

京大3.8m望遠鏡用・可視近赤外線ドッ  
プラー観測装置とサイエンスについて

太陽系外惑星探査プロジェクト室  
小谷隆行

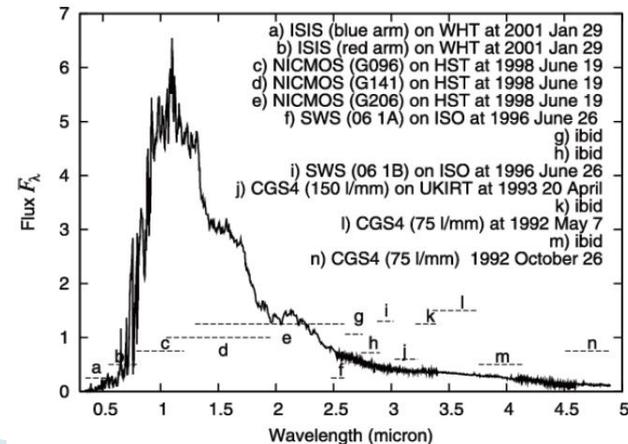
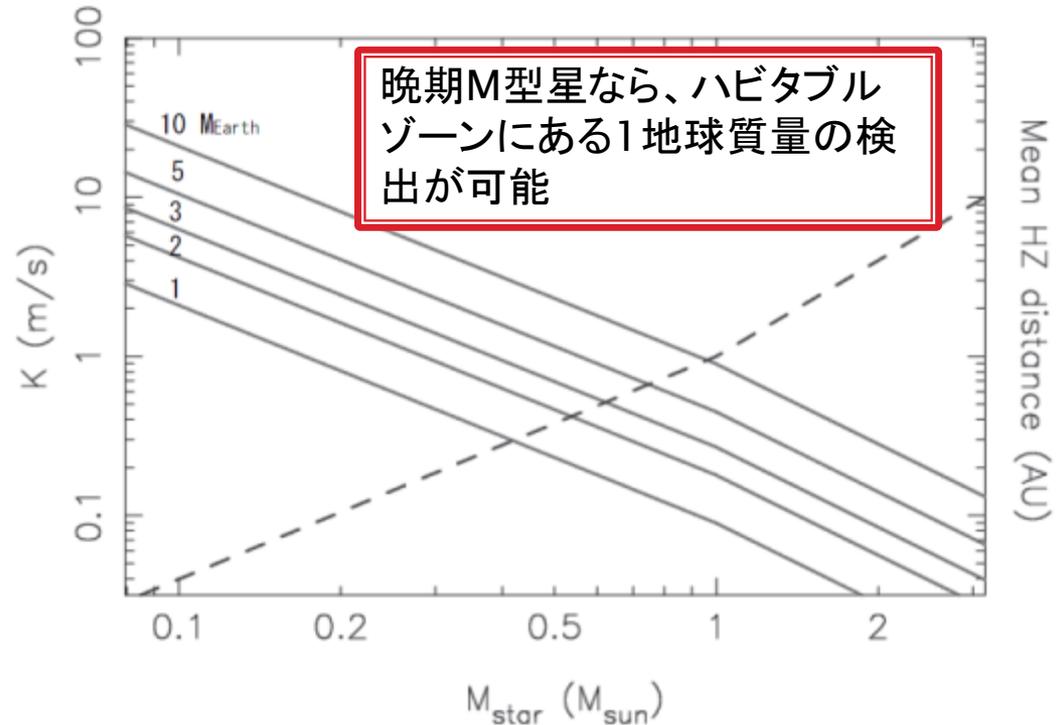
# 概要

- ▶ IRD(Infrared Doppler)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
  - 赤外線ドップラーサーベイによる惑星探査
  - 装置提案
  - 3.8m望遠鏡でのサーベイプラン

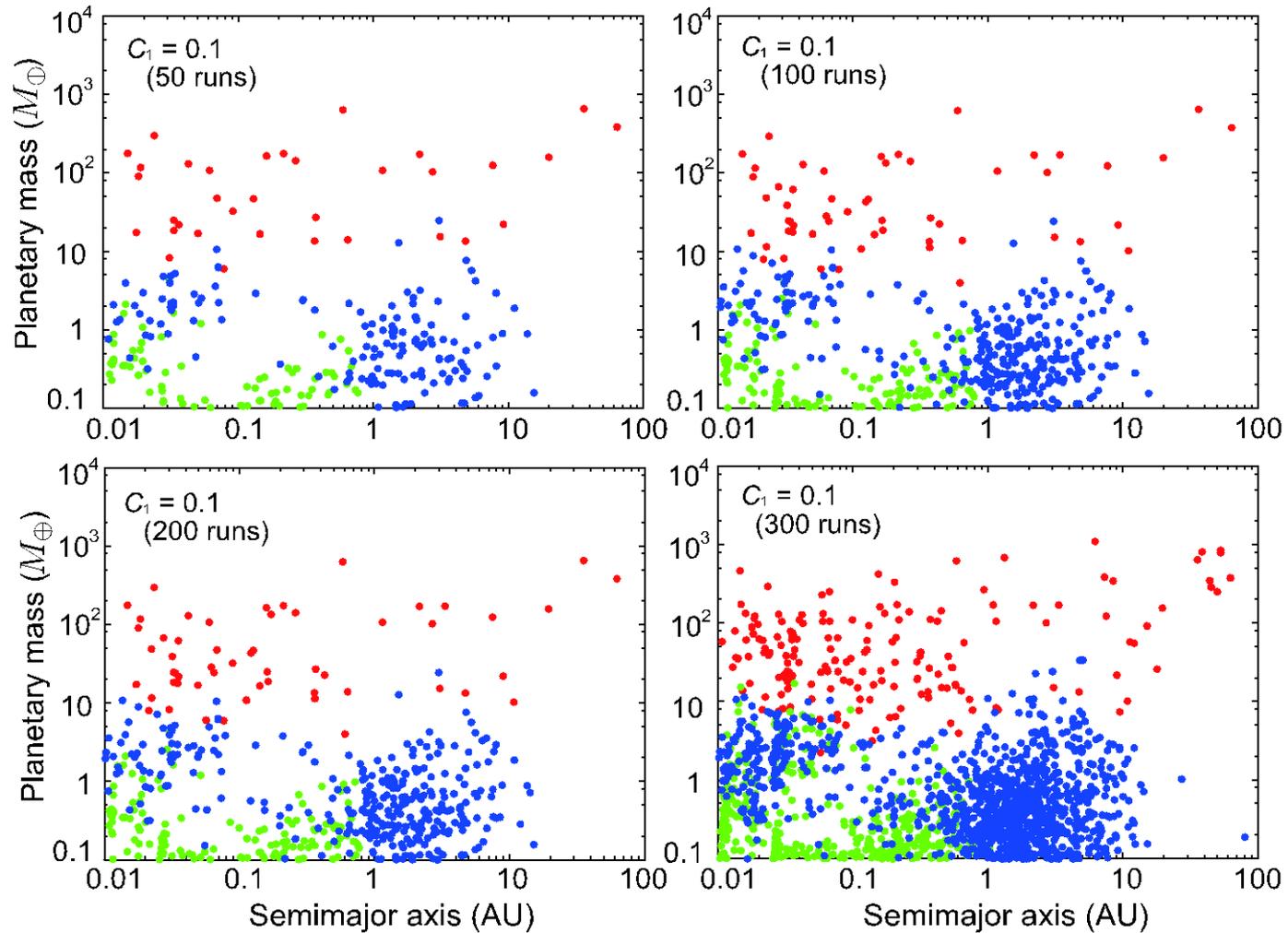
# 赤外ドップラー装置による地球型惑星探査

## M型星のハビタブルゾーンにある1地球質量の惑星の検出を狙う

- ▶ M型星まわりの惑星探査の利点
  - 太陽型恒星(F,G,K)の地球型惑星探査は今より10倍高精度が必要
  - M型星は質量が軽く、低質量惑星による視線速度変動が検出しやすい
  - ハビタブルゾーンにある1地球質量の惑星検出が可能！
- ▶ 中心星が赤外線で見ると、可視で暗い
  - 可視RVでは0.3Msunが限界
  - 赤外RVが効率的
- ▶ 将来の直接撮像につながる (SEIT, Second Earth Imager for TMT)



# シミュレーションとの比較によるM型星まわりの惑星形成の理解



# 赤外ドップラー装置での惑星サーベイ

- ▶ 晩期M型矮星周りの惑星探索の目標
  - ハビタブルゾーンにある地球質量惑星の検出
  - 太陽近傍(15~20pc以内)の星のサーベイ
  - 一通りの惑星系-伴星系の統一的理解
  - 赤外トランジットの観測との連携で惑星の特徴付け
- ▶ IRD(Infrared Doppler)/すばる望遠鏡での視線速度サーベイ
  - 2014年ファーストライト予定
  - 0.97~1.75 $\mu\text{m}$ の波長域と光周波数コムを使って、~1m/sの精度を達成
  - 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)
- ▶ 3.8m望遠鏡用赤外線ドップラーによるサーベイ
  - IRDのHeritageを生かして、安く早く装置を開発
  - サーベイのやり方によっては、地球型惑星の検出も可能

# IRDのスペックまとめ

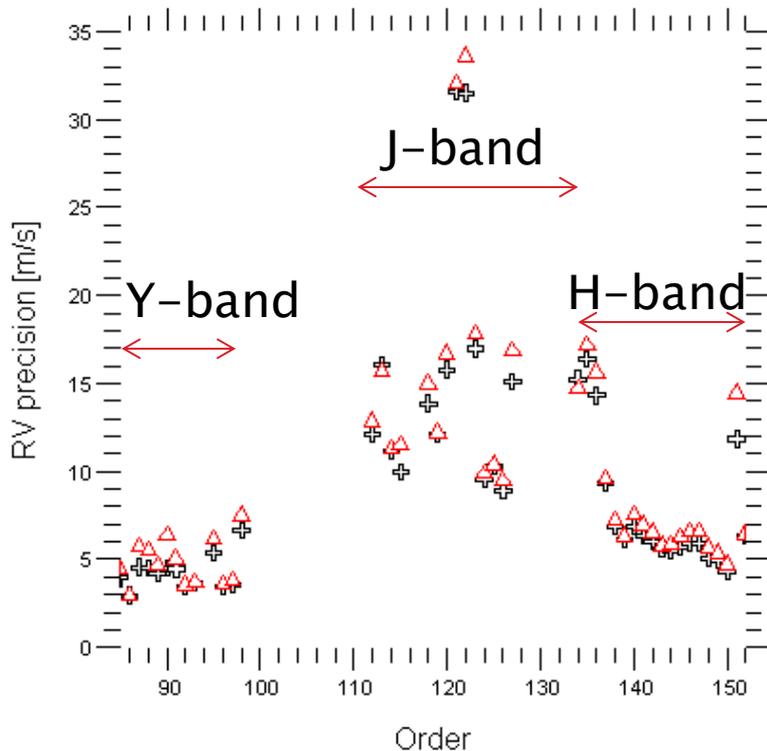
- 波長域: 0.97-1.75  $\mu\text{m}$   
短波長側(0.97-1.1 $\mu\text{m}$ )も重要 (based on simulations using model M star spectra)
- 波長分解能: ~ 70,000 @ 1480nm (3pixel sampling)
- ピクセルスケール: 0.09 arcsec/pixel
- スリット: 0.27 x 3 arcsec
- ファイバー: star + comb
- 分散素子: Echelle (high Blaze angle)  
& VPH-Grating (order sorting)
- 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

# 3.8m望遠鏡用赤外線ドップラー装置の提案

IRDのHeritageを生かして、高精度な分光器を安く早く作る

# 3.8m望遠鏡赤外線ドップラー装置の提案

## IRDのHeritageを生かして、高精度な分光器を安く早く作る



IRDで達成できる視線速度精度 (各オーダー毎にプロット)、 $10^4$  photon/pixelの場合

3.8m望遠鏡で達成できる視線速度精度

Y,J,Hをフルに使う場合

H = 8 magの場合 10min積分で1m/s

Y-bandのみの場合

H = 8 magの場合 30min積分で1m/s

### ▶ 波長範囲

- CCDで運用できるY-band(0.97-1.1  $\mu\text{m}$ )、Y-bandだけでもかなりの精度が出る
- 近赤外(0.97-1.75  $\mu\text{m}$ ,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用試作グレーティング(本番用の1/4サイズ、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 (Tr-Ar, Ur-Neなど)
- Laser Frequency Comb

### ▶ ファイバー入射

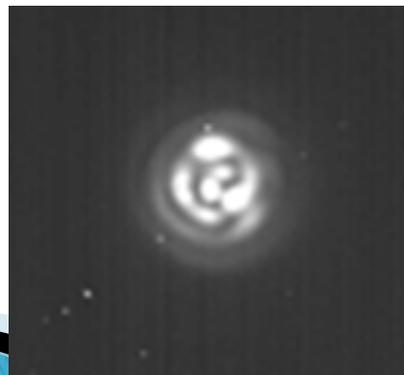
- シングルモードファイバー(モーダルノイズなし、ただし良いAOが必要)
- マルチモードファイバー(モーダルノイズあり、入射が容易)

### ▶ 波長分解能

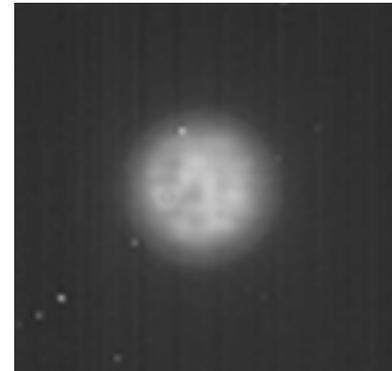
- シングルモードファイバーなら容易に $10^5$ が可能

## 3.8m望遠鏡用シングルモードファイバー高分散分光器の提案

- ▶ 近赤外線ドップラー観測の測定精度の限界
  - 装置の熱安定性、波長校正、光子ノイズ、etc...
  - **ファイバーのモーダルノイズ**
    - マルチモードファイバーを伝搬する電場のモードが変化することで、偽の視線速度変動が発生
    - モードスクランブラー(ファイバーを揺らすなど)を使うことで低減できるが、完全にはなくなる
    - 可視だとモードの数が多いのでスクランブルされやすい



スクランブル



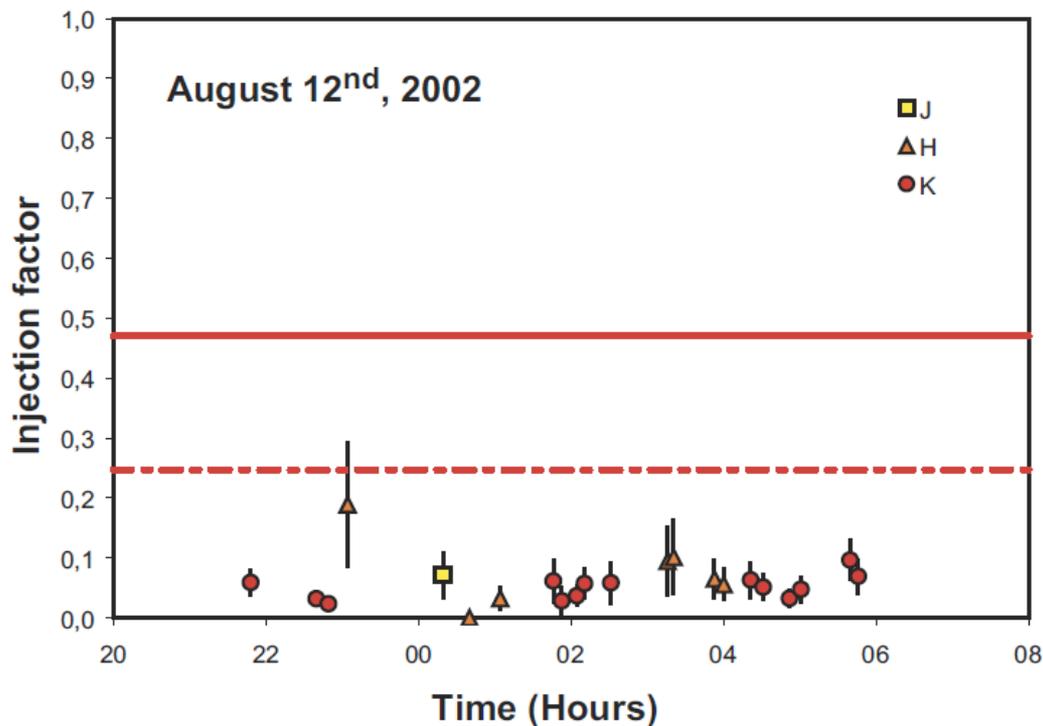
# シングルモードファイバー高分散分光器の提案

- ▶ マルチモードファイバーからシングルモードファイバーへ
- ▶ マルチモードファイバー
  - コア直径が50-100um
  - 波長に比べてコア直径が大きいので、内部を伝搬するモードが多数
  - コア径が大きいいため、高波長分解能のためには大面積のグレーティングが必要、光学系が巨大に
  - 伝搬途中でのロスが無視できない(~80-90%/100m)
- ▶ シングルモードファイバー
  - コア直径 5-10um
  - 内部を伝搬するモードは一つだけ(>カットオフ波長)、**モーダルノイズフリー**
  - **非常に高い伝搬効率(>99%/km)**
  - **コア径が小さいため、小さなグレーティングで高波長分解能達成が可能、光学系が極めてシンプル・コンパクトに**

ただし、シングルモードファイバー  
への光の入射が難しい

# シングルモードファイバーへの高効率入射にはAOが必要

- ▶ シングルモードファイバーは、「空間フィルター」
- ▶ 乱れた波面を入れても、完全にフラットな波面が出てくる
  - 乱れた波面成分は伝搬できずに失われる
- ▶ 現世代のAOを使って入射させても、入射効率は10%以下
- ▶ 高い入射効率のためには、**極限補償光学が必要**



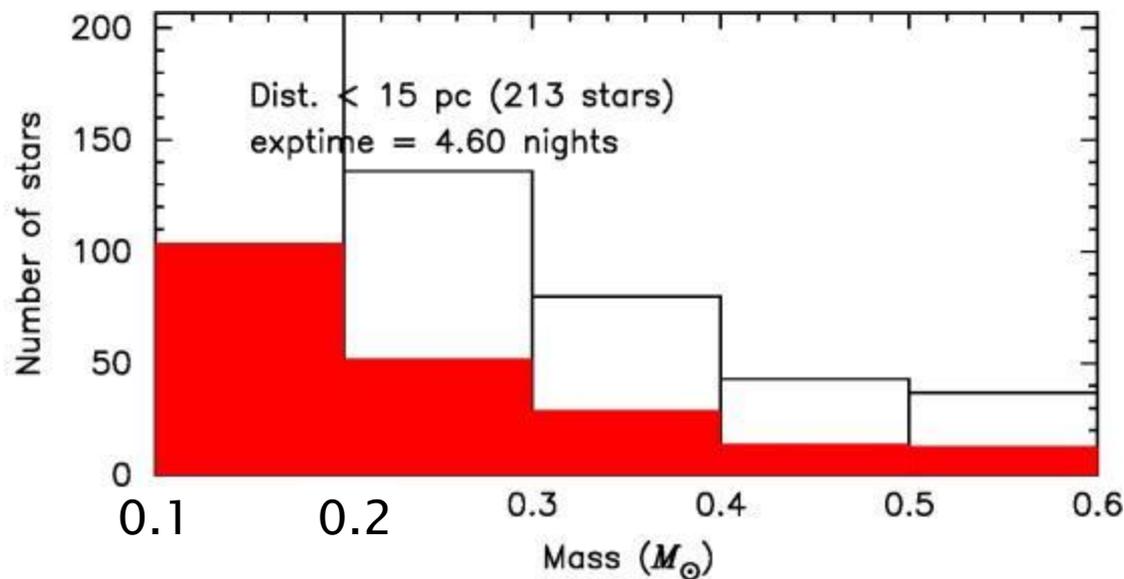
CFHT/AOでのシングルファイバー入射テスト

3.8m望遠鏡用極限補償光学を使えば、入射効率90%も可能

# 3.8m望遠鏡でのサイエンス

# IRDサーベイのサンプル星

- ▶ 表面活動度が低い近傍の星: 200~500個
  - An All-sky catalog of Bright M Dwarfs (Lepine+2011)
  - A Spectroscopic Catalog of the Brightest ( $J < 9$ ) M Dwarfs in the Northern Sky (Lepine+2012)



# IRDでの観測方針(仮)

1.  $M < 0.2 M_{\text{sun}}$  &  $J < 9$ の星(25星)は毎日観測
  1. ハビタブル地球型惑星の調査
2. サンプルセレクション
  1. 活動性が低く連星系ではない星を見つける
3. メインサーベイ
  1. 変動が小さい天体と惑星候補を中心に
  2. 雪線付近の惑星に感度を持った均一な観測
4. 候補天体のフォローアップ
  1. RV/transit候補天体の軌道決定

# 軌道決定に必要な観測数

- ▶ 0.2AUの巨大惑星：30~40回
  - $P=50\sim 100$ 日,  $M_p=100 M_{\text{earth}}$
- ▶ 雪線のスーパーアース：約80~100回
  - $P=14\sim 80$ 日,  $M_p=5 M_e$
- ▶ ハビタブルゾーンの地球質量惑星：約600回
  - $P=5$ 日,  $M_p=1 M_e$

# 3.8m望遠鏡でのサイエンス

- ▶ 高頻度観測ができることが最大の利点
- ▶ IRD候補天体のフォローアップ
  - サンプル: 数十?個 ( $J < 10$ )
  - 精度5m/s以下が必要
  - IRDで視線速度変動が検出されたら、3.8m望遠鏡で詳しく探査
  - 視線速度変動が恒星の活動由来なのか確認
- ▶ もっとドラスティックに「超高頻度観測」を行い、明るい星のまわりのハビタブル惑星検出を率先して狙う
- ▶ 大量の観測時間を使い、低質量星の惑星系の統計理解を目指す

# まとめ

- ▶ 岡山3.8m望遠鏡＋赤外線ドップラーによるサイエンス
  - IRDで検出された視線速度変動のフォローアップ観測
  - M型星まわりの地球型惑星の検出
  - M型星まわりの惑星形成理論の検証
- ▶ IRDのHeritageを生かして、極限補償光学＋シングルモードファイバー入射型の分光器にすれば、高精度な赤外線ドップラー装置を「安く早く」実現できる

終