

「太陽物理学と恒星物理学の相互交流と将来的展望」研究会  
(2011年12月26-28日:東京大学)

# 太陽類似の恒星

竹田洋一(国立天文台)

# 太陽類似星の研究で明らかにしたいこと

- 太陽は仲間の星々と比べて普通か？特殊か？
- 太陽とそっくりの星はあるのか？

恒星進化論では①初期質量、②初期角運動量、③初期化学組成、④年齢、の4つのパラメータで恒星の性質は決まるとされる

従って、太陽とあらゆる面から見て全くうり二つの星を見出すことができればそれは太陽と同じ初期条件で生まれてこれまで進化した星と見てよいのではないか

もし(SETIなど)宇宙における我々の仲間を探そうという企てをするならば、そのような星が候補としてふさわしかろう

因みに1960年のDrake率いるOzma Projectのターゲットは $\tau$  Cet (G8V)と $\epsilon$  Eri (K2V)で太陽とはちょっと異なるタイプの星だった

# 太陽類似の星を選び出す 手法の色々

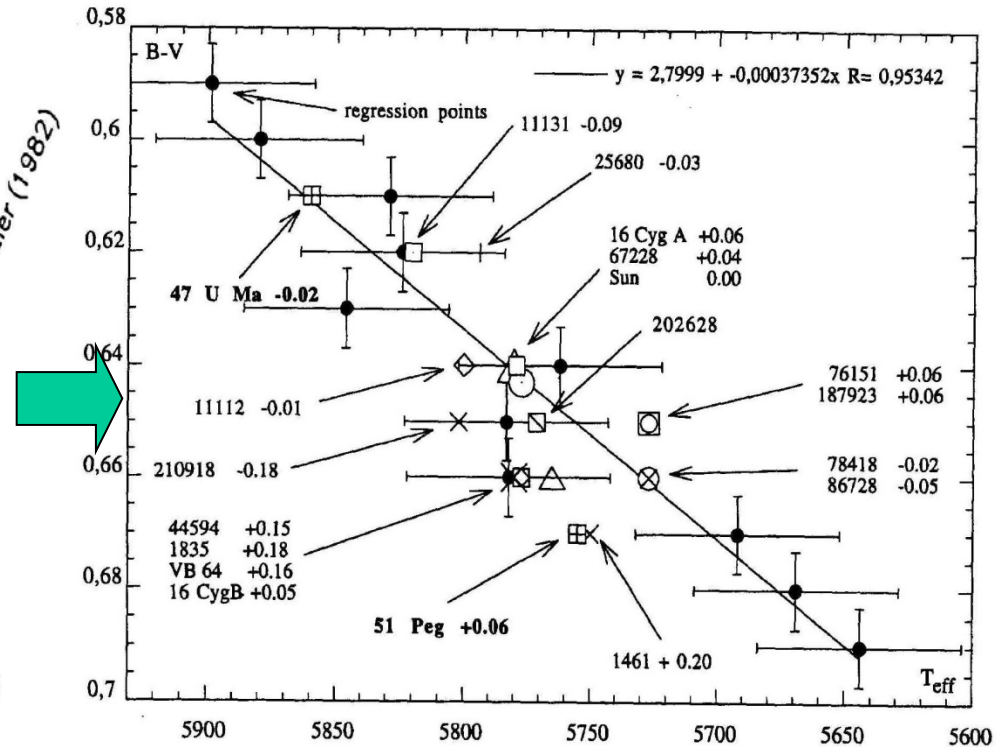
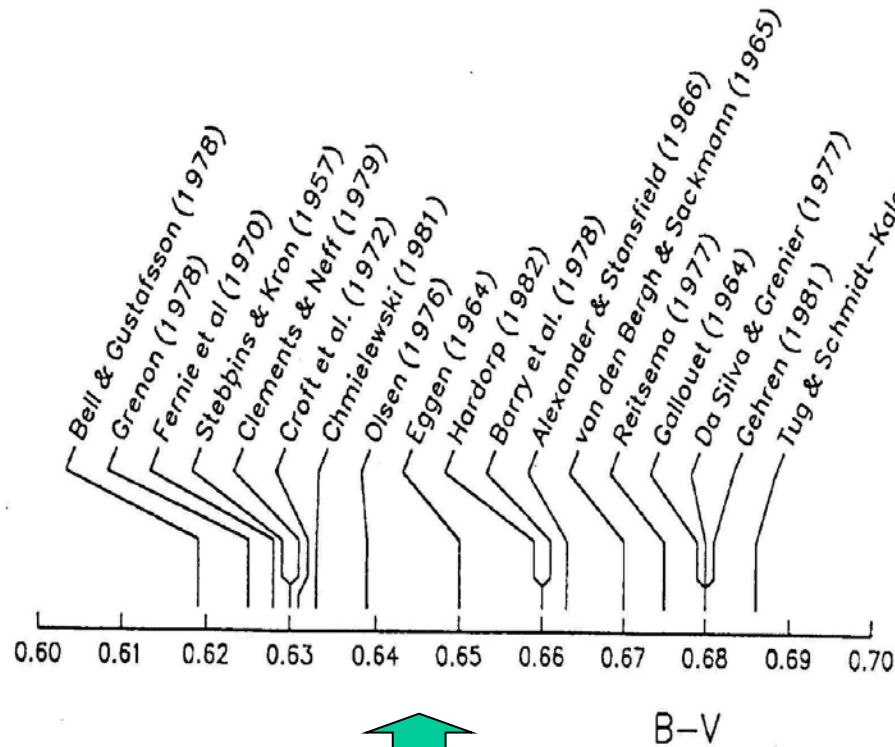
# 太陽類似恒星とは？

- この分野の言葉遣いも人によって色々違っていて混乱しているが一般的に言って次のような大ざっぱな感じをもっておけばよからう
  - solar-type star: 一般のF,G,K型の星
  - solar-analog star: 早期G型主系列星
  - solar-twin: G2V型の太陽に色んな点で十分類似した星
  - real solar-twin: クローンの的に太陽に酷似した星
- 因みにCayrel de Strobel (1996)のレビューでは以下のように定義している
  - solar analog → 測光的に太陽に類似した星
  - solar twin → 恒星パラメータ(質量、有効温度、金属量、etc.)が本質的に太陽と同一と認められる星

# 太陽類似の星を検出する方法の色々

- 測光的手法(伝統的なもの)
  - カラーと絶対等級の似通ったものという基準
- 分光学的手法(最近の主流)
  - 単純にスペクトルが太陽にそっくりなものという基準
  - ちゃんとスペクトルを解析して得られた恒星パラメータが太陽と似ているものという基準
- 星震学的手法(今後の発展が期待される)
  - 高精度視線速度観測に基づきパワースペクトルの成分を解析して恒星パラメータを決定しそれが太陽と似ているものという基準

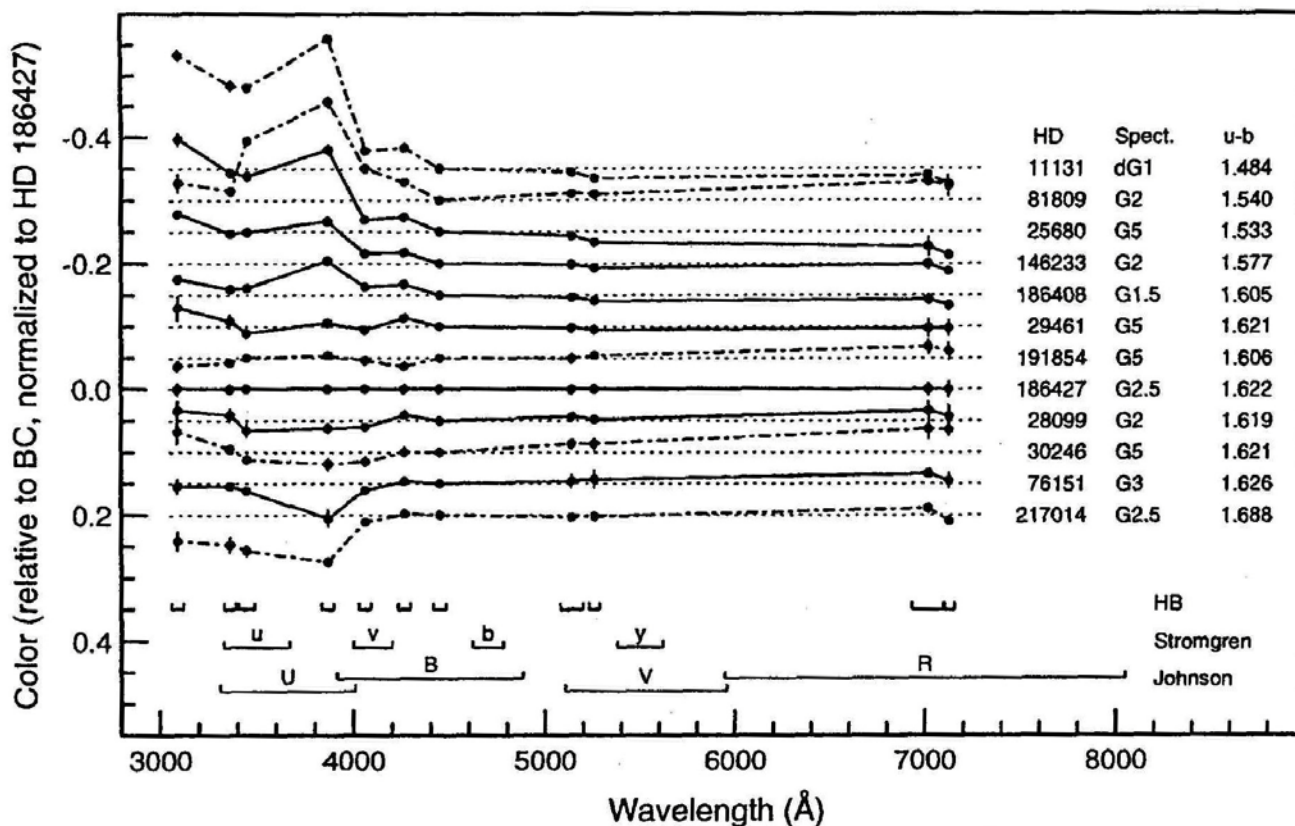
# 測光にもとづく伝統的やりかた



太陽のカラーもこれまでさんざん議論がなされてきたが、大体**B-V ~ 0.64 - 0.65**というところになっている

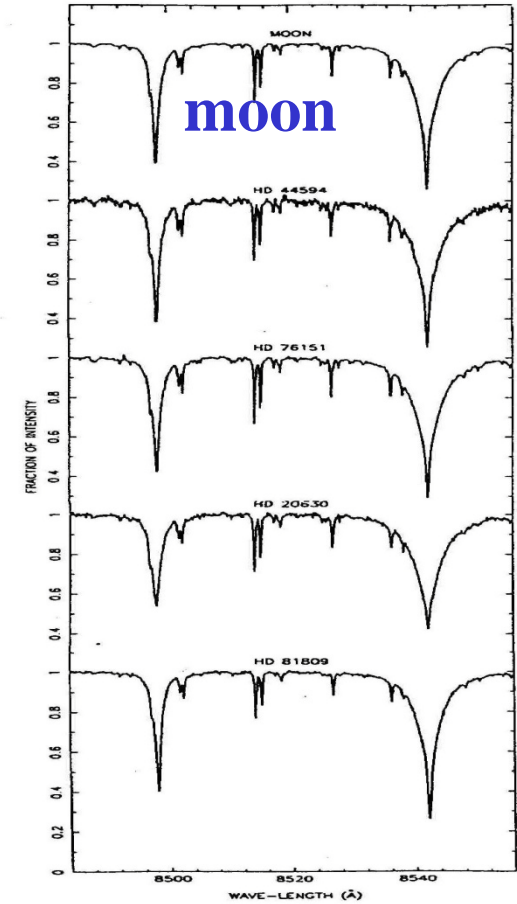
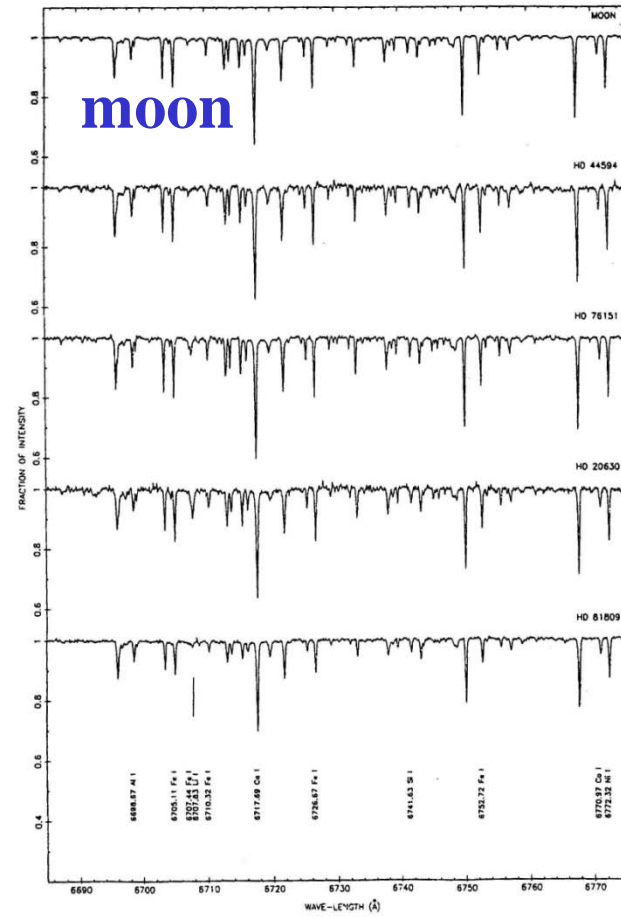
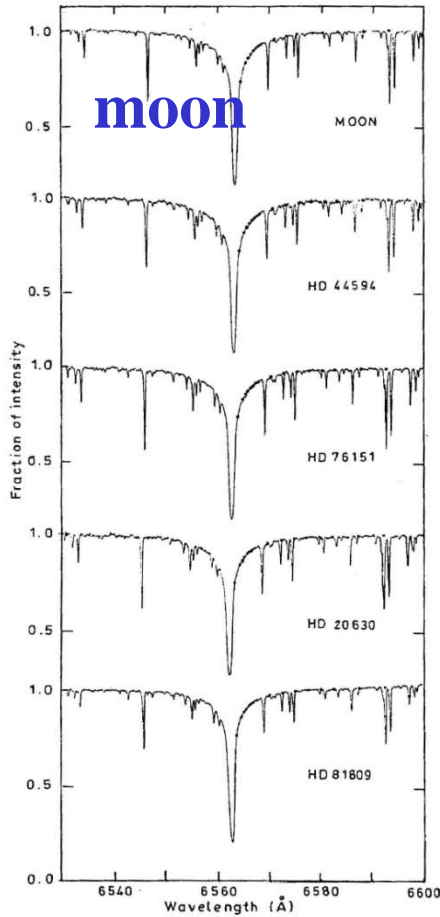
カラーが太陽と非常に近い星を選び出す、というシンプルで正統的な手法 (solar analogを選びだすには有効だが solar twinを見いだすには精度不足)

# しかしB-Vが一致しても必ずしも全波長域のSEDの形が合うとは限らない



特にUVのフラックスはパラメータへの感受性が大きい上に恒星の彩層活動に大きく影響される

# 高分散スペクトルにもとづく分光学的アプローチ (スペクトルの極力似ているものを探す)



見た目だけの主観でなく、 $\chi^2$ フィットなどを用いる客観的な数値的テクニックも適用されているが、類似の決定的な判断をするのはスペクトル線の定量解析が必要



# 分光学的パラメータ決定に基づく手法

我々が用いているもの: 太陽との類似度の定量的な判断には最適

## 普通行われている大気パラメータの分光学的決定法

- 鉄 (Fe I と Fe II) のラインを用いて大気の基本パラメータ  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $\xi$ ,  $A(\text{Fe})$  を以下の三条件を満たすとの要請で決める
  - ① 出した組成が励起ポテンシャルによらない (励起平衡)
  - ② 中性原子線と電離原子線から出した組成平均が一致する (電離平衡)
  - ③ 各ラインから出した組成が強度によらない
- 用いるラインのセットの違いなどにより  $T_{\text{eff}}$  で 50 度程度の絶対誤差は不可避

## これを二星間の相対解析に特化して応用した手法 (Takeda 2005)

二つの星 p, q があった場合  $\Delta A(\text{Fe}) = A(\text{Fe})(p) - A(\text{Fe})(q)$

$\Delta T_{\text{eff}} = T_{\text{eff}}(p) - T_{\text{eff}}(q)$ ,  $\Delta \log g = \log g(p) - \log g(q)$ ,  $\Delta \xi = \xi(p) - \xi(q)$  を求める

問題が全て差分の物理量で定式化され、両星のパラメータの相対的な差が高精度で決定できる。差分解析ゆえ散らばりも際だって減少する

$T_{\text{eff}}$  で  $\sim 10\text{K}$ ,  $A(\text{Fe})$  で百分の一 dex レベルの相対精度も十分視野に入る

星 q を太陽として  $\Delta A(\text{Fe})$ ,  $\Delta T_{\text{eff}}$ ,  $\Delta \log g$ ,  $\Delta \xi$  のいずれもほとんど 0 に近い星があればそれは solar twin と見てよい

# 将来的には星震学的手法も有望

恒星の非動径振動は  $\xi_{nlm}(r, \theta, \phi, t) = \xi_{nl}(r)Y_l^m(\theta, \phi)e^{-i\omega(n,l,m)t}$  で表される

$n$ は中心から表面までの節の数で、太陽型星では $\sim 20$

$l$ は周囲の節の数で、表面分解不能の星の場合観測できるのはせいぜい0,1,2

高精度視線速度観測をしてそのパワースペクトルを出てくる振動数ピークの間隔を調べれば、モデルと比べることにより恒星パラメータや内部の情報が得られる。[特に重要な量は $\Delta\nu_0$  (large separation)と $\delta\nu_{n,l}$  (small separation) ]

$\Delta\nu_0 = \left( 2 \int_0^{R_*} \frac{dr}{c_s} \right)^{-1}$  の関係式より $\Delta\nu_0$  は星の内部の音速が関わるので

$\Delta\nu_0 \cong 135 \left( \frac{M_*}{R_*^3} \right)^{1/2} \mu\text{Hz}$  のように(平均密度から)質量と半径という基本パラメータが観測的に決定できる

一方 $\delta\nu_{n,l}$  (small separation)は

$$\delta\nu_{n,l} = \Delta\nu_0 \frac{(l+1)}{2\pi^2\nu_{nl}} \int_0^{R_*} \frac{dc_s}{dr} \frac{dr}{r}$$

であるから内部の音速の勾配、つまり平均分子量など内部核燃焼コアの状態のことがわかり、ひいては恒星の年齢などの情報も得られる

このように星震学でパラメータを決定し、日震学的に確立されている太陽のパラメータと一致するという条件で太陽類似の星を選び出す

# 明るい太陽型星では振動も検出されている

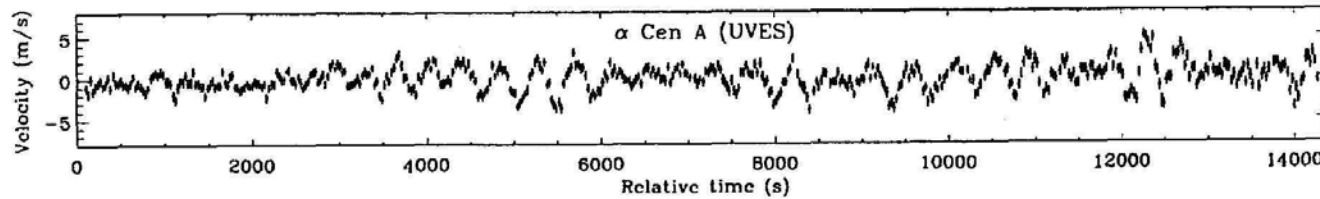


Fig. 37. The time series of observed radial velocity variations due to  $p$ -mode oscillations in  $\alpha$  Cen A (from Butler et al. 2004)

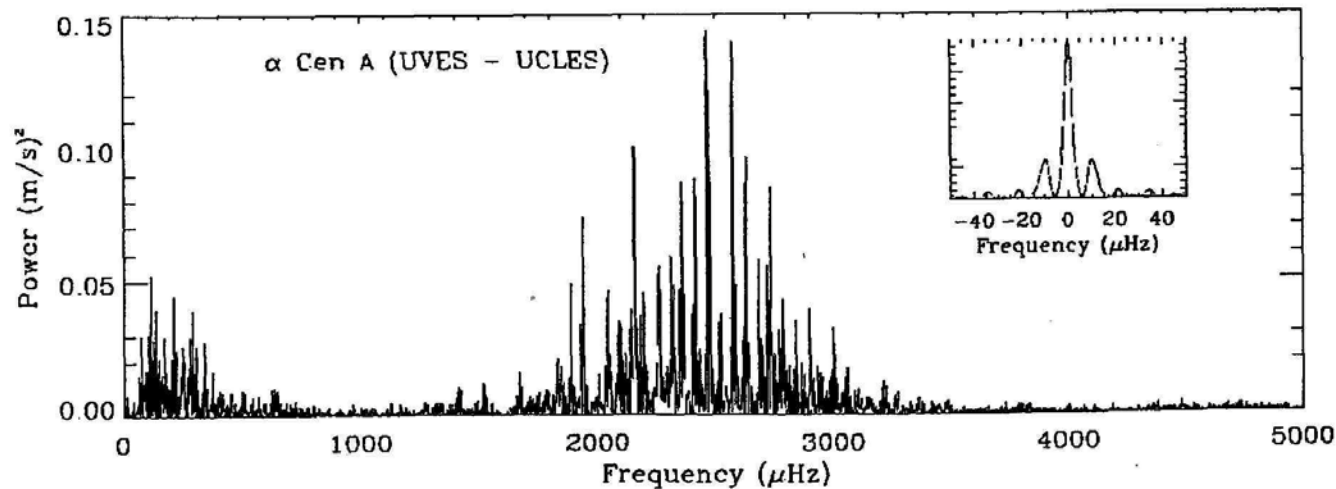
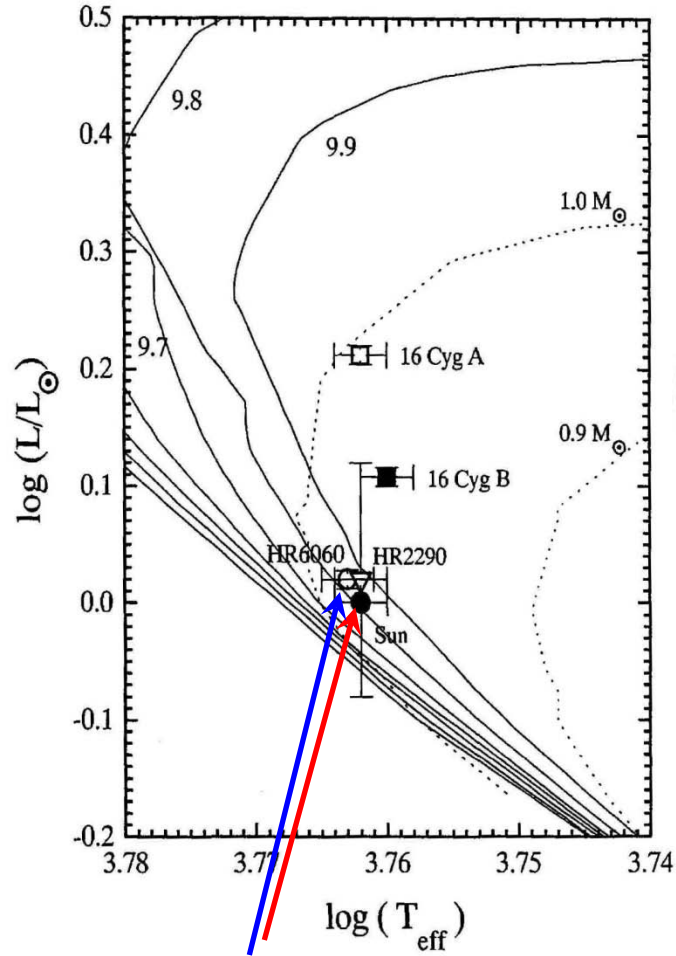


Fig. 38. Power spectrum of the time series of low-amplitude Doppler variations exhibited in Fig. 37 for  $\alpha$  Cen A (from Butler et al. 2004)

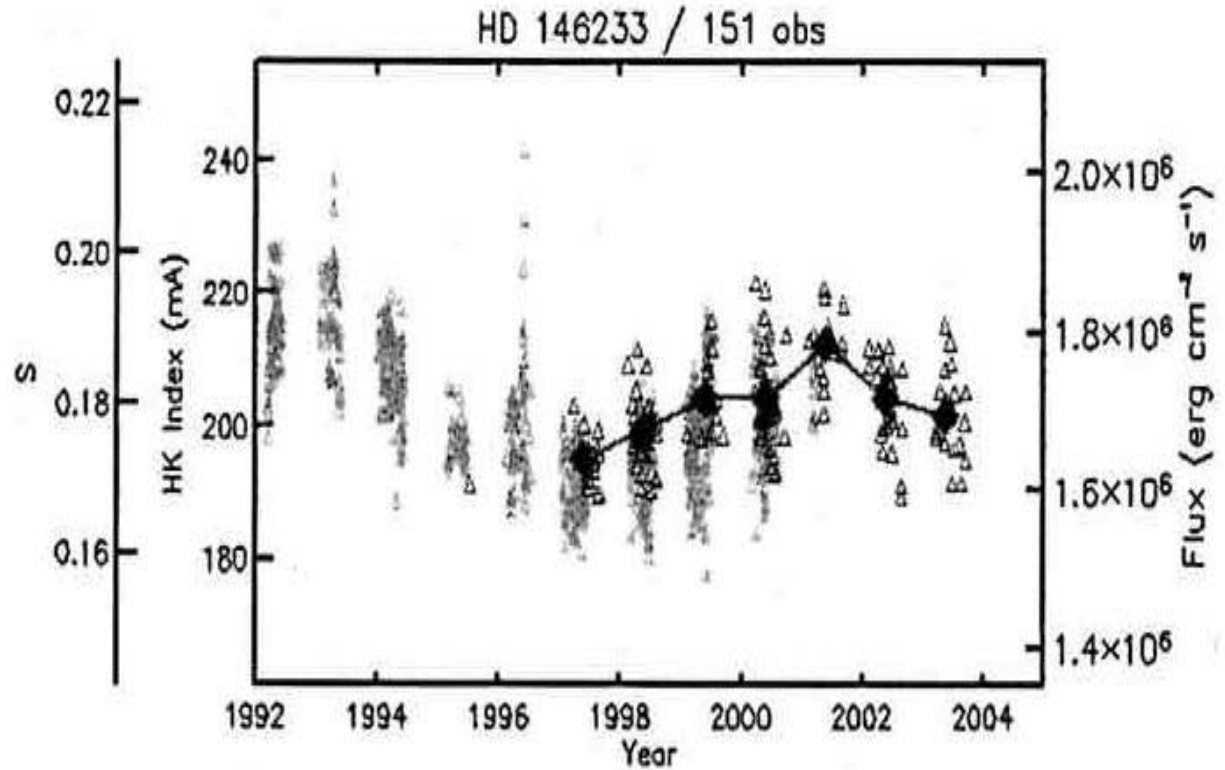
の恒星振動検出  
バトラー達によるケンタウルス座の星で

太陽と瓜二つの星は  
存在するか？

# 有名な(非常に太陽に性質が類似する)solar twinは さそり座18番星(18 Sco, HD146233, HR6060)



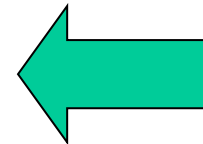
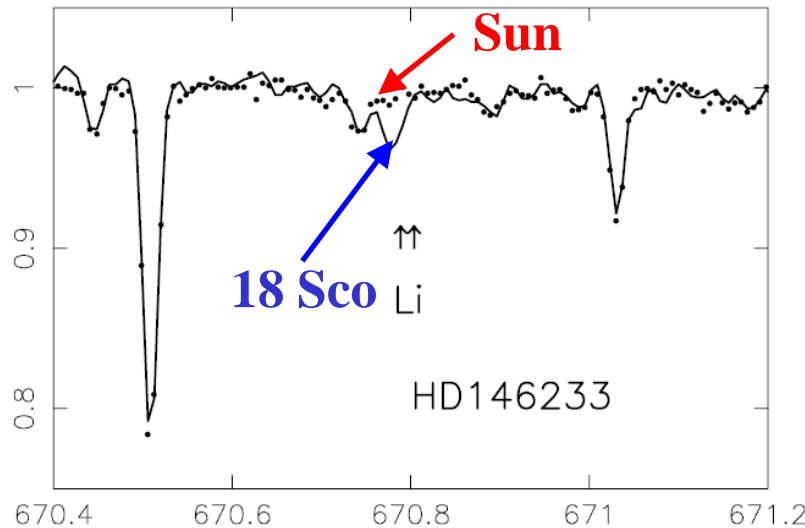
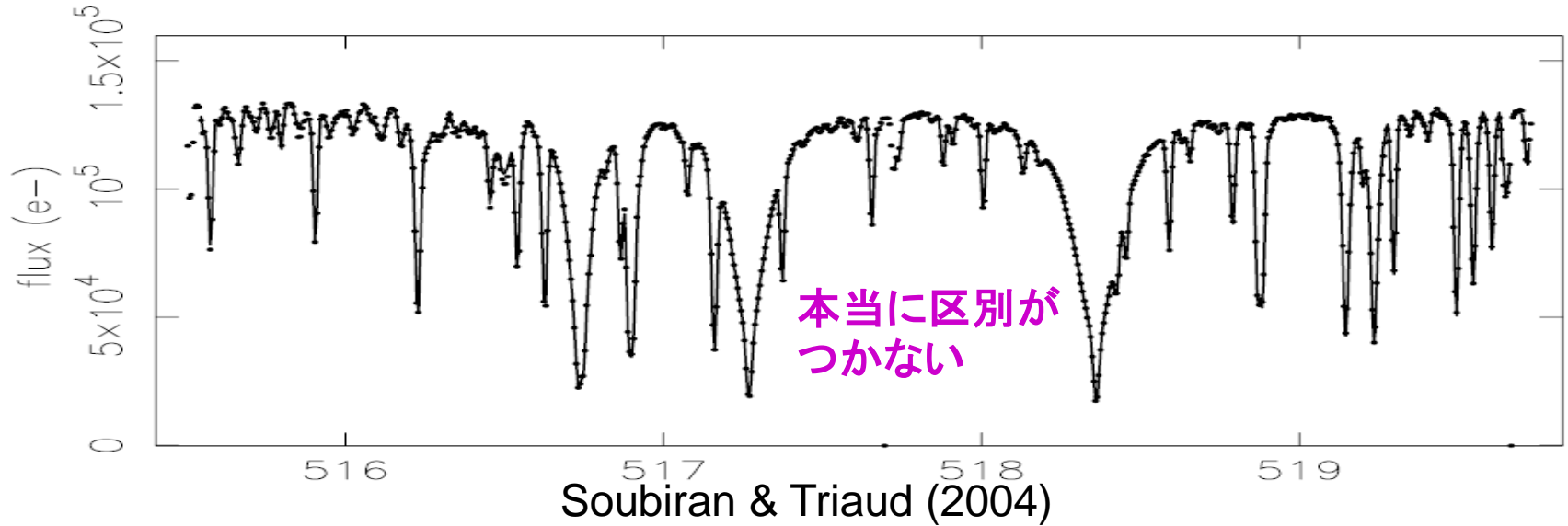
HR図上の位置は実際  
太陽と区別がつかない



恒星活動も~8-9年の周期で変動  
しているようだ

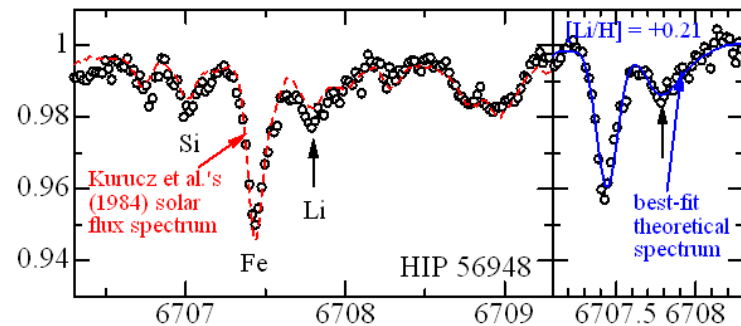
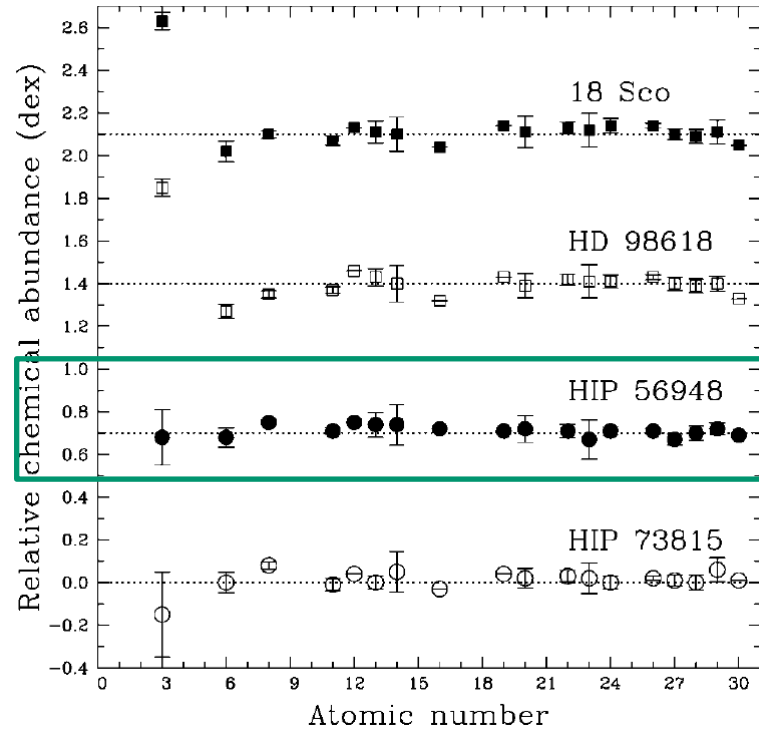
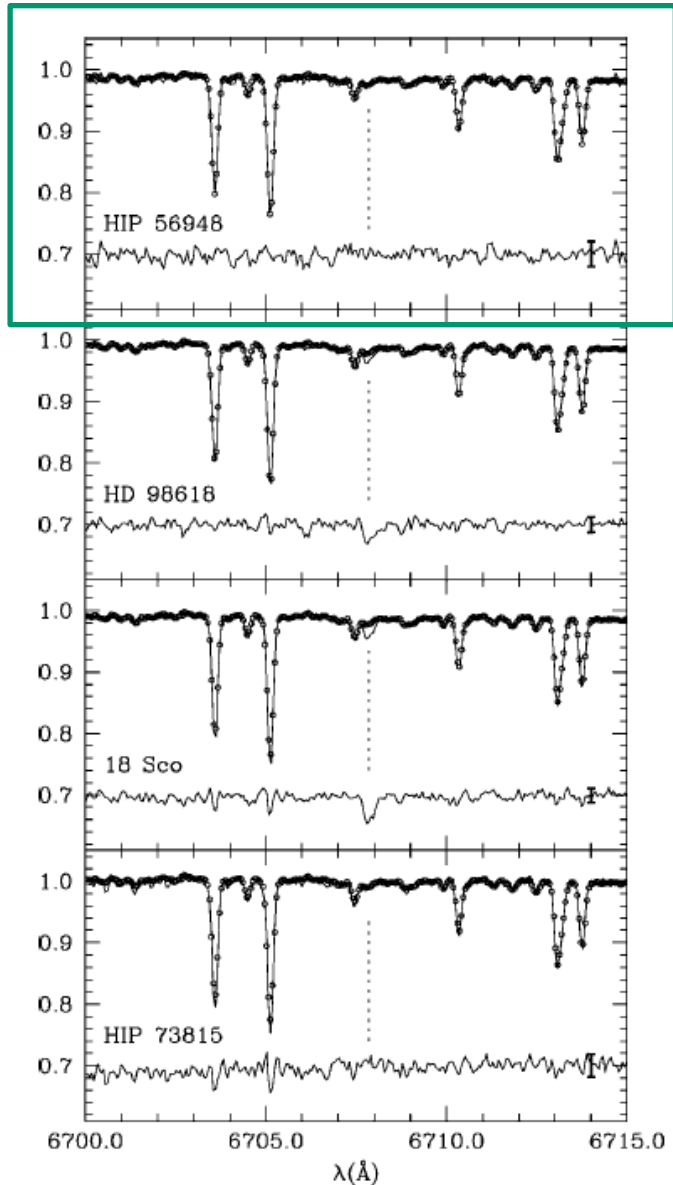
(太陽の11年とはちょっと異なる)

# 18 Scoはスペクトルも一見太陽にそっくりである ....が問題はリチウム



ただ一つ非常に惜しいのは  
リチウムの強度が全く食  
い違ってることである...

# 現在の所Liも含めて最も太陽に似ている(完全ではない) 星はHIP 56948 (Melendez & Ramirez 1997)



我々が再解析したところこの星のLi組成は太陽と同一ではなく+0.21dex過剰

# 我々の太陽類似星研究



# 約120個のサンプル星の高分散分光観測

---足かけ5年にわたる観測---

[竹田、本田、川野元、安藤、桜井、田実]

- 2005年～2006年 岡山HIDES: 黄～赤領域データ
  - Li組成、有効温度、重力加速度、自転速度、年齢、質量、など種々の恒星パラメータの決定
- 2007年～2008年 岡山HIDES: 写真赤外領域データ
  - 写真赤外域のCa II三重線に基づく恒星活動の推定と自転速度、リチウムとの相関
- 2009年～2010年 すばるHDS: 紫外域～青域データ
  - ベリリウムの組成解析を行い、リチウムの結果と併せて外層における混合の様子を探求、CaII Kコア輝線からの活動の推定

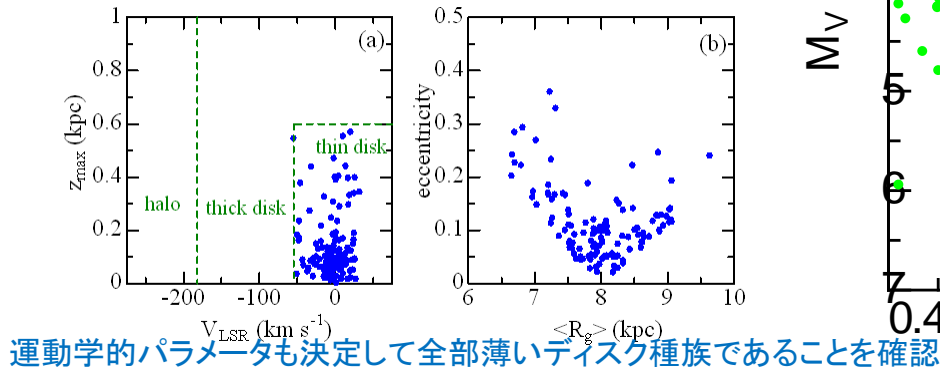
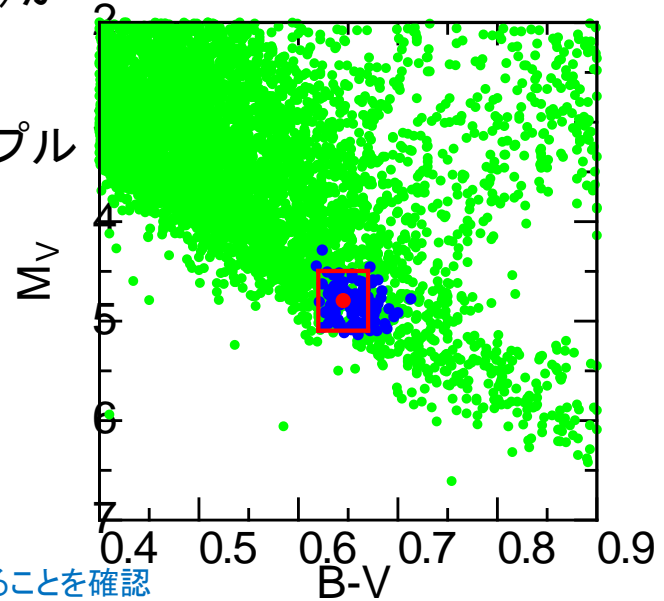
# まず測光的にサンプルを選び それを分光学的手法で太陽とのパラメータ差を決定し、更に他の恒星パラメータも決めた

Fe I と Fe II の線等価幅から大気パラメータ [ $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $\xi$ ,  $A(\text{Fe})$ ] の対太陽相対値を決定

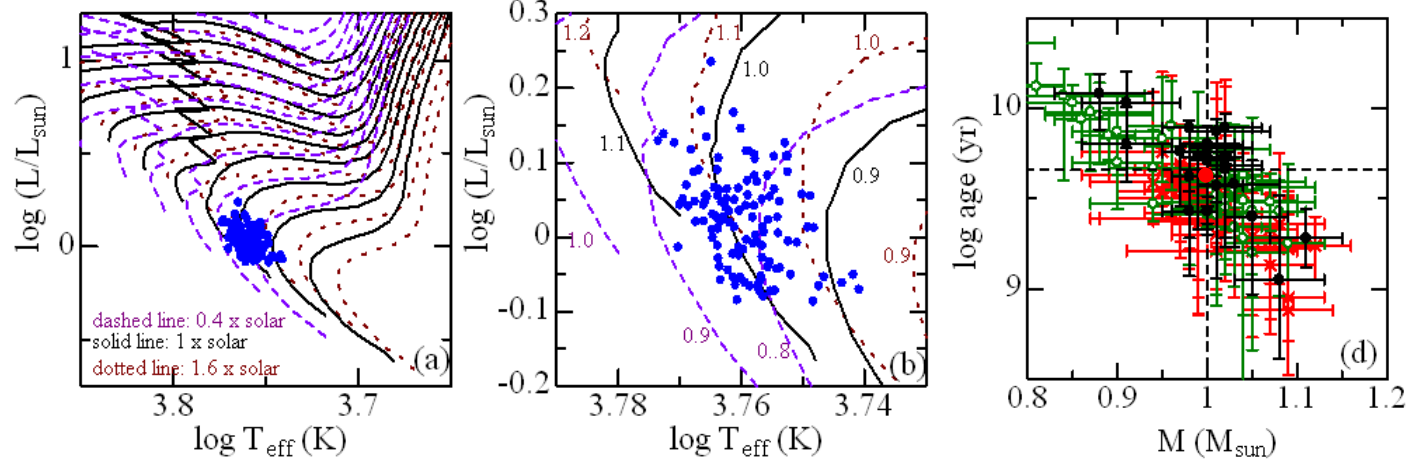
ヒッパルコス衛星で距離(真の明るさ)がすでに良く決められている星から

**0.62 < B-V < 0.67 かつ 4.5 < M<sub>V</sub> < 5.1**

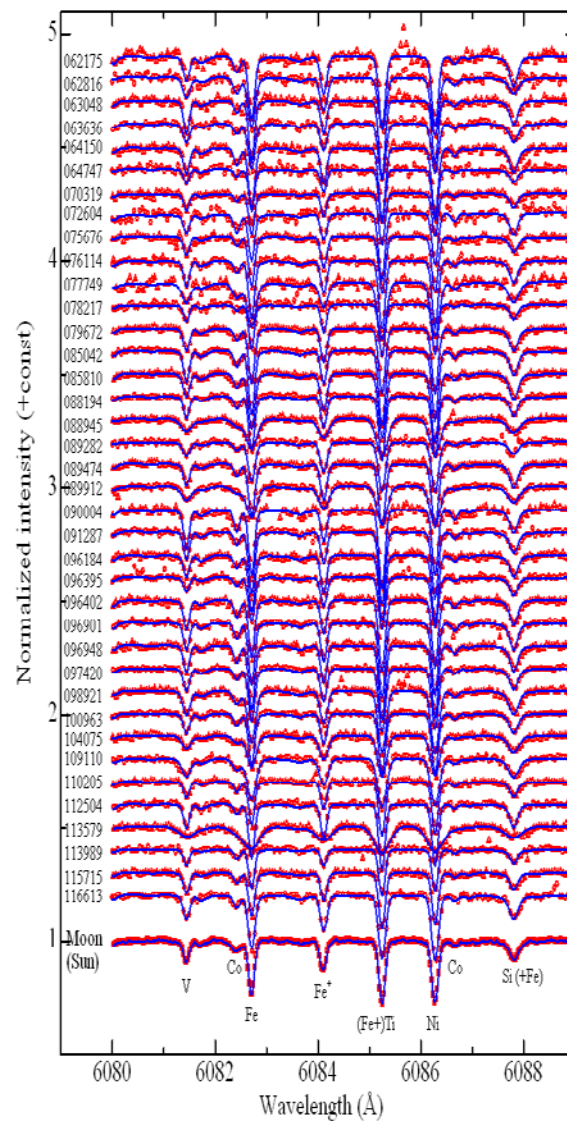
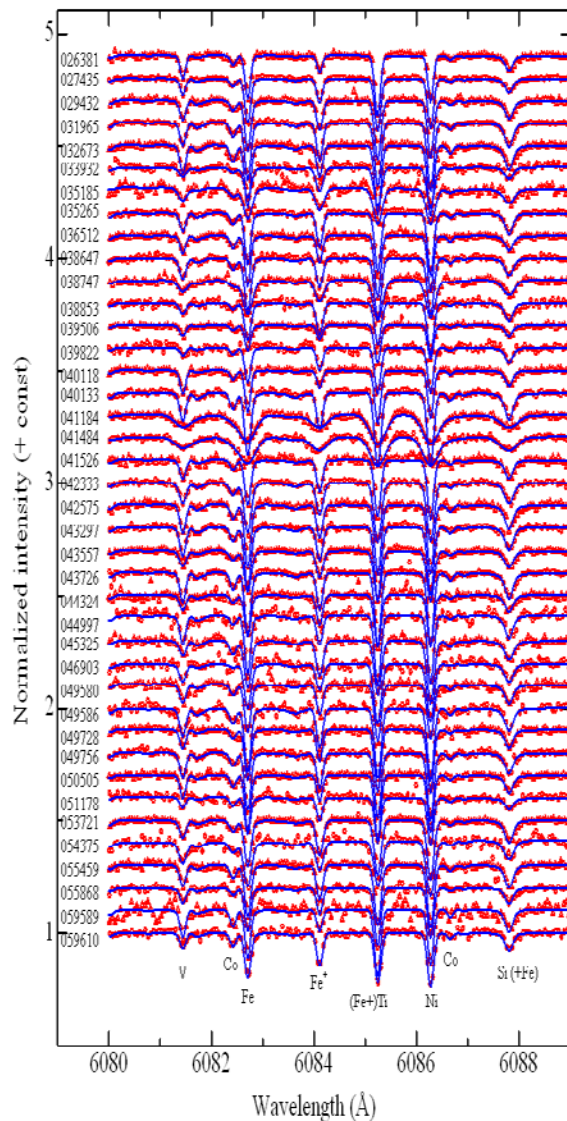
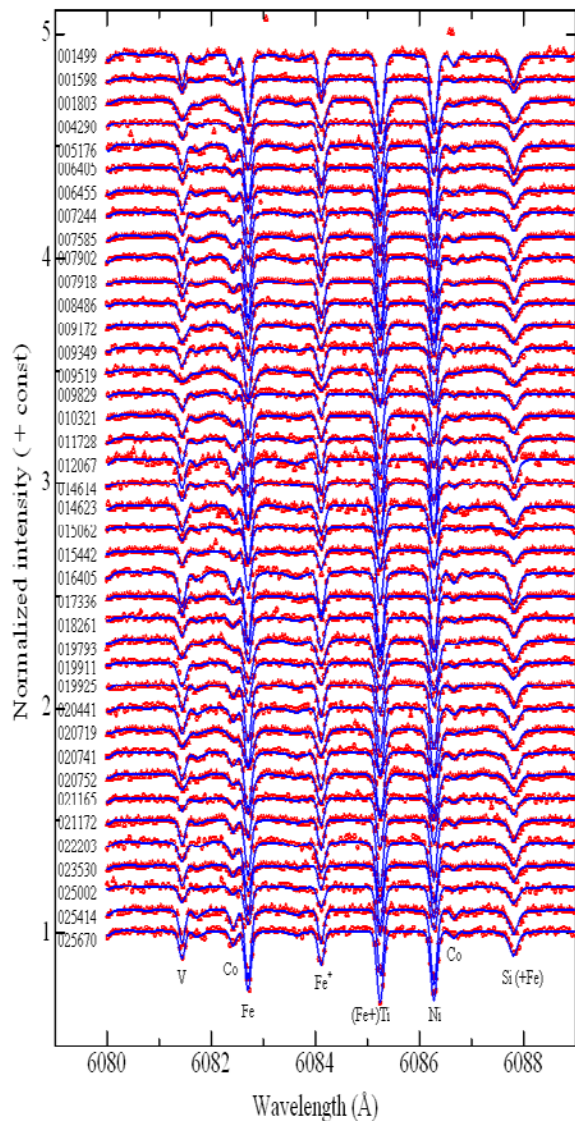
の条件で選びだした約120個のサンプル (7~8等クラスの星が主体)

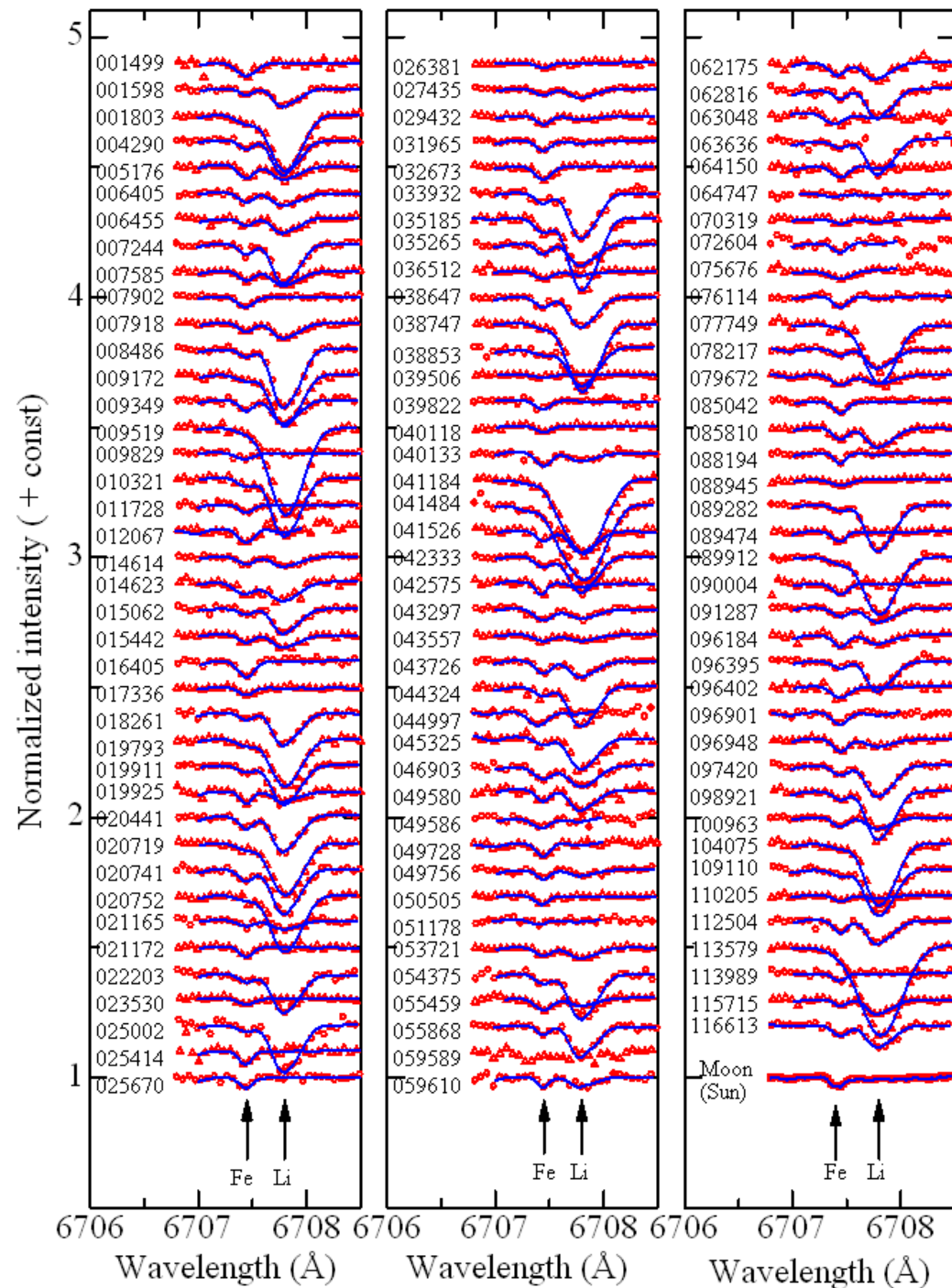


理論的進化トラックと比較して質量と年齢を決定



6080-6089 Å 領域のフィッティングで決まるマクロ速度幅  $v_{r+m}$  から  
 (マクロ乱流  $v_{macro}$  の効果を引いて) **自転速度  $v_e \sin i$**  を求める





## Li I 6708線のフィッティングからリチウムの組成を決定

Li線が見えないものについては上限値を見積もる

(1) Li線の強度が星によって大きく散らばりを見せていること

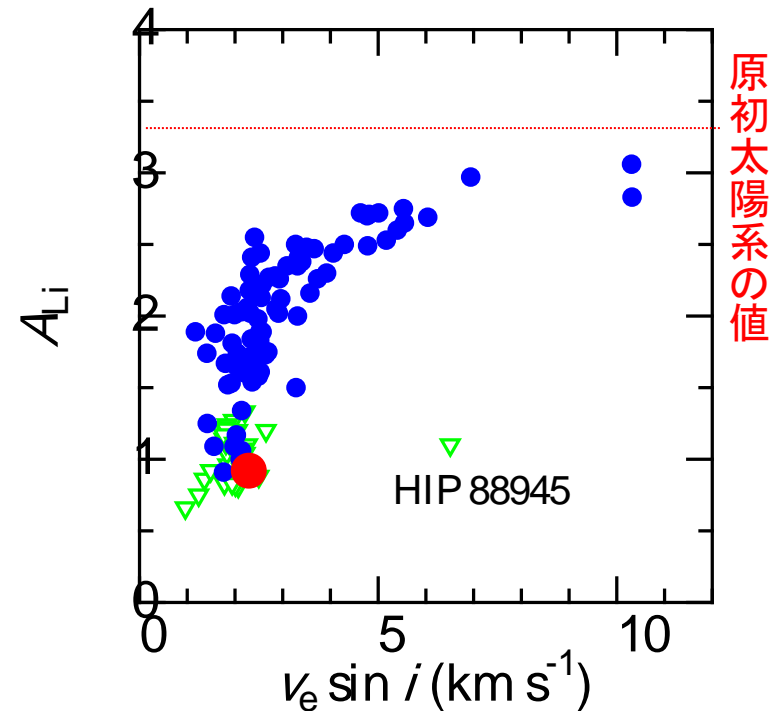
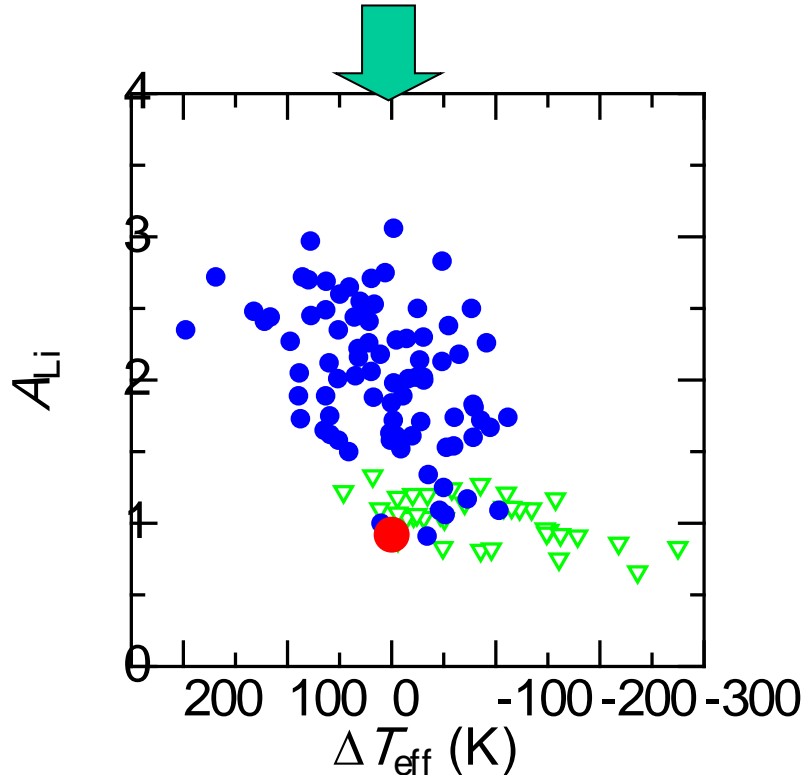
(2) Li線が強い星はラインの幅も広いこと、

が見て取れる

# リチウム組成と射影自転速度の相関

リチウム組成の散らばりは大きい

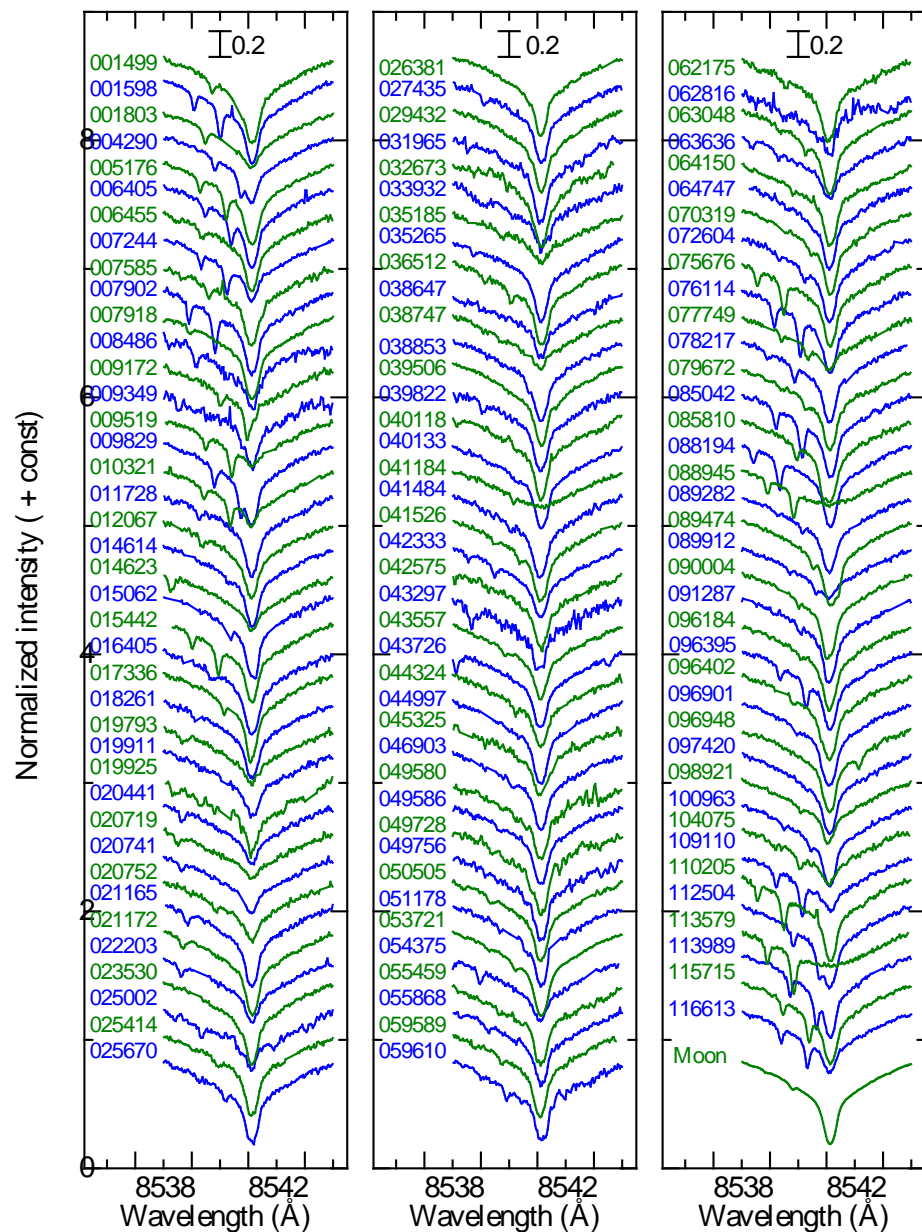
射影自転速度が遅くなるにつれて表面リチウムは減少



Li組成も $v_e \sin i$ も大きく散らばっているが、太陽はいずれも分布の低限界端に位置する

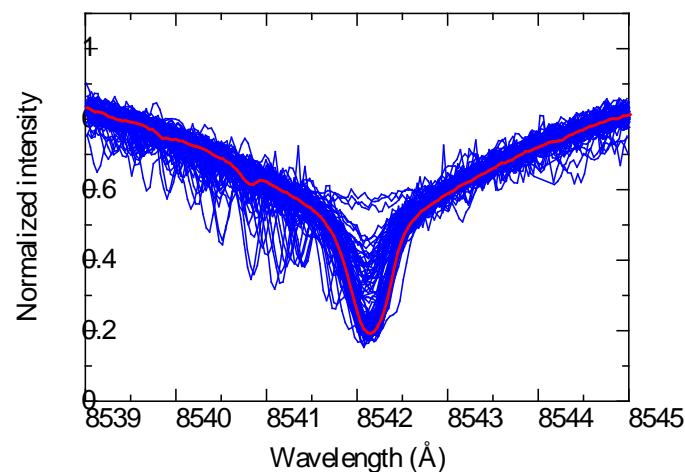
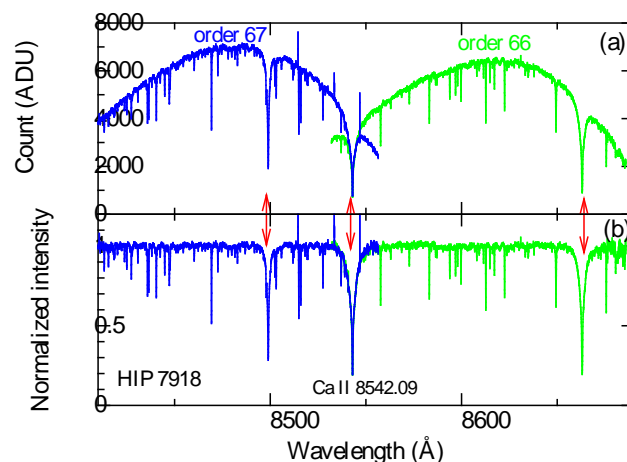
$v_e \sin i$ には射影因子 $\sin i$ が含まれているので表面リチウム組成に自転が本質的に影響することの確証には**恒星活動**(自転が強く絡む)を調べるとよい

# CaII 8542線中心の比強度 $r_0$ (恒星活動の目安)の測定



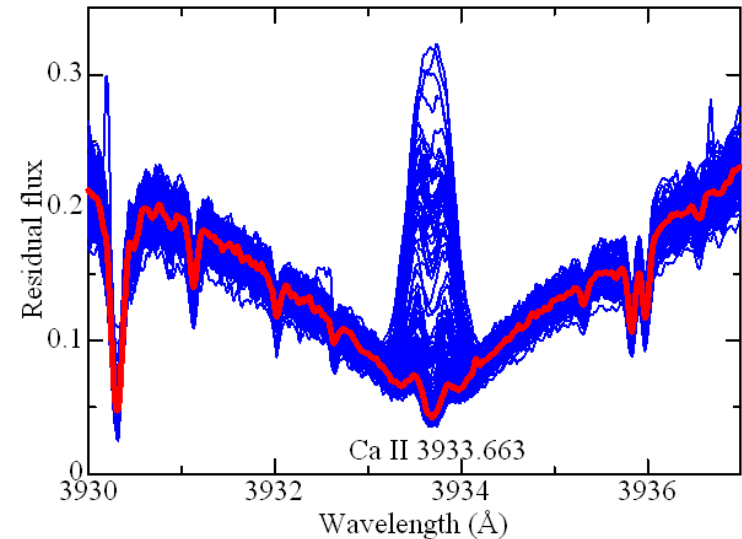
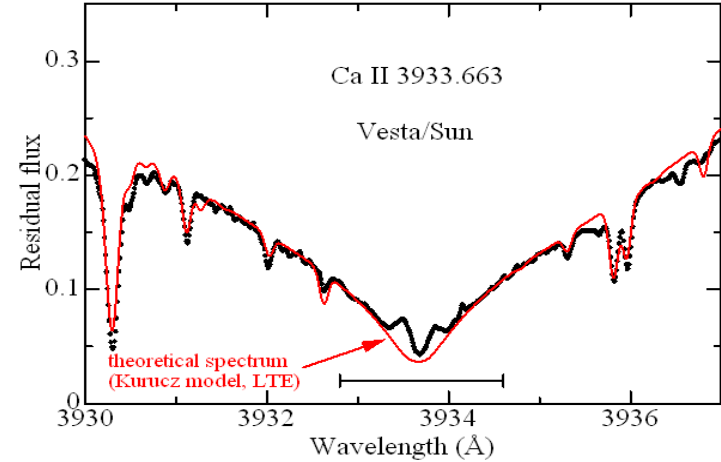
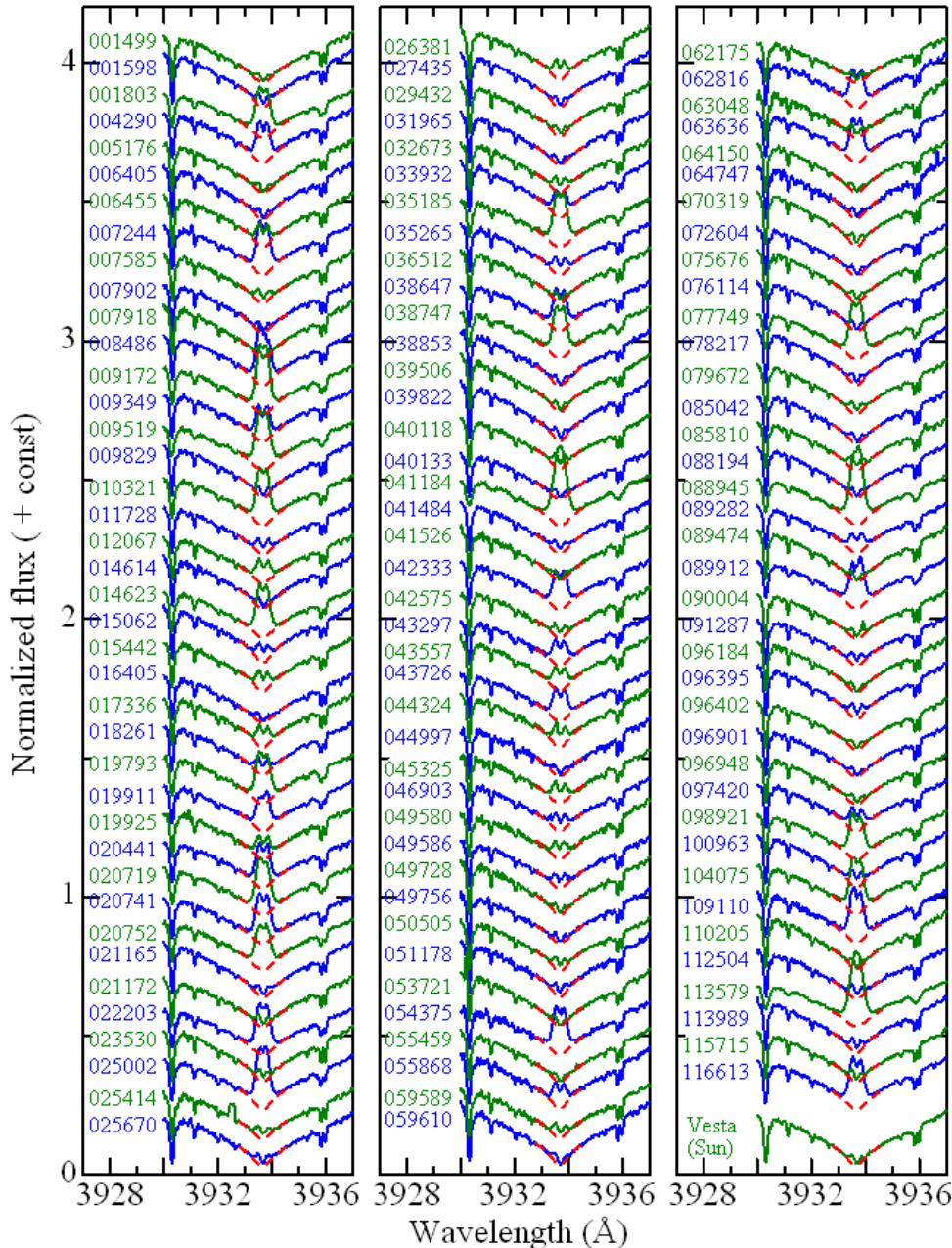
●各ターゲットについて近赤外CaII三重線の中で最も強い8542線の深さを測定して恒星活動の強さを見積もる

●観測は2007年～2008年にかけて岡山HIDESを用いて行い、写真赤外領域のスペクトルを得た



# CaII Kコア輝線強度（活動の目安）の測定

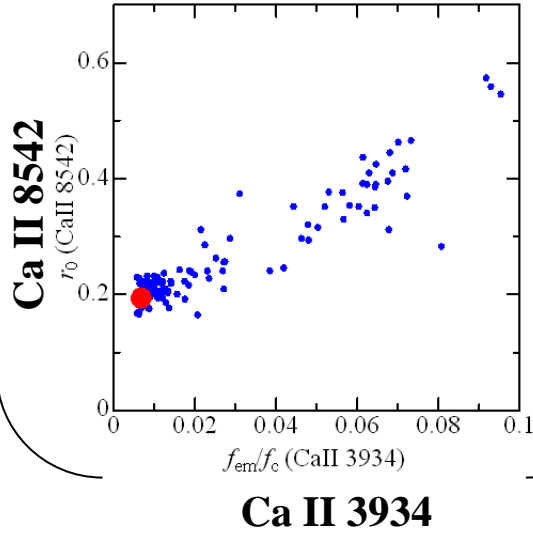
- 各ターゲットについてCaII Kのコア輝線強度を測定して恒星活動の強さを見積もる
- データは2009年～2010年にかけてすばるHDS観測で得られた近紫外域スペクトル



# 結果

恒星活動はリチウム組成とはつきりとした相関がある

当然のことながら  
8542コア中心強度と  
K線コア輝線強度は  
良い相関を示す



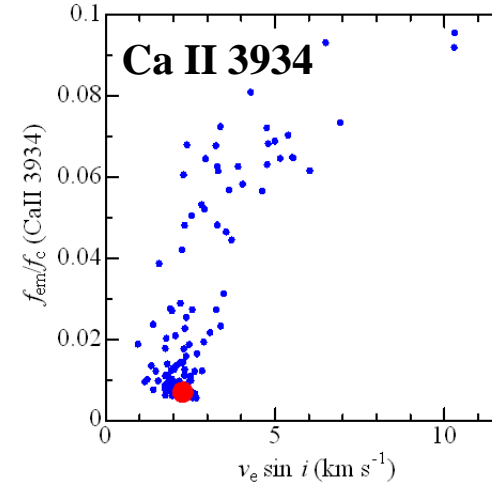
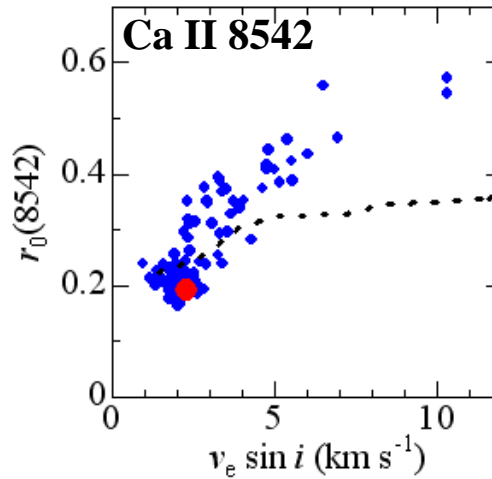
太陽は仲間の太陽類似星  
と比べて明らかに

- (1) 低活動
  - (2) 低速自転
  - (3) 低リチウム量
- の星である

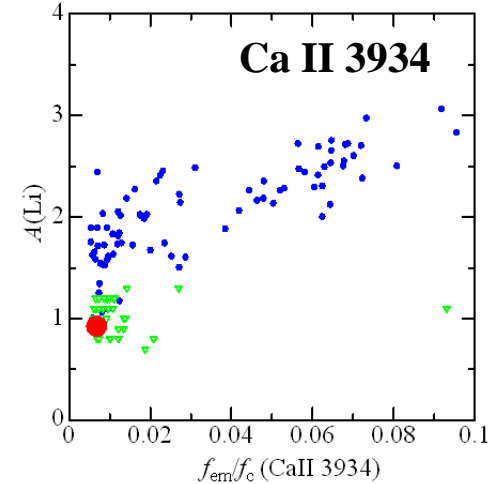
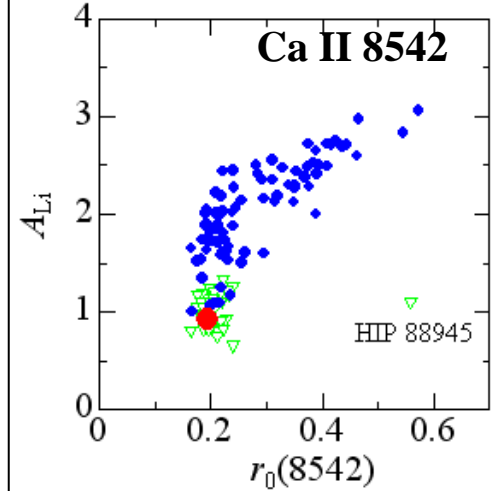
本研究で示された事実

恒星活動は射影自転速度と確かに相関あり

活動指標 vs.  $v_e \sin i$



Li組成 vs. 活動指標



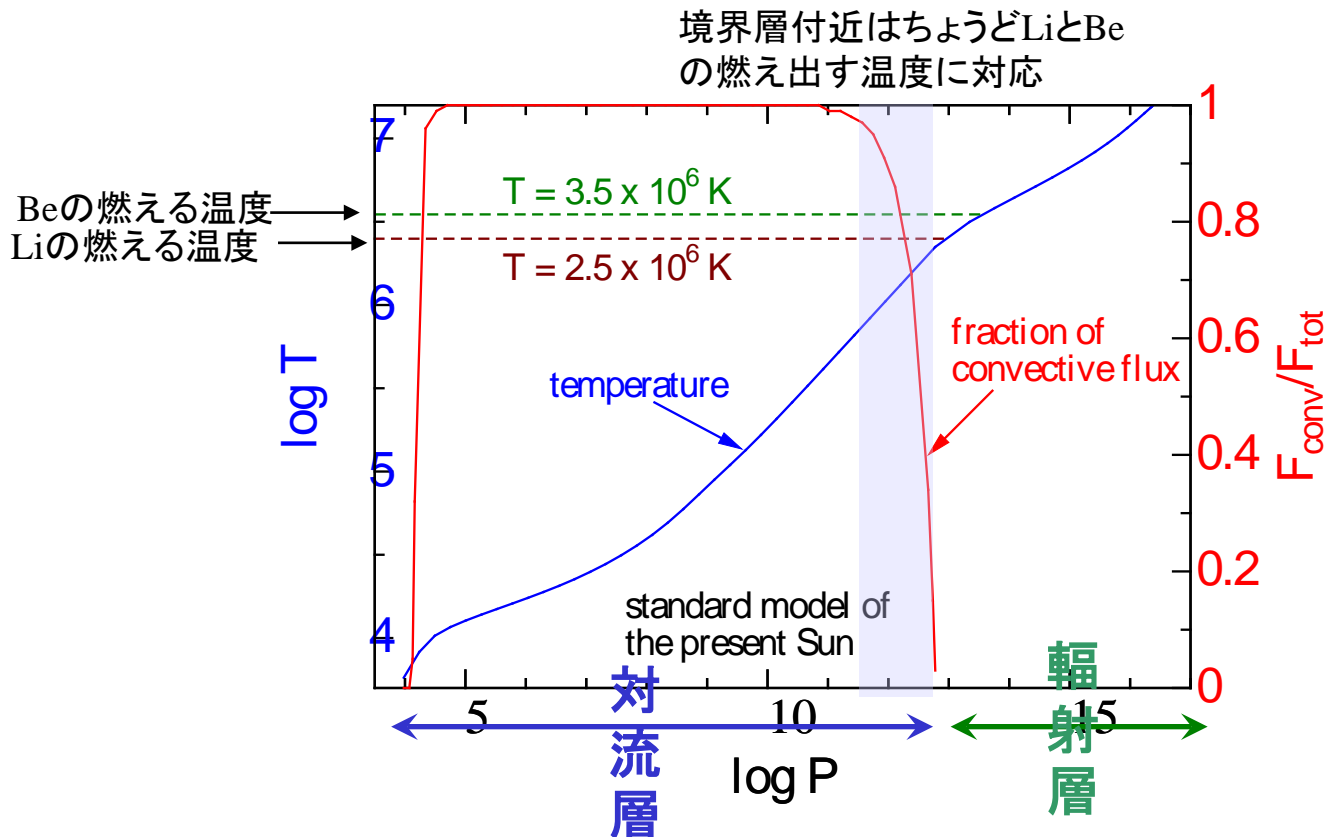
「太陽型星の表面リチウム組成には自転速度  
が本質的に関わる」ことが裏付けられた



# なぜ自転速度が遅いとLiの欠乏が促進されるか？

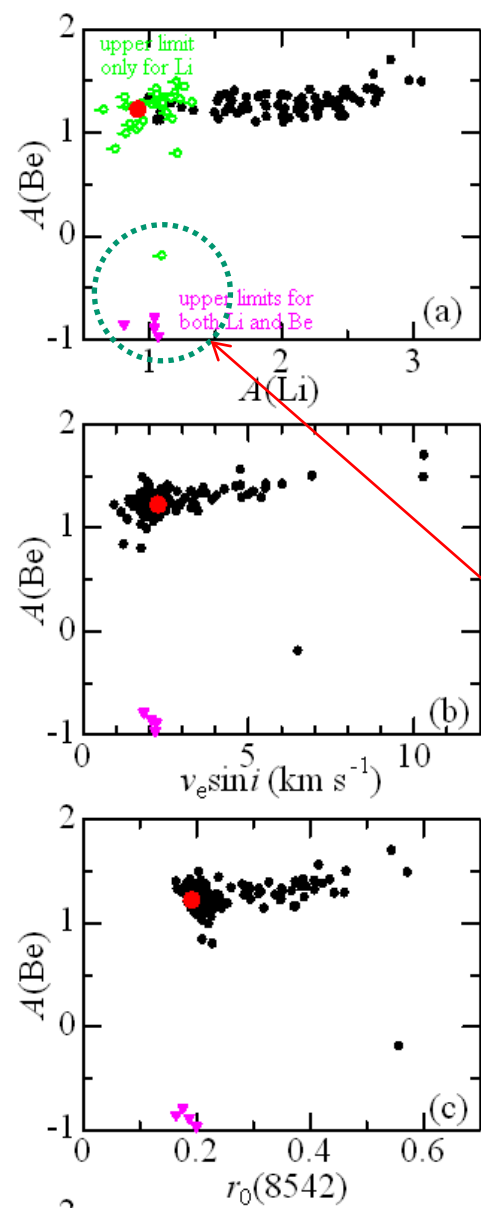
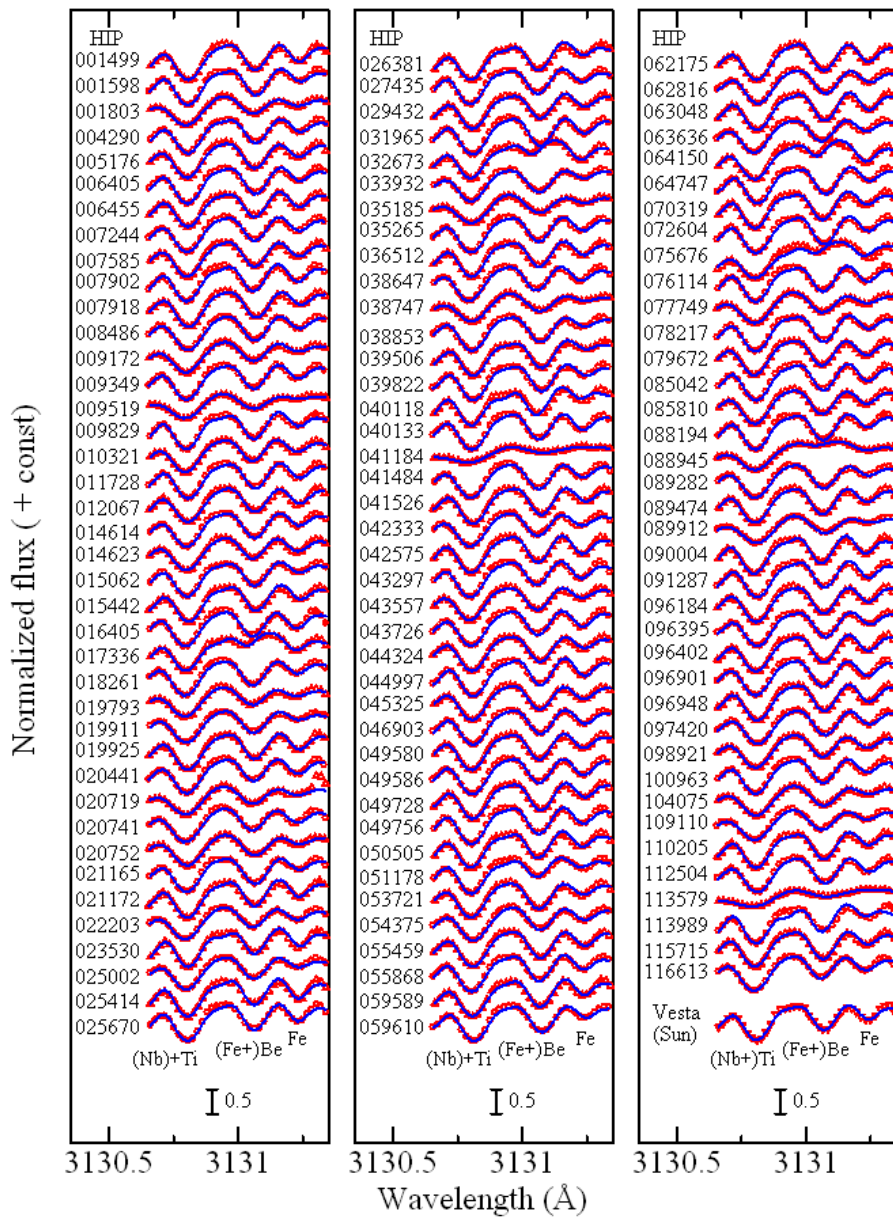
- 最近のBouvier(2008)理論では自転が速いと剛体的に回るが自転が遅いと対流層と輻射層の境界(タコクライン)で微分回転が生じてシア混合が生じる
- 従って、自転が遅いほど混合でLi(250万度以上で燃える)が内部に運ばれて壊されやすく表面での欠乏につながる

この描像が正しければ**対流層と輻射層の境界部分での混合効率**が鍵を握る  
境界層付近の混合の様子を探るには？ → LiとBeがうってつけのプローブ



従ってBeの組成も決めてLiと比較すると共に、Li同様の自転速度や活動への依存性があるかどうか調べることにした

# すばるHDSの紫外域データを用いたBe II 3131線 フィッティングに基づくBe組成解析



- BeはLiの場合とは異なり、散らばりは少なく太陽は他の星と同程度のBe組成を示す
- しかしLiと同様に自転/活動が低下するほどBe組成も緩く減少する傾向が見て取れる
- 奇妙なのは5個の星のみは極めて顕著なBe欠乏を示し、しかもこれらは他のパラメータは太陽とほぼ同一で低活動低自転の solar twin であること
- おそらくは太陽以上に低速自転低活動の星ではないか

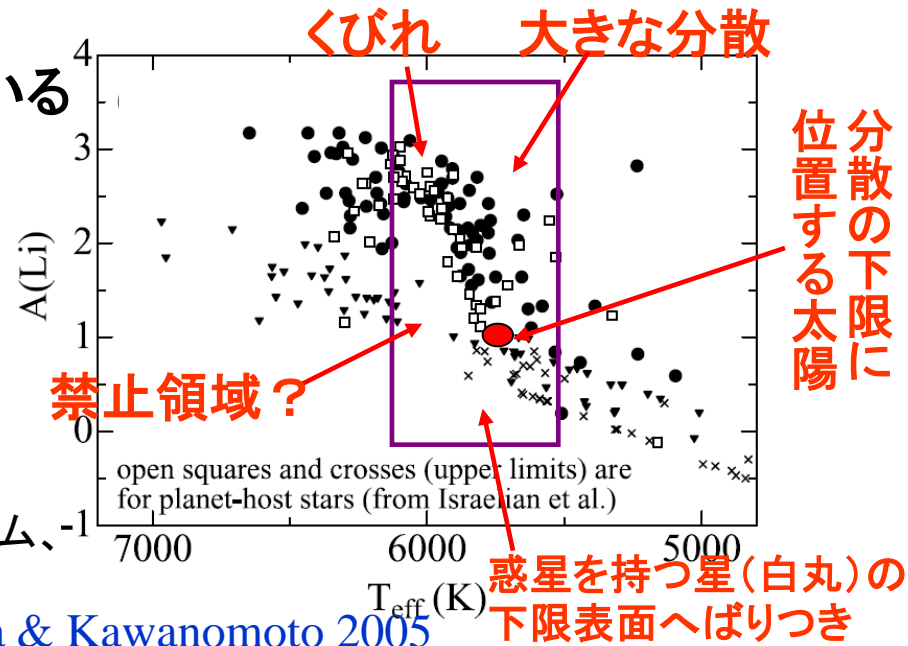
# まとめ

- 以前から続けられて来た「太陽とうり二つの星を探す」試みの手法の色々
- 恒星のパラメータ(有効温度、重力加速度、金属量、...)が非常に類似する星は何個も探し出せる
- しかし大きなネックはLiであり、太陽とパラメータが似ている星はいずれもLi線が太陽よりも強い
- 我々の太陽類似星約120個のサンプルの解析で判明したことは、太陽はこのグループ内で「**低速自転、低活動、低Li量**」であり分布のエキセントリックな端に位置すること
- これがLi線も含めて何もかも太陽そっくりの星を見つけることが未だにできていない困難の原因であろう

## 太陽近傍の温度領域は謎めいている

- 表面リチウムの振る舞いにみられるように、この太陽類似早期G型星の温度領域は一種のミステリーゾーン
- 有効温度が六千度から五千五百度の間における大きな分散と特徴的な傾向は何に起因するのか？

キーワードは自転、活動、年齢、リチウム、ベリリウム、外層混合、惑星、...



Takeda & Kawanomoto 2005