

# 恒星の重元素組成と トリウム年代学

本田 敏志（京大・理・附属天文台）

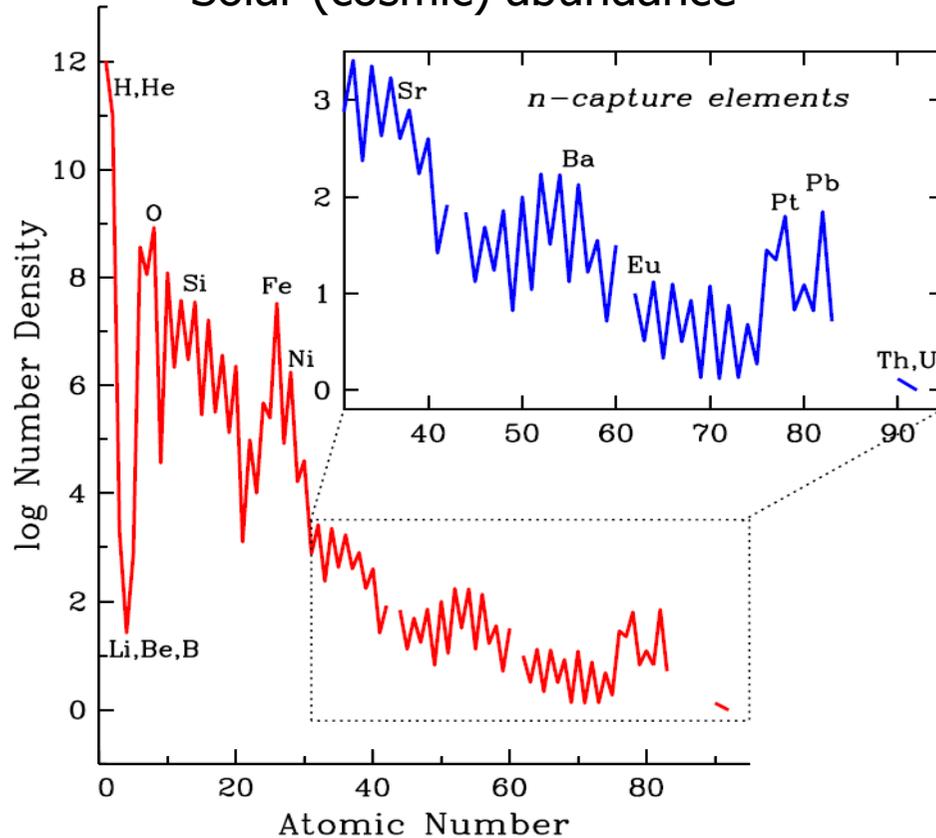
青木 和光（国立天文台）

太陽・恒星研究会 2011. 12. 26-28（東京大学）

# 重元素( $Z > 30$ )組成

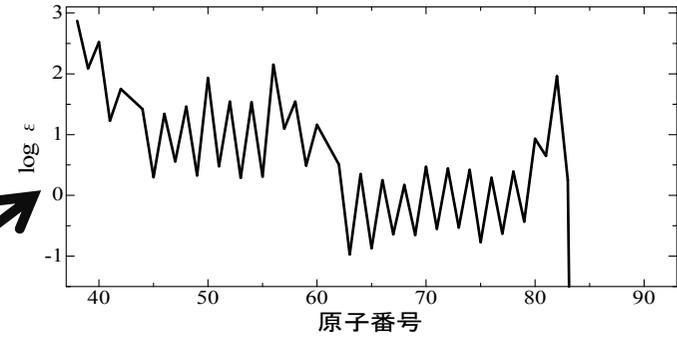
neutron-capture elements

Solar (cosmic) abundance

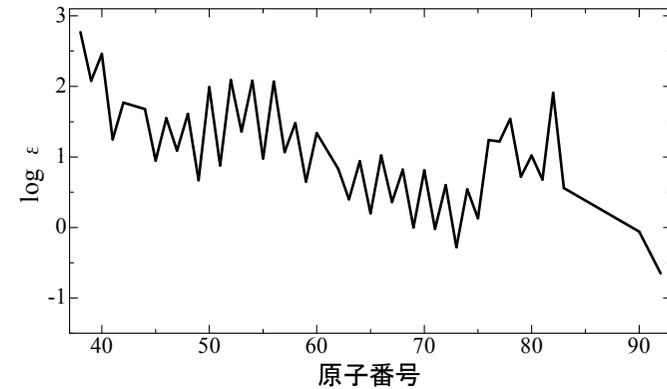


Sneden et al. 2008

太陽組成はこれらの重ね合わせ



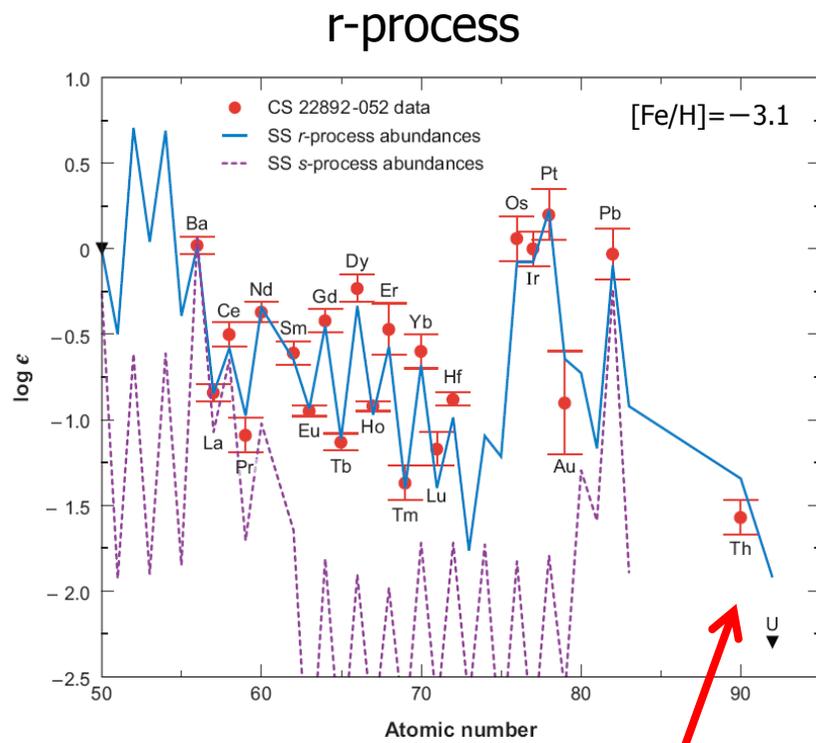
s-processで作られる成分  
AGB星起源



r-processで作られる成分  
起源は不明 (Type II SNe?)

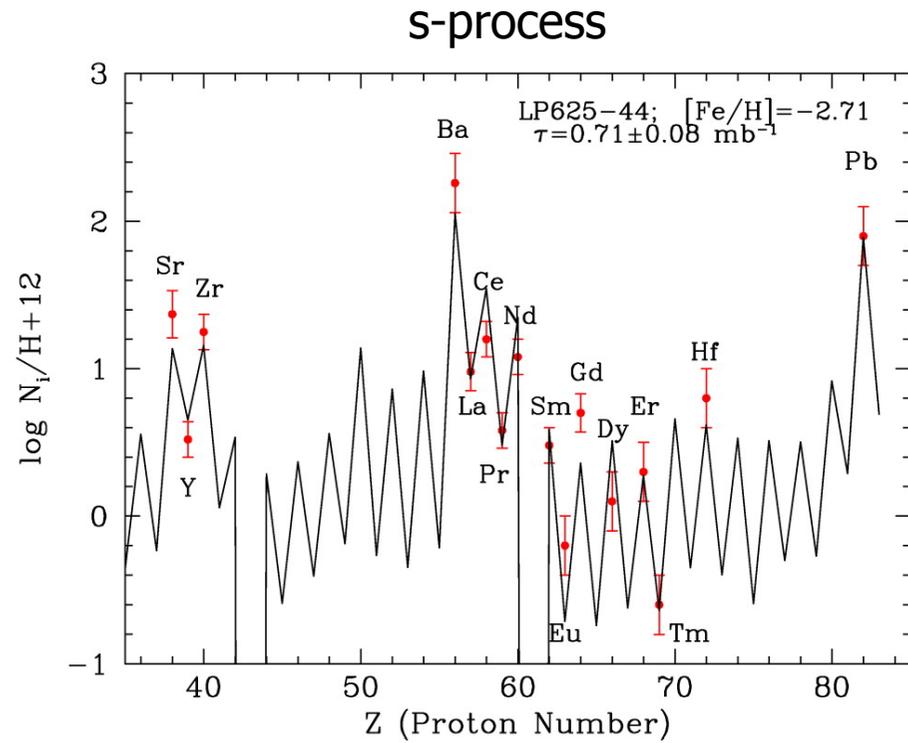
# abundance patterns of n-capture rich stars

These stars show pure r-/s- process patterns.



Sneden et al. 2003

Th, U



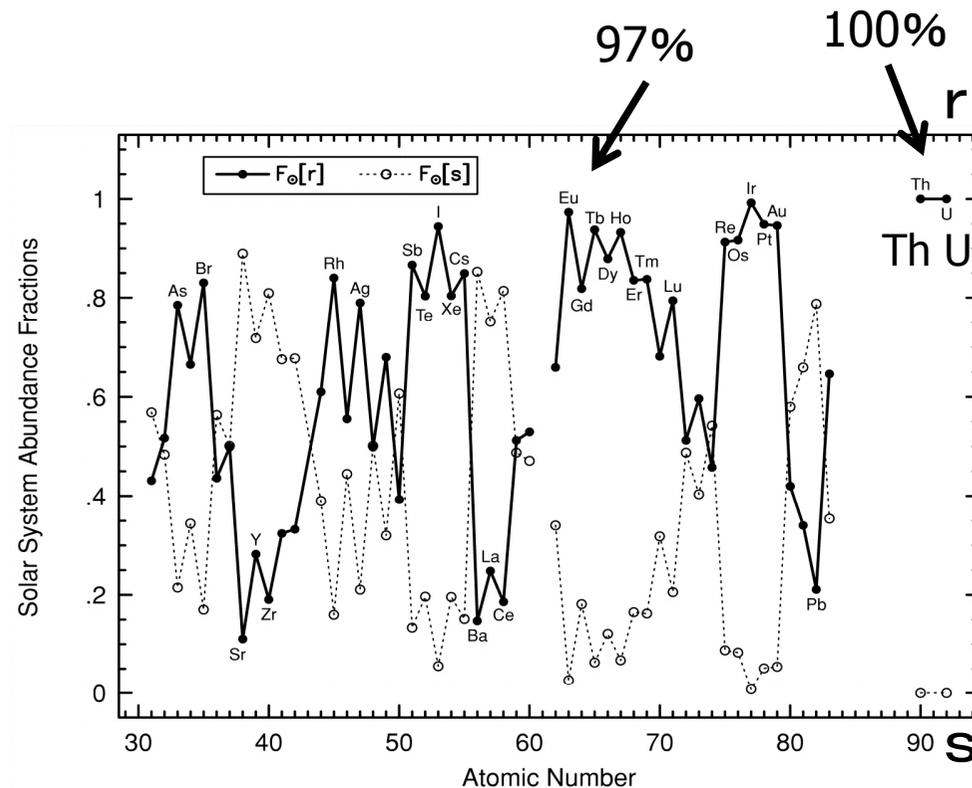
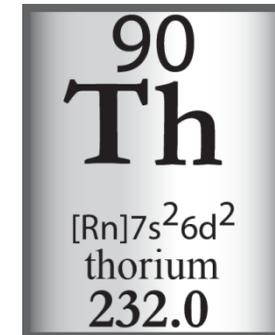
Aoki et al. 2001

星の化学組成は誕生した時のガス組成をそのまま反映している。

例外) 対流層が発達した進化した星、連星系

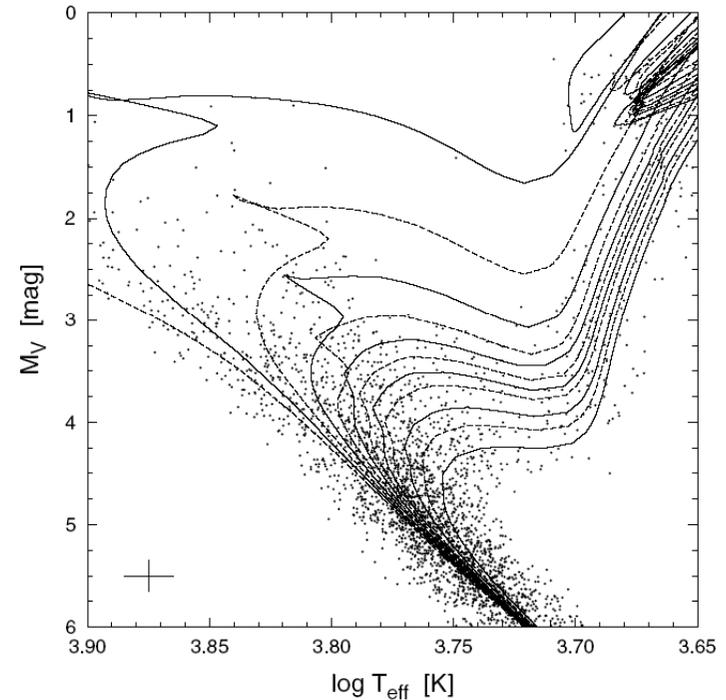
# Thorium

- rプロセスでのみ合成される。
  - sプロセスの影響無し
- 長い半減期を持つ放射性元素
  - $^{232}\text{Th}$  140.5億年
  - $^{230}\text{Th}$  7万5千年
- 年代学を用いた年齢決定が可能。

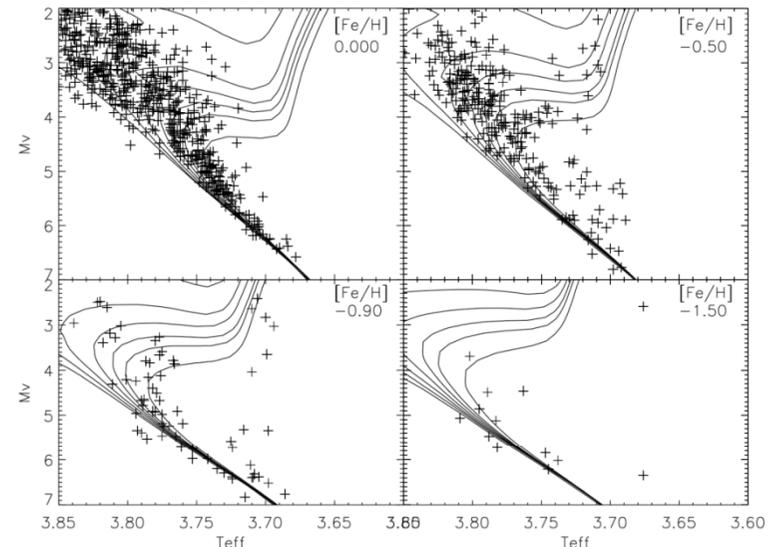


# 星の年齢

- 正確に決めるのは難しい。
- 主に進化モデルをつかったisochroneが使われる。
- 恒星進化のモデルや、距離の不定性などが問題。



Jørgensen & Lindegren 2005



Nordström et al. 2004

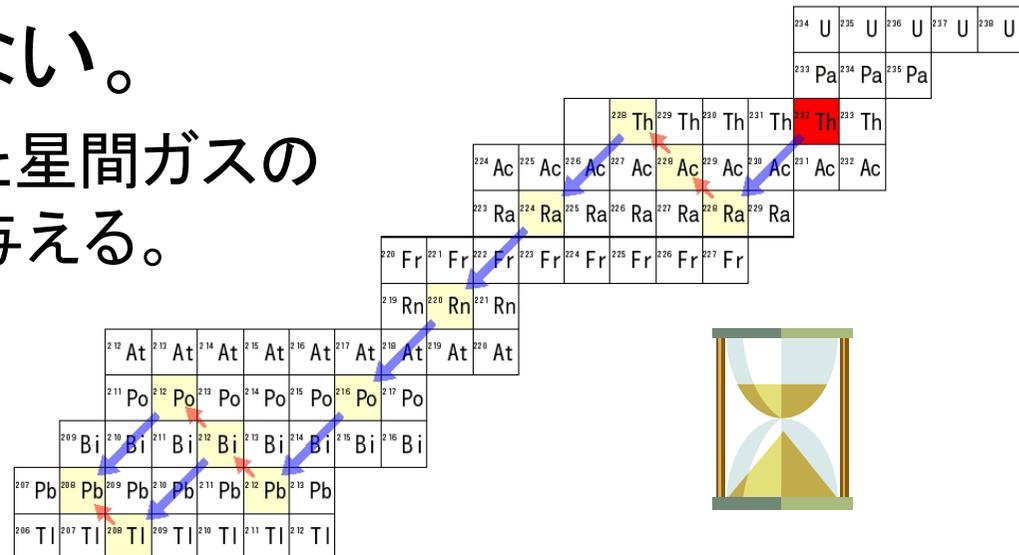
# 年代学を用いた年齢の推定

- 同じ起源の安定な元素と放射性元素の崩壊を使う方法。

$$\Delta t = 46.67[\log(\text{Th}/\text{S}_0) - \log(\text{Th}/\text{S}_{\text{now}})]$$

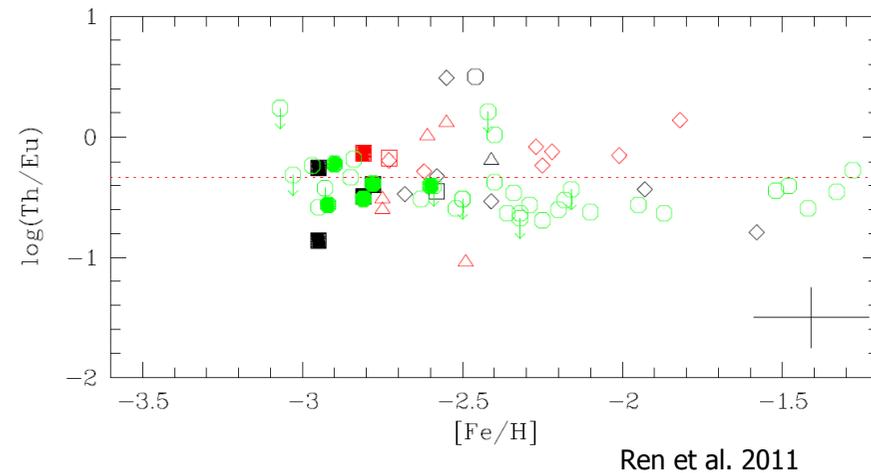
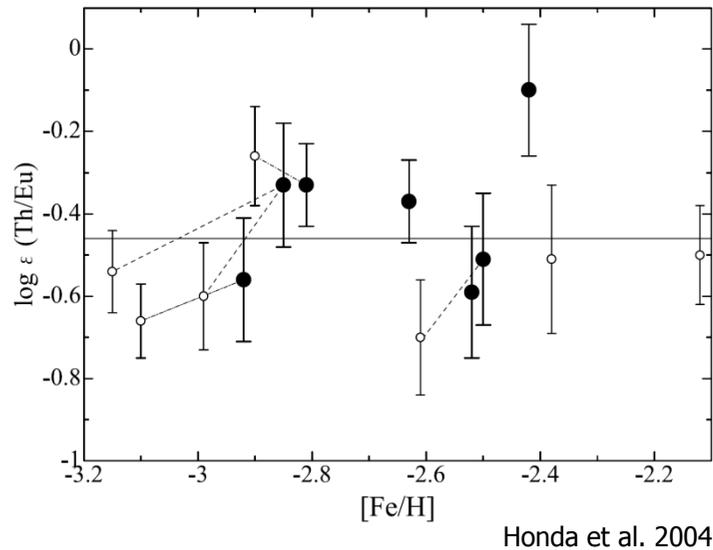
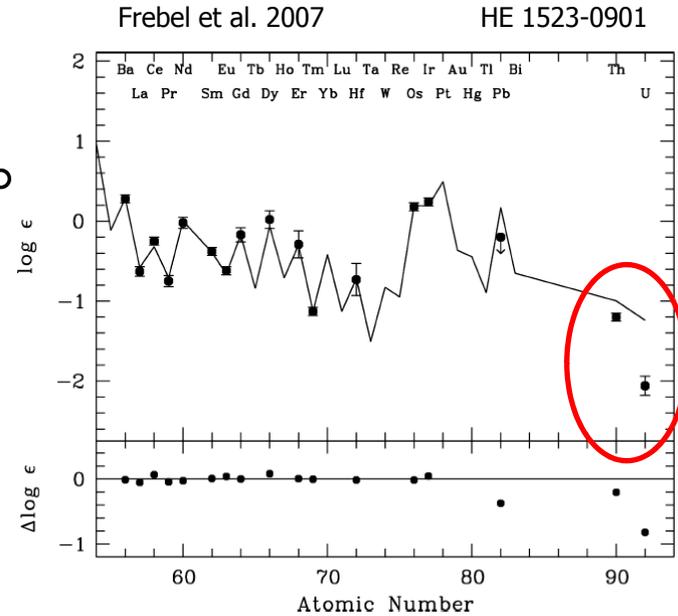
- 星の距離や進化モデルなどの不定性に依存しない。

- 星形成の元になった星間ガスの年齢に強い制限を与える。



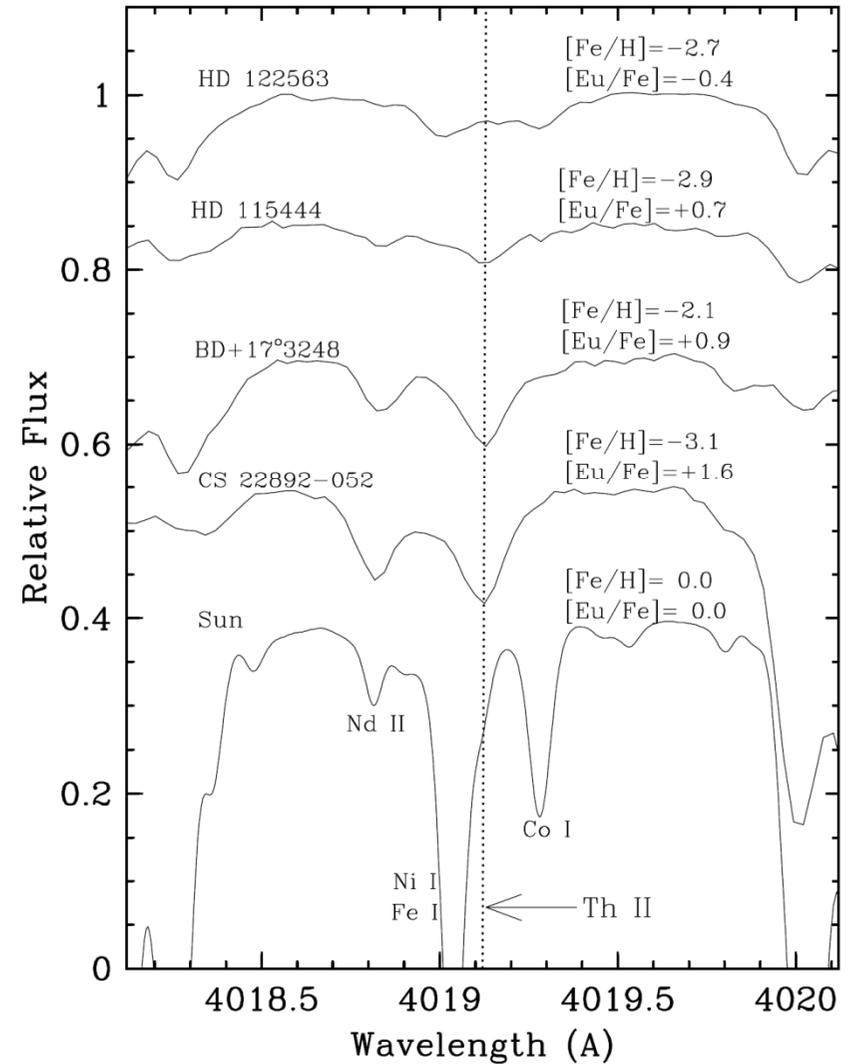
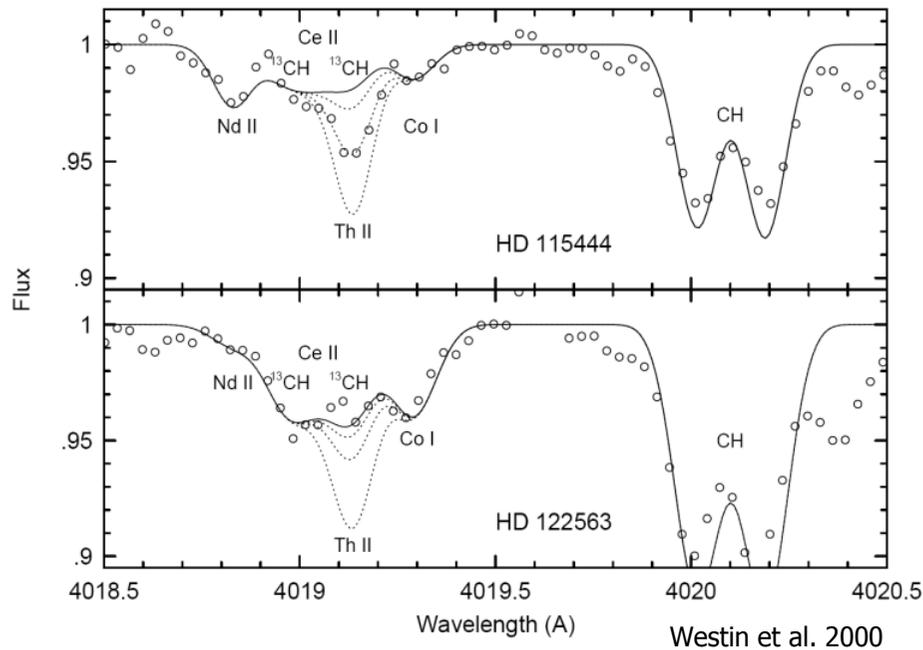
# 年代学を用いた年齢の推定

- $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ の金属欠乏星でいくつかThが観測されている。
  - Th/Euにばらつきも見られる。
- 初期値に不定性がある。
  - rプロセスの起源が不明

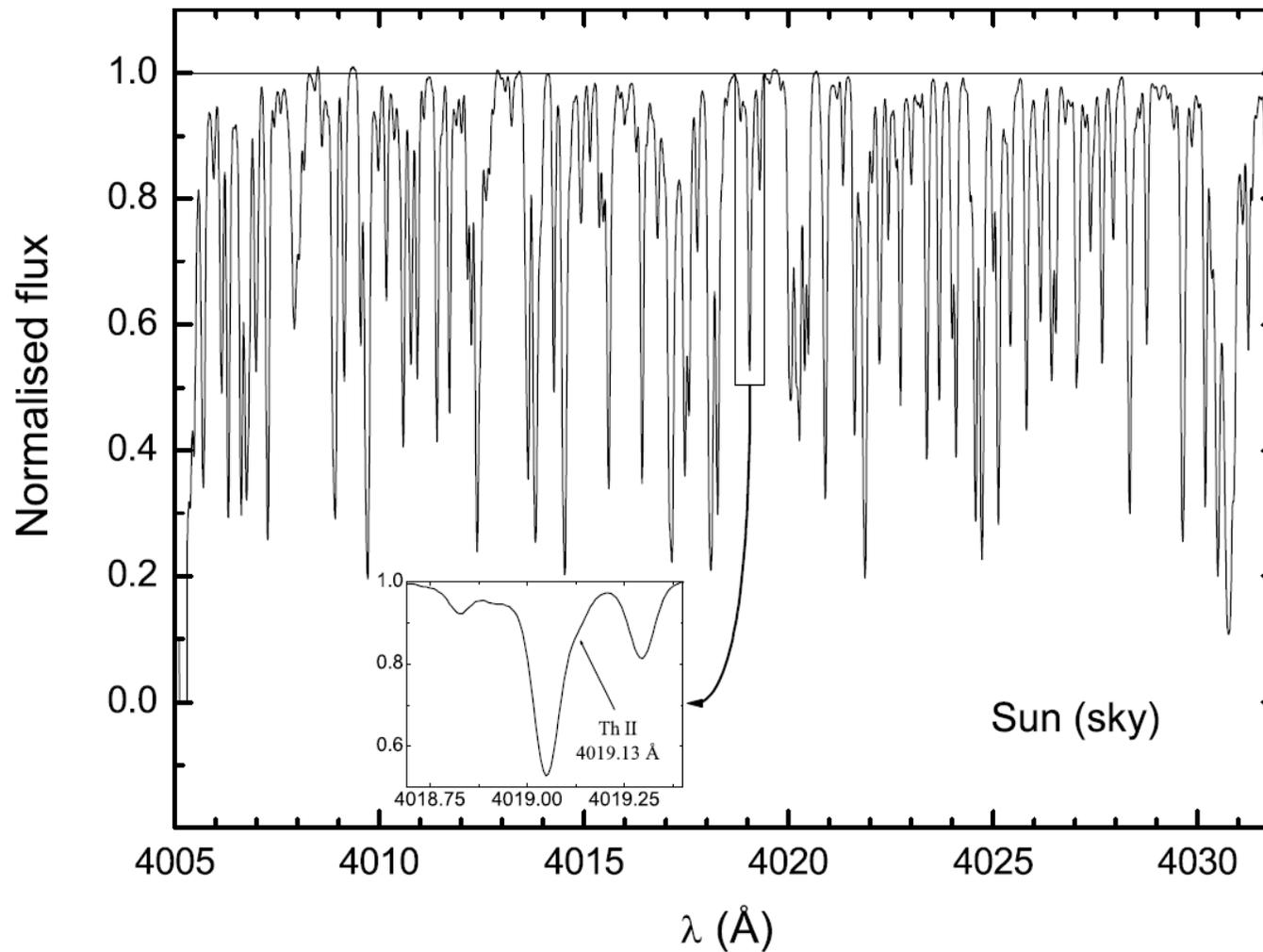


# これまでのThの観測

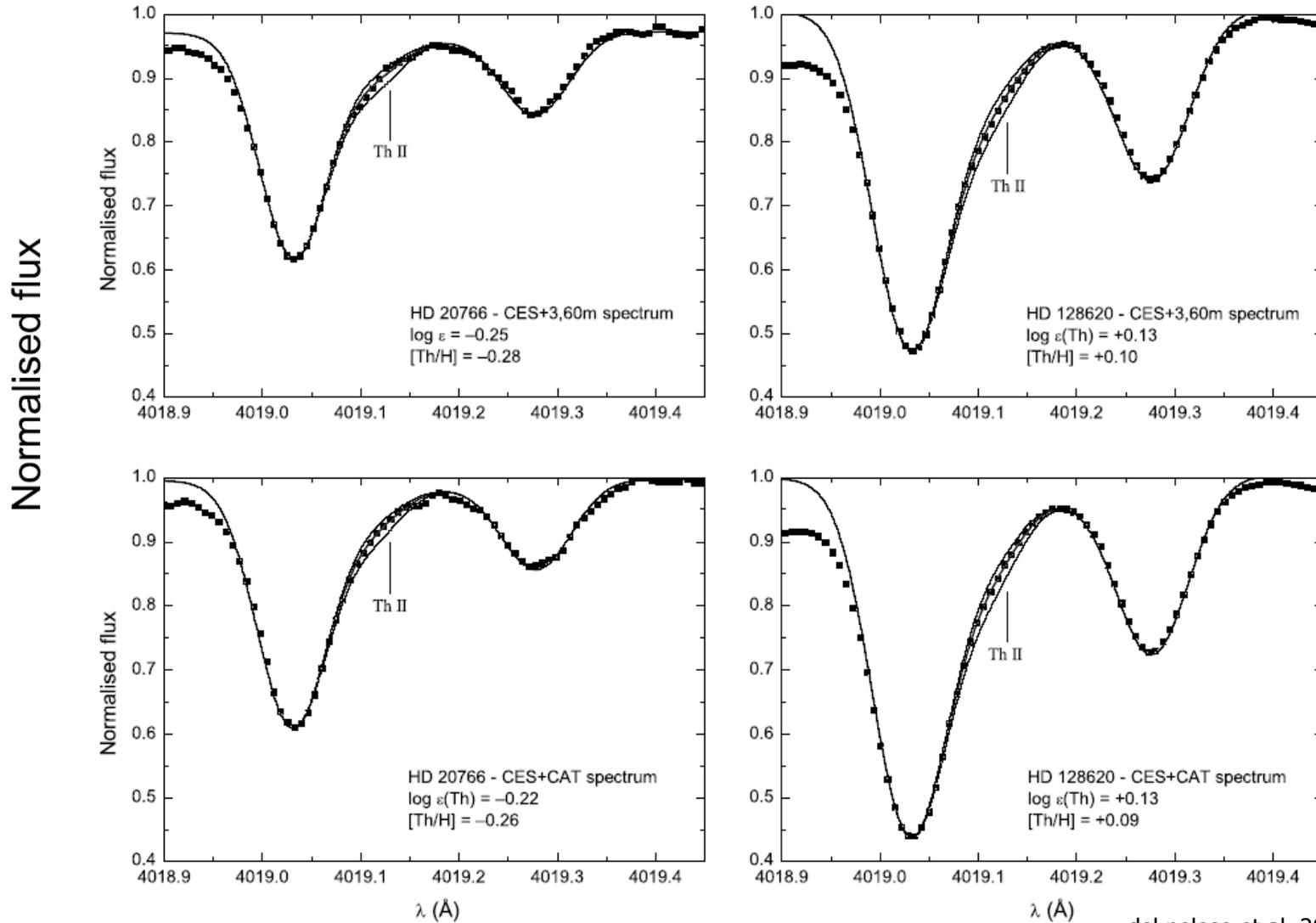
- 検出されているThのラインはほとんどが4019 Åのみ。
- ブレンド成分が強い。
  - $^{13}\text{CH}$ 、FeI、CoI、etc.
- 金属の多い星では検出が困難。



# Solar (Ganymede) spectrum in the ThII line region at 4019Å.

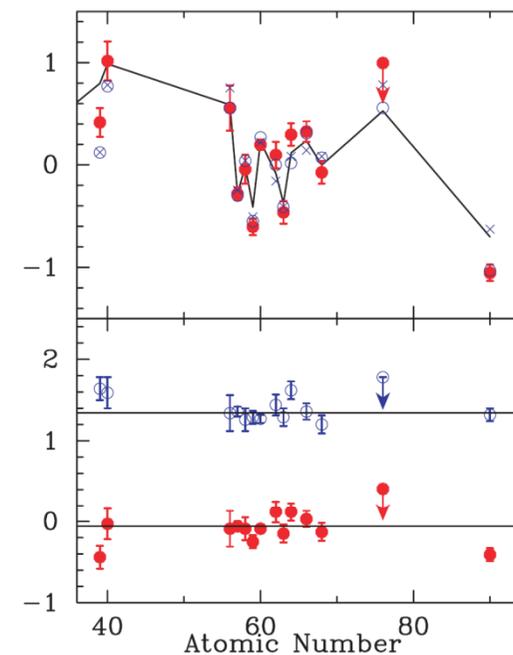
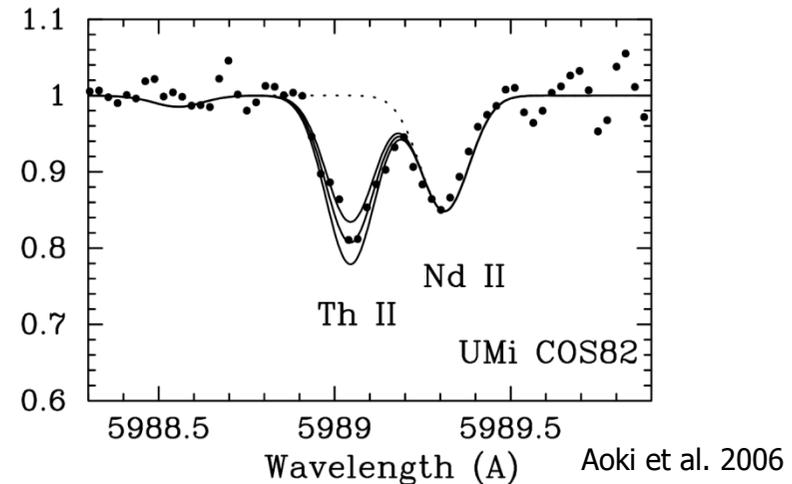


# ThII line region at 4019A.



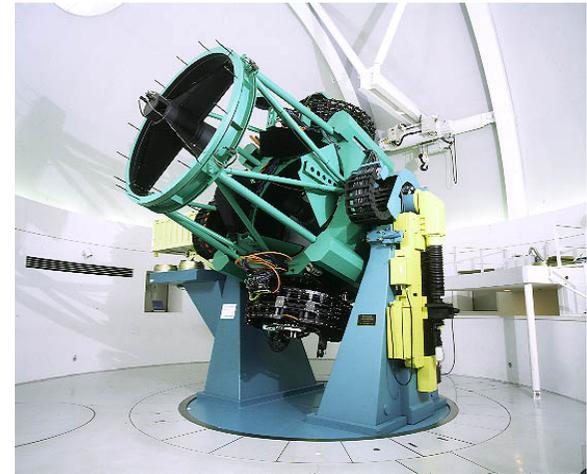
# 矮小銀河の星でThを検出

- Ursa Minor COS82
- Red giant
  - $T_{\text{eff}}=4300\text{K}$   $\log g = 0.6$
- $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ ,  
 $[\text{Eu}/\text{Fe}] = +1.49$
- ThII 5989 Åを検出
  - 他のrプロセス元素も多数検出
- このラインは4019 Åよりブレンド成分が少ない。  
(Yushchenko et al. 2005)
- 金属の比較的多い星でTh組成を得ることができる。
- 近傍のdisk星でも検出できる可能性がある。



## ThII 5989A の観測

- 明るいG,K 巨星をターゲット
  - $[Fe/H] > -1.5$
  - 金属量の多い星も含む
- 銀河の化学進化が十分進めば、星の個別のrプロセスによる影響の強さが打ち消される。
  - 初期値の不定性が無視できる可能性がある。



ぐんま天文台150cm/GAOES



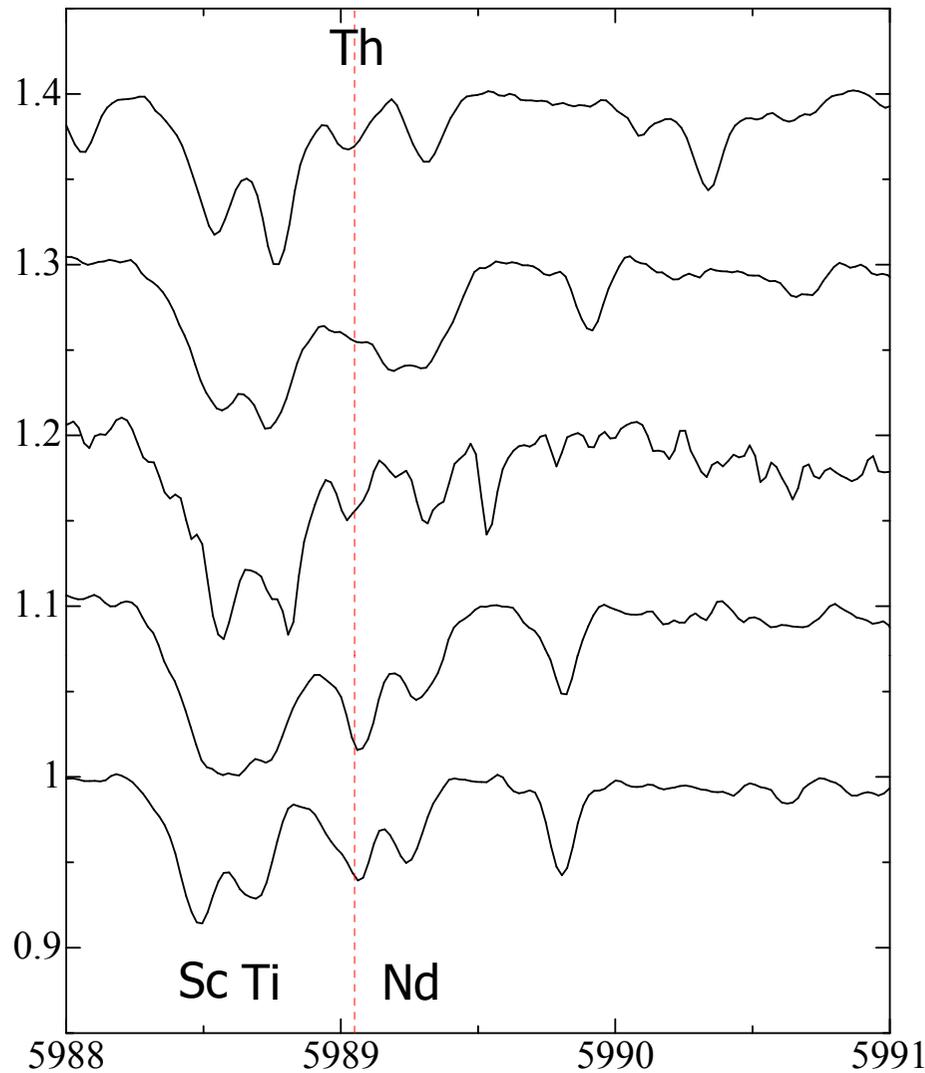
すばる/HDS

# 明るいG,K型巨星の観測

- (惑星を持つ星など)金属の多い星でのThとEuの検出が目標
  - 年代学適用の可能性を探る
- ターゲットは明るいG,K型巨星
  - 4200K ~ 5500K
- $R \sim 70,000$  or  $50,000$
- $\lambda$  5150~6950 Å
  - Th 5989、Eu 6645
- 20天体以上のスペクトルを取得
  - $+0.4 > [Fe/H] > -2.8$
- S/N: 50~270@6000 Å
  - データの質は均一ではない。

HD103036	4200	1.10	-2.04
HD165195	4235	0.80	-2.18
HD187111	4259	0.58	-1.83
HD118055	4280	1.10	-1.75
HD124897	4300	1.50	-0.47
HD165195	4471	1.11	-2.15
HD122956	4510	1.55	-1.82
HD85503	4517	2.30	+0.30
HD63791	4629	1.76	-1.63
HD8724	4688	1.49	-1.69
HD43039	4692	2.54	-0.42
HD141680	4700	3.02	-0.28
HD41597	4700	2.38	-0.54
HD54810	4703	2.48	-0.32
HD37160	4704	2.49	-0.65
HD54131	4737	2.37	-0.18
HD44007	4773	1.68	-1.89
HD18970	4791	2.40	-0.07
HD62412	4800	2.80	-0.06
HD6186	4829	2.30	-0.31
HD76294	4844	2.30	-0.11
HD35369	4852	2.44	-0.25
HD141680	4861	2.60	-0.13
HD77912	4899	1.75	-0.14
HD58367	4911	1.76	-0.14
HD111721	4940	2.40	-1.34
HD10761	4952	2.40	-0.05
HD67447	4974	2.12	-0.06
HD14770	4977	2.50	+0.01
HD145675	5309	4.50	+0.44
HD210277	5505	4.30	+0.18
HD134987	5552	4.20	+0.08
HR7373	5580	4.19	+0.37

# Th 5989 Å 付近のスペクトル



HD6186 [Fe/H]= -0.31  
T=4829、logg=2.30

HD58367 [Fe/H]= -0.14  
T=4911、logg=1.76

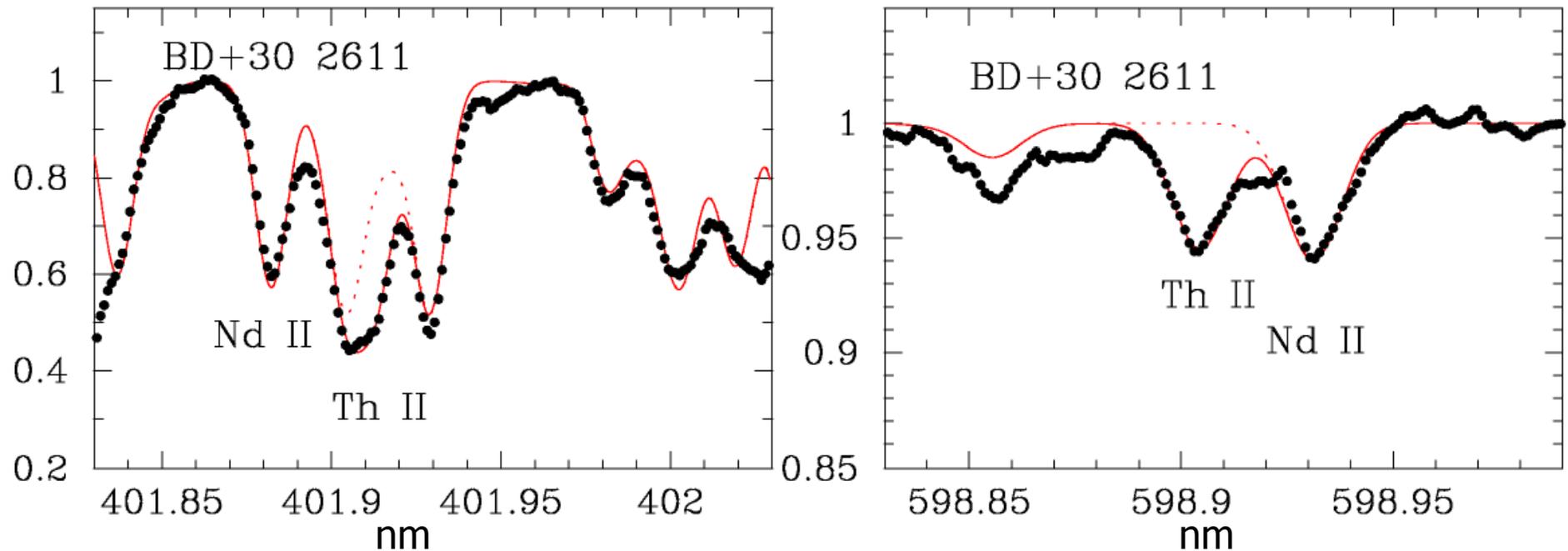
HD14770 [Fe/H]= 0.01  
T=4977、logg=2.50

HD67447 [Fe/H]= -0.06  
T=4974、logg=2.12

HD35369 [Fe/H]= -0.25  
T=4852、logg=2.44

波長(Å)

# Th 4019 vs 5989

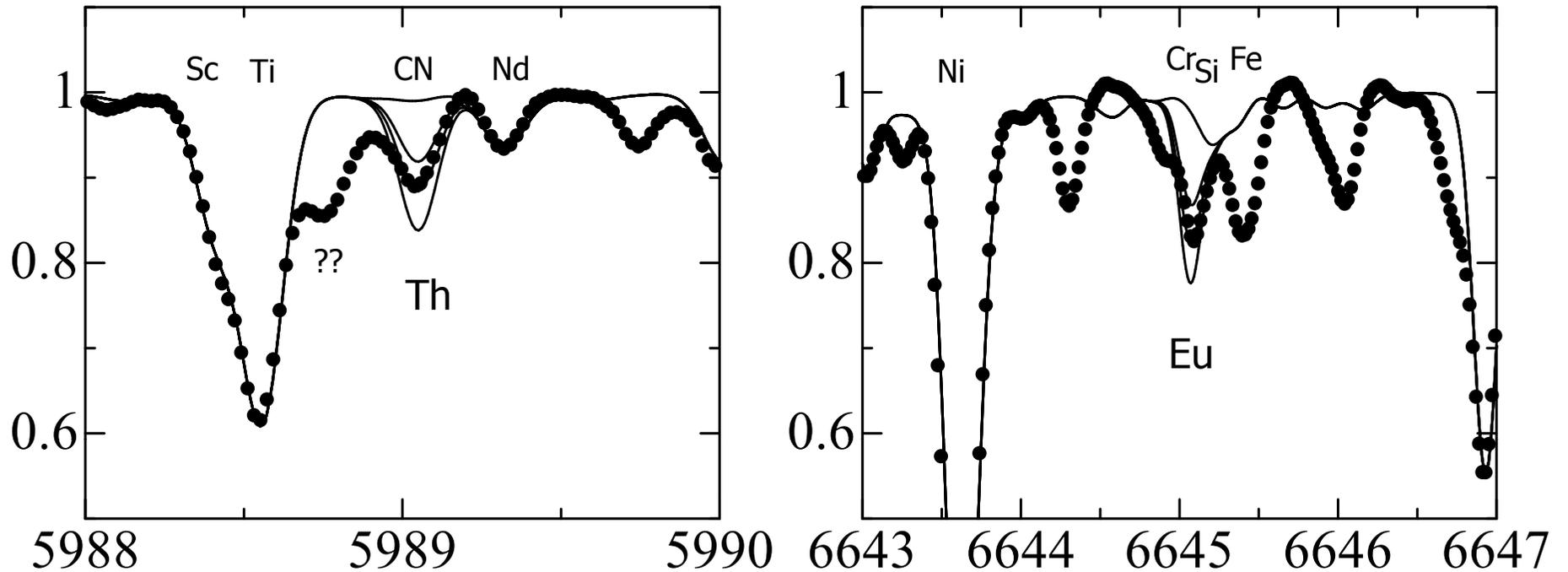


$T_{\text{eff}} = 4250$   $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.4$

4019Aの方が強いが、他のラインのブレンドが強く、不定性が大きい。

十分なS/Nのスペクトルが得られれば太陽程度の金属量を持つ星でも巨星はThの測定が可能。

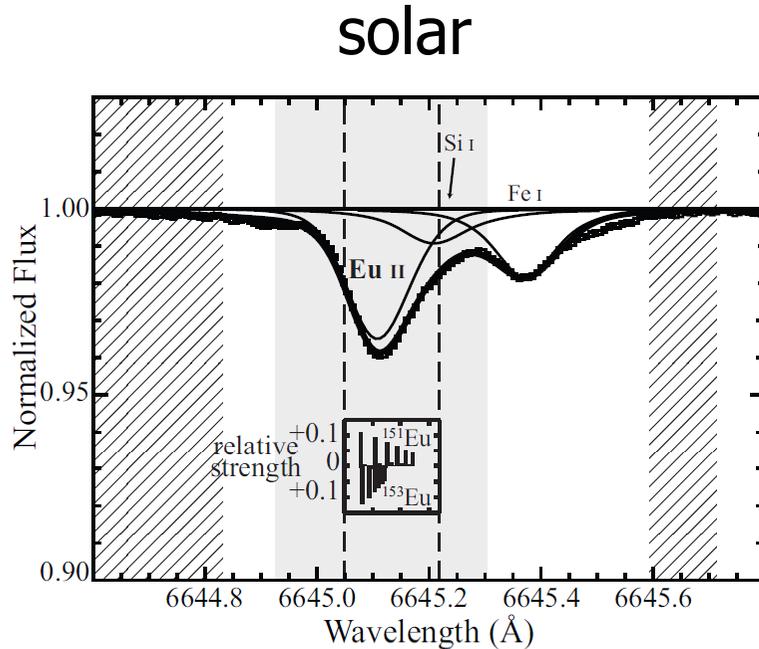
# 金属過剰星 $\mu\text{Leo}$ ( $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.3$ )



- ThよりもEuの測定が困難
- ラインブレンドの影響が大きくなる

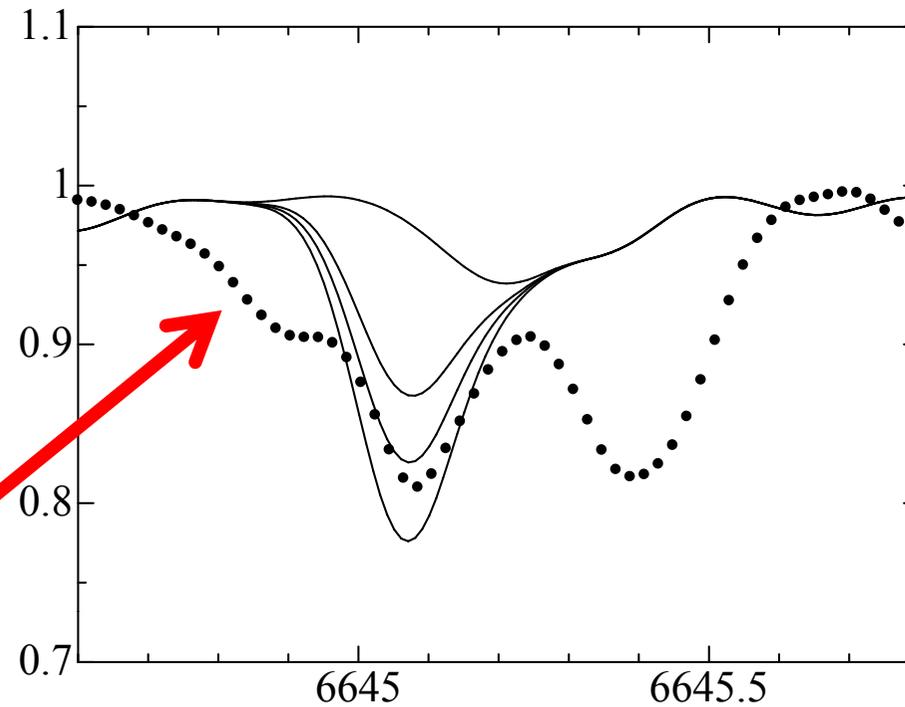
# 太陽より金属量の多い星

$\mu$  Leo [Fe/H] = +0.3



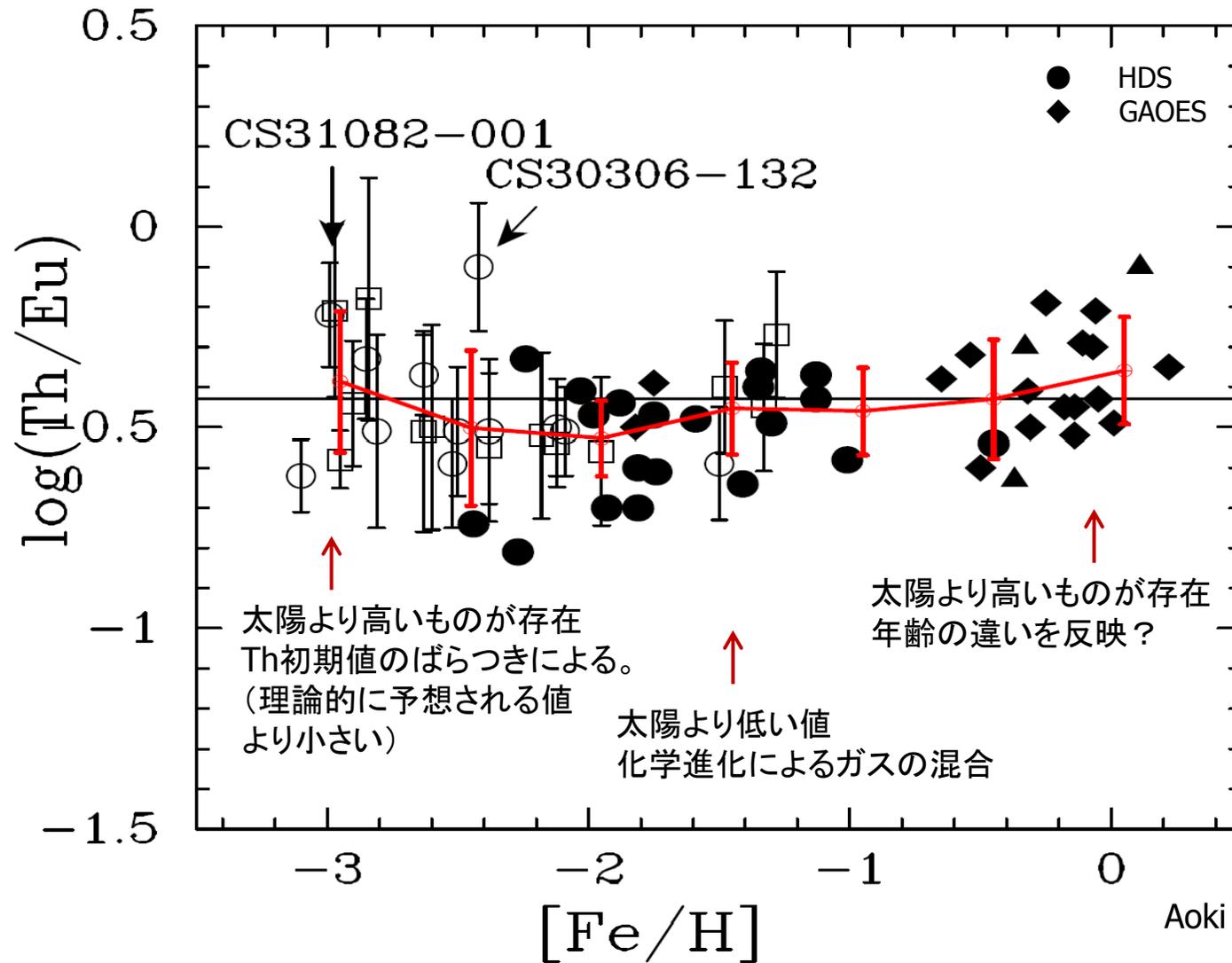
K.M.G.Peek 2009

Cr I ?



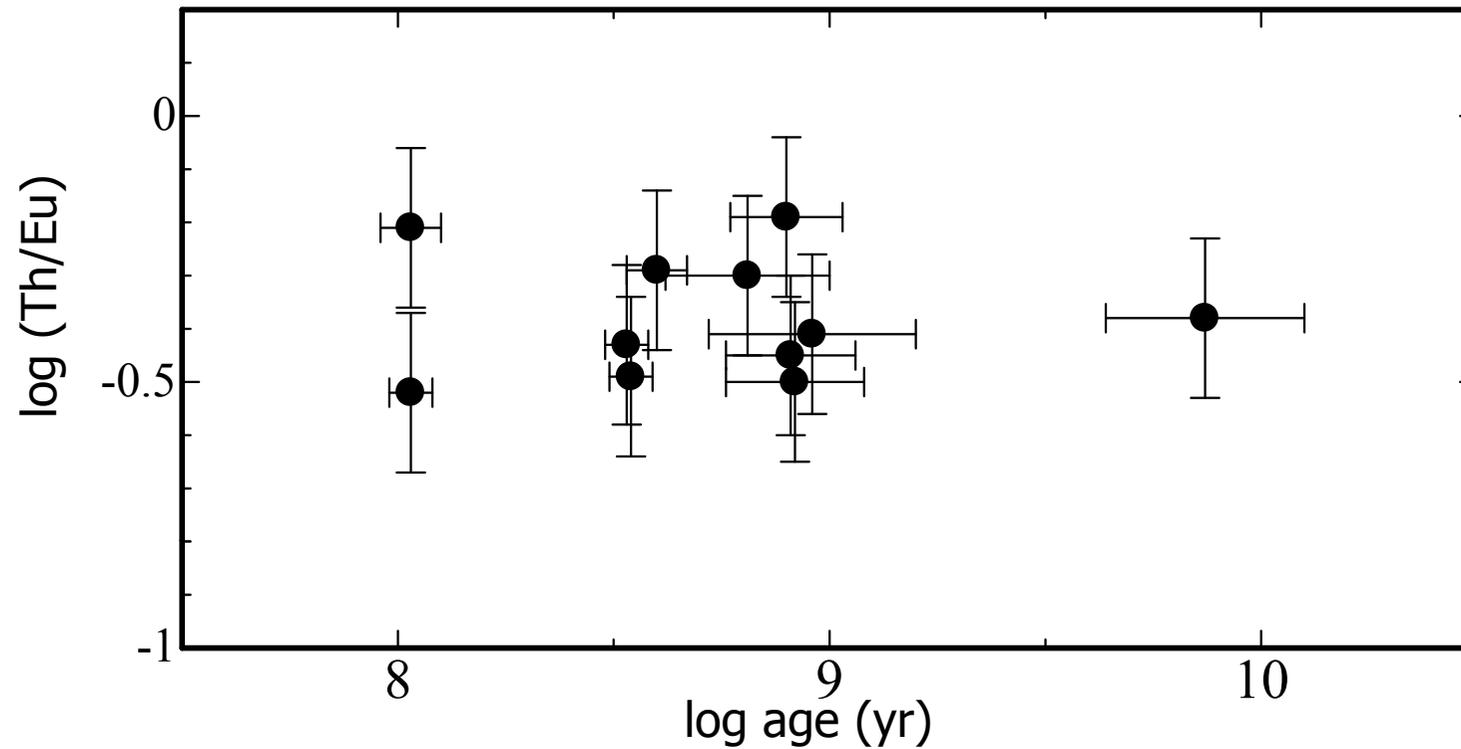
- Euの測定精度も重要となる。
- ラインブレンドの影響を詳しく調査。
  - 未知のラインが存在する可能性が高い

# Th/Eu ratio as a function of metallicity



# Th/Eu ratio as a function of age

ターゲットは巨星  
 $-0.65 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.01$

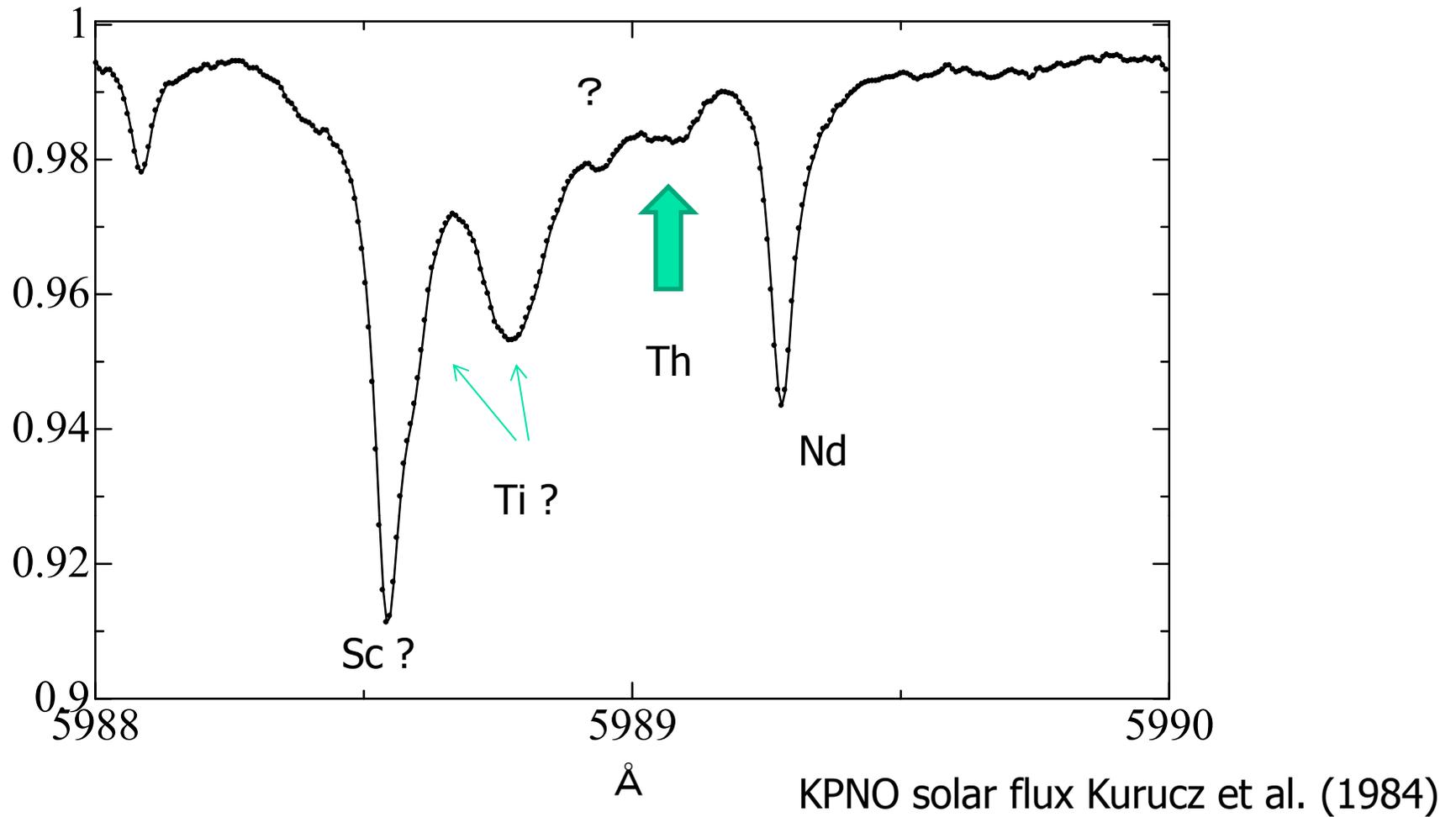


相関は見られない。

rプロセス元素合成  $\neq$  disk星の年齢 ?  
(星の化学組成)

(Takeda et al. 2008)  
(Lejeune and Schaerer's 2001  
theoretical evolutionary tracks )

# Solar spectrum in the ThII line region at 5989 Å.



高いS/Nが得られれば測定できそうだが、、、

# まとめ

- ブレンド成分の少ない5998 Å Thのラインを金属量の広い範囲で検出し、Th/Euの値を得た。
- Th/Euの値のばらつきはそれほど大きくない。
  - 理論モデルに制限を与えられる。
- $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ ではTh/Euにばらつきが見られる。
  - Rプロセス元素合成時のTh合成量の違い
- $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ ではすべて太陽より低い値を示す
  - 銀河進化による星間ガスの混合によって平均化。
- $-1 < [\text{Fe}/\text{H}]$ ではばらつきが見られる。
  - 星の年齢を反映している可能性がある。
- 年齢(下限値)を得るためには精度が不十分。
  - 0.1dex以下の誤差で得ることを目指す。
- 金属過剰な星では、未知のラインの影響が考えられる。
  - 分子線のチェック。

# 今後の課題

- Isochrone法とは独立に年齢を検証する。
  - dwarf ,若い星の観測で検証
  - 化学進化モデルとkinemaitcを考慮
  - 同じガスから誕生した星は一致するか？
- $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.3$ の星のサンプルを増やす。
  - アーカイブデータを探してみる。
- データと解析の精度を上げる
  - 誤差0.1dex以下を目指す。
- 金属過剰な星での検出
  - Super Metal Rich星の起源はよくわかっていない。
    - 古い星？ (Feltzing & Gonzalez 2001)
    - バルジ起源の星？
    - 銀河初期のガスの不均一の影響？
    - 惑星の存在？