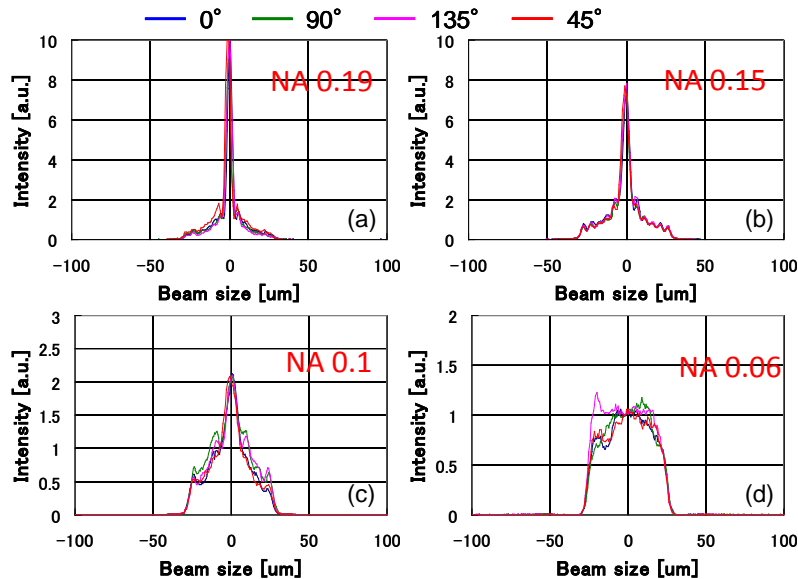


試作グレーティングを使ったHg Hyperfine line
の分光画像

最適ファイバーの選択

- マルチモードファイバー
 - 効率(結合損失 × 伝送損失 × Near filed損失 × Far filed損失)
 - 出力像の安定性(モーダルノイズ、視線速度精度に直結)
- シングルモードファイバー
 - 高入射効率のためにはクリーンな入射波面必要
 - 出射像は完全に安定

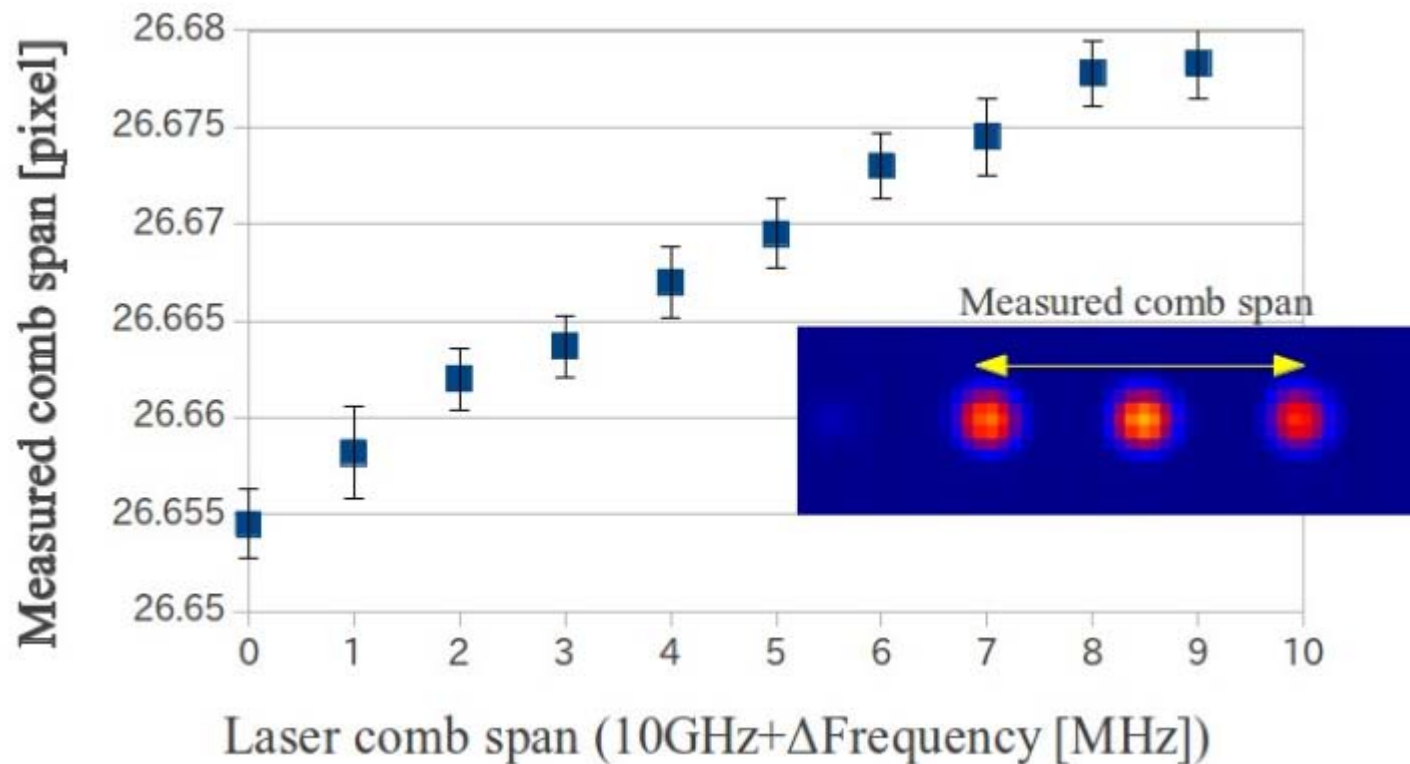
Near
Field



モーダルノイズが少ない方形ファイバー

視線速度測定の実験室デモンストレーション

- M型星まわりのハビタブルな地球型惑星検出に必要な視線速度測定精度は1m/s
- シングルモードファイバー+試作グレーティング、レーザーコムを使用
- コムの間隔を1GHz(1m/s)変化させ、これを分光器で検出



3.8m望遠鏡用装置案

IRDのHeritageを生かした視線速度測定用高分散分光器

- 波長範囲
 - CCDで運用できるY-bandあたり(0.97-1.1 μ m)
 - 近赤外(0.97-1.75 μ m,大フォーマット赤外検出器があるなら)
- グレーティング
 - IRD用試作具レーティングの波長分解能は最大約200000
- 波長校正
 - ファブリペローフィルター＋ハロゲンランプ
 - ガスセル
 - Laser Frequency Comb
- ファイバー入射
 - シングルモードファイバー(モーダルノイズなし、ただし良いAOが必要)
 - マルチモードファイバー(モーダルノイズあり、入射が容易)
- 波長分解能
 - シングルモードファイバーなら200000まで可能
 - マルチモードファイバの場合は<100000 (要検討)

視線速度測定精度

- 視線速度測定精度を制限する要因
 - フォトンノイズ、検出器ノイズ
 - マルチモードファイバーのモーダルノイズ(ファイバー出射パターンの変動)
 - 装置の不安定性
- シングルモードファイバー+(Extreme)AOなら
 - 波長分解能 $R > 10^5$ は可能
 - モーダルノイズなし
 - 明るい星なら1m/sが可能?
- マルチモードファイバーの場合の精度は要検討

Table 1.2: Expected RV accuracy

Wavelengths (μm)	$R = 5 \times 10^4$ (m s^{-1})	$R = 8 \times 10^4$ (m s^{-1})	$R = 10^5$ (m s^{-1})
0.515–0.57	0.8	0.4	0.3
0.99–1.07	2.9	1.4	1.0
1.17–1.3	4.6	2.7	2.1
1.5–1.75	2.1	0.9	0.7
0.99–1.75	1.3	0.6	

$N = 10^5$, 3 pixel sampling

まとめ

- IRDのHeritageを使い、視線速度測定赤外線高分散分光器が比較的容易に開発できる
- (Extreme)AO+シングルモードファイバー入射なら非常に高い視線速度測定精度が達成可能
- マルチモードファイバーの場合の性能は要検討

終