

科学研究費補助金・特別推進研究 FY2025-2030

超精密分光観測による革新的系外惑星探索： cm/sレベルでの恒星変動現象の解明

研究代表者

佐藤文衛（東京科学大学）

研究分担者

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（核融合科学研究所）

本田敏志（兵庫県立大学）

青木和光（国立天文台）

「第二の地球」発見における視線速度法の位置づけと現在の到達点・限界点

究極的な目的

宇宙における生命の起源と進化、およびその特殊性、普遍性の解明

系外惑星探索の大目標 太陽近隣の「太陽型星」における「第二の地球」候補の検出

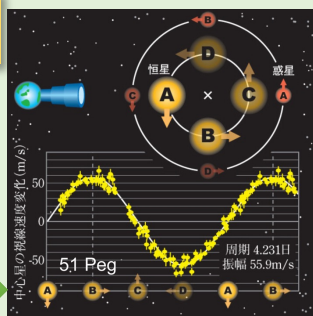
手法

可視光波長域でのドップラー効果
を利用した視線速度法⁺

⁺ 惑星の周回で引き起こされる主星の運動を主星のスペクトル吸収線の波長変化として捉える観測手法

- ✓ 太陽型星は可視光で最も明るい
- ✓ 視線速度法は幅広い軌道半径と惑星質量に適応
→ 惑星検出率が高い

1995年に視線速度法で初めて発見された系外惑星地球型の発見にはさらに微少な揺動の検出が必要

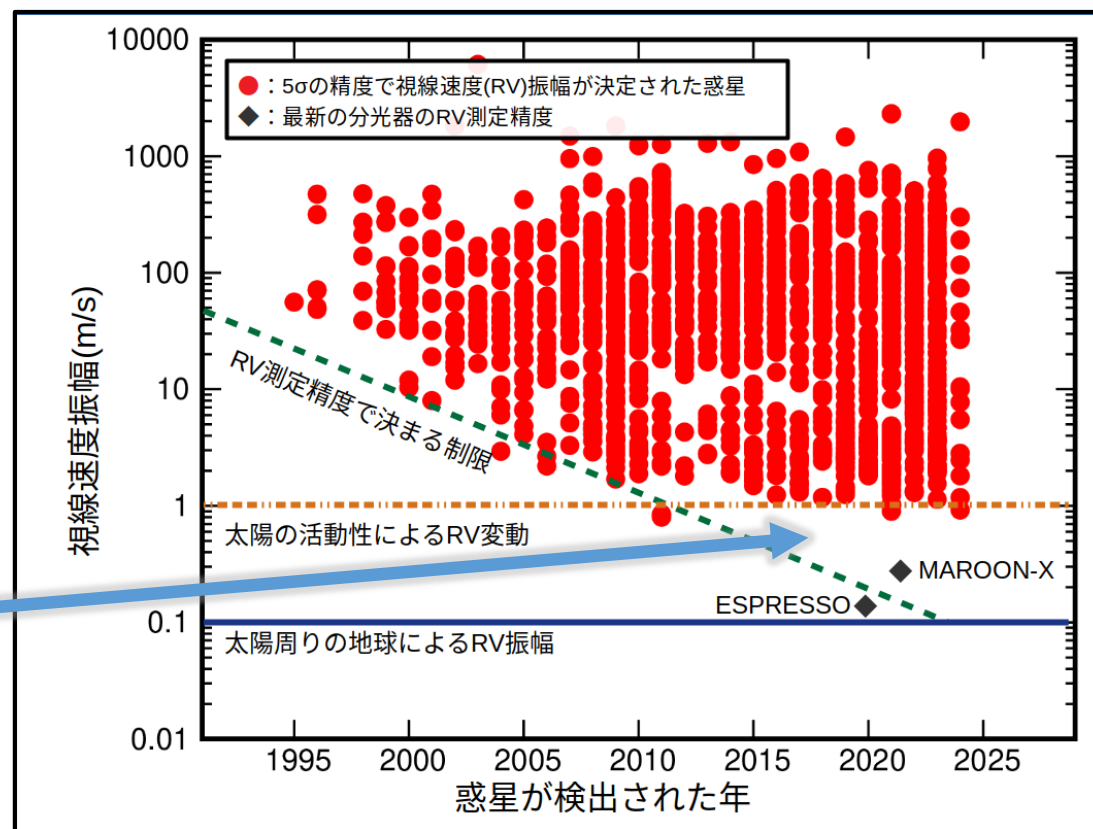


現状

- ✓ 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（右図）

⁺⁺地球による太陽の揺動は約10cm/s

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



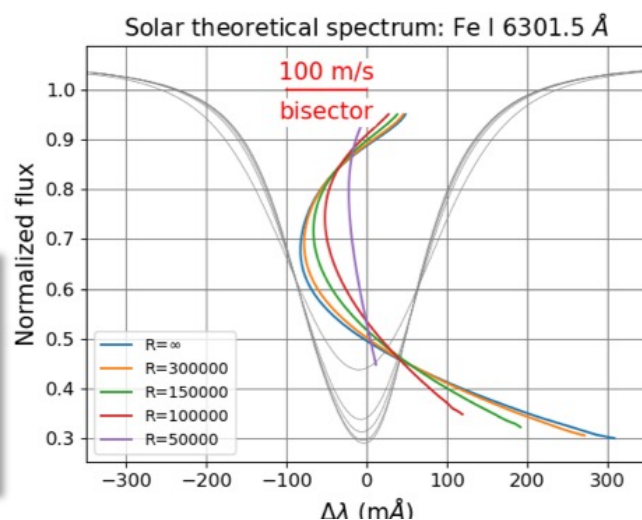
課題：恒星の変動現象の把握と軌道運動との分離—吸収線輪郭解析

惑星の周回による軌道運動 → 吸収線輪郭形状が**変化しない**波長変化
 恒星表面大気の変動 → 吸収線輪郭形状の**変化を伴う**波長変化

- ◆ 現行の系外惑星探索用分光器（比波長分解能 $R=\lambda/\Delta\lambda \sim 15$ 万）では、波長分解能の不足により吸収線輪郭形状を正確に観察できず（左下図）、恒星活動による線輪郭形状変化を十分に検出できない
- ◆ 超高波長分解能分光（ $R > 30$ 万）では、吸収線の**線輪郭形状変化と波長変化の相関**から恒星表面の大気変動に起因する波長変化を補正することができる（右下図）

波長分解能による太陽吸収線輪郭形状の違い（シミュレーション）

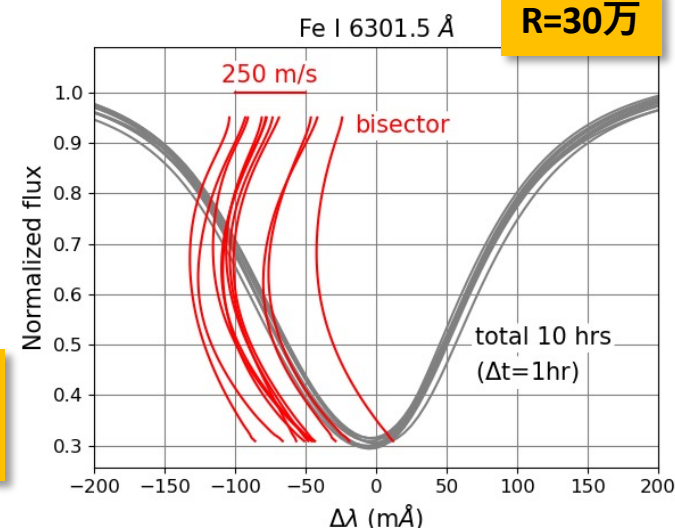
バイセクター
（2等分線）は
見やすさのため
波長方向に40倍
拡大した上でシ
フトさせている



太陽表面磁気乱対流による吸収線の時間変動シミュレーション

1 時間間隔で
計10 時間の
変動を計算

バイセクターは見
やすさのため波長
方向に10 倍拡大



超精密分光観測による革新的系外惑星探索：cm/sレベルでの恒星変動現象の解明

未だかつて世の中に存在していない、極めて独自性の高い分光器を岡山188cm / せいめい3.8m 望遠鏡用に開発し、以下の先進的かつ革新的な観測研究を実施

- ・ センチメートル毎秒レベルでの太陽型星の変動現象の解明
- ・ 太陽近隣の太陽型星を周回する地球型惑星の探索

独自性と創造性①：5つの「超」を同時に実現する新分光器の革新性

- I. 超高波長分解能 : 比波長分解能30万以上
- II. 超高精度波長較正 : 速度換算で10cm/s以下 (ゴール 1cm/s)
- III. 超高時間分解能 : ~秒スケール
- IV. 超広波長域 : 400-900nm
- V. 超大量長期間観測 : ~年以上

これらの全てを備える
分光器は存在しない

独自性と創造性②：新分光器が生み出すデータの独自性

人類が未だ手にしていない
新たな観測データ

- ◆ 可視光の広い波長域で恒星由来の変動を直にスペクトル線輪郭の変動から抽出できる
- ◆ 恒星由来の変動を取り除き、cm/sレベルの精度で恒星の真の視線速度変化を測定できる
- ◆ あらゆる時間尺度の変動を高いデューティーサイクルでモニターできる
- ◆ 豊富な観測時間により、時間的に密に長期間にわたって大量のデータを取得できる

1. 新分光器の開発（R7～R9年度）

キーアイテム①：分光器本体

近年の設計・加工技術の向上によって可能に

◆ 超高波長分解能とコンパクトさの両立

- ✓ 将来の真空槽封入を想定しコンパクト（約1.9m）な瞳移行型
- ✓ 極めて細いスリット幅50 μ m（イメージスライサーを使用）

◆ 極めて高い反射率の鏡面 → キーアイテム⑤

- ✓ 高度な収差補正が可能な3枚鏡TMA系（予備設計）

キーアイテム②：イメージスライサー

188cm & すばるでの開発をさらに一歩前進させる

◆ 星像を細い短冊状にスライスし整形する光学部品

- ✓ スリット幅を狭めつつ効率を失わないために必須

◆ 実績のあるプリズム型と新しいミラー型を試みる

キーアイテム③：天文コム（レーザー周波数コム）

◆ 周波数（波長）軸上で等しい周波数間隔の輝線列

◆ これまでの実績をもとに新分光器対応のコムを開発

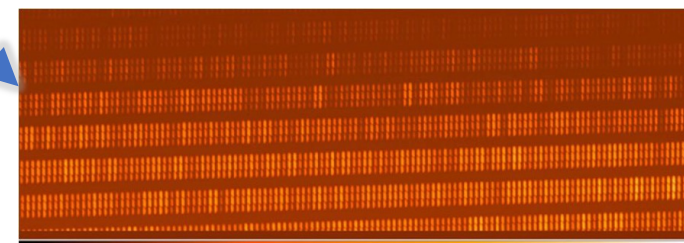
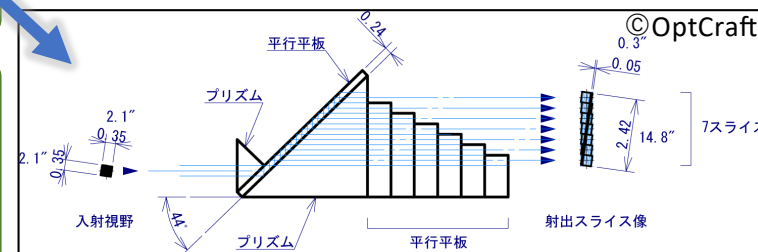
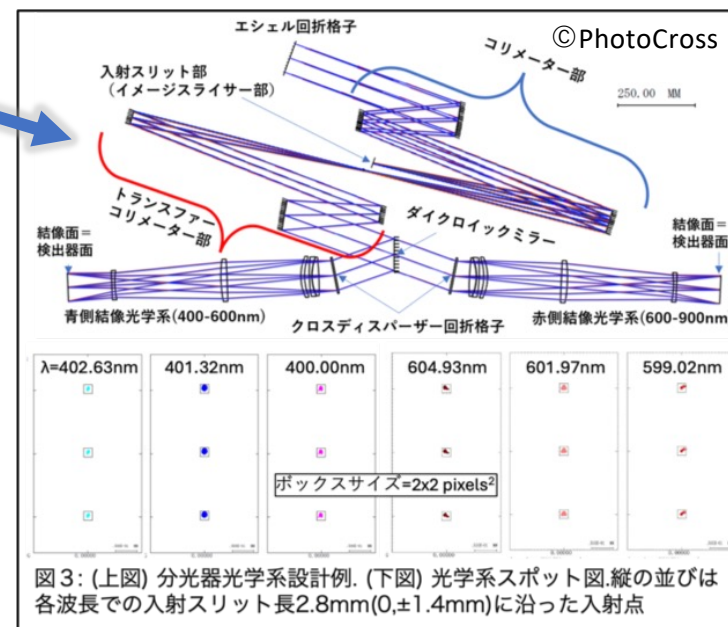
- ✓ 理論的には1cm/sまでの校正精度

188cm 望遠鏡で独自開発を継続中

キーアイテム④：検出器（CMOSカメラ）

◆ 高感度・広波長域・大面積・小画素サイズ・高速読出

◆ 恒星とコムのスペクトルを時間的に密に交互に取得し、あらゆる変動を校正するという新しい手法を開発

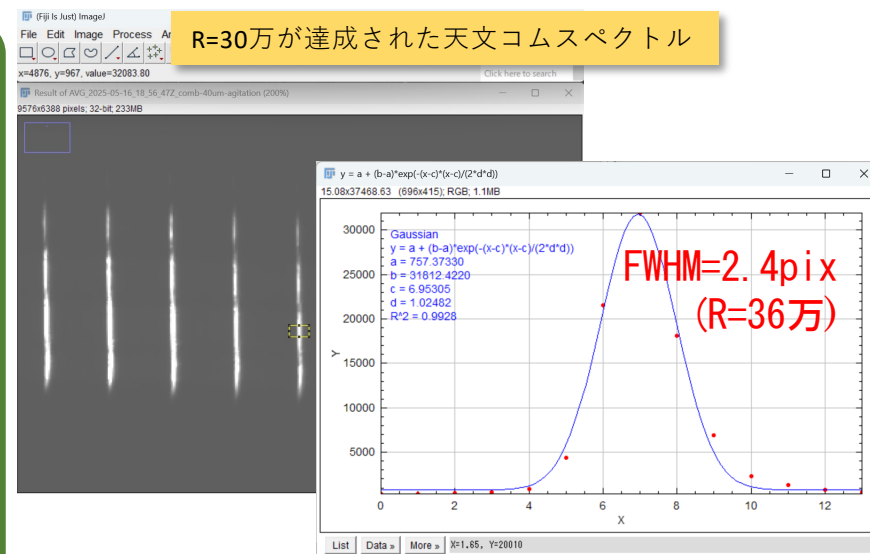


ごく最近になって製品として利用可能となり
長期間・多額の予算を要する開発を回避できる

2. データ解析手法の開発 (R7～R9年度)

188cm望遠鏡/HIDES-Fによる模擬データの取得

- ◆ HIDES-Fへ超高波長分解能オプションを導入
 - ✓ スリット幅40um & 民生用CMOSカメラ (TMT戦略基礎開発研究経費で導入済)
 - ✓ 狭い波長域 (光軸近傍) でR=30万を達成済 (右図)
- ◆ 初年度に開発する新・天文コムを利用
 - ✓ 上記波長域で、理論的にはコムスペクトルに対して～10cm/sの精度を達成可能
- ◆ 特に明るい (3等星以下) 数個の天体に対し、新分光器での観測を模擬したデータを取得

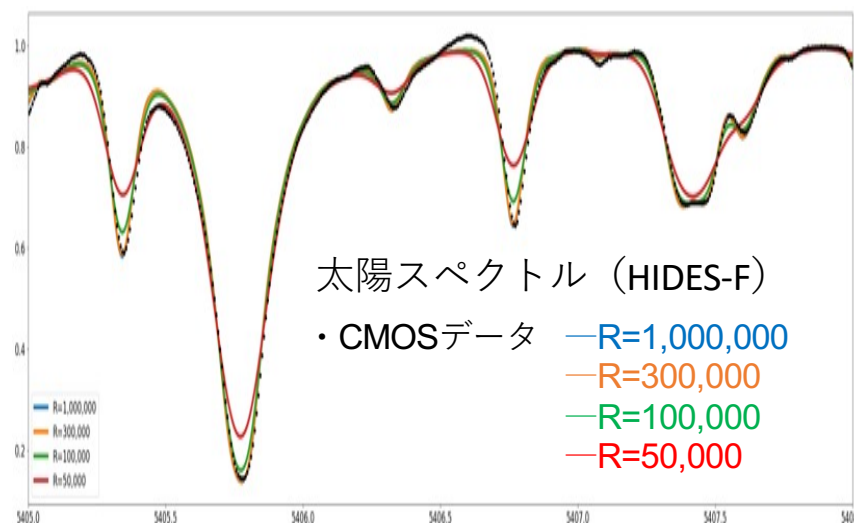


シミュレーションによる模擬データの生成

- ◆ 3次元動的大気モデル (研究協力者が開発済) に基づくシミュレーション
 - ✓ 恒星表面磁気乱対流を再現
- ◆ 様々な吸収線、大気パラメータ、時間尺度を想定した模擬時系列データを生成



これらの模擬データを用いて、新分光器のデータ解析手法、観測戦略を事前に検討



光ファイバーを直接太陽に向け、波長分解能30万で取得した太陽スペクトルの一部。黒点がCMOSでの観測点、実線はR=100万のスペクトルにガウス関数を畳み込んで波長分解能を落としたもの。

3. 新分光器を用いた観測 (R10～R12年度)

観測対象

- ◆ 岡山から観測可能な位置にある太陽型星
(晩期F～早期K型の矮星および準巨星)
 - ✓ 4等星以下で約20個 (6.5等以下だとこの約30倍)
 - ✓ 地球型惑星の存在確率 (約50%) を考えると十分な数
- ◆ 1データ点当たりの精度～**10cm/s** (**30cm/s**) の場合
 - ✓ 188cm望遠鏡では～**2.5等星** (**5等星**) 以下
 - ✓ せいめい3.8m望遠鏡では～**4等星** (**6.5等星**) 以下



国立天文台ハワイ観測所岡山分室 188cm望遠鏡
当プロジェクトによる占有が可能

観測期間・頻度・夜数

- ◆ 観測期間：3年間
 - ✓ 太陽型星周りのハビタブルゾーン (公転周期～1年) にある惑星を検出/棄却するために最低限必要
- ◆ 観測頻度：1晩に複数回を毎晩～数晩おきに
 - ✓ 様々な時間尺度の変動 (乱対流、自転によるモジュレーション、活動サイクル) を補正するため
- ◆ 想定最大夜数
 - ✓ 188cm望遠鏡：約150夜/年
 - ✓ せいめい3.8m望遠鏡：約50-60夜/年

頻度・期間併せて膨大な観測時間を必要とするため
8m級以上の望遠鏡では事実上不可能



京都大学岡山天文台 せいめい3.8m望遠鏡
共同利用および京都大学時間を使用

各望遠鏡と超高波長分解能分光器の配置

新分光器は188cm望遠鏡ドーム1Fに設置し、188cm望遠鏡とせいめい望遠鏡それぞれに光ファイバーで接続、それを切り替えて使用する



年次計画

天文コム

<超高波長分解能分光器SHRS>

前置光学系

検出器

高安定環境

SHRS本体

ファイバー

経路

CaIIHK

分光器

<せいめい望遠鏡接続>

接続

観測・研究

FY2025/R7

FY2025/R7

打ち合わせ・設計・調達手続き

FY2026/R8

FY2026/R8

チューニング

FY2027/R9

FY2027/R9

FY2028/R10

FY2028/R10

FY2029/R11

FY2029/R11

FY2030/R12

FY2030/R12

定常運用

設計・打ち合わせ
設計・打ち合わせ
設計・打ち合わせ調達手続き
調達手続き
調達手続き設計・打ち合わせ
設計・打ち合わせ調達手続き
部品調達・インハウス製作打ち合わせ
打ち合わせ調達手続き
調達手続き打ち合わせ
設計・打ち合わせ調達手続き
調達手続き打ち合わせ
打ち合わせ調達手続き
調達手続き設計・打ち合わせ
打ち合わせ調達手続き
調達手続き打ち合わせ
詳細設計調達手続打ち合わせ
設計・打ち合わせ188cm超高分解能用
188cm高効率測定・参照用設計・打ち合わせ
設計・打ち合わせ

アセンブリ・チューニング

アセンブリ・
チューニング

定常運用

設計・打ち合わせ

調達手続き

設計・打ち合わせ

調達手続き

設計・打ち合わせ

調達手続き

設計・打ち合わせ

調達手続き

打ち合わせ
設計・打ち合わせ調達手続き
調達手続き

アセンブリ・チューニング

アセンブリ・
チューニング

定常運用

天体捕捉・ガイド光学系
ファイバー伝送路設計・打ち合わせ
設計・打ち合わせ調達手続き
調達手続き

アセンブリ・チューニング

定常運用

せいめい超高分解能用

設計・打ち合わせ

調達手続き

HIDES-F予備観測

HIDES-F予備観測

HIDES-F予備観測 by 新CMOSカメラ

SHRS試験観測

SHRS本観測

せいめい望遠鏡観測

HIDES-F予備観測

SHRS試験観測

SHRS本観測

波及効果

◆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カメラの特性理解と高分散分光観測への本格導入

◆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
 - 低速自転星の表面模様（黒点）のマッピング
 - 太陽以外の恒星の内部対流や磁気活動性の理解
 - 3次元動的大気モデルの観測的検証、他の恒星への適用・一般化 など
- ✓ 太陽近傍の明るい太陽型星における「第二の地球」探索
 - 明るい星については豊富な観測時間がとれる中小口径望遠鏡が有利
- ✓ 大望遠鏡での詳細観測のためのターゲット選定、予備観測
 - TMT、Habitable World Observatory (HWO) 計画等へのターゲット提供、あるいはターゲットを決めるための有益な情報の提供
- ✓ 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、系外惑星大気におけるバイオシグナチャー探索、宇宙の加速膨張の直接検証
 - 大口径望遠鏡での超高波長分解能観測を視野に入れている（例：すばる/HDSの超高波長分解能化）