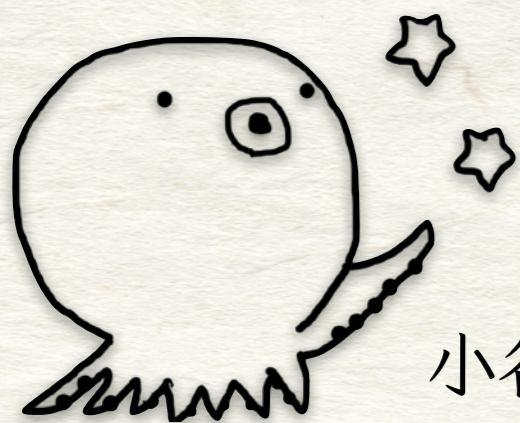




すばる望遠鏡の

新近赤外高分散分光装置IRDによる

中期M型矮星のスペクトルの解釈



石川 裕之 (総研大)

Hiroyuki Tako ISHIKAWA (SOKENDAI)

小谷隆行, 大宮正士 (ABC), 青木和光, 白田知史, 林左絵子 (NAOJ)

# M dwarfs

## M型矮星

SpTy Dwarf	$T$ (K)	$R$ ( $R_{\text{sun}}$ )	Mass ( $M_{\text{sun}}$ )	$L/100$ ( $L_{\text{sun}}$ )
M0	3800	0.62	0.60	7.2
M1	3600	0.49	0.49	3.5
M2	3400	0.44	0.44	2.3
M3	3250	0.39	0.36	1.5
M4	3100	0.26 <sup>a</sup>	0.20	0.55
M5	2800	0.20	0.14	0.22
M6	2600	0.15	0.10	0.09
M7	2500	0.12	~0.09	0.05
M8	2400	0.11	~0.08	0.03
M9	2300	0.08	~0.075	0.015

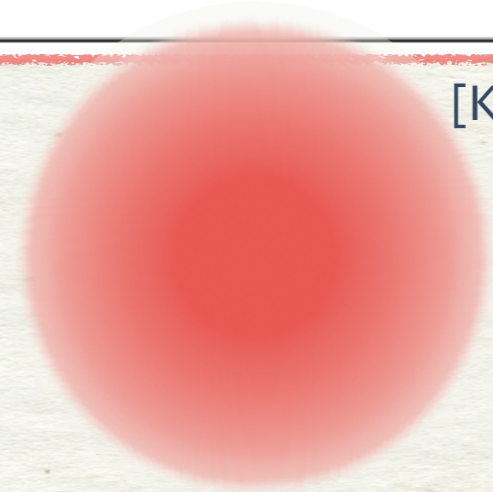
[Kaltenegger et al. 2009]

$$T_{\text{eff}} = 5800 \text{ K}$$

$$M = 1 M_{\odot}$$

$$R = 1 R_{\odot}$$

$$L = 1 L_{\odot}$$



地球

太陽近傍の恒星の > 70 %

[Covey et al., 2008; Bochanski et al. 2010]

# M型矮星まわりの惑星探査

1. 惑星の間接検出 (RV法 / Transit法) に有利

2. ハビタブル惑星の検出や追観測に有利

3. 近傍にサンプル数が多いので有利

近年多くの惑星サーベイ

## トランジット法

MEarth(Irwin et al. 2015)  
TRAPPIST(Gillon et al. 2013)  
APACHE(Sozzetti et al. 2013)  
TESS(Ricker et al. 2016) ... etc.

## RV(ドップラー)法

CARMENES(Quirrenbach et al. 2014)  
IRD(Kotani et al. 2014)  
HPF(Mahadevan et al. 2012)  
SPIRou(Artigau et al. 2014) ... etc.

# 惑星の形成環境としての M型矮星の化学組成

惑星が見つければ、

その惑星の**現在の環境**あるいは**形成・進化過程**を知るために

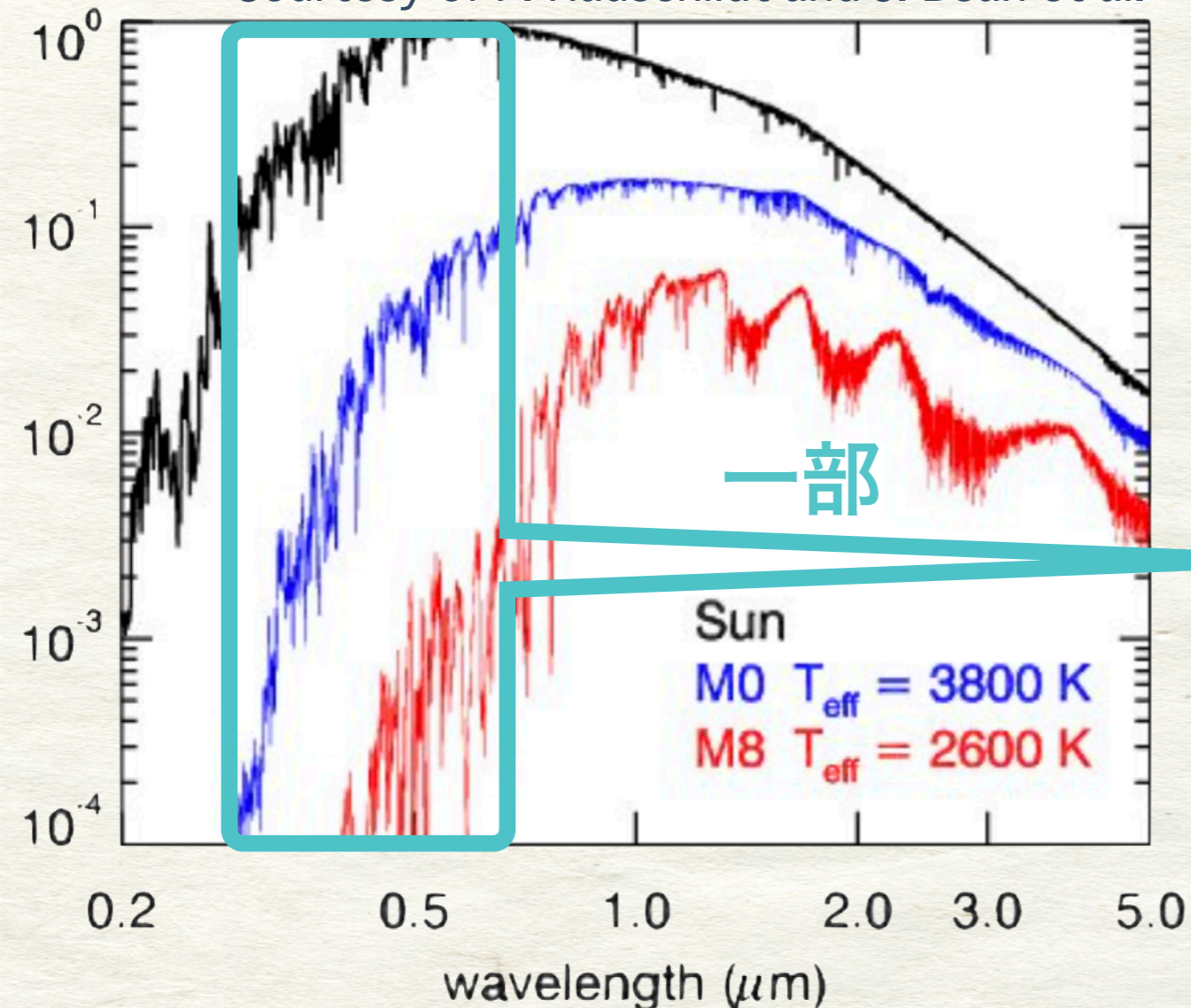
中心星のパラメータを知ることは重要

- その中でも **恒星大気**の**化学組成** は、  
惑星の**形成環境**における化学組成を反映し  
**内部構造**にも制限をつける。(e.g. Fe, Si, Mg, C, O ... etc.)

[e.g. Unterborn & Panero, 2017; Dorn et al. 2017]

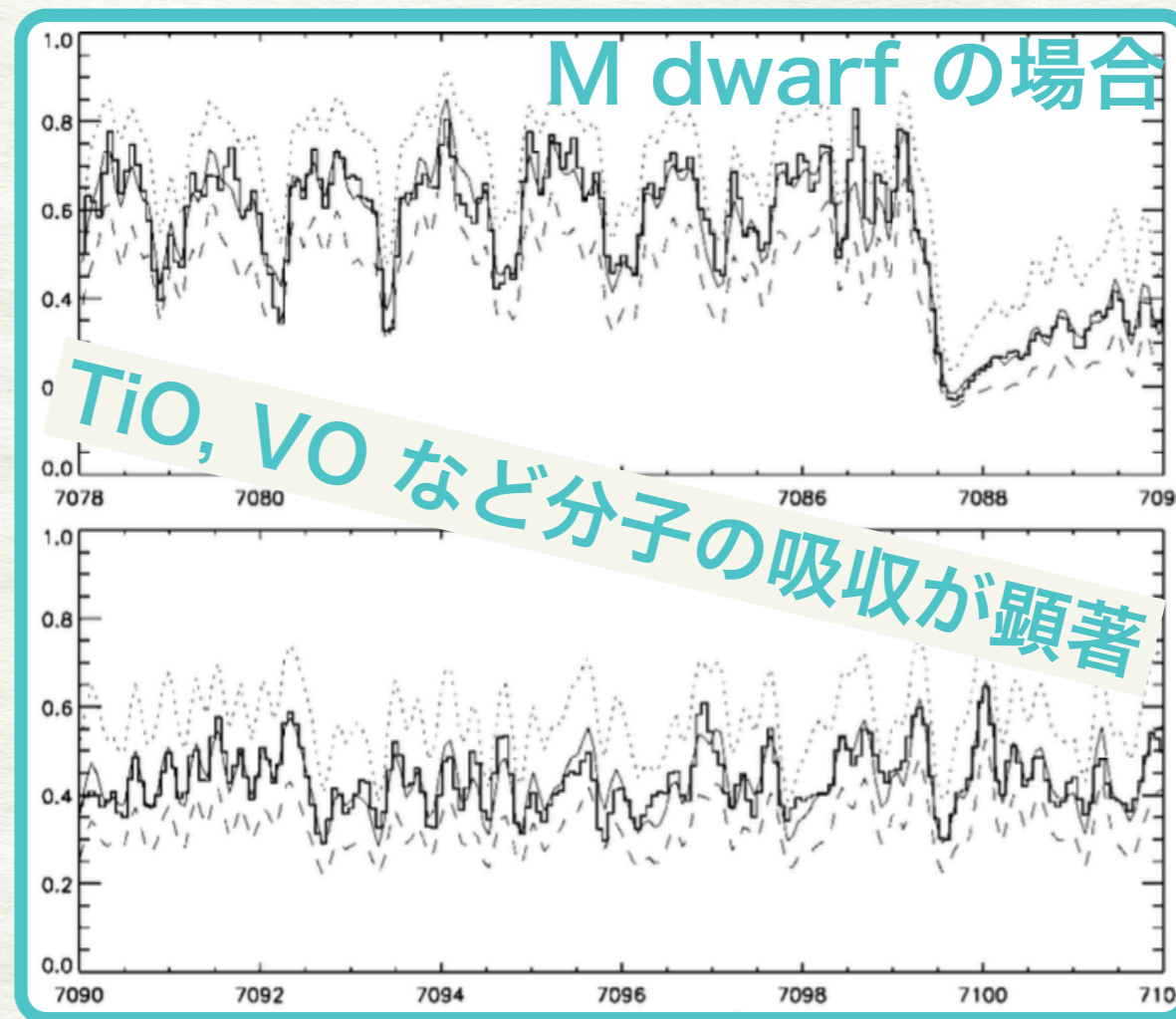
# M型矮星の高分散スペクトルの難点

Courtesy of P. Hauschildt and J. Bean et al.



F,G,K型星で標準的な方法：

可視高分散スペクトルのモデル比較



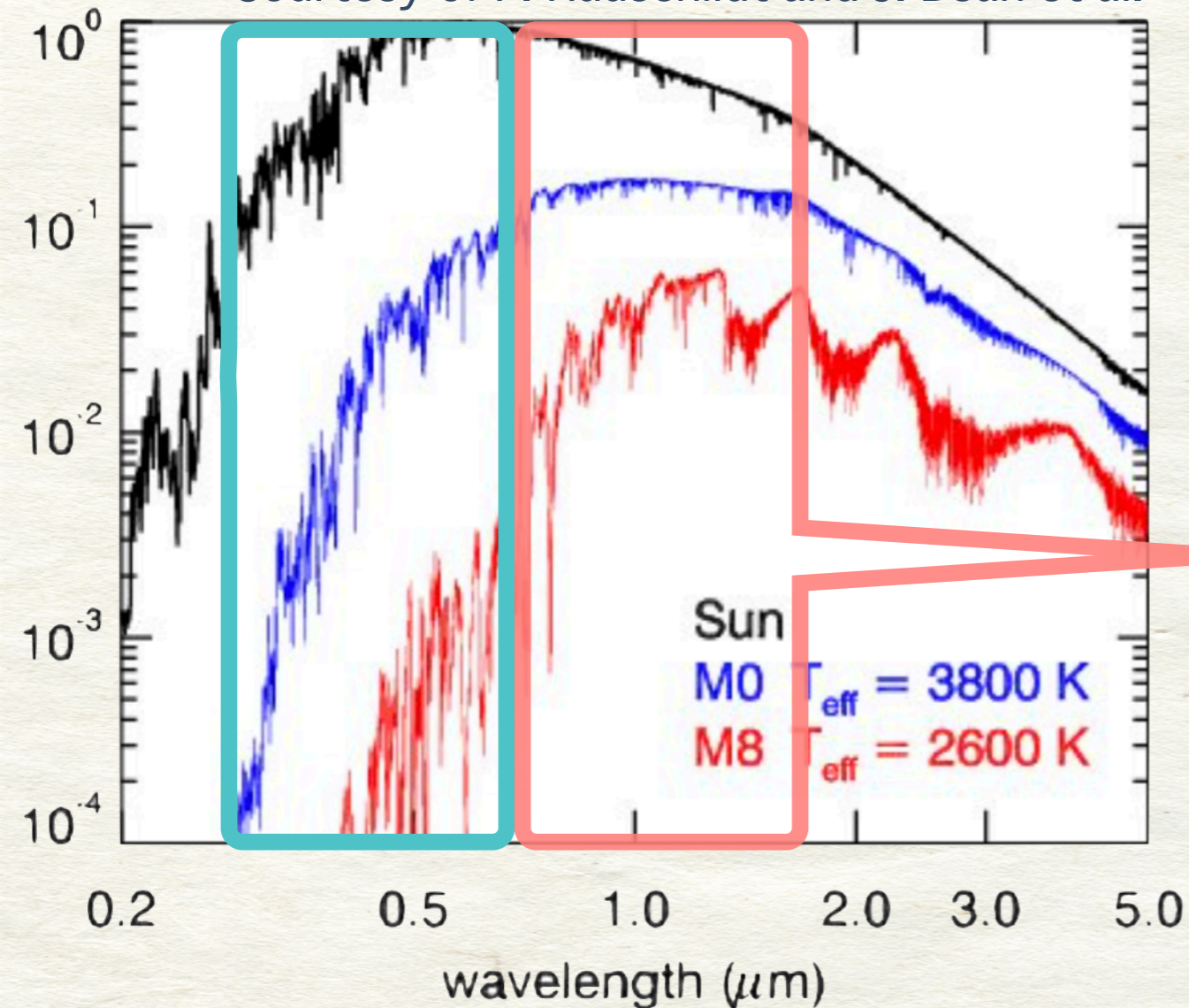
[Bean et al. 2006]

**暗い**・TiOなど**分子吸収線**が多く可視スペクトルが複雑

(これまで金属量の決め方としては一般的に経験式が用いられてきた)

# 近赤外高分散分光を用いた組成解析

Courtesy of P. Hauschildt and J. Bean et al.

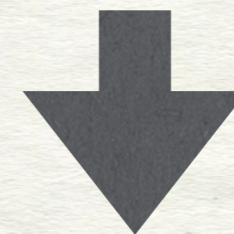


近赤外高分散分光装置の発展



M型矮星は

近赤外波長域の方が**明るく**、**分子吸収**も比較的少ない



近赤外高分散スペクトルの  
モデル比較が有望

近赤外高分散スペクトルを用いた研究	適用天体	波長帯域, 分解能	決めたパラメータ
Önehag+12 (CRIRES)	M0-M4.5 11個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H]
Lindgren+16,17 (CRIRES)	M0-M4.5 28個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H] FeH線 $\rightarrow T_{\text{eff}}$
Souto+17 (APOGEE)	M1 2個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	<b>13種の組成</b> OH $\rightarrow \xi_t$ (H <sub>2</sub> OとOH $\rightarrow T_{\text{eff}}$ )
Rajpurohit+17 (APOGEE)	M0-M <b>8</b> 45個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	[Fe/H], $T_{\text{eff}}$ , log g (全部fitting) (K,Ca,Al,Mg $\rightarrow$ log g)
Veyette+17 (NIRSPEC)	M0-M5 29個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ Y$ $R \sim 25,000$	[Fe/H] [ <b>Ti</b> /H] $T_{\text{eff}}$
Passegger+18 (CARMENES etc.)	M0-M4 <b>300個</b>	$\Delta \lambda \sim 11,000 @ Y, J, H$ $R \sim 90,000$	[Fe/H] $T_{\text{eff}}$

近赤外高分散スペクトルを用いた研究	適用天体	波長帯域, 分解能	決めたパラメータ
Önehag+12 (CRIRES)	M0-M4.5 11個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H]
Lindgren+16,17 (CRIRES)	M0-M4.5 28個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H] FeH線 $\rightarrow T_{\text{eff}}$
Souto+17 (APOGEE)	M1 2個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	<b>13種の組成</b> OH $\rightarrow \xi_t$ (H <sub>2</sub> OとOH $\rightarrow T_{\text{eff}}$ )
Rajpurohit+17 (APOGEE)	M0-M <b>8</b> 45個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	[Fe/H], $T_{\text{eff}}$ , log g (全部fitting) (K,Ca,Al,Mg $\rightarrow$ log g)
Veyette+17 (NIRSPEC)	M0-M5 29個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ Y$ $R \sim 25,000$	[Fe/H] [ <b>Ti</b> /H] $T_{\text{eff}}$
Passegger+18 (CARMENES etc.)	M0-M4 <b>300個</b>	$\Delta \lambda \sim 11,000 @ Y, J, H$ $R \sim 90,000$	[Fe/H] $T_{\text{eff}}$

**動機**

個々の元素の組成を十分な精度で決め、他の恒星パラメータも決めるため、より**広い波長帯域**で**多様な元素**の**個々の吸収線**を多く調べたい



# IRD

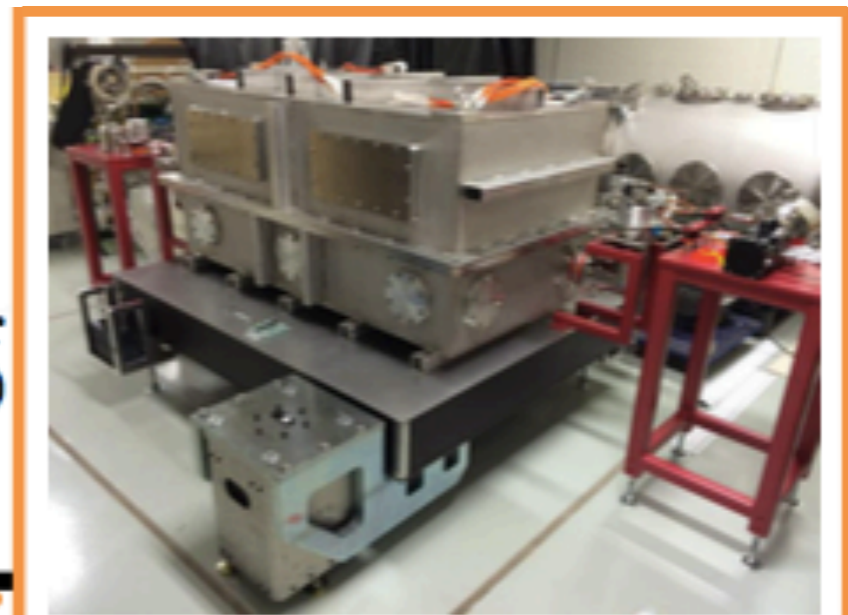
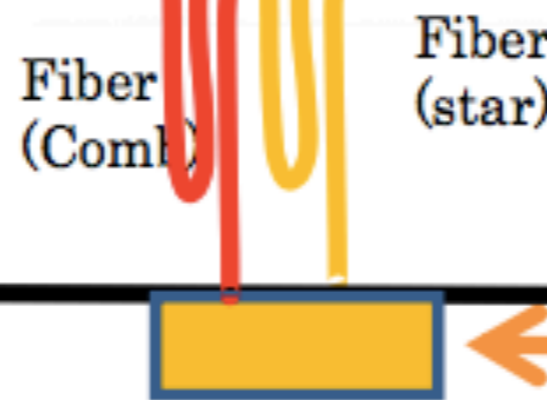
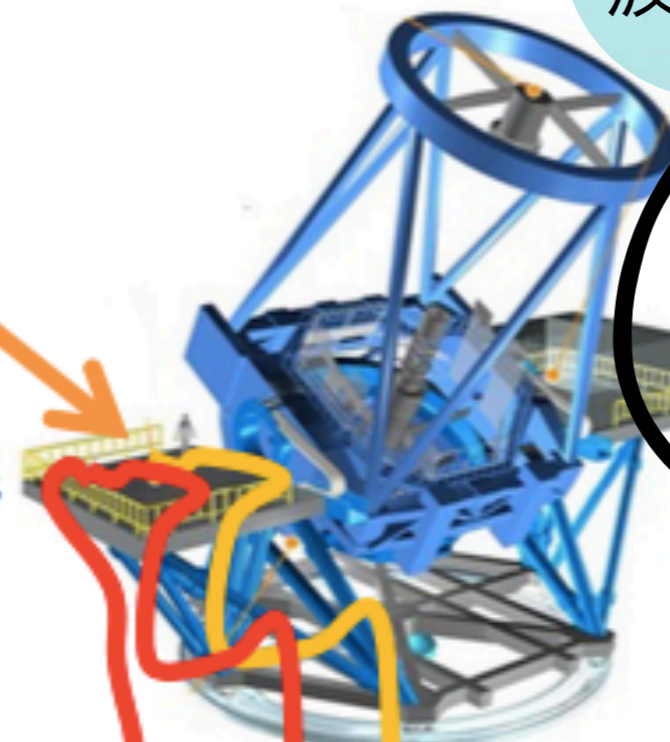
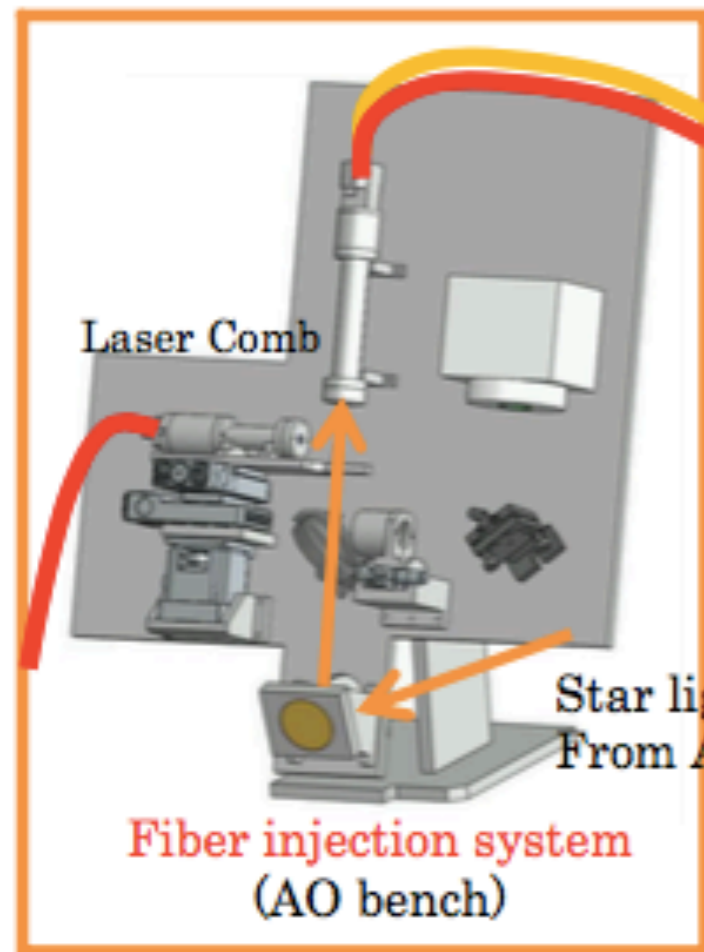
InfraRed Doppler instrument for the Subaru telescope

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 70,000$$

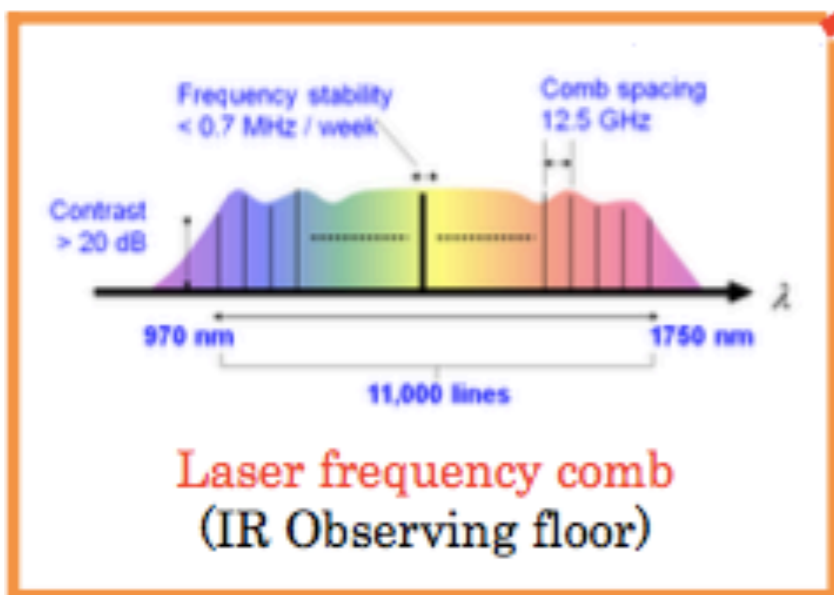
波長帯域  $0.97\text{-}1.75\ \mu\text{m}$ :  $\lambda/1.7$

**CRIRES** (VLT,  $R \sim 100,000$ ,  
波長帯域  $\lambda/70$ )

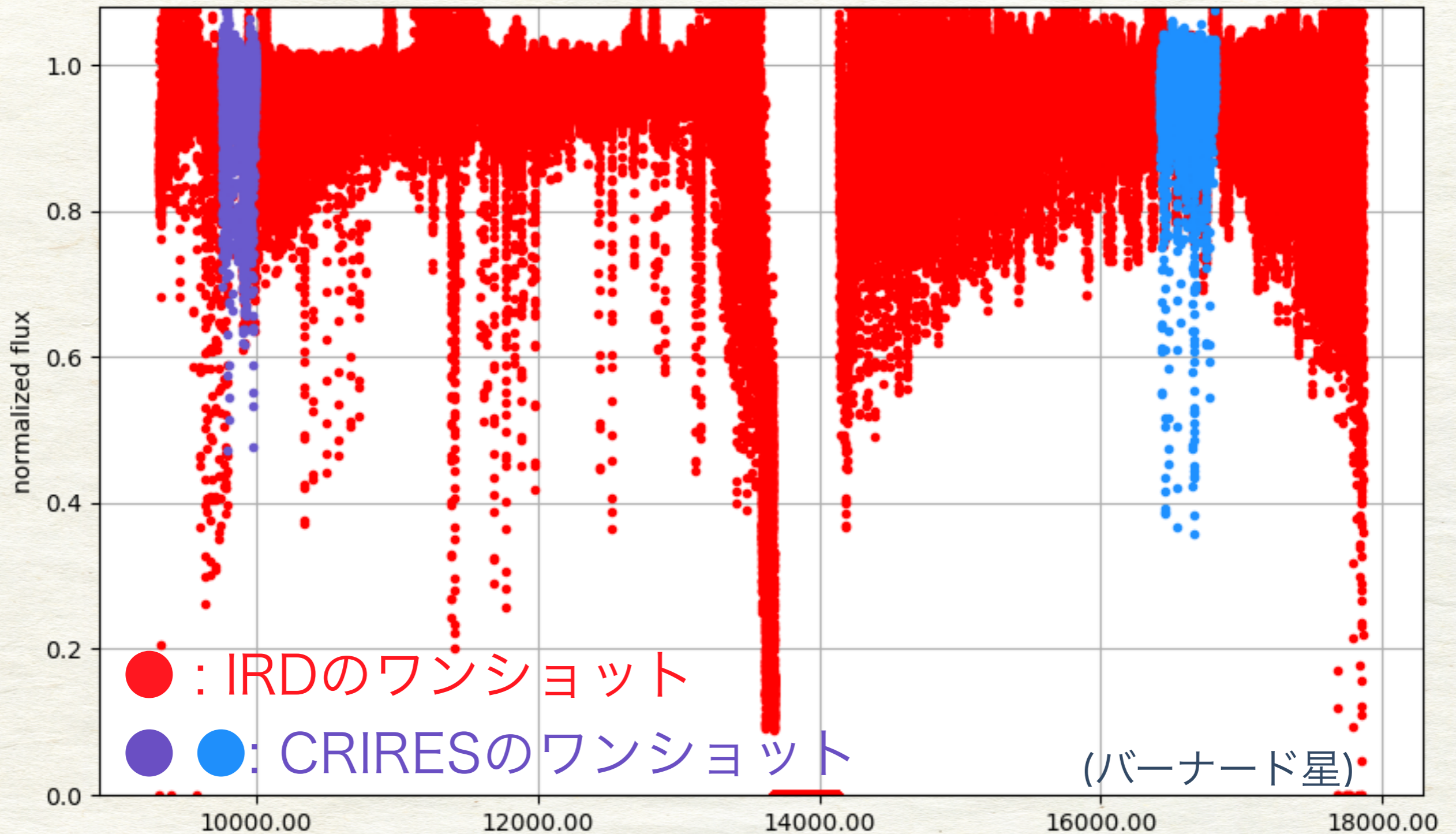
**Phoenix** (Gemini-S,  $R \sim 80,000$ ,  
波長帯域  $\lambda/200$ )



Spectrometer system (Coudé room)



# 波長帯域の比較



IRDの波長帯域は、他の8m級望遠鏡の  
近赤外高分散分光器に比べて、かなり広い！！

近赤外高分散スペクトルを用いた研究	適用天体	波長帯域, 分解能	決めたパラメータ
Önehag+12 (CRIRES)	M0-M4.5 11個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H]
Lindgren+16,17 (CRIRES)	M0-M4.5 28個	$\Delta \lambda \sim 500 @ J$ $R \sim 50,000$	[Fe/H] FeH線 $\rightarrow T_{\text{eff}}$
Souto+17 (APOGEE)	M1 2個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	<b>13種の組成</b> OH $\rightarrow \xi_t$ (H <sub>2</sub> OとOH $\rightarrow T_{\text{eff}}$ )
Rajpurohit+17 (APOGEE)	M0-M <b>8</b> 45個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ H$ $R \sim 20,000$	[Fe/H], $T_{\text{eff}}$ , log g (全部fitting) (K,Ca,Al,Mg $\rightarrow$ log g)
Veyette+17 (NIRSPEC)	M0-M5 29個	$\Delta \lambda \sim 2,000 @ Y$ $R \sim 25,000$	[Fe/H] [ <b>Ti</b> /H] $T_{\text{eff}}$
Passegger+18 (CARMENES etc.)	M0-M4 <b>300個</b>	$\Delta \lambda \sim 11,000 @ Y, J, H$ $R \sim 90,000$	[Fe/H] $T_{\text{eff}}$
本研究 ( <b>IRD</b> )	M4 ~ 2個 ~	$\Delta \lambda \sim 7,000 @ Y, J, H$ $R \sim 70,000$	<b>11種の組成</b> ~

データの取得と

吸収線の同定および等価幅解析

---

# データの取得

IRDエンジニアリングラン in 2017年 8月, 9月

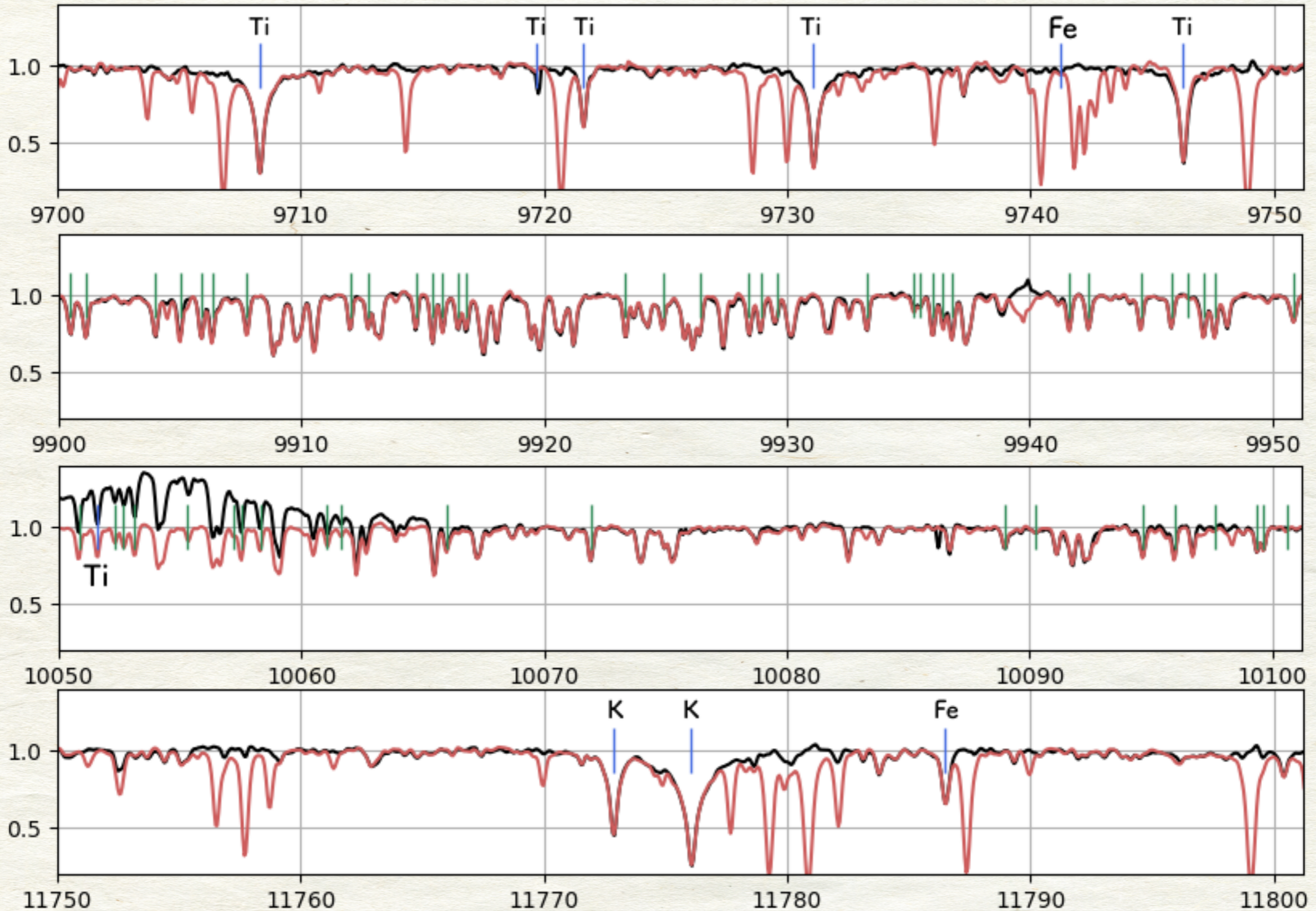
S/N比 > 100

バーナード星 (GJ 699)	固有運動で有名なM4V型星 (運動速度・自転周期・金属量 から、古い種族という予想)	80秒 x 3回 (CRIRES @ ESO-VLTの スペクトルも比較に利用)
LHS 1140	ハビタブルゾーンにスーパーア ースが報告されたM4V型星 (古い種族の可能性が示唆)	1500秒 x 1回
HR 7596	バーナード星 の 大気補正用の 高速自転星	80秒 x 3回
HR 8634	LHS 1140 の 大気補正用の 高速自転星	20秒 x 2回

主に PyRAF のタスクを利用してリダクション

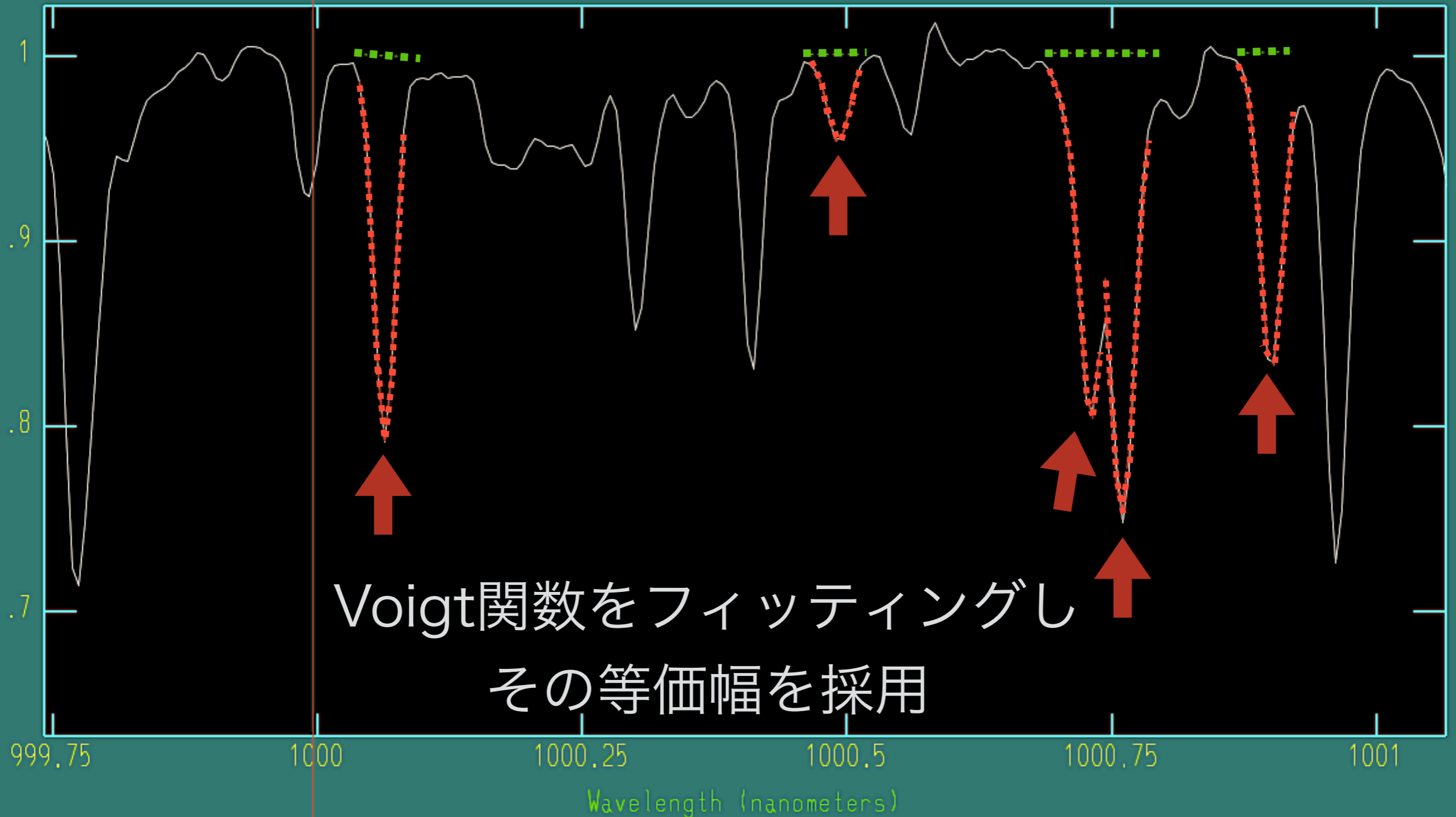
# 吸収線の同定

(バーナード星)

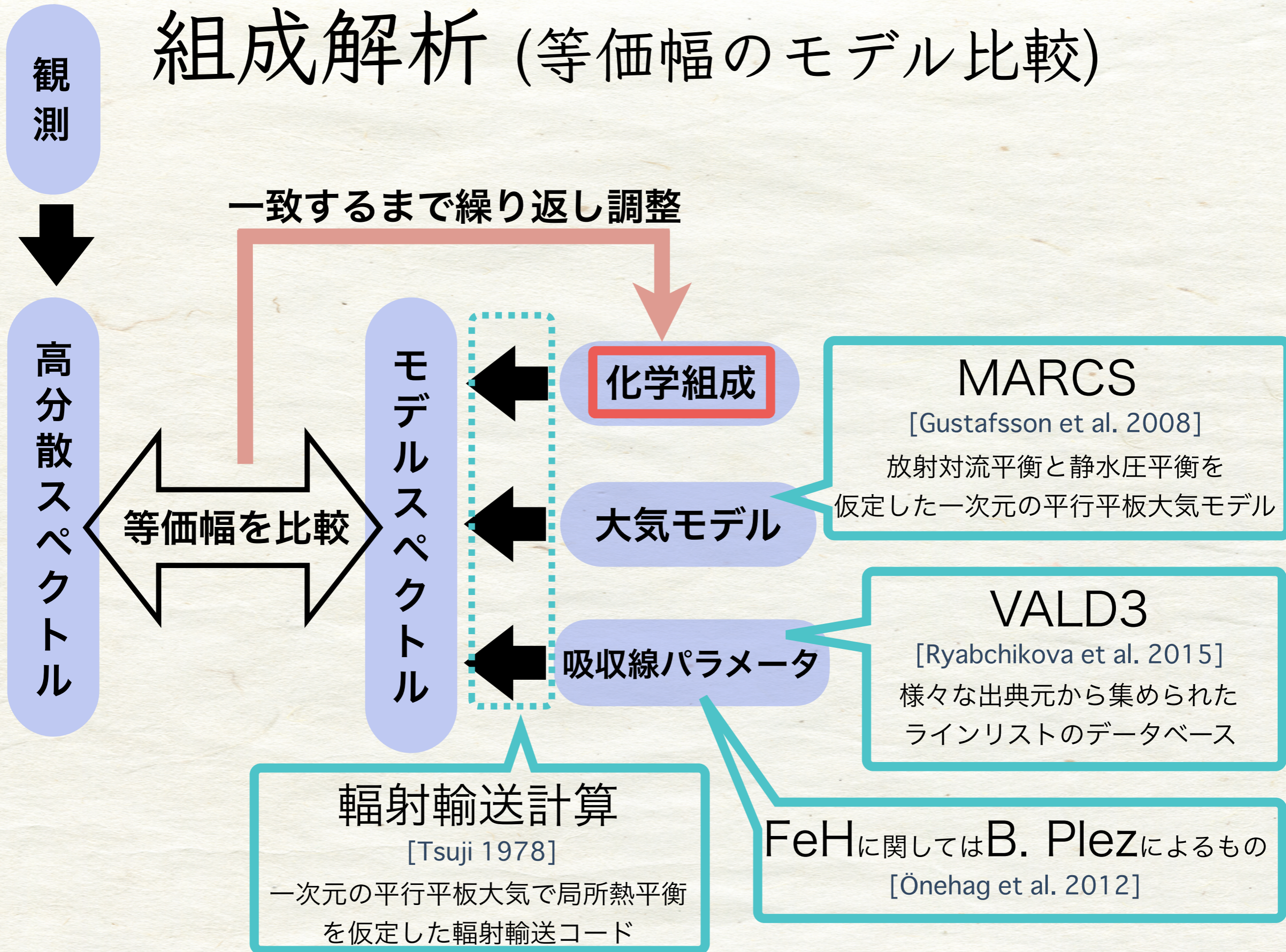


# 等価幅の測定

NOAO/IRAF V2.16 ChonMacBookPro@wlan-64-145.mtk.nao.ac.jp Tue 02:14:50 19-Dec-2017  
[Barnard0910]: GJ699 3.5E4 ap:1 beam:158



# 組成解析 (等価幅のモデル比較)





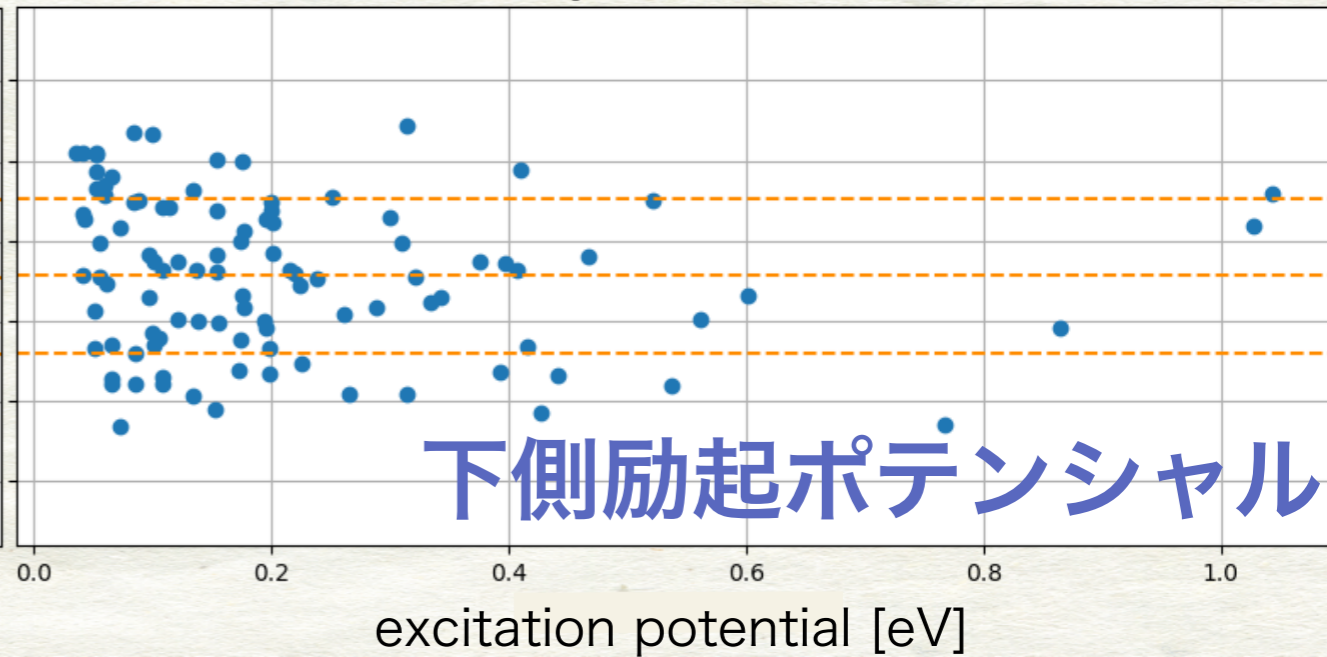
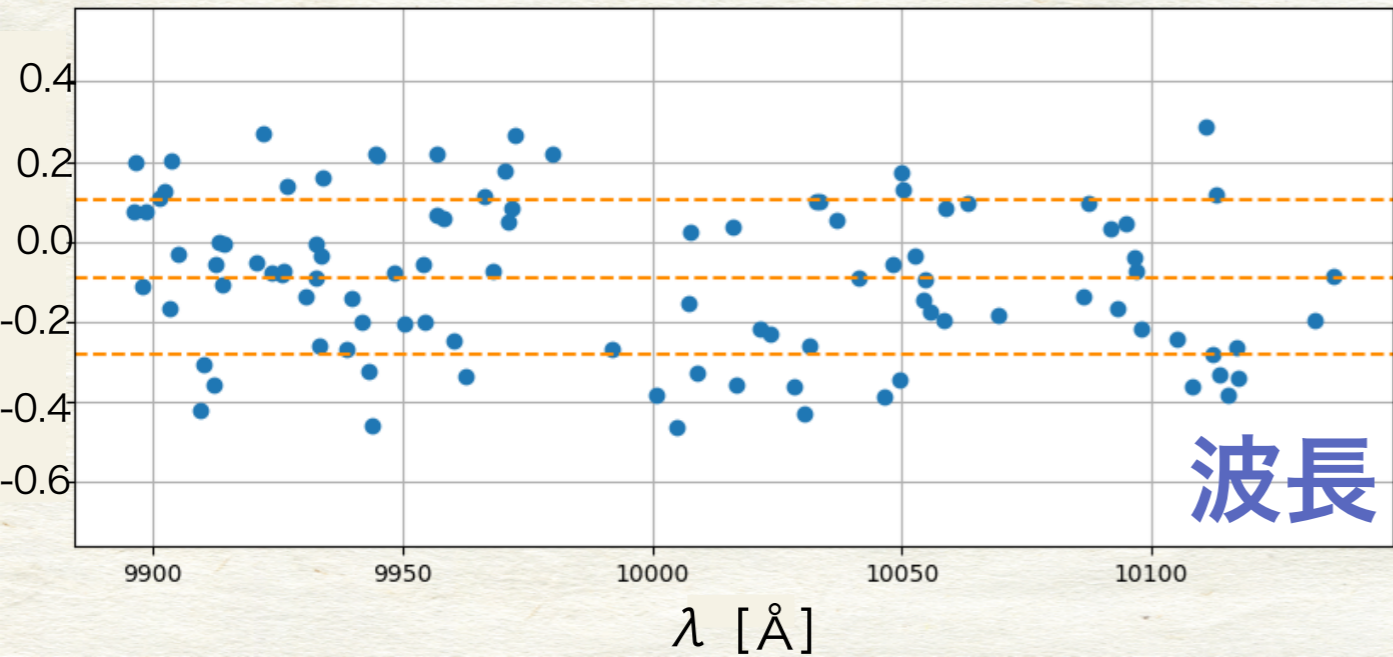
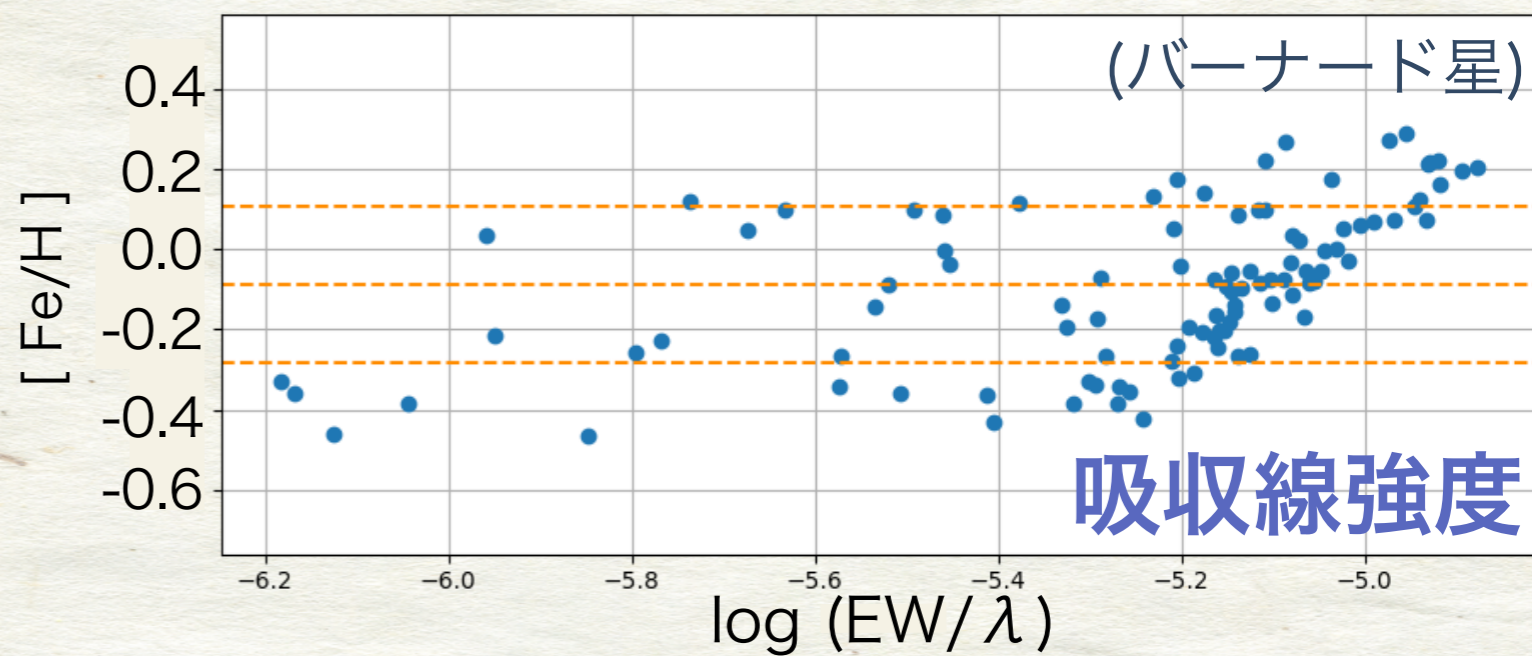
# 結果と議論

- ① FeH分子の結果
  - ② 各種原子（11種）の結果
-

# 結果と議論①: FeH分子

## 吸収線パラメータ依存性

導かれる金属量の、吸収線のパラメータに対する依存性を調べることで、**解析上の問題**を洗い出す。



# 結果と議論①: FeH分子

## 吸収線強度 ( $\log(EW/\lambda)$ ) 依存性

右上がりのトレンド?

● マイクロ乱流速度  $\xi_t$  の間違い?

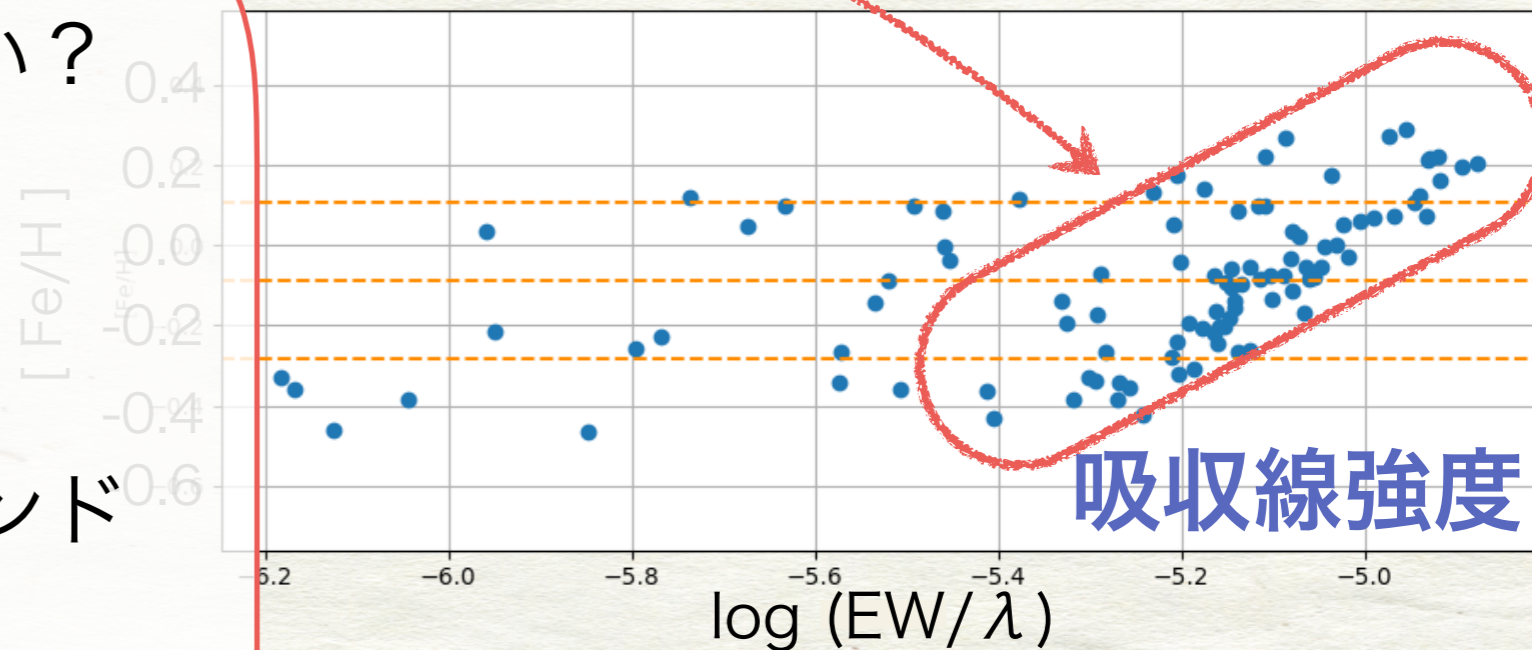
→  $\xi_t$  を変えても改善せず

● バーナード星の問題?

→ LHS 1140 でも同じトレンド

● IRDの問題?

→ CRILES-POPでも同じトレンド



未解決...



減衰定数の取り扱い調整、別の大気モデルとの比較、擬似continuumの評価、...etc.?

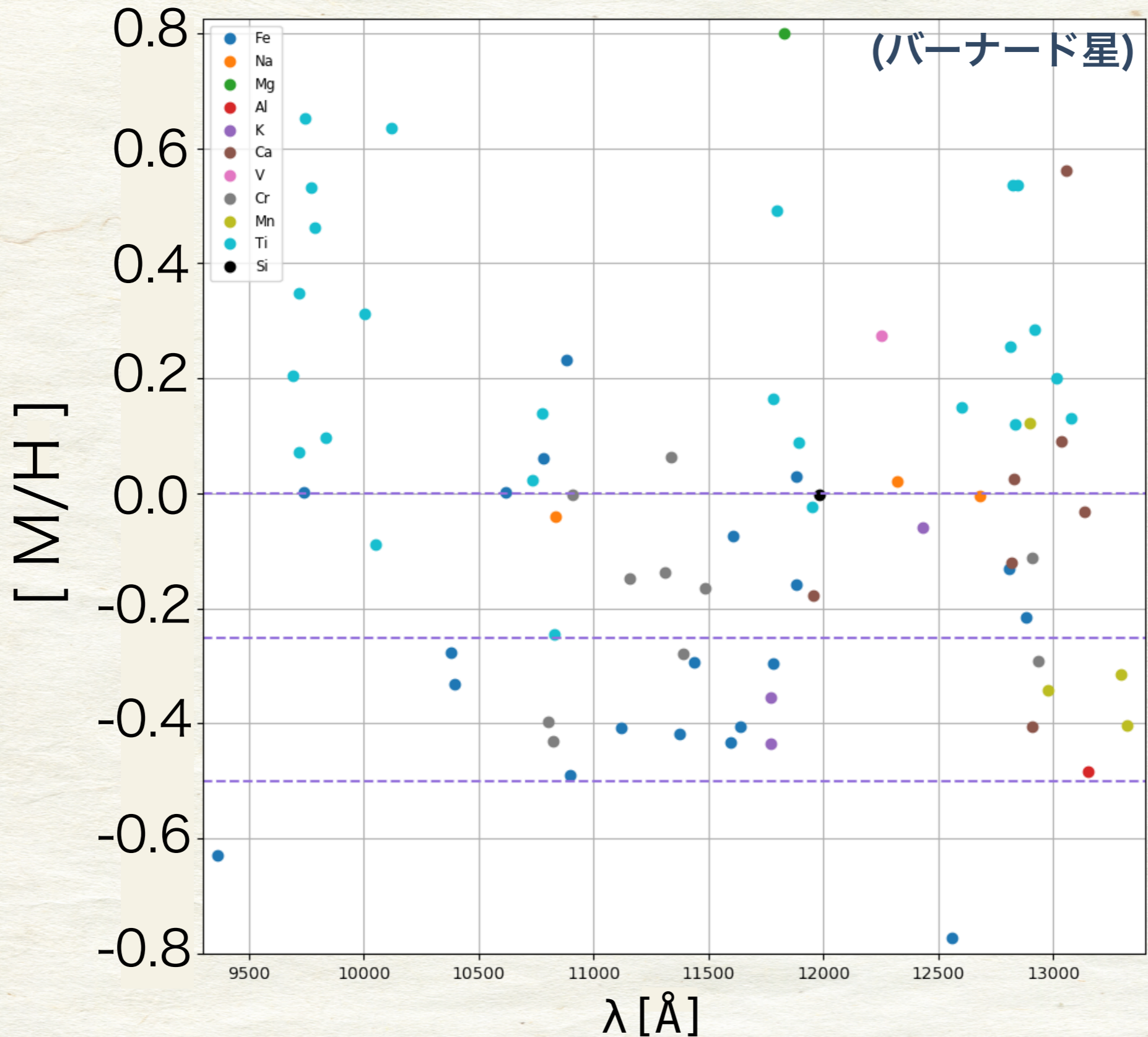
# 結果と議論

① FeH分子の結果

② 各種原子 (11種) の結果

# 結果と議論②: 原子

## 各吸収線の結果



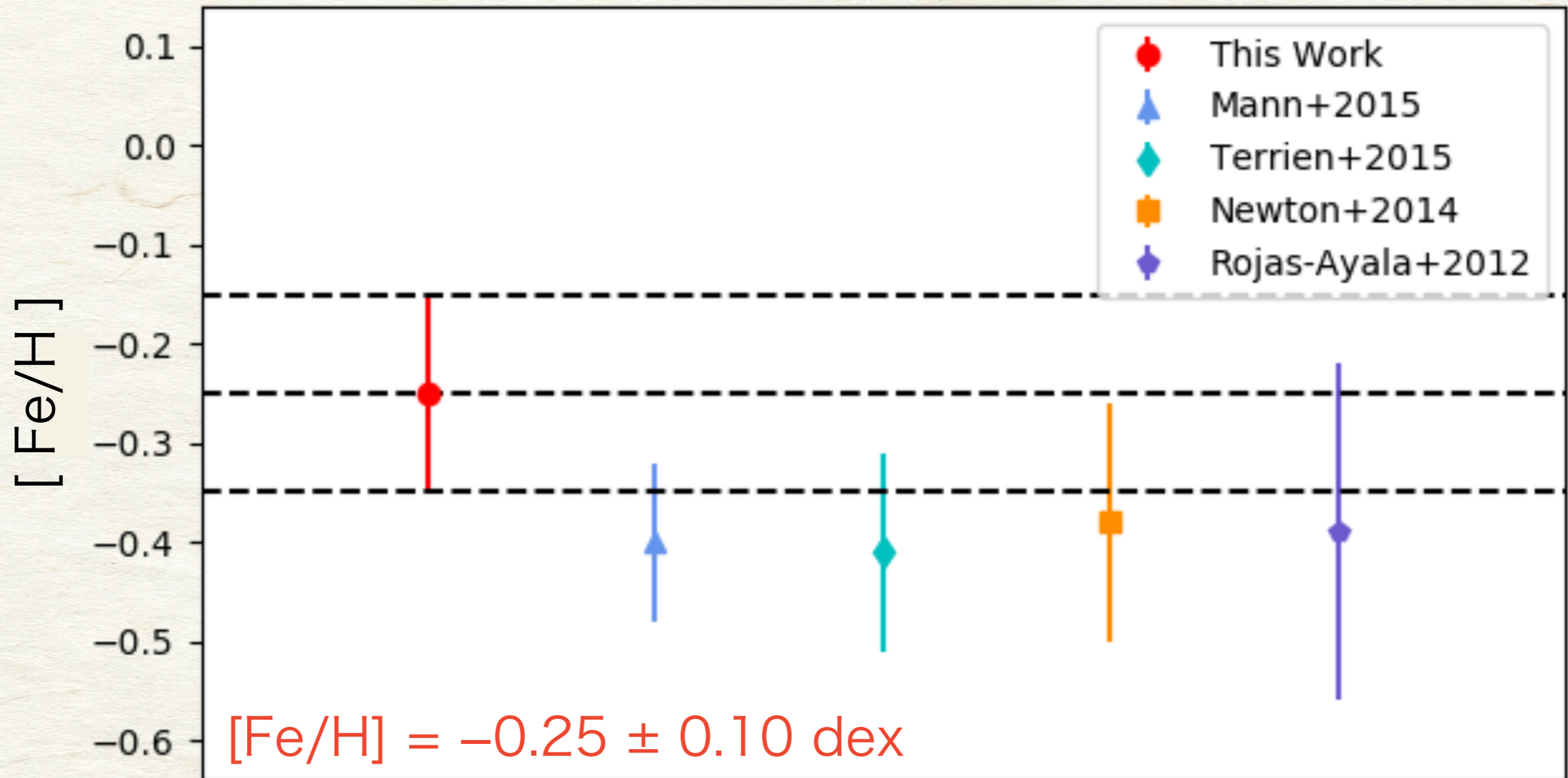
## 結果と議論②: 原子

# 各種原子の結果

元素	バーナード星	$\sigma$	本数	LHS 1140	$\sigma$	本数
[Fe/H]	-0.25	0.10	20	-0.07	0.09	20
[Na/Fe]	0.24	0.20	3	0.37	0.18	4
[Mg/Fe]	1.05:	0.29	1	—	—	0
[Al/Fe]	-0.23	0.28	1	—	—	0
[Si/Fe]	0.25	0.41	1	—	—	0
[K/Fe]	-0.03	0.47	3	0.16	0.49	2
[Ca/Fe]	0.24	0.21	7	0.19	0.19	6
[Ti/Fe]	0.49	0.13	25	0.25	0.13	27
[V/Fe]	0.52	0.28	1	0.69	0.28	1
[Cr/Fe]	0.06	0.15	10	0.01	0.15	11
[Mn/Fe]	0.01	0.18	4	0.32	0.19	4

## 結果と議論②: 原子

# 先行研究との比較



経験式を用いた先行研究とも  
誤差の範囲内で一致。

# 結果と議論②: 原子

## 個々の元素から伺えるバーナード星の種族

元素	バーナード星	$\sigma$	本数	LHS 1140	$\sigma$	本数
[Fe/H]	-0.25	0.10	20	-0.07	0.09	20
[Na/Fe]	0.24	0.20	3	0.37	0.18	4
[Mg/Fe]	1.05:	0.29	1			
[Al/Fe]	-0.23	0.28	1			
[Si/Fe]	0.25	0.41	1			
[K/Fe]	-0.03	0.47	3			
[Ca/Fe]	0.24	0.21	7			
[Ti/Fe]	0.49	0.13	25			
[V/Fe]	0.52	0.28	1			
[Cr/Fe]	0.06	0.15	10			
[Mn/Fe]	0.01	0.18	4			

Si, Mg, Alは信用できない

Ca, Ti は太陽より多い

古い種族であることを示唆

鉄族元素は太陽程度, 妥当。



# 結論

[Fe/H]が低く  $\alpha$  元素が多い傾向から、化学組成の面でも **バーナード星が古い種族** の天体である可能性を支持。

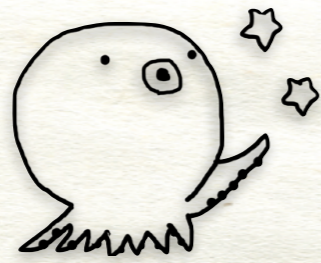
LHS 1140 はバーナード星に比べると金属量が高い。  
種族については結論は出せない。



本研究にとって重要な結論としては、

IRDのデータを組成解析に適した形に **一次処理** し、  
**100本以上のFeH線** と **11種類の原子線** の **同定に成功**。

**IRDのスペクトルがM型矮星の化学組成解析に  
有用であることが確認できた。**



# まとめ

## 目的

IRDの広い波長帯域で、**近赤外高分散スペクトル**のモデル比較により直接的に**M型矮星の各種元素の組成**を決定すること。

## 内容

2つの中期M型矮星の Y, J スペクトルにおいて、**吸収線の同定・等価幅解析**を行った。

## 結果

FeH吸収線について、**得られる[Fe/H]が線強度に依存する**という解析上の問題を見つけた。

また、各種原子の吸収線から**11種類の元素の組成**を決め、**バーナード星が古い種族**であることを支持する結果を得た。

## 結論

IRDのスペクトルがM型矮星の組成解析に有用であることを確認した。今後、連星を用いた補正や、晩期M型矮星への拡張を予定している。