



系外惑星サーベイの副産物と PFSのシナジーの検討

成田憲保 (アストロバイオロジーセンター/国立天文台)

はじめに

- 現状のPFSのスペックでは、系外惑星そのものの観測に適したサイエンスは見当たらなかった
- かといってPFSに反対というわけではなく、大局的に見てすばるの将来計画にPFSのようなユニークな装置は必要不可欠
- そこでこれまであるいは今後の系外惑星サーベイの副産物とPFSで何かシナジーを考えることができないかを検討した
- また、現状のPFSにどんなアップグレードがあると、系外惑星の分野から見ても魅力的な装置になるかを検討した

目次

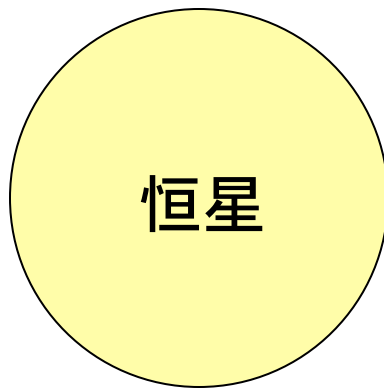
- 系外惑星研究の現状と将来計画
 - 視線速度サーベイ
 - トランジットサーベイ
- 考えられるPFSとのシナジー
 - 系外惑星サーベイで得られた精密恒星パラメータとPFSスペクトルの比較
 - PFSによる惑星保有星の系統的パラメータ決定
 - 星団や星形成領域の網羅的パラメータ決定
- PFSに望まれる追加機能
 - 惑星の大気や軌道の調査
- まとめ

主な系外惑星の探査法

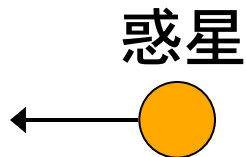
- 視線速度法
- トランジット法
- 直接撮像法
- 重力マイクロレンズ法

視線速度法の原理

恒星を惑星が公転していると、恒星も反動で少しだけ動く



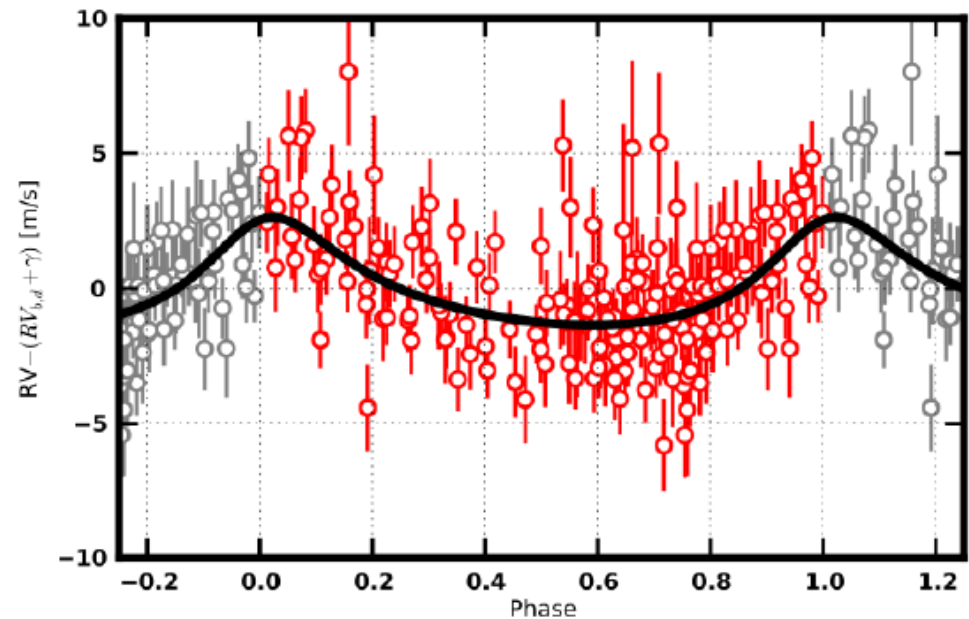
「光のドップラー効果」を使って
この速度(視線速度)を望遠鏡で測定する
→ 高分散分光観測 ($R > 50000$) を行う



- ・太陽は $\sim 10 \text{ m/s}$ でふらついている
- ・現在の観測装置は 1 m/s 以下まで測定可能
- ・将来は $\sim 10 \text{ cm/s}$ の測定を目指している

視線速度法の現在

- 可視光で1m/sを切るような精度が達成されつつある
- 地球に近い質量を持つ「スーパーアース」の発見数も増加している
- ハビタブルゾーン(HZ)にある惑星も発見されつつある_(c)
- 非常に高いSNの高分散分光データが蓄積されている



Delfosse+ (2012)
GJ667C c の視線速度

視線速度法の将来

赤外(z,Y,J,Hバンド)高分散分光器による低質量星の惑星探査

- すばる望遠鏡 8.2m / InfraRed Doppler (IRD)
- ホビー・エバリー望遠鏡 9.2m / Habitable-Zone Planet Finder
- Calar Alto望遠鏡 3.5m / CARMENES
- CFHT 3.6m / SPIRou

どれも2015-2017年頃に観測開始を計画

→今後低質量星の高SN/高分散分光スペクトルが蓄積されていく

視線速度サーベイの副産物

- 非常に高SNな星の高分散分光スペクトル
- 恒星パラメータが比較的よく求められている
 - T_{eff} , $\log g$, 金属量など
- 既にほぼ全天にサンプルが存在
 - これまでは太陽型星や巨星などが多かった
 - 今後は低質量星サンプルが増えて行く

系外惑星のトランジット(食)

系外惑星の軌道が太陽系から見てたまたま主星の前を通過する場合
定期的に主星が暗くなる現象が観測される

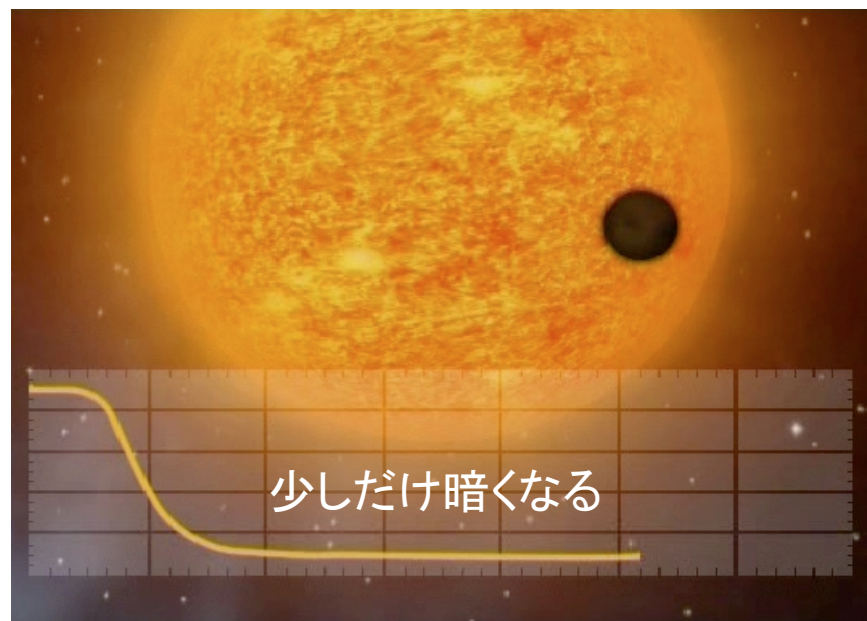
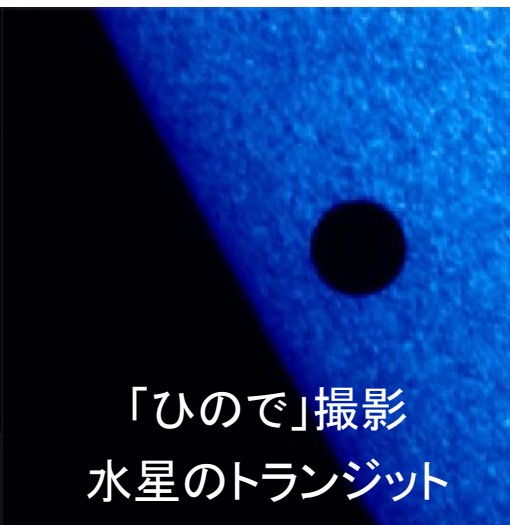
皆既月食



皆既日食



「ひので」撮影
水星のトランジット



系外惑星のトランジット

太陽系での食現象

トランジット観測からわかること

- トランジット中心時刻
- 惑星の公転周期
- 惑星の半径
- 惑星の軌道傾斜角
 - 惑星の質量(視線速度とあわせて)
 - 惑星の密度(視線速度とあわせて)

トランジット惑星に対しては惑星の詳細情報を調べられる

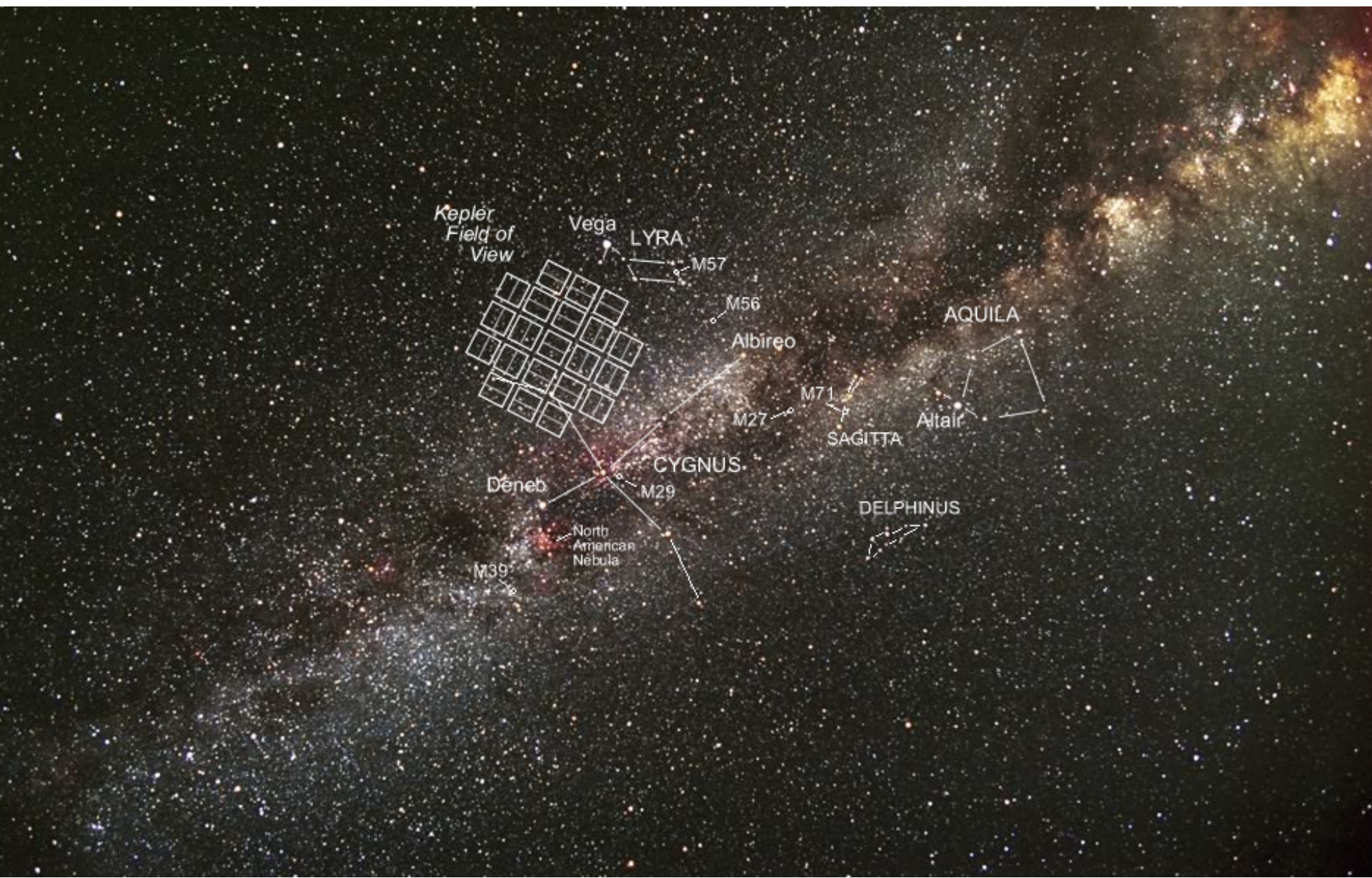
ケプラー計画

- NASAの宇宙望遠鏡計画
- 太陽-地球のような惑星系の発見が目標
- 白鳥座付近の10万個以上の主系列星を4年にわたって観測し続けた
- 95cm望遠鏡とCCD42枚によるトランジット惑星探し
- 2009年3月6日に打ち上げ
- 2013年5月16日活動休止後、K2計画として2014年に再開

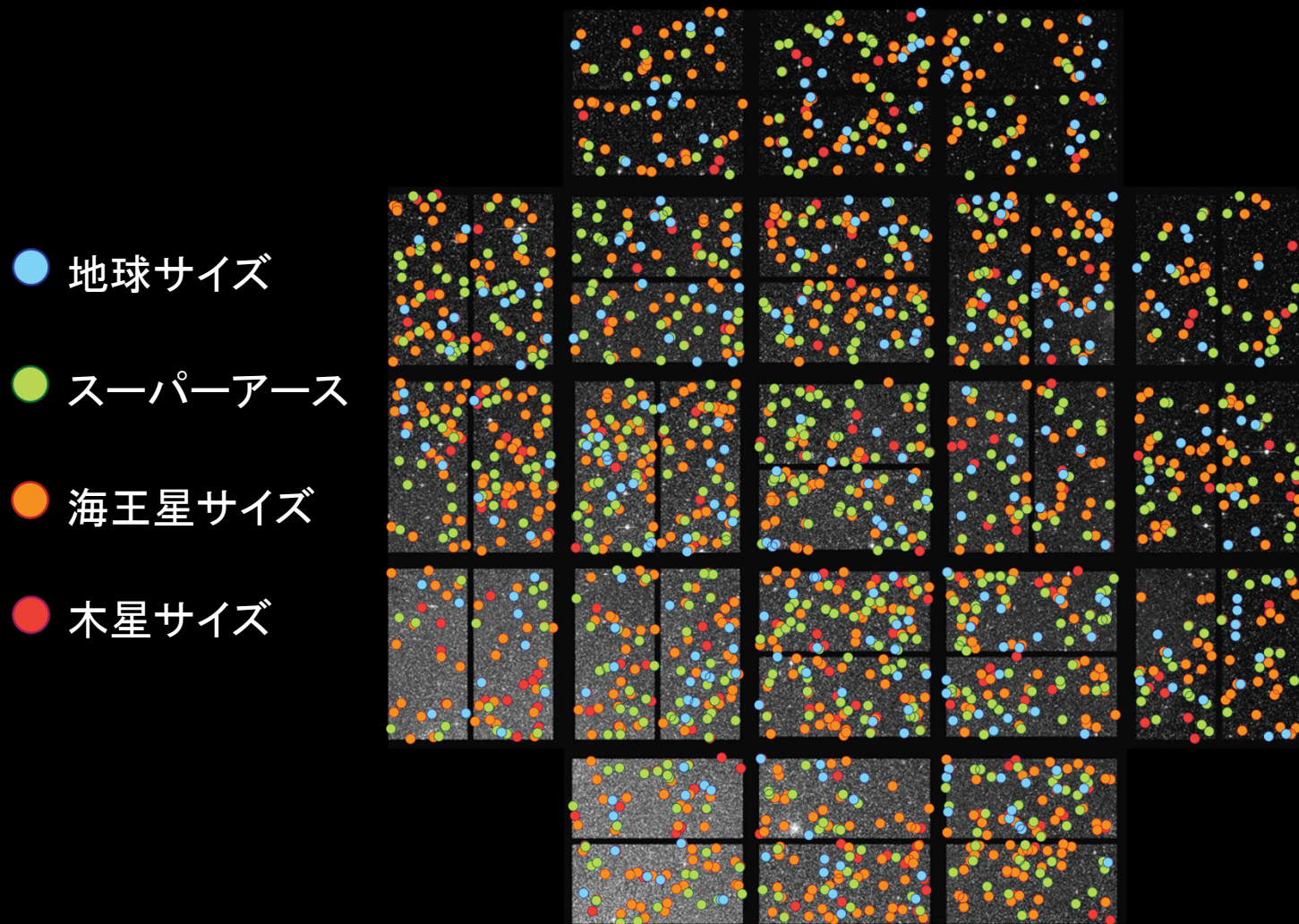


Kepler 打ち上げの様子

ケプラーの観測領域



ケプラーが2013年1月までに発見した惑星候補

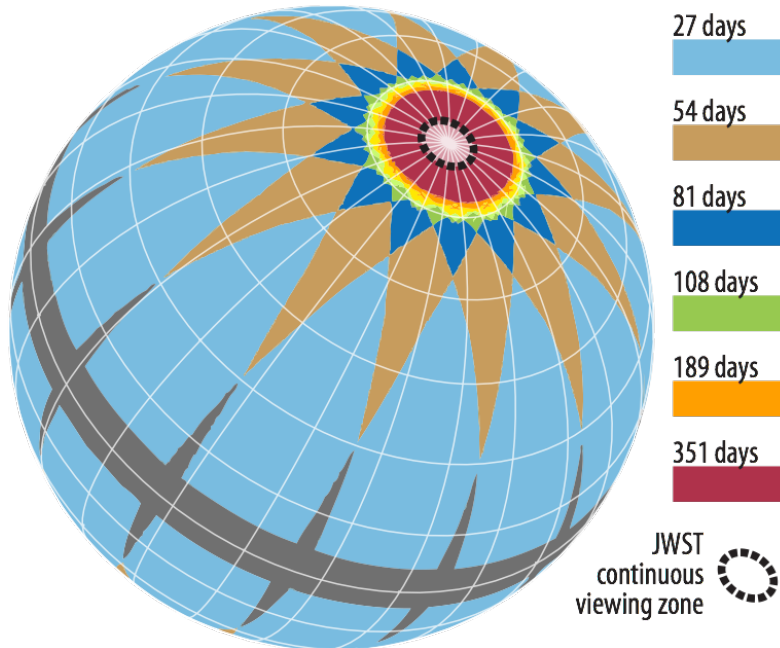
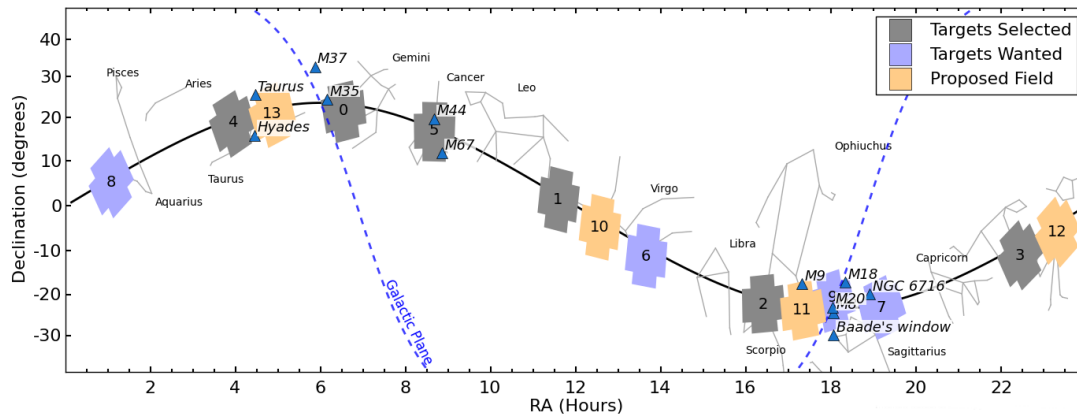


2740個の惑星候補の発見 → 2014年9月までに4234個

Keplerの大きな副産物：星震学

- 宇宙からの連続的な高精度測光観測
- 太陽型星、赤色巨星、rapidly oscillating Ap型星(roAP星)など多様な星のパラメータを地上分光観測+理論モデルより高精度に決定可能
 - 質量・半径・年齢・距離など
- 地上分光と合わせると恒星のパラメータが非常によく求められる

将来の宇宙トランジットサーベイ計画



2014-
Kepler2

2017

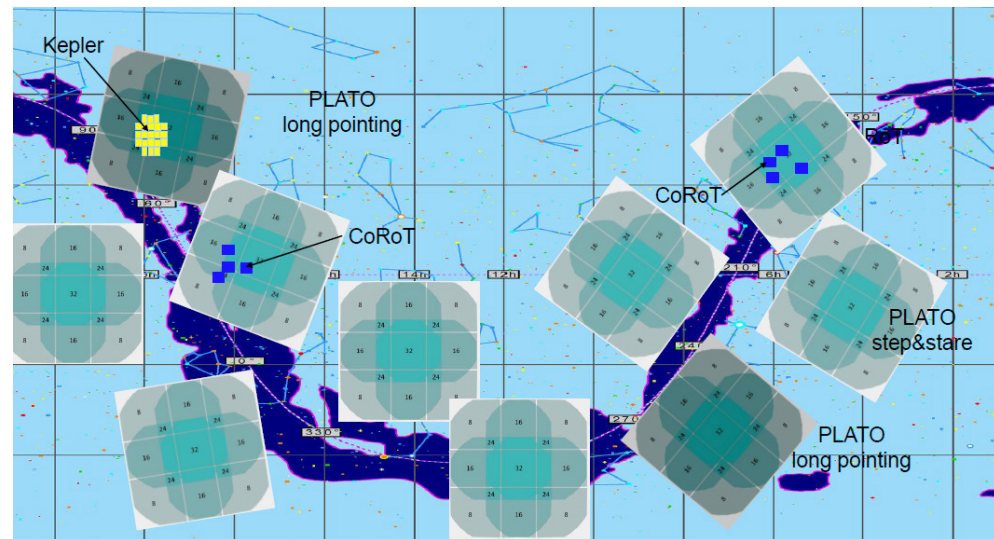
TESS

Transiting Exoplanet
Survey Satellite

2024

PLATO

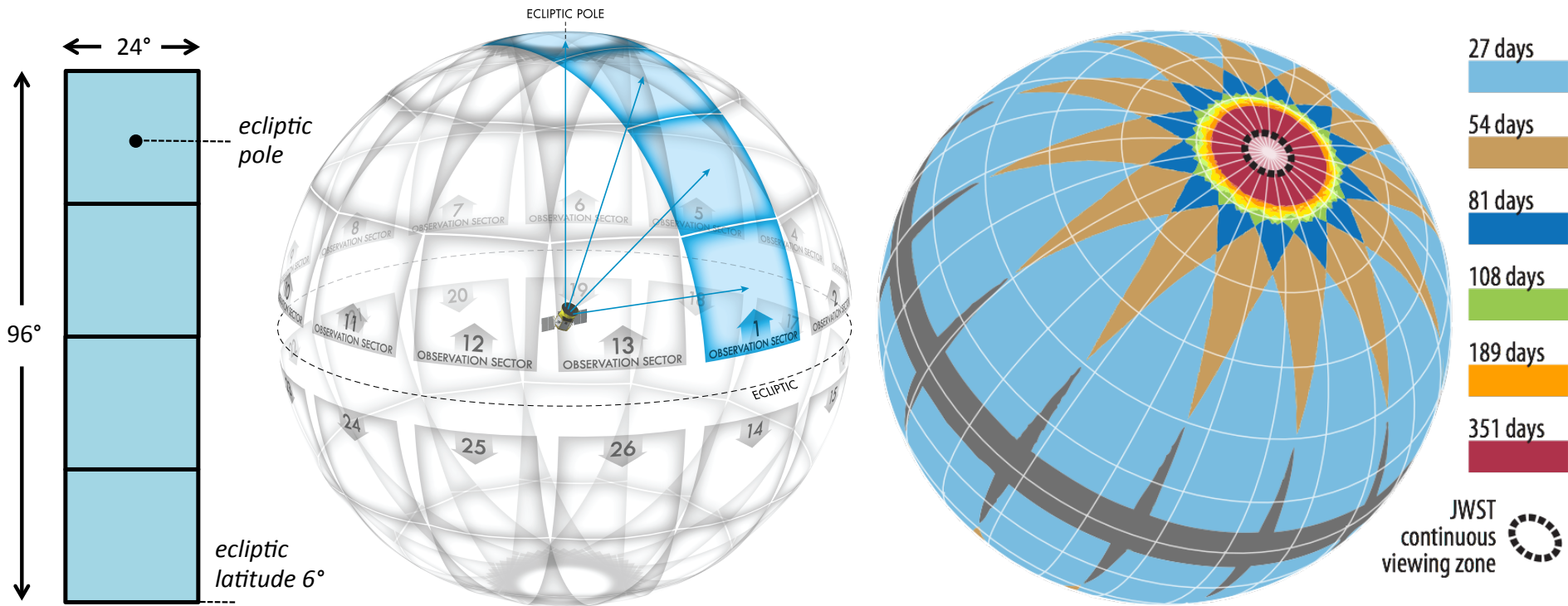
PLAnetary Transits and
Oscillations of stars



TESS Overview

- 2017年8月に打ち上げ予定
 - 太陽系近傍の約500,000個の恒星をターゲットとしたほぼ全天のトランジットサーベイ
 - 直径10cmの4台の超広視野($24^\circ \times 24^\circ$)カメラ
 - 2年間のサーベイ
- 
- The diagram, titled "Exoplanet Missions", illustrates a timeline of astronomical observatories. It features a blue ribbon path curving through space, with various telescopes and missions placed along it. From bottom-left to top-right, the labeled elements include: "Ground-based Observatories" (represented by two white domes), "Hubble" (a space telescope), "Spitzer" (a space telescope), "Kepler" (a space telescope), "TESS" (a space telescope), "JWST" (a large space telescope), and "AFTA" (a small satellite). Below the ribbon path, there are three book covers: "Autonomy and Astrophysics in the New Millennium", "2001 Decadal Survey: New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics", and "2010 Decadal Survey".
- 太陽系近傍の低質量星の生命居住可能領域周辺で、約20個のトランジット地球型惑星を発見する見通し

TESS Field of View and Strategy



- TESSはそれぞれの長方形領域($24^\circ \times 96^\circ$)を27日間観測
- 北半球を1年かけて観測し、その後南半球を1年かけて観測

TESS Timeline

2014: PDR完了、打ち上げロケットがSpaceX Falcon 9に決定

2015: Critical Design Review

2017: 8月に打ち上げ予定

- 約2ヶ月で周回軌道(High Earth Orbit)に到達

- 約1ヶ月の調整

- 最初のサイエンス観測データのダウンリンクは2018年頭頃

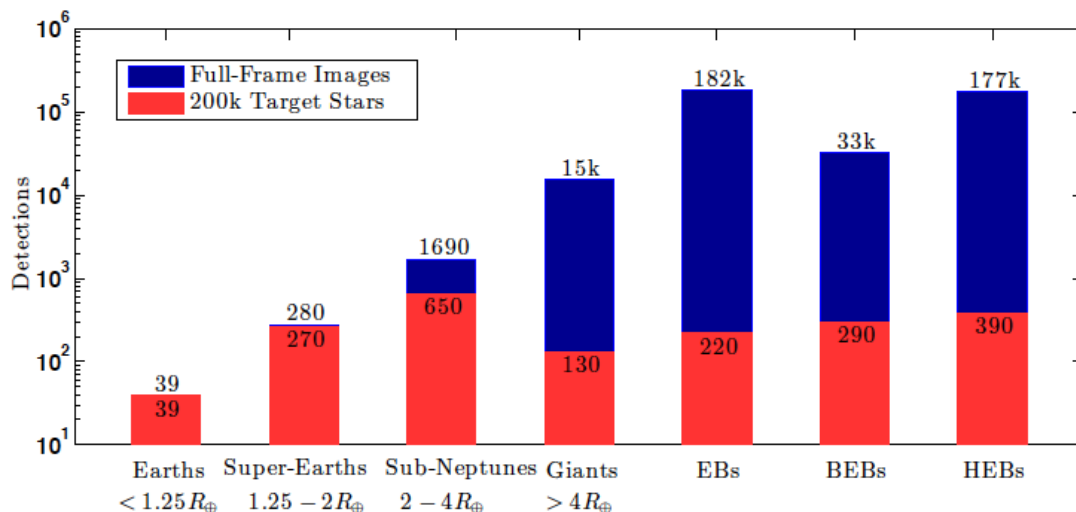
2018: 北半球の観測

2019: 南半球の観測

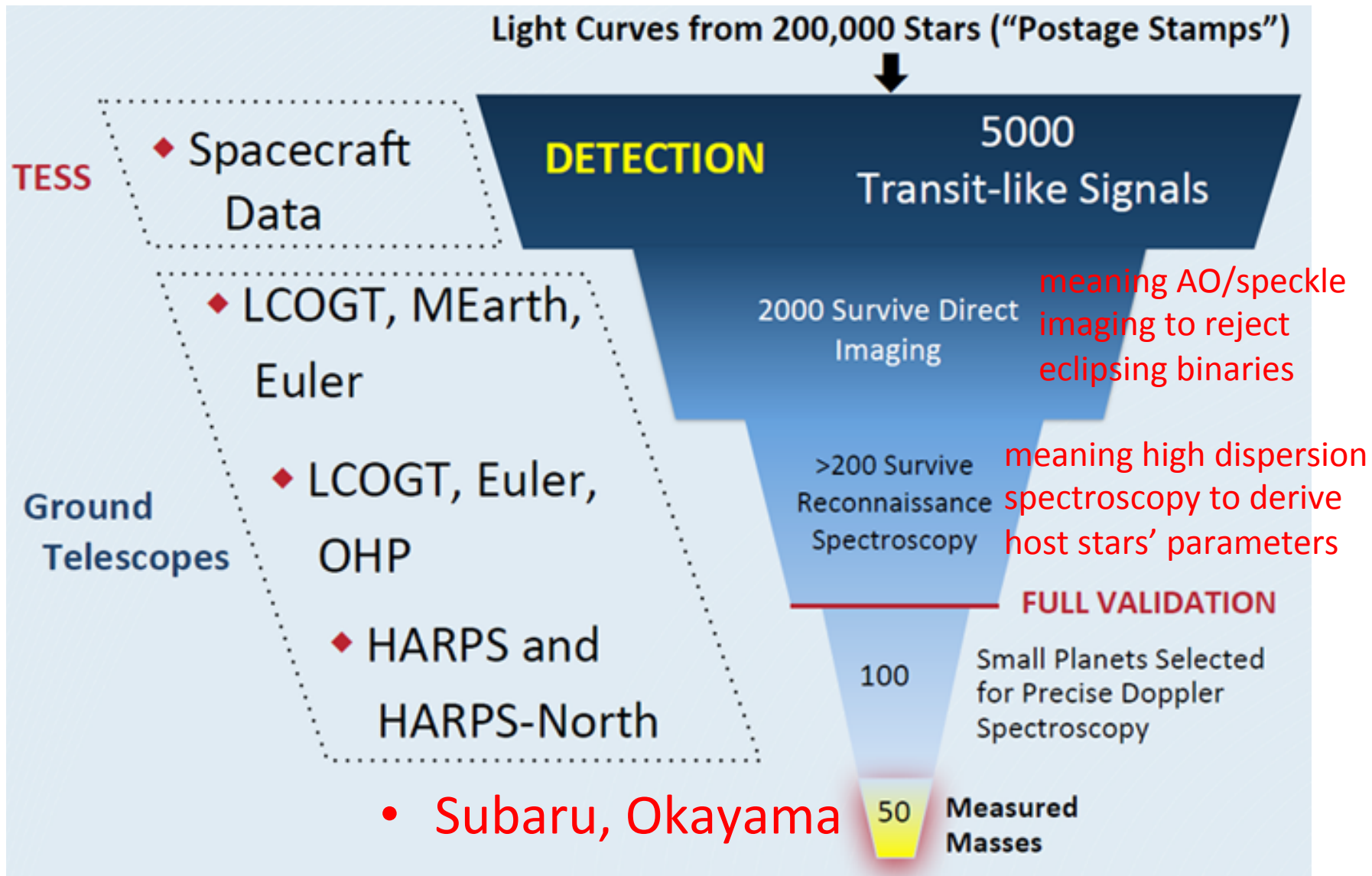
2020-: 予算次第で延長の可能性

TESSの惑星発見数の見積り (Sullivan+2015)

- 2 地球半径以下の”地球型惑星”を約300個
 - そのうち~165個がM型星まわり
 - さらに~100個は $I < 10$ の明るい主星を持つ
 - 約20個は生命居住可能領域の周辺にある
- 2-4地球半径の”スーパーアース/ミニネプチューン”を約650個
 - スーパーアースとミニネプチューンの境界付近
 - 惑星科学の重要なターゲット



惑星発見確認と性質調査の流れ



考えられるPFSと系外惑星サーベイとのシナジー

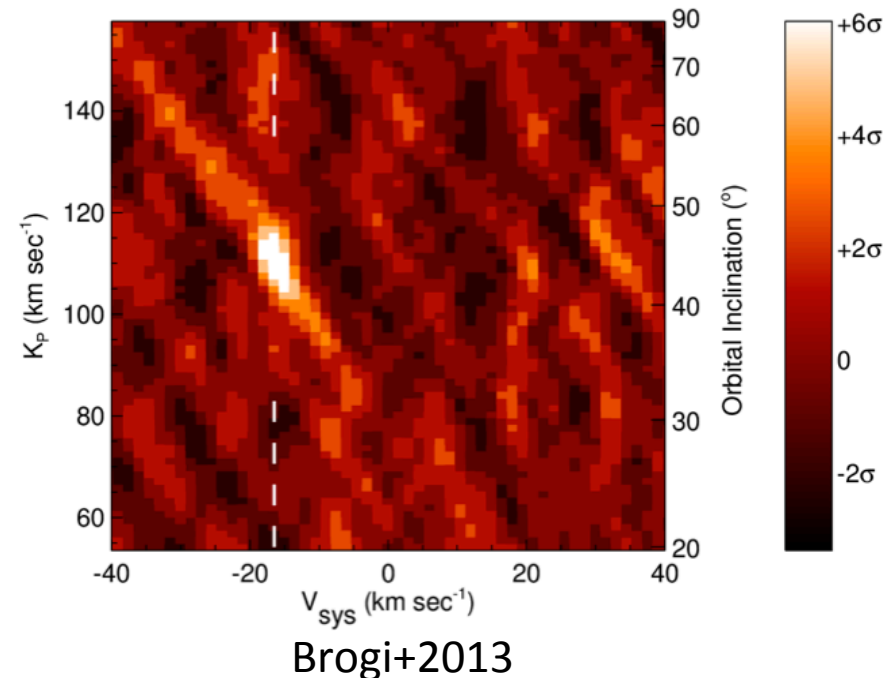
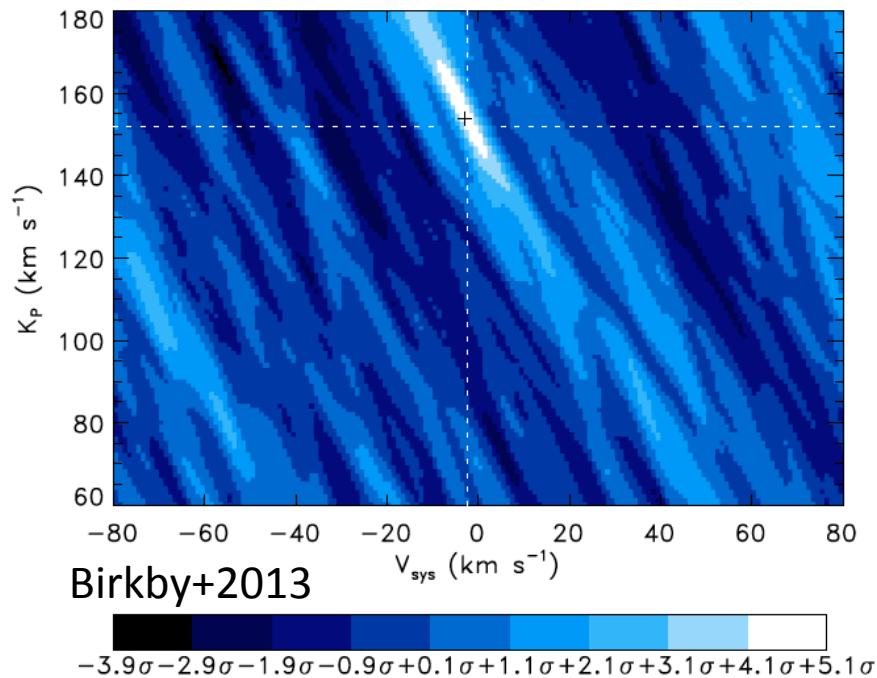
1. PFSサーベイの開始までの系外惑星サーベイで観測された、恒星パラメータの非常によくわかっている星をPFSの一部のファイバーで観測していき、PFSのスペクトルと恒星パラメータを対応づける
2. それをもとに、TESS(2018年以降)、PLATO(2024年以降)で発見された惑星保有星候補の恒星パラメータをPFSで決める
3. 星団や星形成領域、矮小銀河(?)などの恒星パラメータも一網打尽に決められるかもしれない

PFSにあると望ましい追加機能

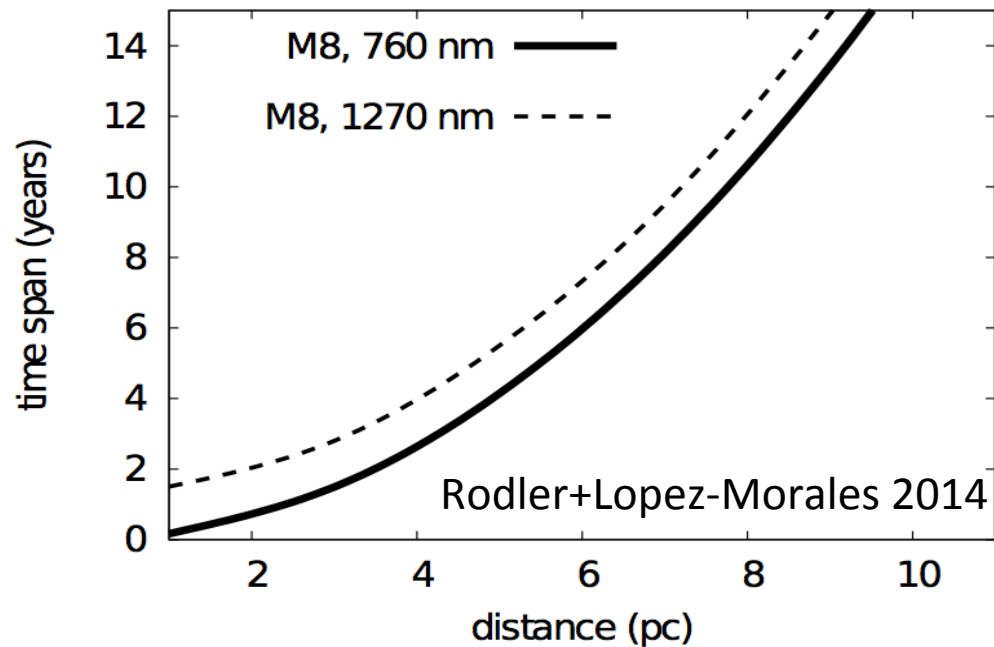
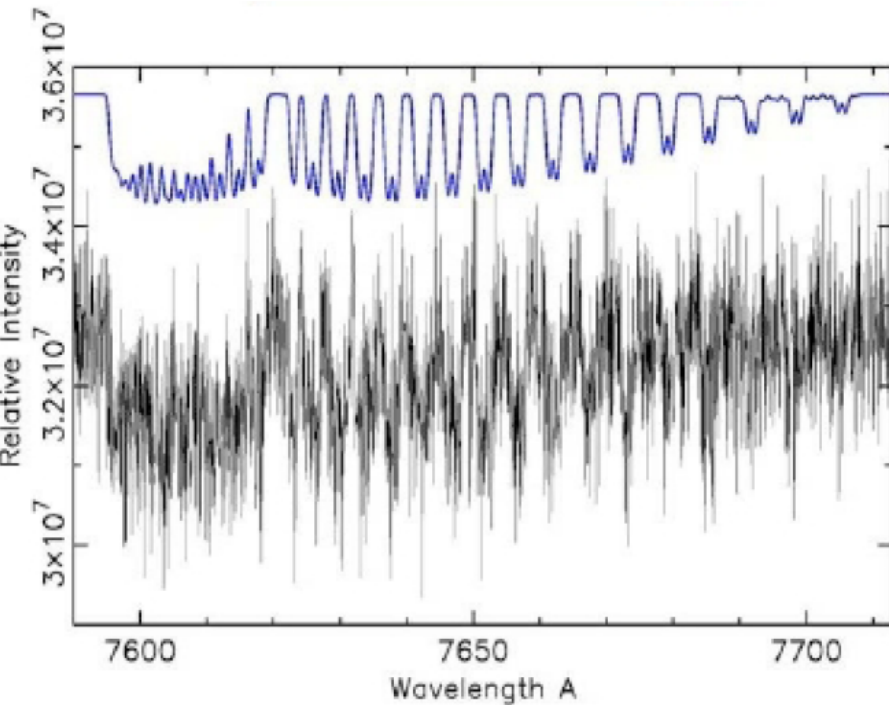
- 現状のスペックでは系外惑星そのもののサイエンスでPFSを使えない
- 可能であれば、少ない本数・限られた波長域でも良いので、非常に高い波長分解能($R > 50000$, 可能なら100000)のファイバーが追加されると、系外惑星分野においても有用な観測装置になる
 - 追加の分光ユニット？
 - 一部のファイバーの光をHDSやIRDに入れられる？

惑星大気分光のサイエンス

- 可視・近赤外高分散分光による惑星大気光の検出
 - トランジット惑星系あるいは短周期惑星系を高い波長分解能で分光することで、惑星の反射光・放射光を直接検出できる(水蒸気、酸素、二酸化炭素、一酸化炭素、メタンなど)

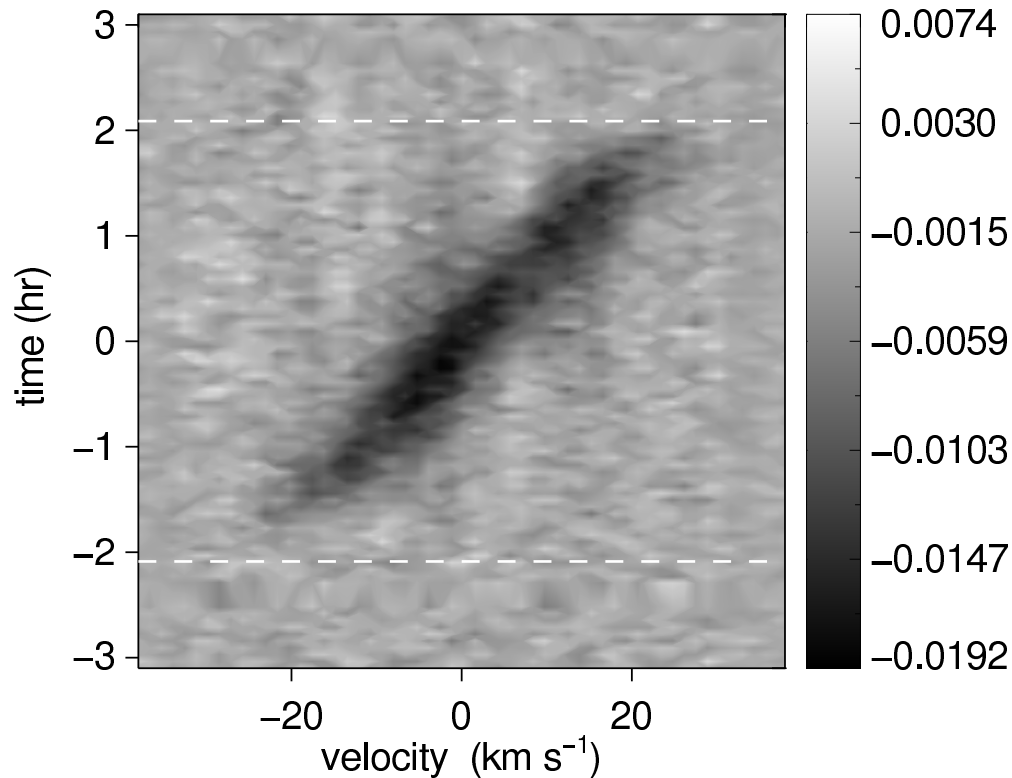


惑星大気分光観測



トランジット惑星の大気の高分散分光観測によって
(時間はかかるが)酸素をはじめとする大気成分の検出が可能

惑星軌道の分光観測



Albrecht et al. (2013)

トランジット惑星のトランジット中の高分散分光観測によって
惑星の影を検出しその軌道の傾き(向き)を測定可能

まとめ

- 現状のスペックのPFSでは系外惑星そのもののサイエンスは難しいが、系外惑星サーベイで得られている豊富な恒星のデータを用いたシナジーが考えられる
- もし高分散分光機能を付加できれば、系外惑星研究においてもさらに魅力的な装置になりうる