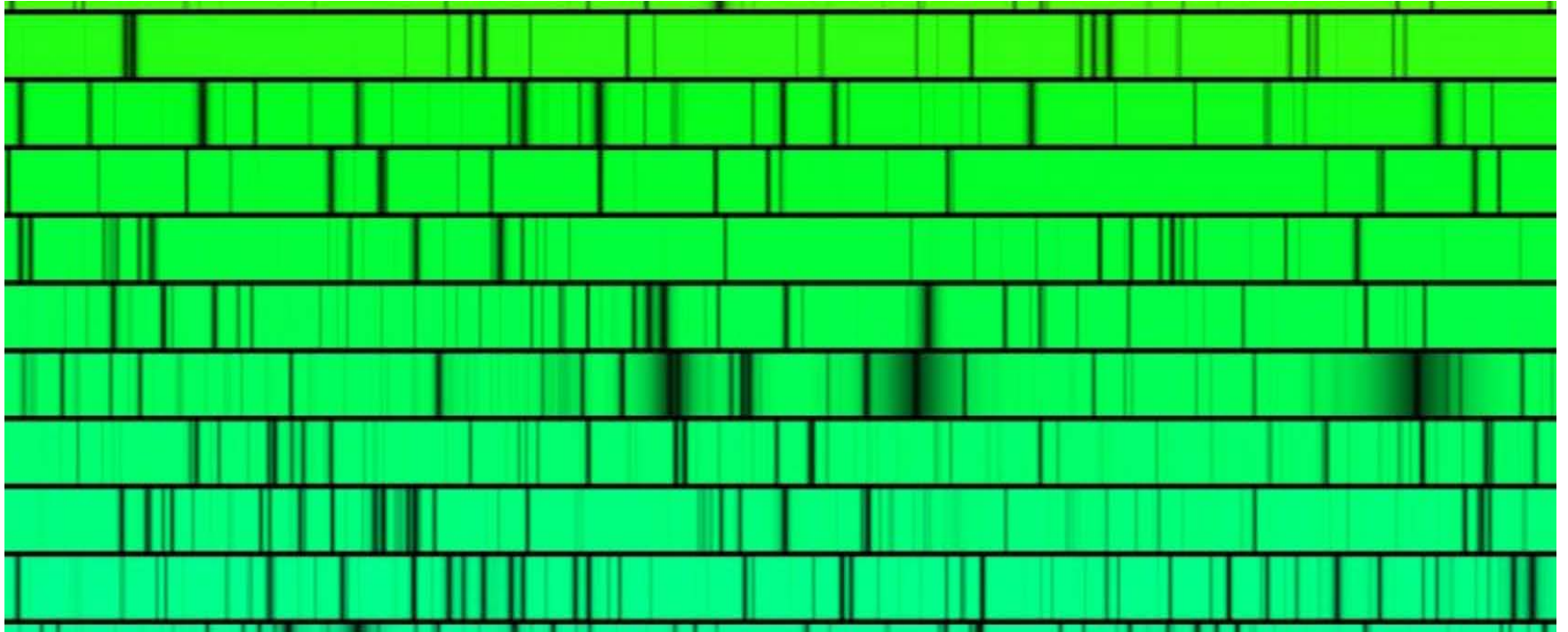


太陽の化学組成は果たして**正常**か？

太陽近傍の種族I恒星の代表例として適切な星か？



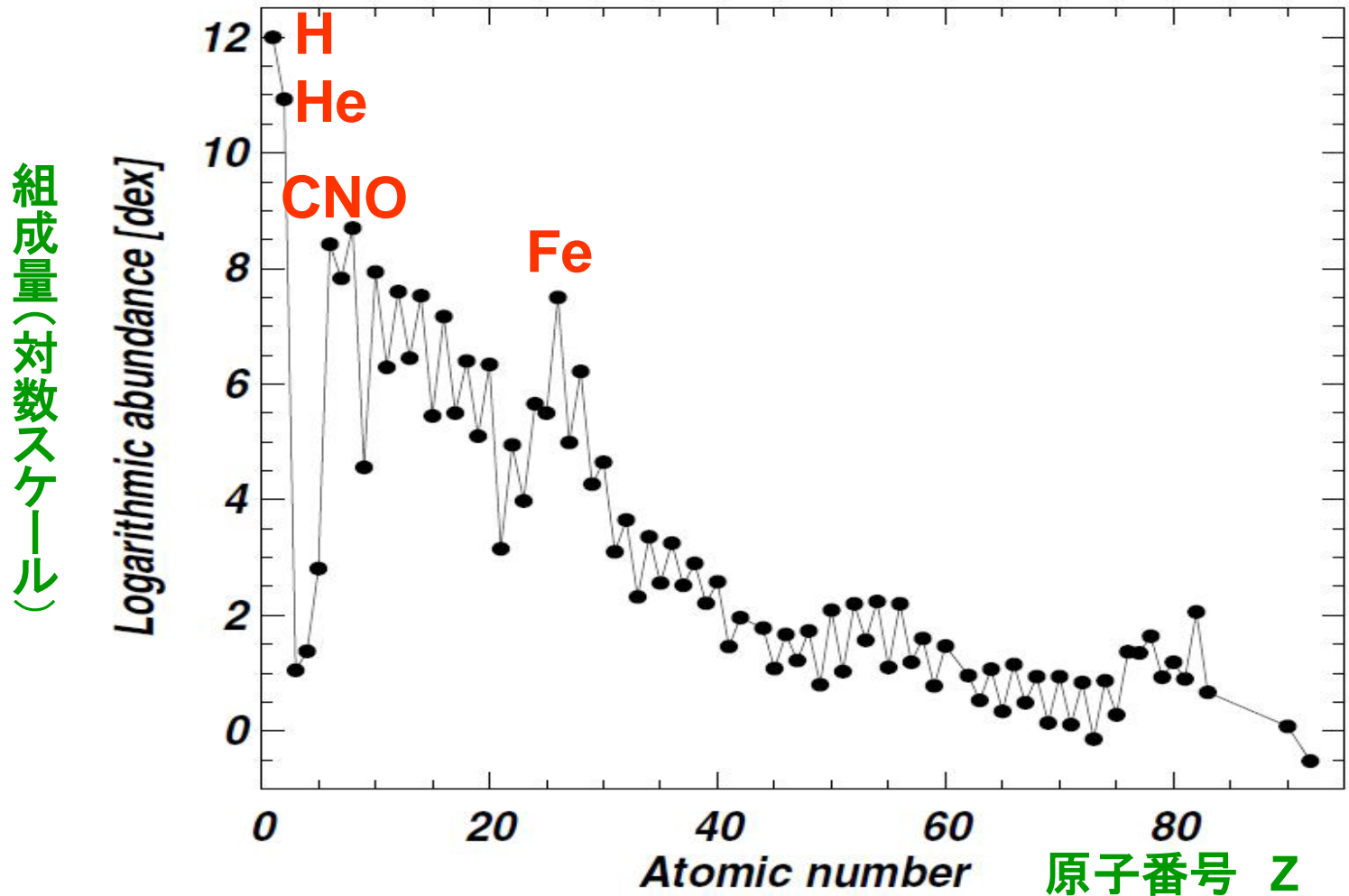
The Solar Spectrum NOAO (部分)

分光学的側面からの考察

定金晃三 (大阪教育大学)

太陽化学組成(2010)

分光学的方法 Asplund et al. 2009, ARA&A, 47, 481



他に **CIコンドライト**の分析 Lodders et al. Landolt- Boernstein , 4B, 44

分光解析と隕石の結果の違い

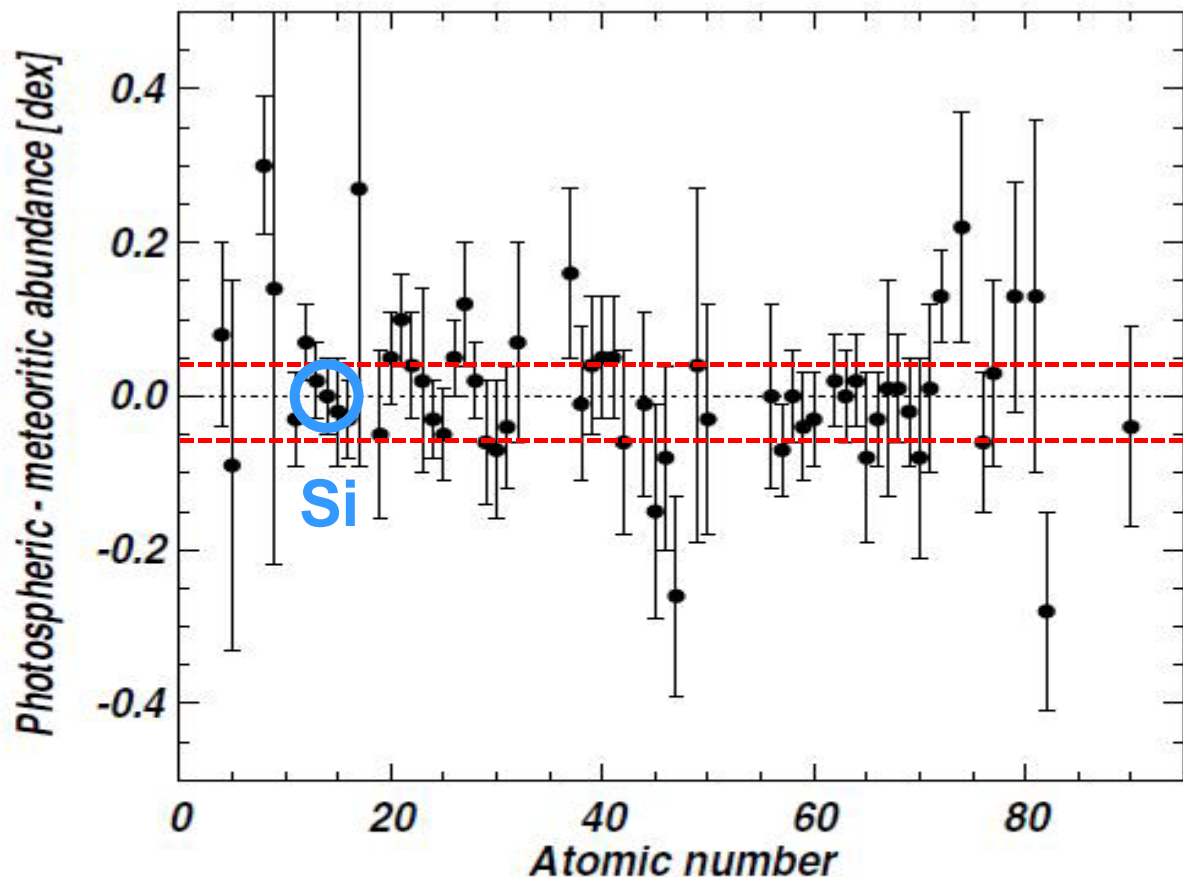


Figure 7: Difference between the logarithmic abundances determined from the solar photosphere and the CI carbonaceous chondrites as a function of atomic number. With a few exceptions the agreement is excellent. Note that due to depletion in the Sun and meteorites, the data points for Li, C, N and the noble gases fall outside the range of the figure.

ケイ素(Si)で規格化している。

He, Ne, Ar, Kr, Xe等の組成は光球のスペクトルからは求められない。

一方で、

H, C, N, Oと希ガス組成は隕石からは求められない。

分光解析の方法と問題点

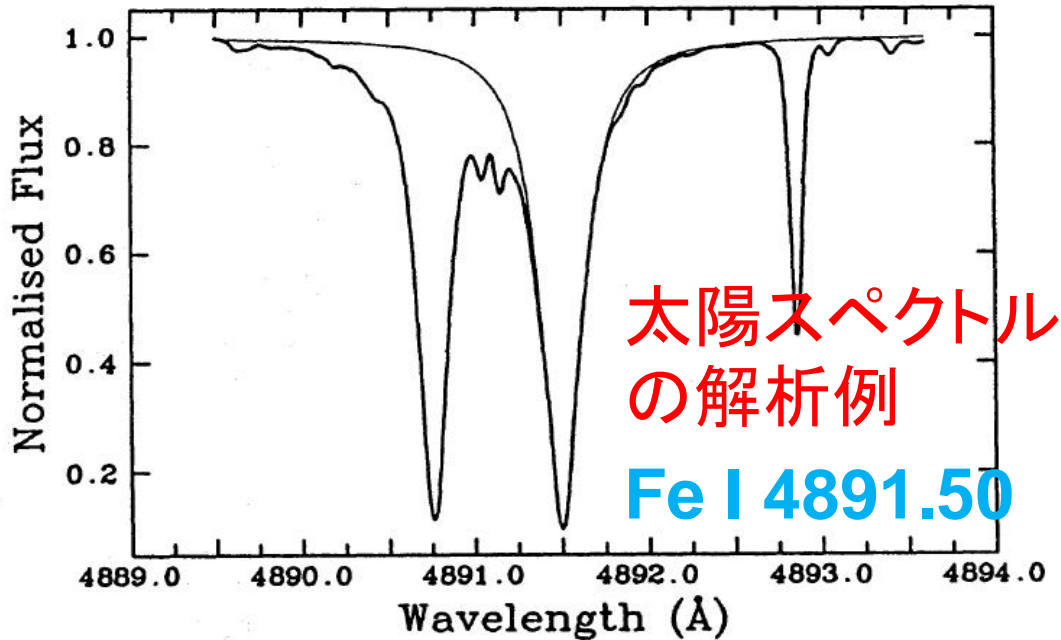


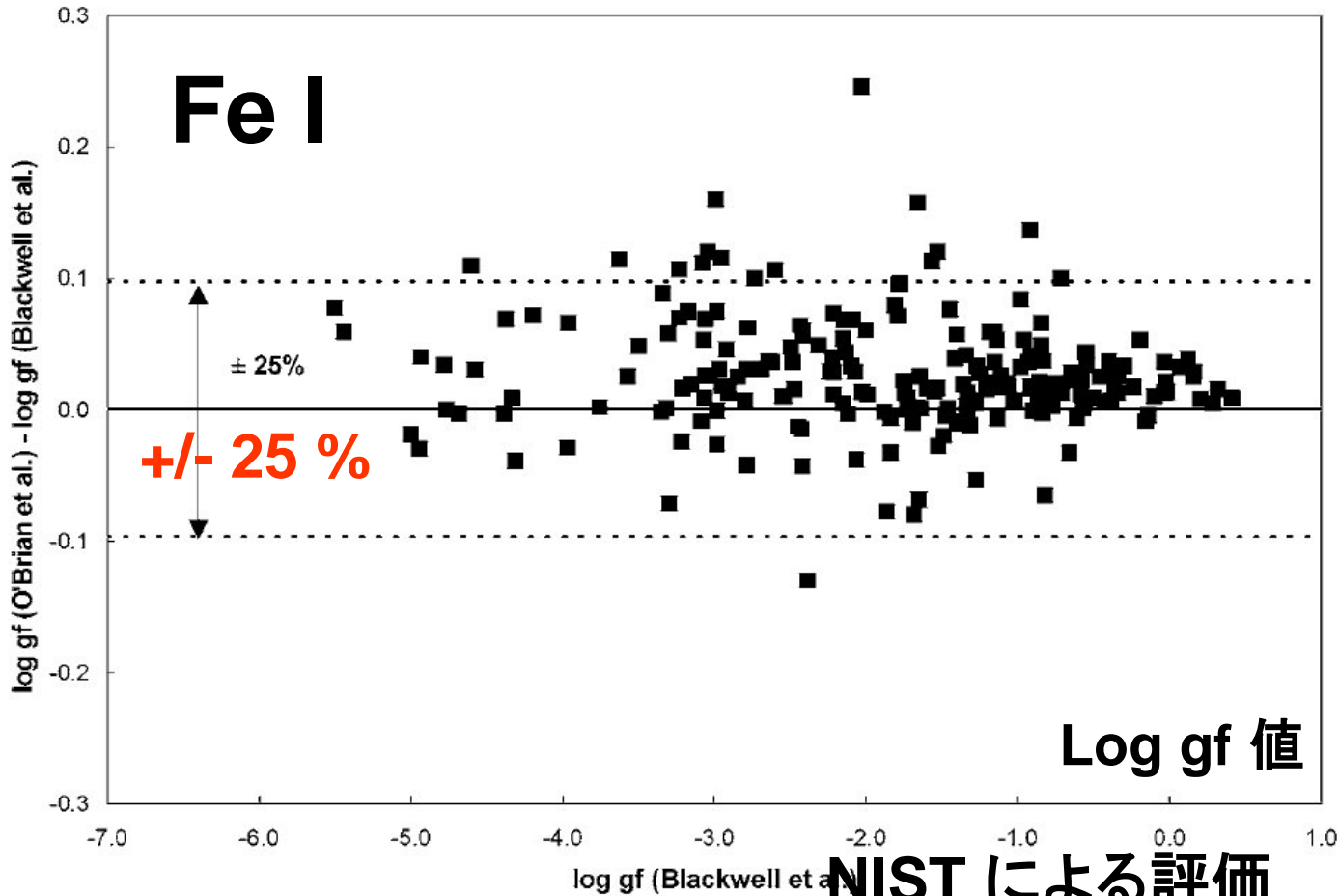
Fig. 3. Comparison of observed and synthetic profiles of solar spectrum line $\lambda 489.150$ for determination of damping parameter, using $\log gf = -0.112$ (O'Brian et al. 1991) 出典: Blackwell et al. 1995, AA, 296, 217

信頼出来る結果を得るには、

- ①高品質のスペクトルデータ(観測)
- ②信頼出来る原子線、分子線データ(実験、理論)
- ③モデル大気と線形成の理論(理論)

原子線データ(遷移確率)の現状

輝線実験と吸収線実験の差



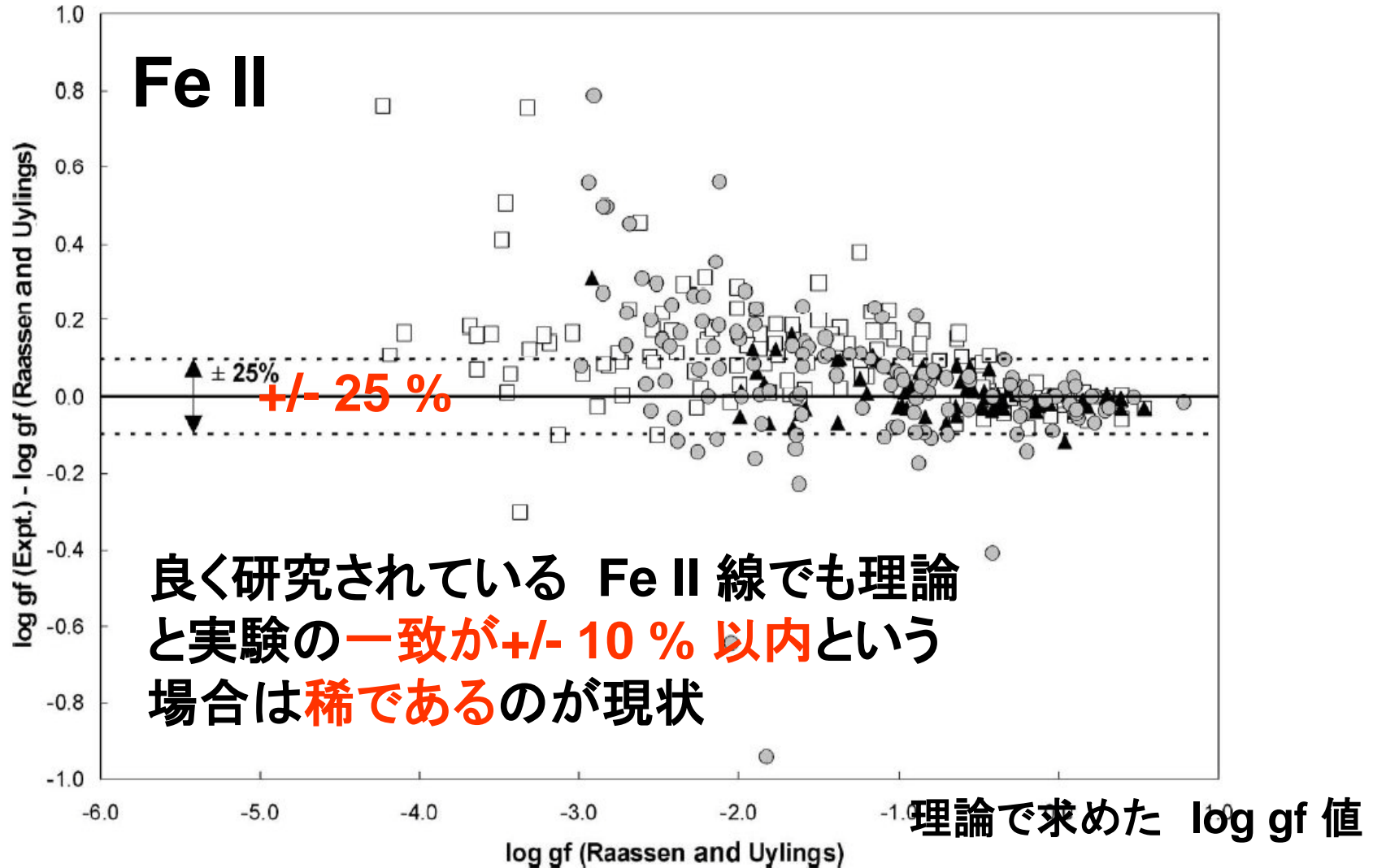
NISTによる評価

出典: Fuhr and Wiese (2006)
J. Phys. Chem. Ref. Data, 35, 1669

A: +/- 3 %, B: +/- 10 %,
C: +/- 25 %, D: +/- 50 %

原子線データ(遷移確率)の現状2

理論と実験の差

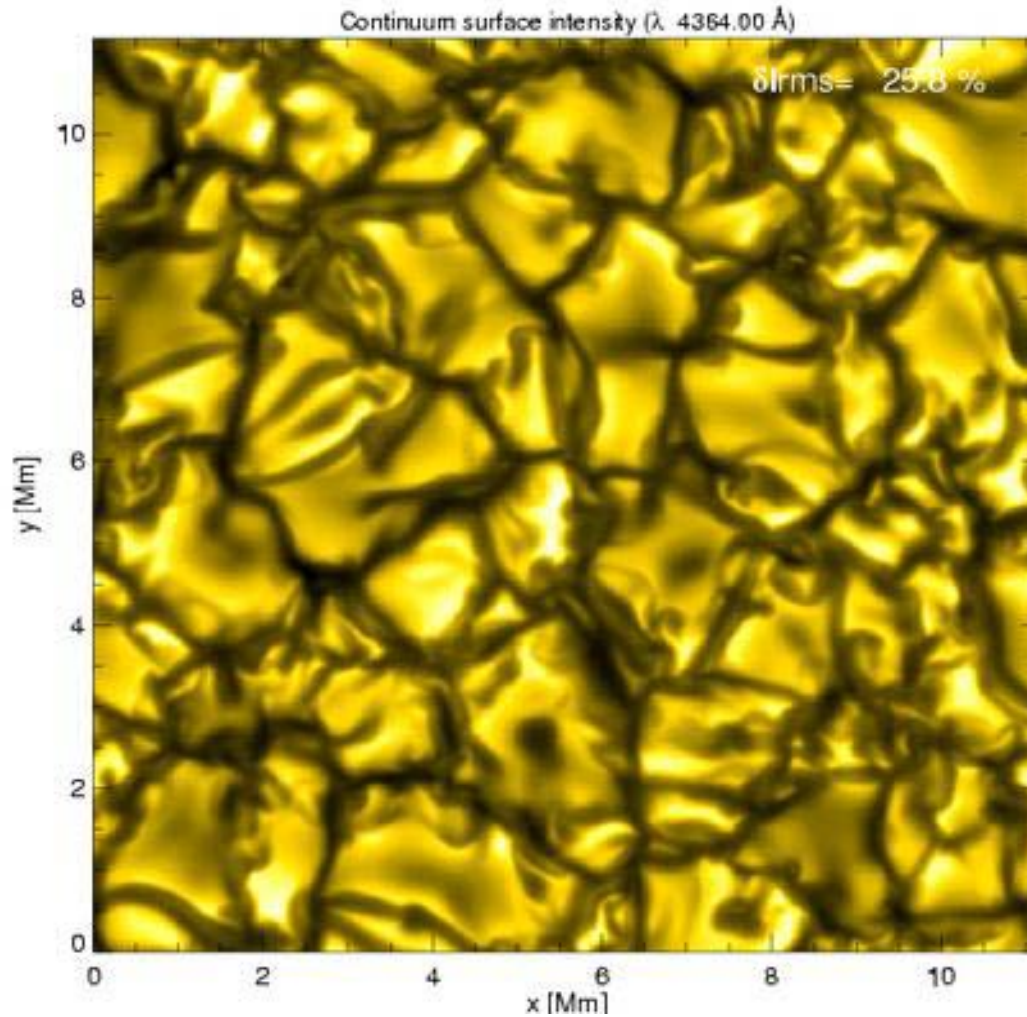


良く研究されている Fe II 線でも理論
と実験の一致が +/- 10% 以内という
場合は稀であるのが現状

Fuhr and Wiese (2006)の中で可視域のFe II 線ではRank A は一本もない。

大気モデル

かつては、1次元、静水圧平衡モデルが使われていた



3次元Hydro Dynamical モデル の登場

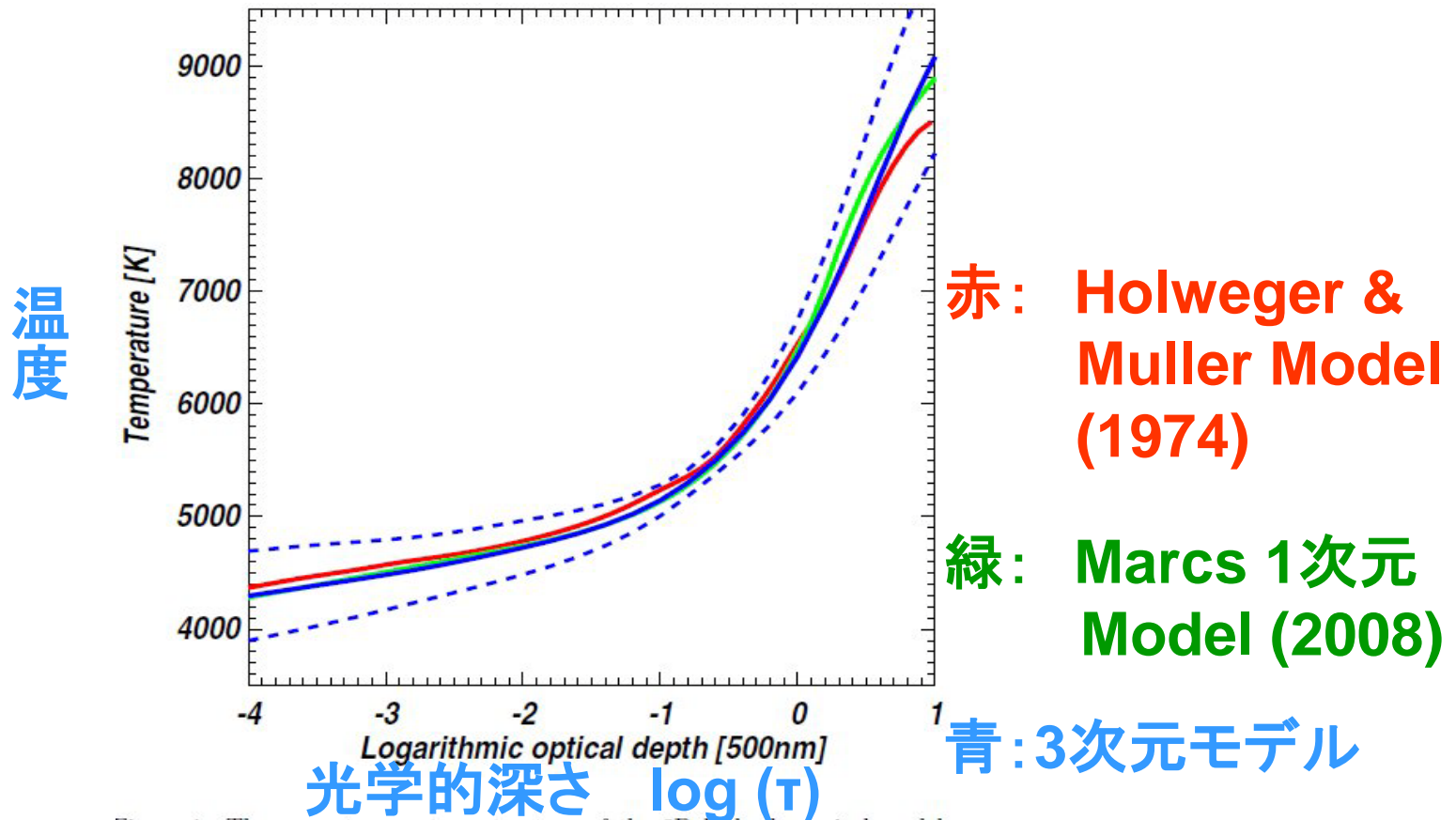
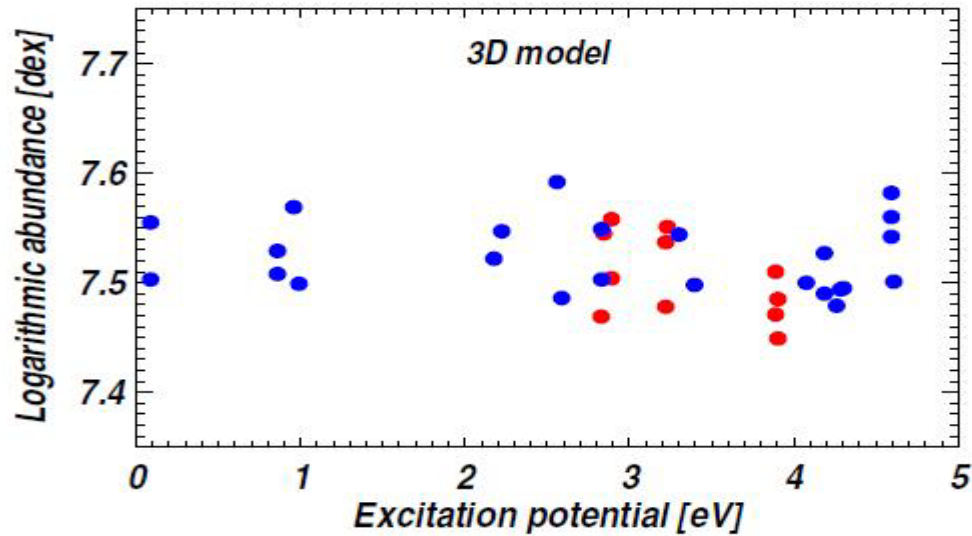


Figure 1: The mean temperature structure of the 3D hydrodynamical model of [Trampedach et al. \(2009\)](#) is shown as a function of optical depth at 500 nm (blue solid line). The blue dashed lines correspond to the spatial and temporal rms variations of the 3D model, while the red and green curves denote the 1D semi-empirical [Holweger & Müller \(1974\)](#) and the 1D theoretical [MARCS \(Gustafsson et al. 2008\)](#) model atmospheres, respectively.

Fe I, II に見るモデルによる違い

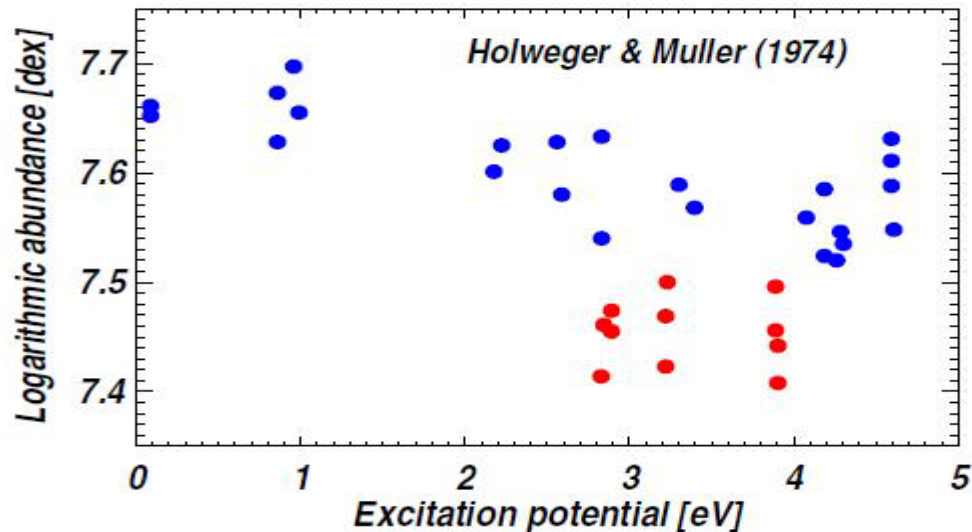
鉄組成



青点: Fe I

赤点: Fe II

励起ポテンシャル



CNO組成

lines	$\log \epsilon_{\text{C,N,O}}$			
	3D	< 3D >	HM	MARCS
[C I]	8.41	8.40	8.41	8.38
C I	8.42 ± 0.05	8.47 ± 0.04	8.45 ± 0.04	8.39 ± 0.04
CH $\Delta v = 1$	8.44 ± 0.04	8.44 ± 0.04	8.53 ± 0.04	8.44 ± 0.04
CH A-X	8.43 ± 0.03	8.42 ± 0.03	8.51 ± 0.03	8.40 ± 0.03
C ₂ Swan	8.46 ± 0.03	8.46 ± 0.03	8.51 ± 0.03	8.46 ± 0.03
N I	7.78 ± 0.04	7.89 ± 0.04	7.88 ± 0.04	7.78 ± 0.04
NH $\Delta v = 0$	7.83 ± 0.03	7.94 ± 0.02	8.02 ± 0.02	7.97 ± 0.02
NH $\Delta v = 1$	7.88 ± 0.03	7.91 ± 0.03	8.01 ± 0.03	7.91 ± 0.03
[O I]	8.70 ± 0.05	8.70 ± 0.05	8.73 ± 0.05	8.69 ± 0.05
O I	8.69 ± 0.05	8.73 ± 0.05	8.69 ± 0.05	8.62 ± 0.05
OH $\Delta v = 0$	8.69 ± 0.03	8.75 ± 0.03	8.83 ± 0.03	8.78 ± 0.03
OH $\Delta v = 1$	8.69 ± 0.03	8.74 ± 0.03	8.86 ± 0.03	8.75 ± 0.03

許容線、禁制線、分子線 から求める方法が使われる

太陽C, N, O組成の変遷

	Anders and Grevesse (1989)	Asplund et al. (2009)	Caffau et al. (2010)
C	8.56 +/- 0.04	8.43 +/- 0.04 -0.13	8.50 +/- 0.06
N	8.05 +/- 0.04	7.80 +/- 0.05 -0.25	7.86 +/- 0.07
O	8.93 +/- 0.035	8.69 +/- 0.03 -0.24	8.76 +/- 0.07

やや揺れ戻しか？

X, Y, Zの最近の値

Table 4: The mass fractions of hydrogen (X), helium (Y) and metals (Z) for a number of widely-used compilations of the solar chemical composition.

Source	X	Y	Z	Z/X
Present-day photosphere:				
<u>Anders & Grevesse (1989)^a</u>	0.7314	0.2485	0.0201	0.0274
<u>Grevesse & Noels (1993)^a</u>	0.7336	0.2485	0.0179	0.0244
<u>Grevesse & Sauval (1998)</u>	0.7345	0.2485	0.0169	0.0231
<u>Lodders (2003)</u>	0.7491	0.2377	0.0133	0.0177
<u>Asplund, Grevesse & Sauval (2005)</u>	0.7392	0.2485	0.0122	0.0165
<u>Lodders, Palme & Gail (2009)</u>	0.7390	0.2469	0.0141	0.0191
Present work	0.7381	0.2485	0.0134	0.0181

Z **0.0201 (1989)** **→** **0.0134 (2009)**

Z/X **0.0274** **→** **0.0181**

若いB型星の解析

B 型星を使う利点

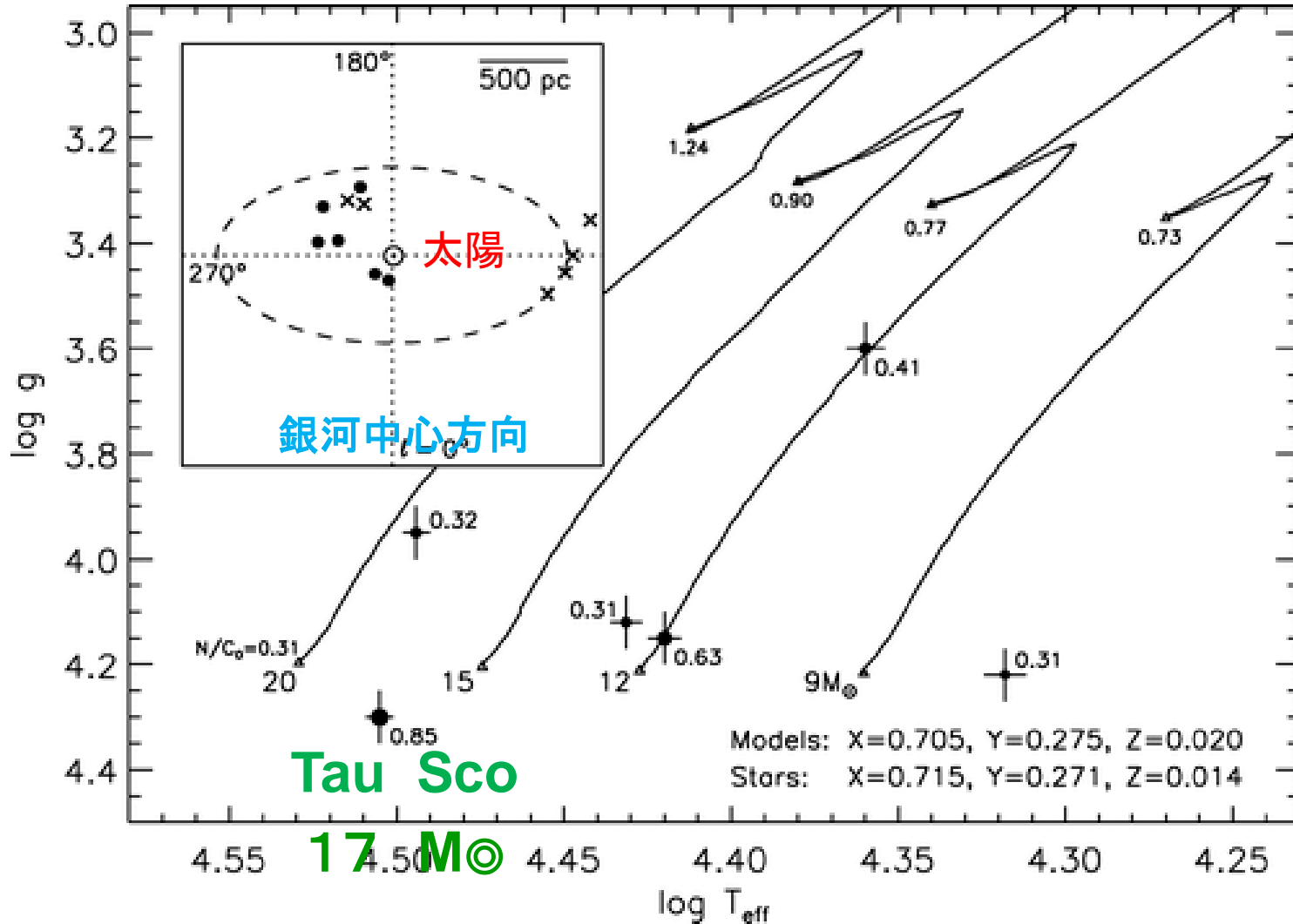
- 出来たばかりの若い星の組成が分かる
- 遠方の星(~ 1 Kpc)の星の組成が分かる
- 大気構造が単純(対流が無い)

B 型星を使う欠点

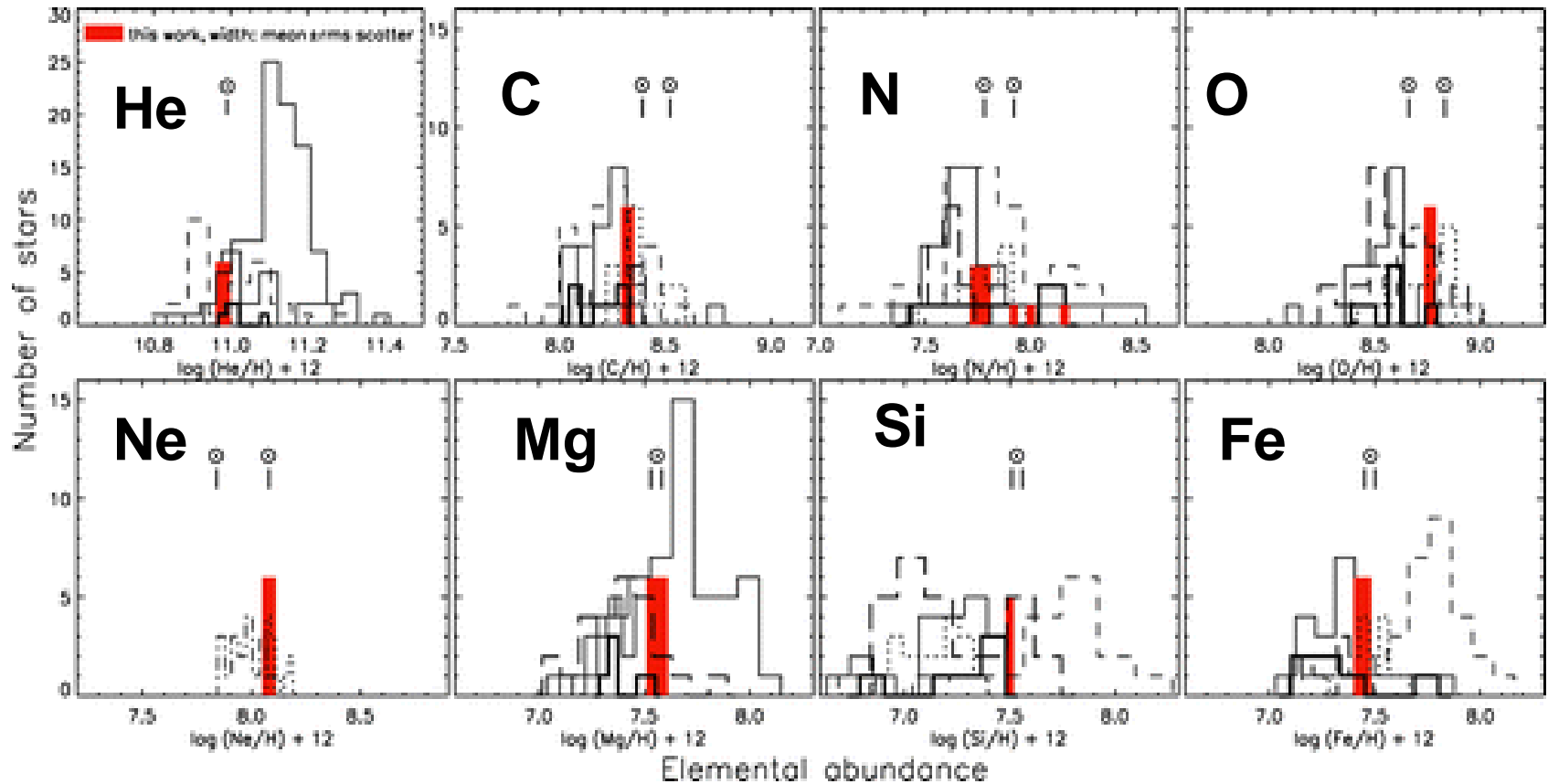
- Fe 以上の重元素の組成は求められない
- non-LTE 効果が大きく影響する

最近の解析結果

Przybilla et al. 2008, ApJ, 688, L103



太陽組成との比較



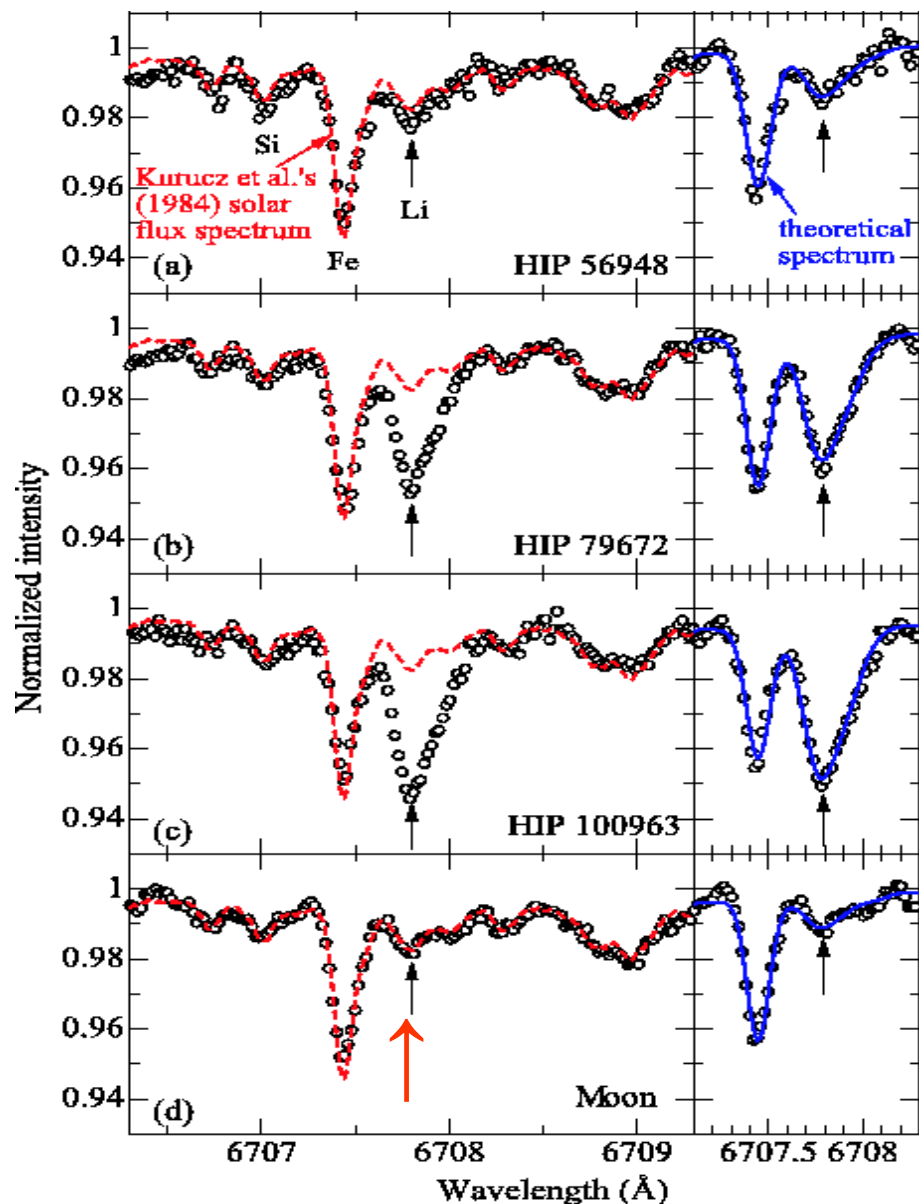
赤のバー: Przybilla et al. の結果

若いB型星と太陽の組成

	Young B Stars (Przybilla et al 2008)			Sun Asplund et al (2009)		
C	8.32	+/-	0.03	8.43	+/-	0.05
N	7.76	+/-	0.05	7.83	+/-	0.05
O	8.76	+/-	0.03	8.69	+/-	0.05
Ne	8.08	+/-	0.03	[7.93	+/-	0.10]
Mg	7.56	+/-	0.05	7.60	+/-	0.04
Si	7.50	+/-	0.02	7.51	+/-	0.03
Fe	7.44	+/-	0.04	7.50	+/-	0.04

観測されたこれらの元素では、**ほぼ一致している**。
B型星の方が金属量が低いことは無い。

Li 組成の異常



Takeda and Tajitsu
(2009) PASJ, 61, 471

太陽のLi 組成 **1.05** +/- 0.05

隕石のLi 組成 **3.26** +/- 0.05

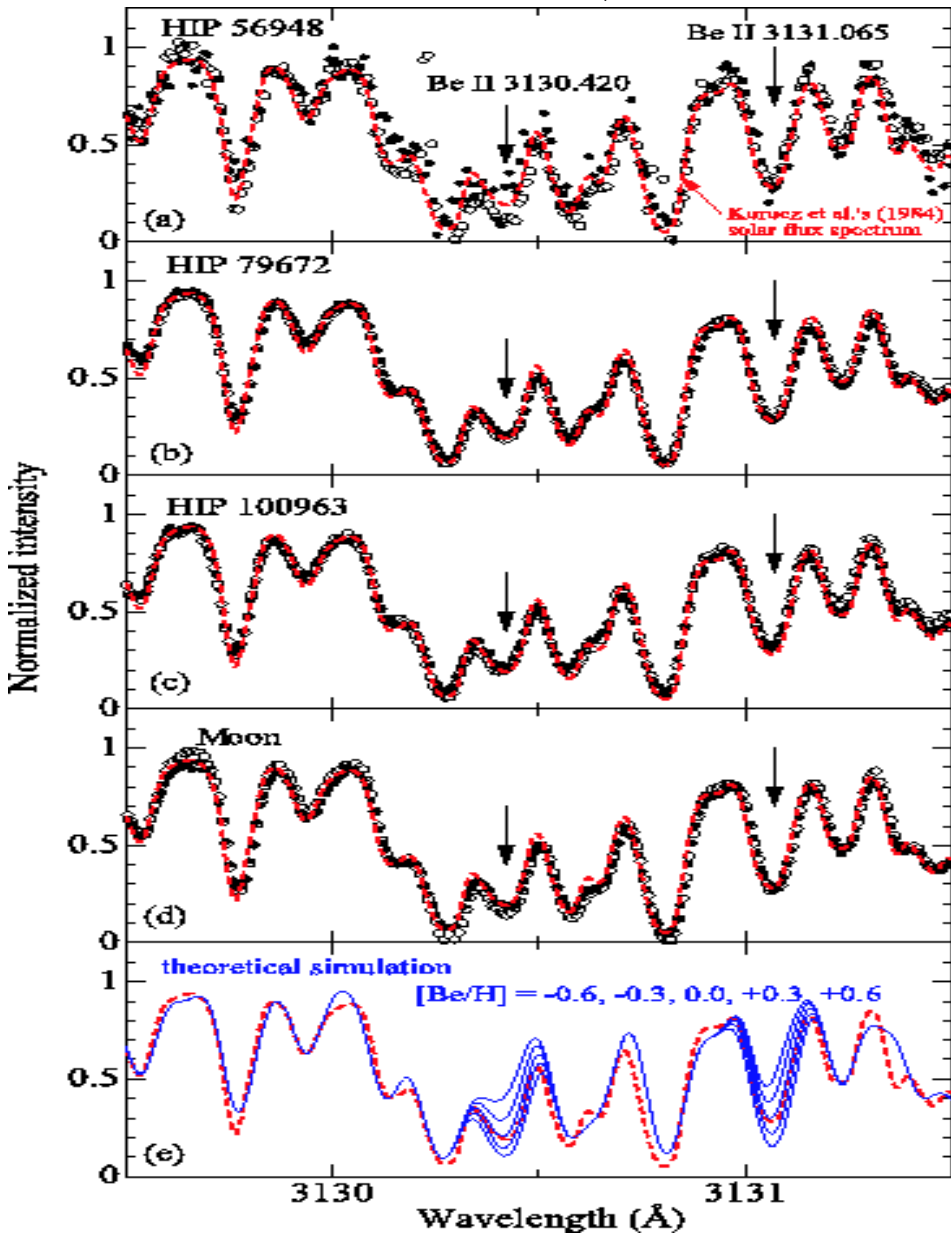
Asplund et al. (2009)

HIP 100963 などは隕石の
組成に近い

原始太陽系星雲の中には
隕石と同じ程度のLi が含
まれていた(はず)

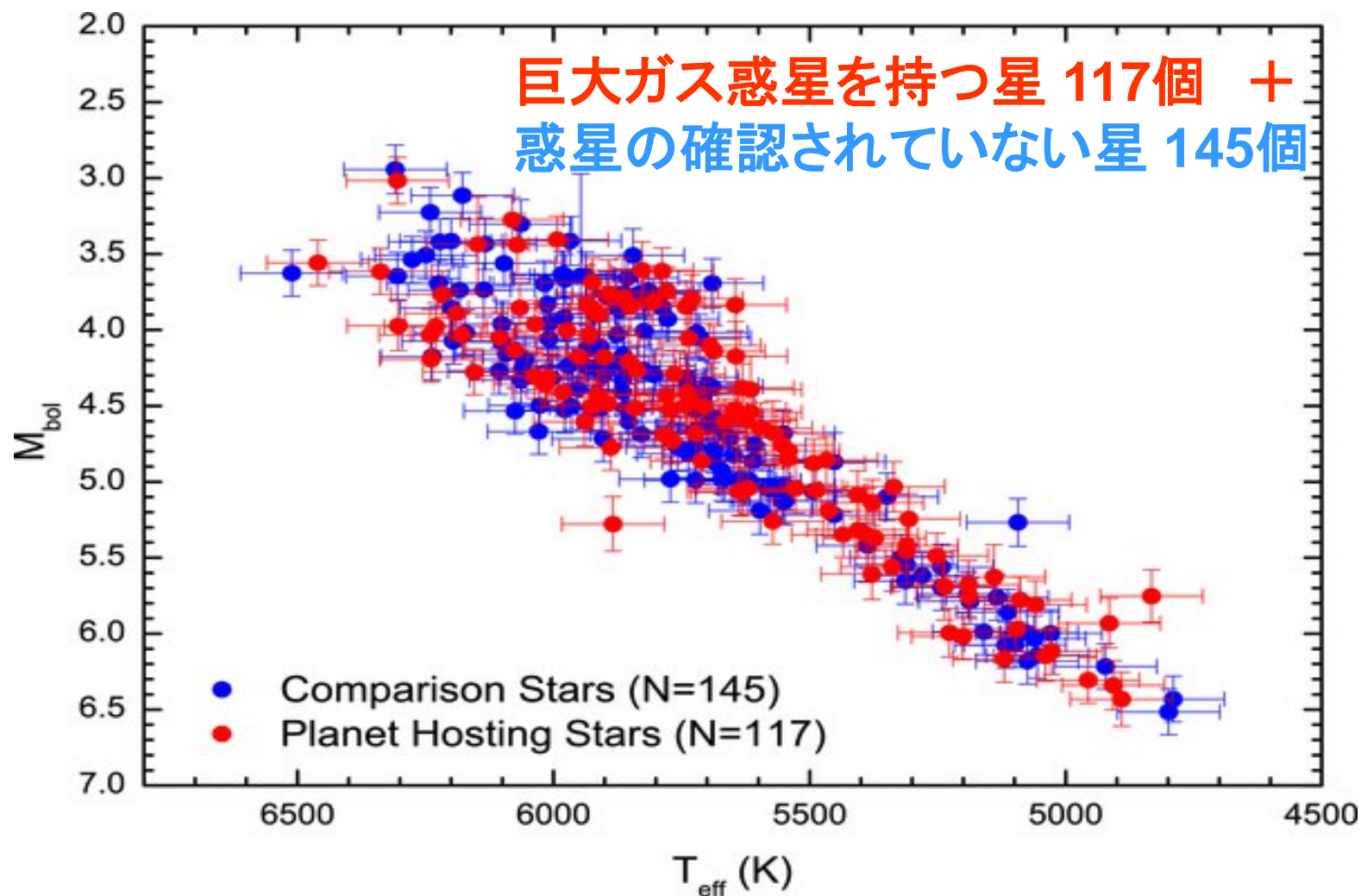
後天的に生じた現象

一方Beは正常



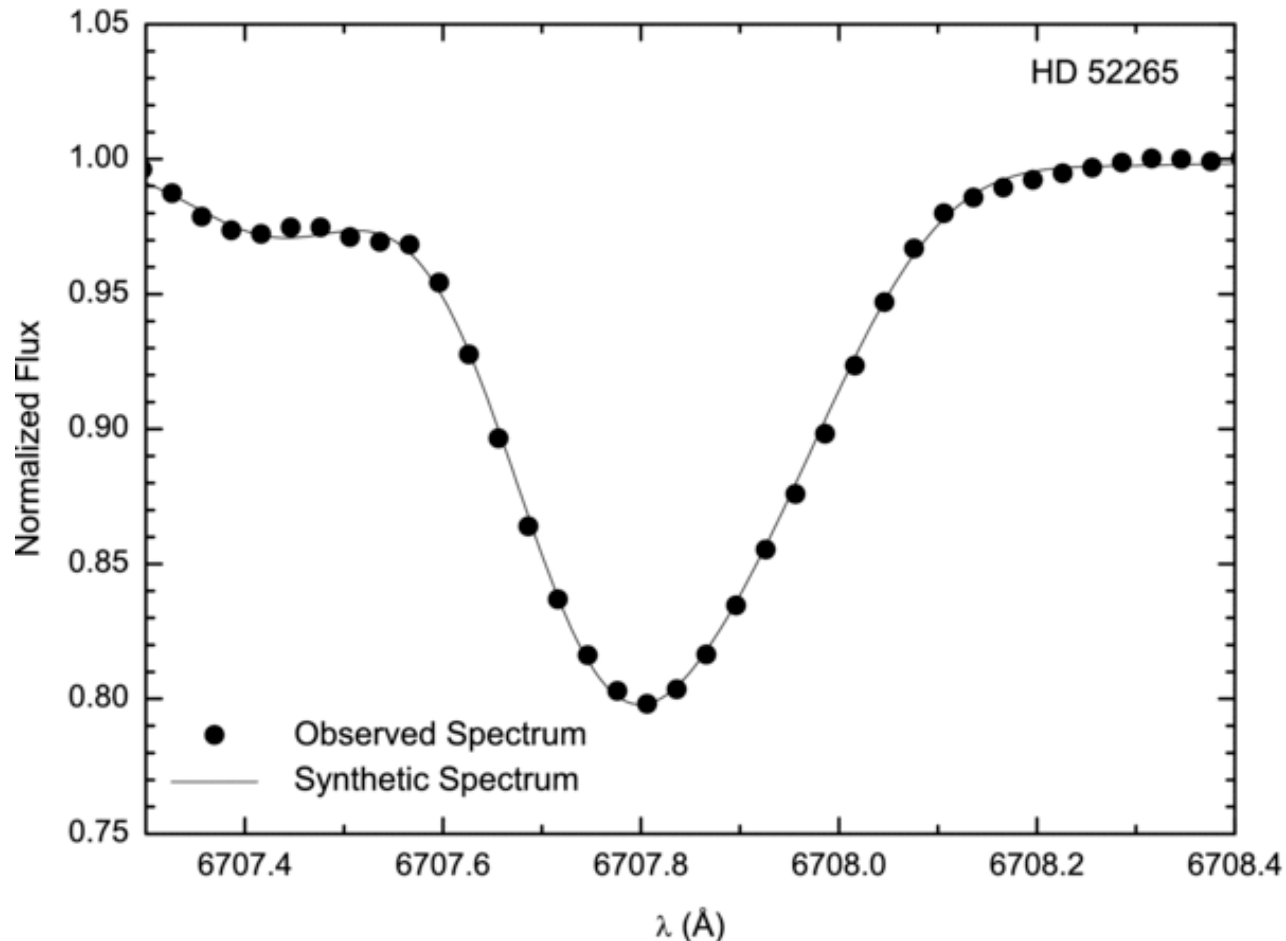
太陽表面では、Be量が保存され、同時にLi量を2桁下げる過程があったことが推察される。

多数の太陽型星について最新結果



Ghezzi et al. (2010) ApJ, 724, 154

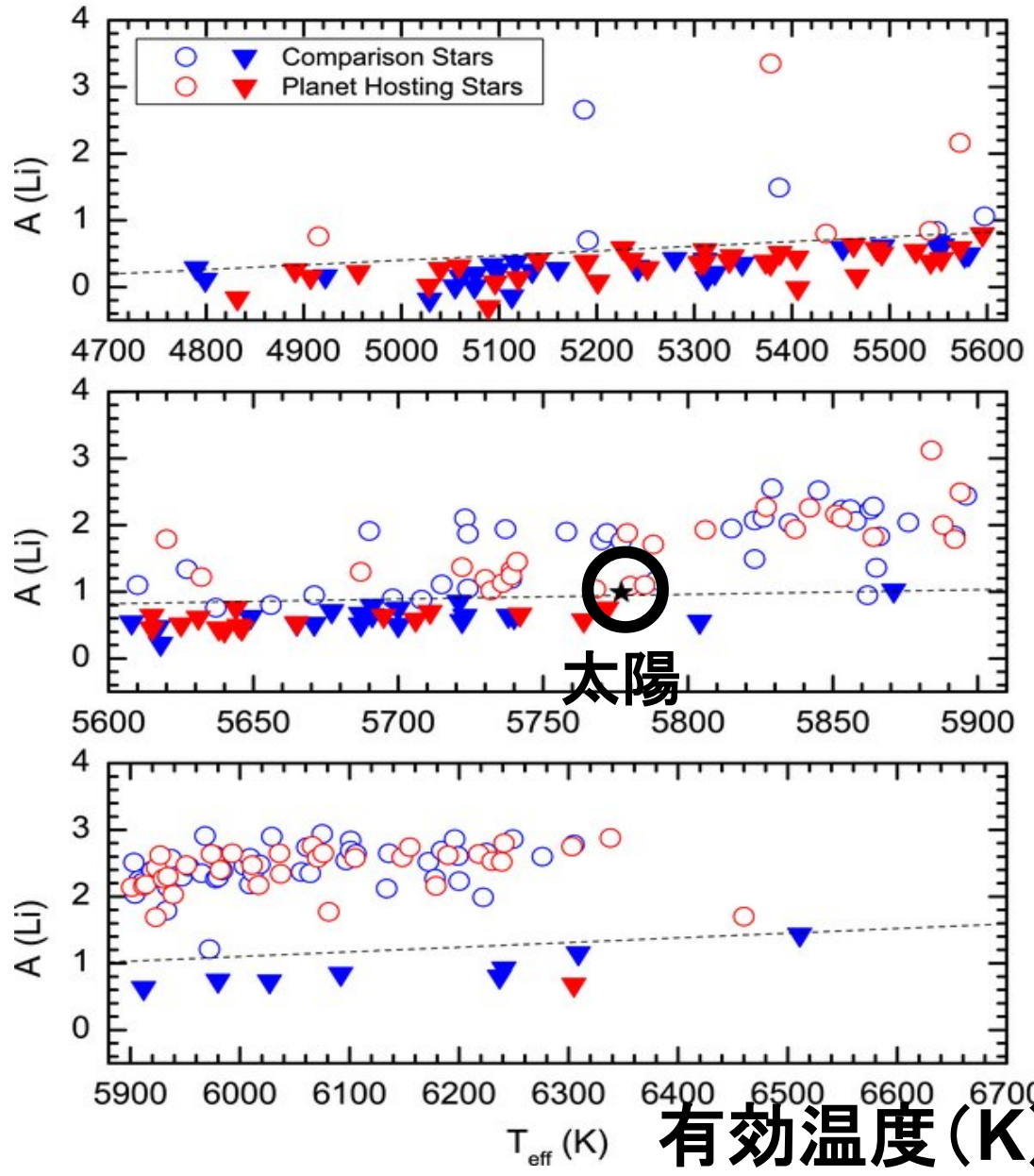
Li I 6707 の解析



観測: FEROS 分光器 ESO 2.2m
分解能 $R \sim 48000$

Li 組成と有効温度

リチウム組成

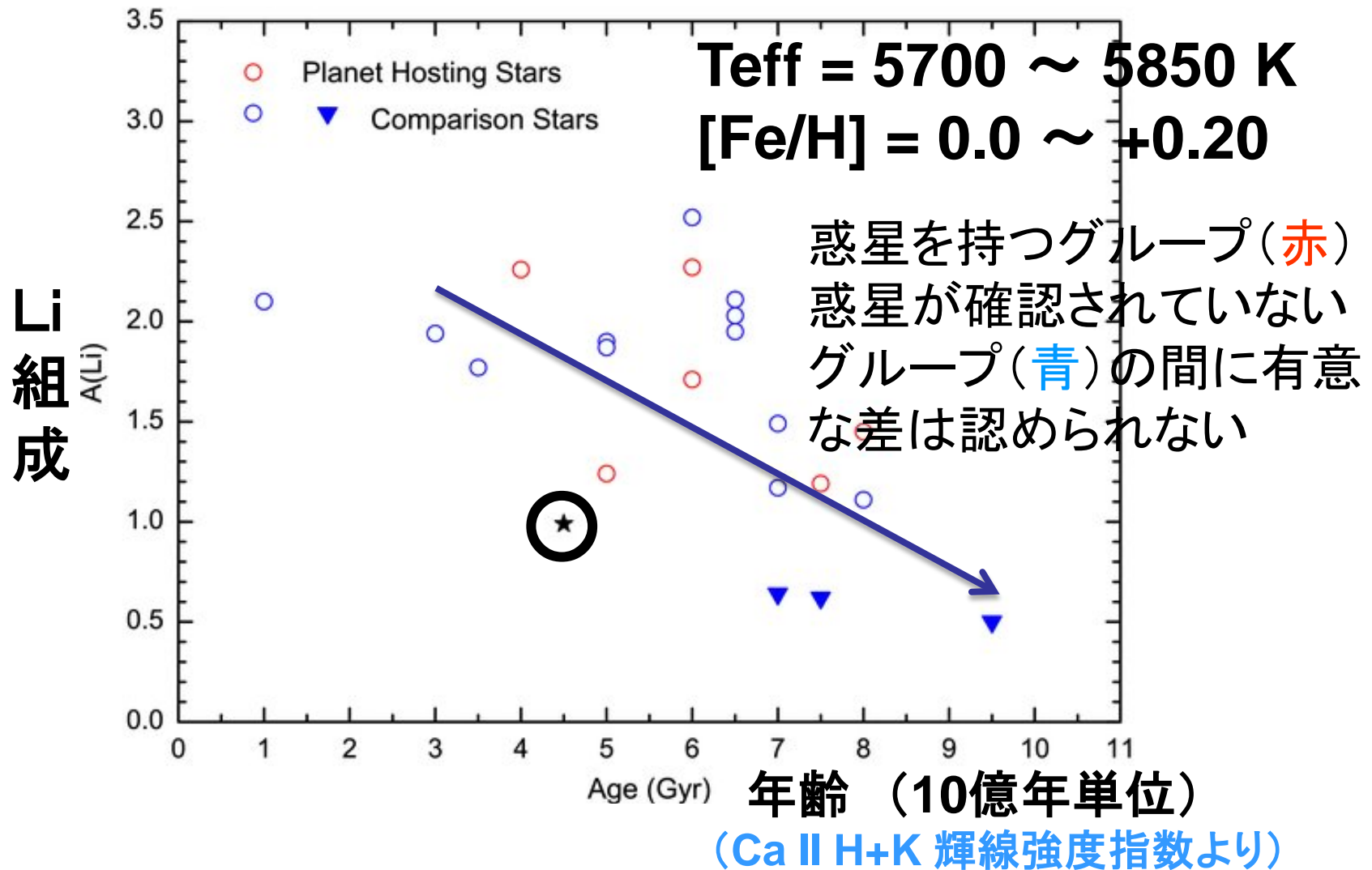


赤: 惑星が確認された星

青: 比較星 (惑星未確認)

有効温度 (K)

対象を絞ると



年齢と共に下がる傾向に太陽ものっている？

太陽は岩石惑星を形成した結果 組成異常になったのか？

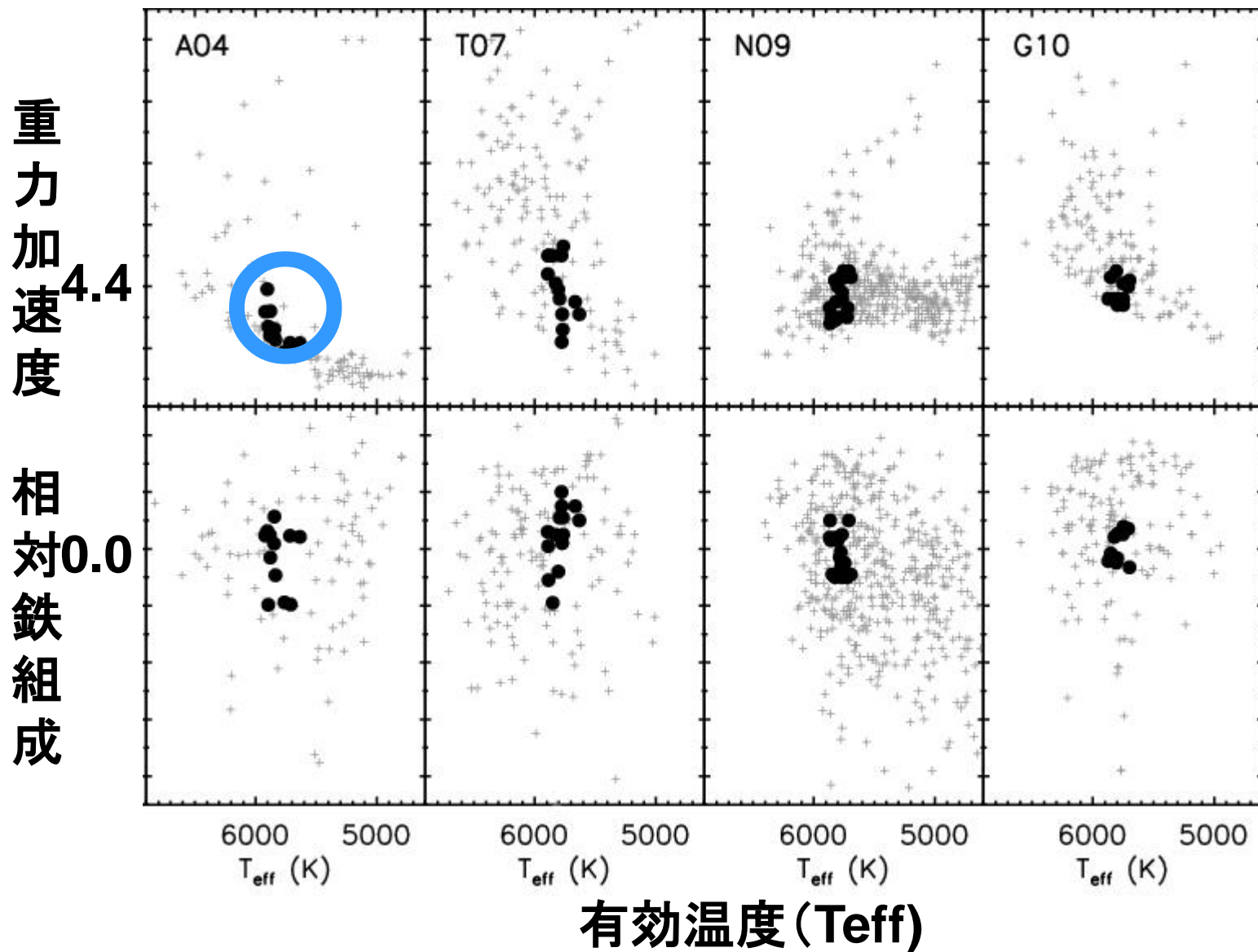
Ramirez et al. 2010, A&A, 521, A33

Samples analyzed in this paper, selection criteria for solar analogs, and number of stars selected.

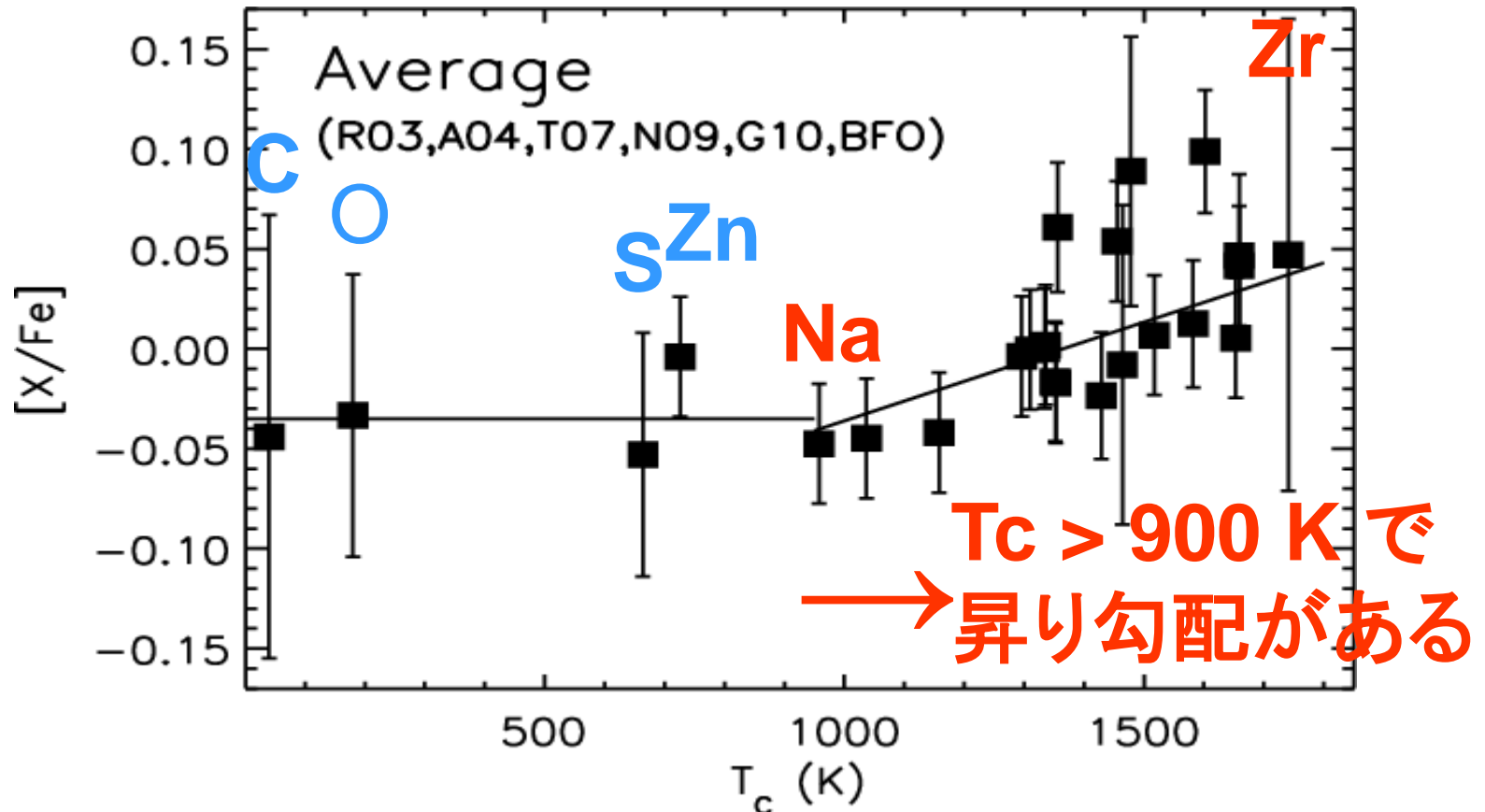
Sample	Solar analogs range	Number
	$\Delta T_{\text{eff}}/\Delta \log g/\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	of stars
Reddy et al. (2003)	$\pm 300 \text{ K}/\pm 0.2/\pm 0.2$	11
Allende Prieto et al. (2004)	$\pm 150 \text{ K}/\pm 0.2/\pm 0.2$	12
Takeda (2007)	$\pm 150 \text{ K}/\pm 0.2/\pm 0.2$	14
Neves et al. (2009)	$\pm 100 \text{ K}/\pm 0.1/\pm 0.1$	19
Gonzalez et al. (2010)	$\pm 100 \text{ K}/\pm 0.1/\pm 0.1$	11
Bensby et al. (in prep.)	$\pm 100 \text{ K}/\pm 0.1/\pm 0.1$	20

多数の星の組成解析を行った7文献から、太陽に近い星を選んで結果を統計的に研究

Solar Twin を選ぶ



Condensation Temperature (T_c) との相関



太陽では $T_c > 900$ K の元素が他の似た星より不足している傾向が見られる

なぜこのような事が？

原始太陽系において温度 900K は太陽から大体
2 AU 以内で実現する

Speculation: 太陽から近距離の空間で、岩石惑星が形成され、残ったガスが太陽に降着した結果を現在見ているのではないか？

だとすると、太陽に似た組成傾向を示す星には、**岩石惑星が存在する可能性**が高いのではないか？

Hot Jupiter を伴う星には、このような傾向は見られない。Melendez et al. 2009, ApJ, 704, L66

Hot Jupiter の存在は岩石惑星の形成を阻害した？

まとめ

1. 太陽(表面)の元素組成の決定精度の現状は、良くて $\pm 10\%$ 程度。
2. 3次元HDモデルの導入により、CNO組成は下がった。まだ決定的とは言えないようだ。このことは太陽内部構造の研究にも影響をおよぼす。
3. Li 組成異常の原因については、まだ決定打は出ていない。
4. 太陽(系)は岩石惑星を形成した結果、太陽表面に組成異常が見られるとの学説が出ている。これもまだ決定的とは言えない。

Super Earth を伴うHD160691

