

日本天文学会2014年秋季年会(山形大学)  
企画セッション「Solar-C」

# Solar-C時代における太陽研究と 恒星研究のシナジー

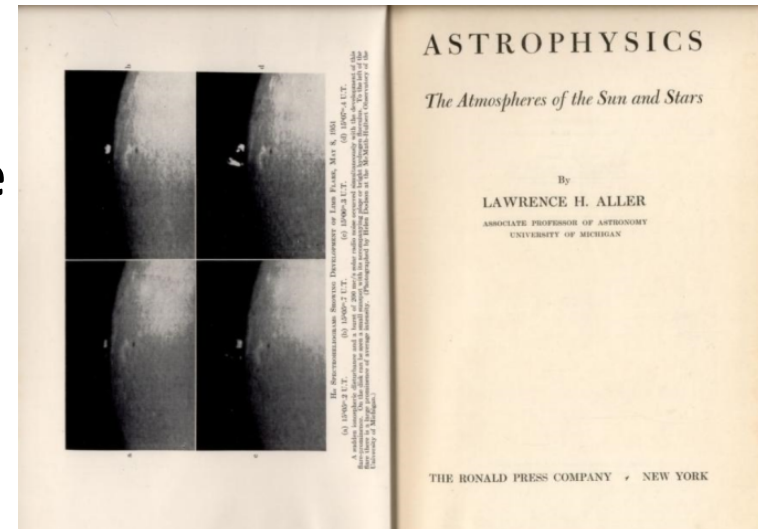
竹田洋一(国立天文台)

# 太陽物理学と恒星物理学

～1980年代頃まで太陽研究と恒星研究はシームレス

**Physik Der Sternatmosphären Mit  
Besonderer Berücksichtigung Der Sonne**  
A. Unsöld (1955: Springer)

**The Atmospheres of the Sun and Stars**  
L. H. Aller (1963: Ronald Press)



**Astrophysics of the Sun**  
H. Zirin (1988: Cambridge)



# スペースからの太陽観測が主流になると 徐々に恒星との乖離が始まったようだ

## 太陽

●1980年代 ひのとり

●1990年代 ようこう

●2000年代 ひので

●2010年代 Solar-C

高空間分解能・高時間分解能での  
爆発などの表面活動現象観測が主  
たる目的に移ってきている傾向

## 恒星

●1980年代 固体撮像素子(高S/N比分光)

●1990年代 恒星の衛星観測も盛んになった  
X(ROSAT...)、UV(IUE、UVSAT、HST...)、  
赤外(IRAS、ISO...)

●2000年代 高分散エシェル分光器

惑星科学、銀河考古学の発展

●2010年代 恒星はプローブの道具でそれ自体の  
研究は近年はあまり主流でない傾向

地上から観測できない波長域を狙う  
ための衛星観測:データの性質自体  
は地上観測と共通部分多し

# Solar-Cが取り組む主な科学的課題

- 太陽磁場の3次元構造を求める
- 波動により彩層・コロナ・太陽風が理解できるか？
- 磁気リコネクション現象の解明とコロナ・彩層加熱への寄与

基礎的物理過程とからめた  
太陽表面現象の理解

他分野と比べて太陽研究者は「どうなっているか」のみならず「なぜそうなるのか」に対する知的欲求が高いように思える

太陽は比較の基準として最も重要な  
恒星だからSolar-Cによって更に良く  
理解されることはもちろん恒星分野  
の研究者にとって喜ばしいので計画  
の早期実現を願う

特に「動的的非均一大気構造の十分な解明」は  
「組成決定に関わるスペクトル線形成機構」  
「線輪郭解析に影響する大気速度場」  
の理解につながるので大いに期待したい

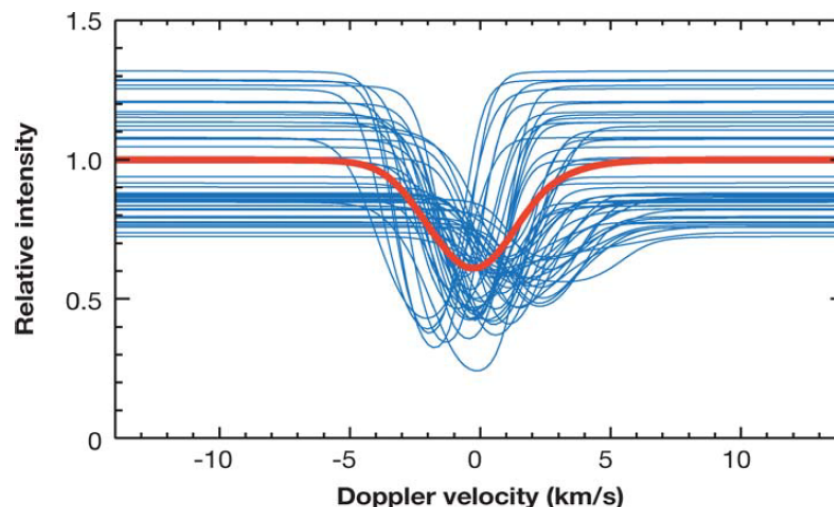
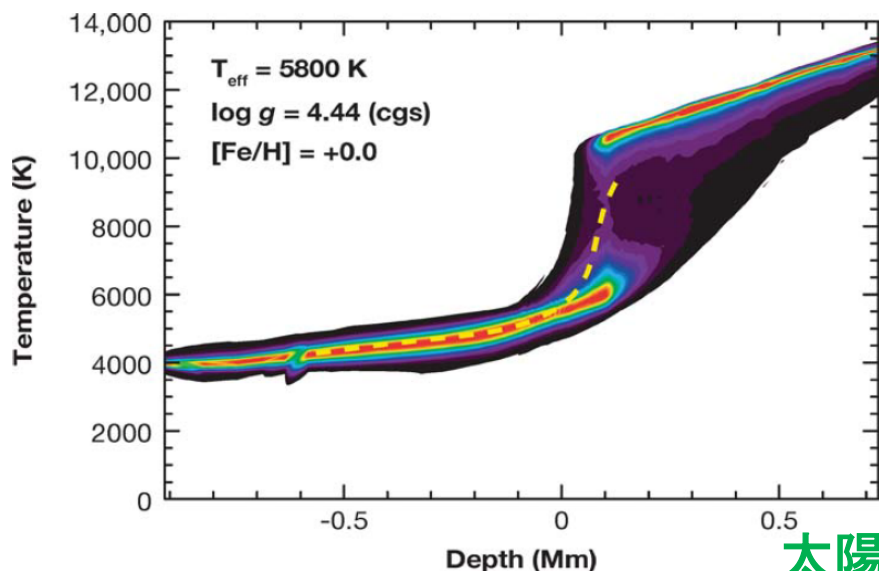
# 一つの具体例：恒星の分光組成解析で 重要な太陽表面の絶対元素組成 $\epsilon$

- $\epsilon(X)$ は単位体積中の元素X原子数と水素H原子数の比
- 元素Xの太陽表面における組成を  $\log \epsilon_{\odot}(X)$ 、  
同じく星表面における組成を  $\log \epsilon_{\star}(X)$ 、とすると相対組成は  $[X/H] = \log \epsilon_{\star}(X) - \log \epsilon_{\odot}(X)$  ( $[X/Y] = [X/H] - [Y/H]$ )
- $[X/Fe]$  vs.  $[Fe/H]$  は銀河の化学進化を調べるための鍵
- 太陽型星なら  $[X/H]$  は差分解析で十分正確に求まる
- しかし $\epsilon$ の絶対組成は手法に大きく影響され正確な決定は困難
- もし太陽の $\epsilon_{\odot}(X)$ が正確に決めれば他の星の $\epsilon_{\star}(X)$ も決まるので  
この太陽の絶対組成比較基準として極めて重要

$\epsilon$ の絶対組成は星の進化や星震学など構造に関わるところで本質的  
また $\epsilon(C)$ と $\epsilon(O)$ の大小は晩期型星のスペクトルを根本的に変える

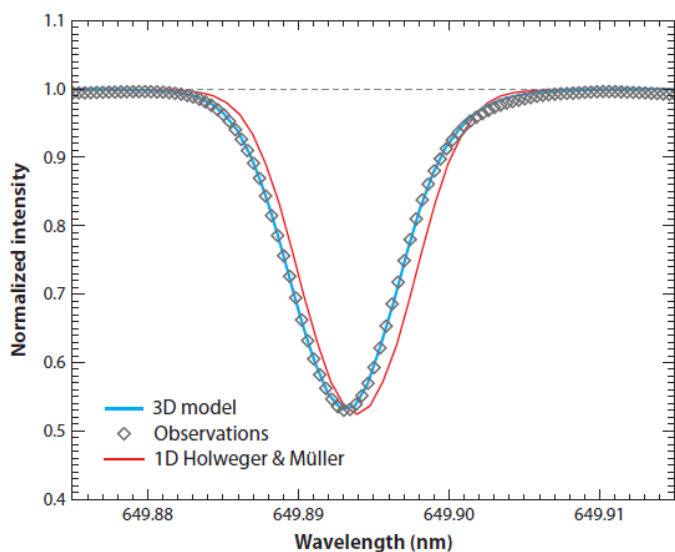
**ただこの組成決定には大気構造のモデルが大変重要  
特に問題なのが3次元動的な非均一モデルの必要性**

# 3D大気モデルの最近の成果と問題点

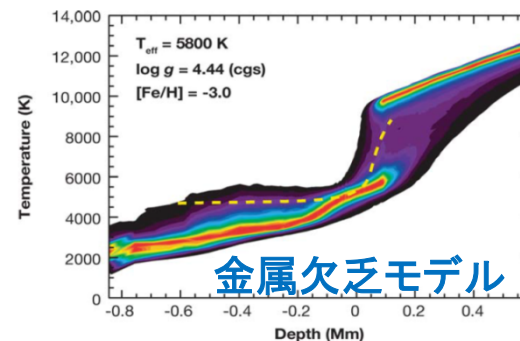


太陽の線輪郭・異なる線から得られる組成における理論と観測の矛盾解消は確かに成功

CNOの下方修正(0.2dex程度)は星震学や恒星進化論に大きなインパクト→新たな問題の発生  
特に金属欠乏星への適用では表面温度低下で極めて大きな補正を予測→信頼性は？



磁場も彩層も入れてないモデルだがどこまで適用できるのか？



# 十年前に太陽のゼミでSolar-Bに向けての期待として以下のように話したことがあった

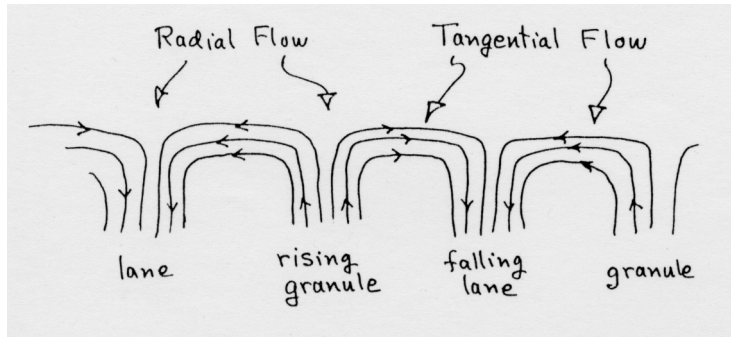
- いずれにせよ**太陽の静穏領域大気**の**非均一動的モデルシミュレーション**が**今後の恒星分光の発展の鍵を握るポイント**の一つであることは確実
- 最近静穏な領域でも数百ガウスの磁場があることがTenerife Infrared Polarimeterでの観測で示された。(Khomenko et al. 2003)。この成因や速度場との相関は大変興味がある。
- Solar-Bのスリットスキャンによる偏光分光観測のメリットを生かし、磁場観測においても(面白い活動領域を対象にするのみならず)「internetwork region」の静穏領域も高空間分解能かつ高時間分解能で詳細に調べ、磁場の変動と速度場の変動の相関の様子を明らかにし、3Dシミュレーションの妥当性を検証するための決定的なデータを提供してもらいたい

これは今でもそのまま変わらないが、Solar-CのSUVITは広い波長域をカバーするので多数のスペクトル線を調べることが可能になり、ひのでのSOT(狭波長域)に比べて遙かに期待できる



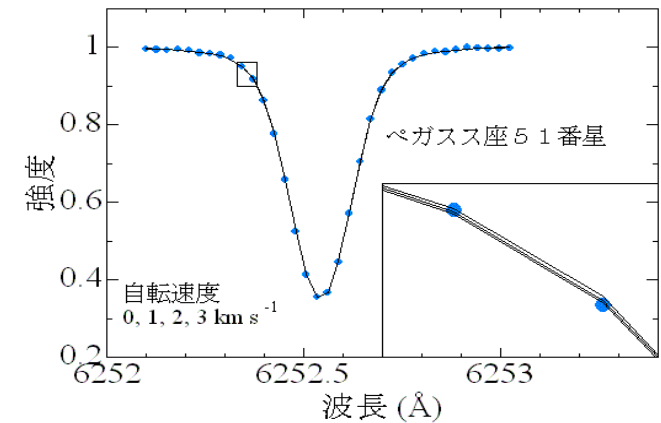
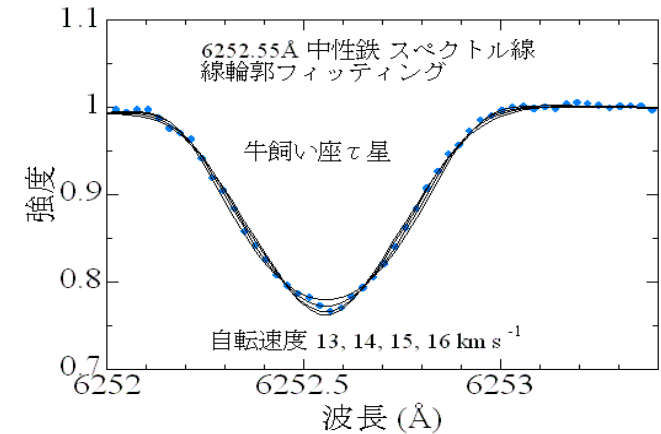
# 大気速度場(いわゆるマクロ乱流)は恒星自転速度決定など詳細な線輪郭解析を行う際の鍵

グラニュールの運動をモデル化した動径接線型マクロ乱流がよく用いられる



高温で自転が大きい場合は乱流の寄与はそう大きくない

低温のシャープラインの場合は自転が遅く乱流幅の方が卓越しているのでマクロ乱流をいかに正確に考慮するかが線輪郭解析では本質的に重要



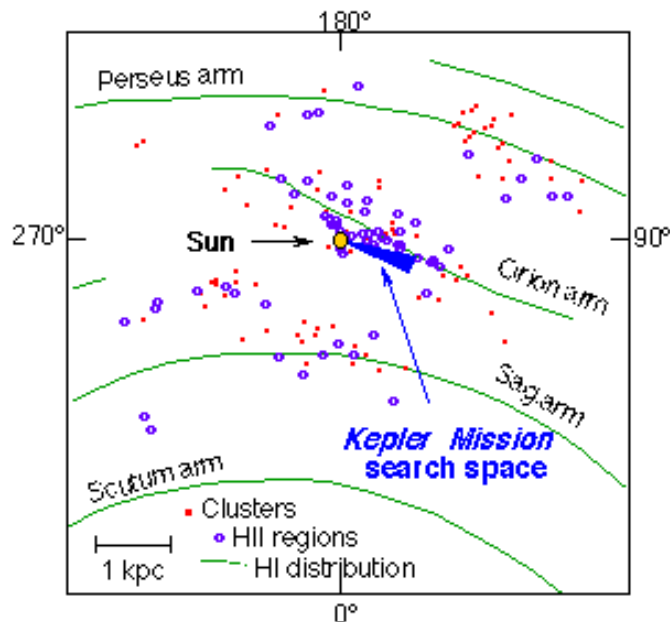
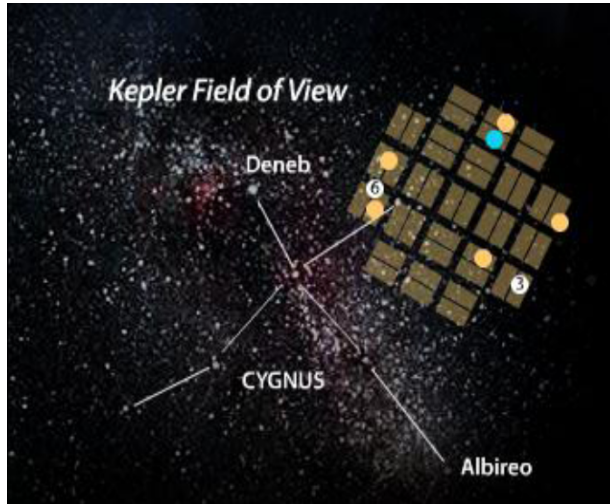
太陽の動的な光球大気構造が明らかになることで輪郭に与える影響もかなり正確に取り入れられて太陽型星の射影自転速度 ( $v_e \sin i$ ) や差動度が分光学的に決定できるようになるものと期待

# これからの恒星研究の動向は？

最近の科学衛星の観測(特に惑星検出)は恒星物理にも予想もしなかった飛躍的な進展をもたらしつつある

- Kepler(トランジット惑星発見目的)やCoRoT(星震学内部探針)による超高精度測光観測は恒星表面の黒点や白斑をとらえて自転周期も導かれ、スーパーフレアの発見もなされた
- 最近打ち上げられた欧州の超高精度位置観測衛星Gaiaは恒星の距離はもちろん正確なパラメータ決定や運動学に飛躍的な進歩をもたらすのは確実と見られる
- 一方Kepler衛星の後継機のTESSにより2017年からほぼ全天にわたる多数の恒星の超高精度の測光モニター観測がなされる予定

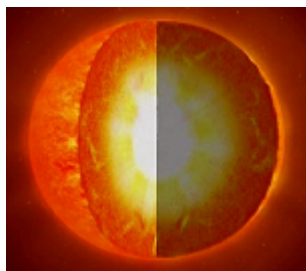
# Kepler衛星はここ数年でめざましい ブレークスルーをもたらした



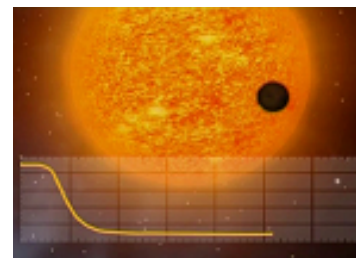
- 目的
- 系外惑星探査、特に生命居住可能領域 (habitable zone) にある地球と同程度の大きさの惑星を見つけること
- トランジット法: 惑星が中心星を隠す「食」現象を検出
- 特定領域(白鳥座、琴座)の15万個以上の星を相対測光精度 $\sim 2 \times 10^{-5}$ でモニター
- 打ち上げ: 2009年3月6日

高精度長時間連続測光観測なので  
恒星振動による微かな変光をとらえる星震学  
の観測(固有振動の測定)にも適する

<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>



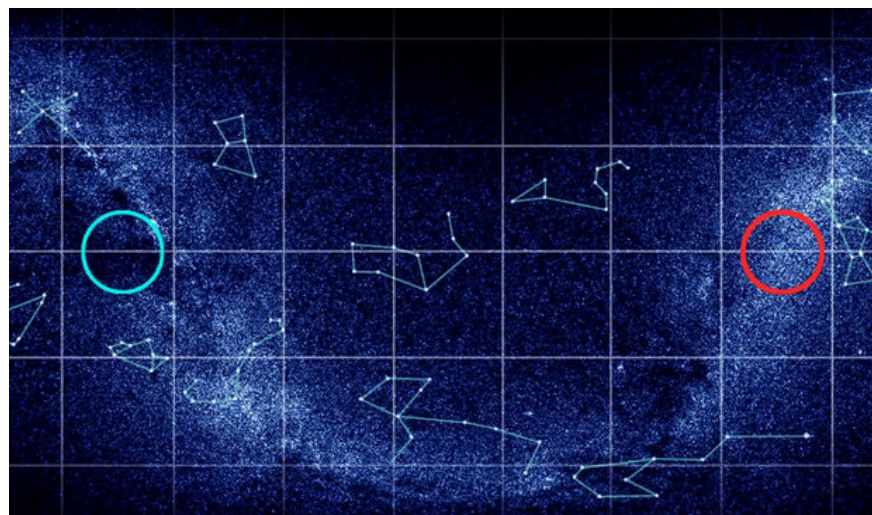
# CoRoT衛星



**C**onvection, **R**otation and planetary **T**ransits

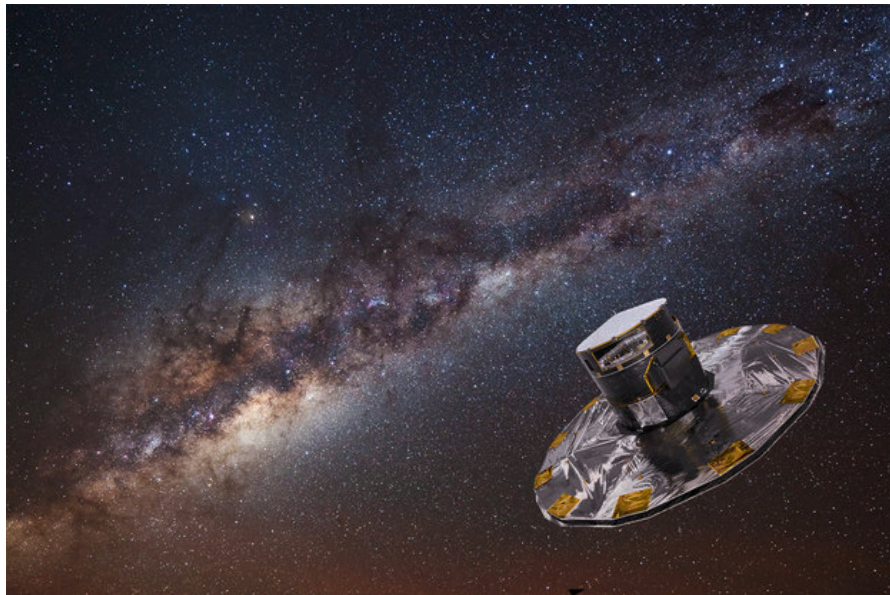
恒星の振動から内部の自転  
や対流層などの恒星内部構  
造を調べる星震学

トランジット法による惑星検出  
ESAの衛星で2006年12月打ち上げ  
30cmの望遠鏡で高精度測光  
3年間の運用予定が2013年3月まで延長  
2.8 x 2.8 平方度の天空領域



# Gaia衛星(高精度位置天文衛星)

2013年12月に打ち上げられた



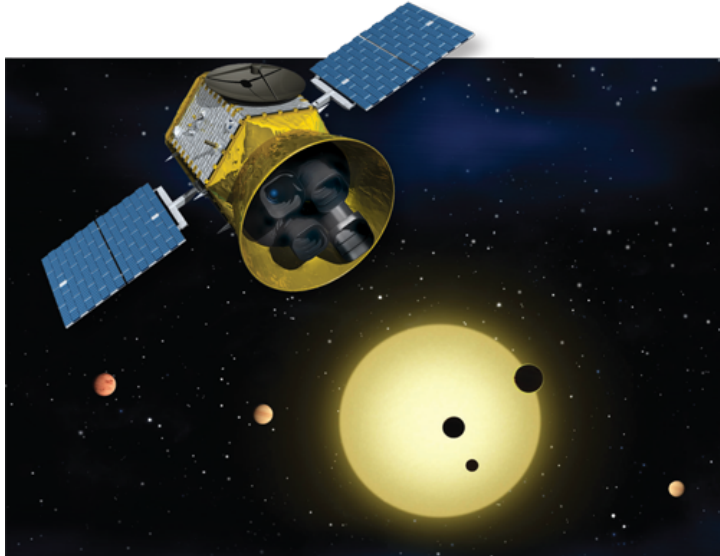
恒星天文のみならず太陽系内の  
暗黒物質の密度などの情報も

- 銀河系内の $\sim 10^9$ 個の星について非常に正確な3次元マップを作成
- $V < 20$ の全ての星について繰り返し観測
- $V < 15$ の星について $0.''000024$ の精度で位置決定
- 太陽近傍の星では $0.001\%$ の精度で距離決定
- 銀河中心近くの星でも $\sim 20\%$ の精度で距離決定

1989年に打ち上げられ12万個の星の位置を $\sim 10^{-3}$ 秒角の精度で決定して1990年代にブレークスルーをもたらした位置天文衛星 Hipparcosの後継機

# TESS

## Transiting Exoplanet Survey Satellite



- At least 27 days staring at each  $24^\circ \times 96^\circ$  sector
- Brightest 100,000 stars at 1-minute cadence
- Full frame images with 30-minute cadence
- Map Northern hemisphere in first year
- Map Southern hemisphere in second year

*ALL-SKY, TWO YEAR PHOTOMETRIC  
EXOPLANET DISCOVERY MISSION*

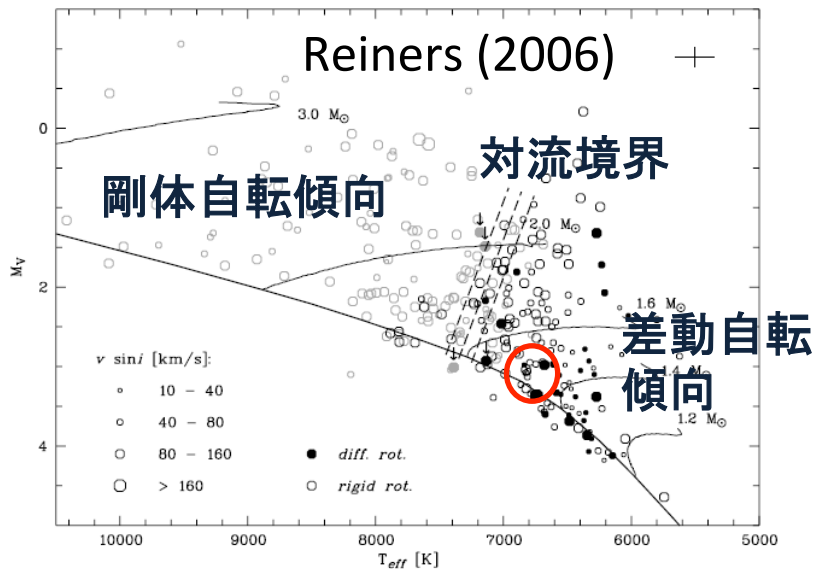
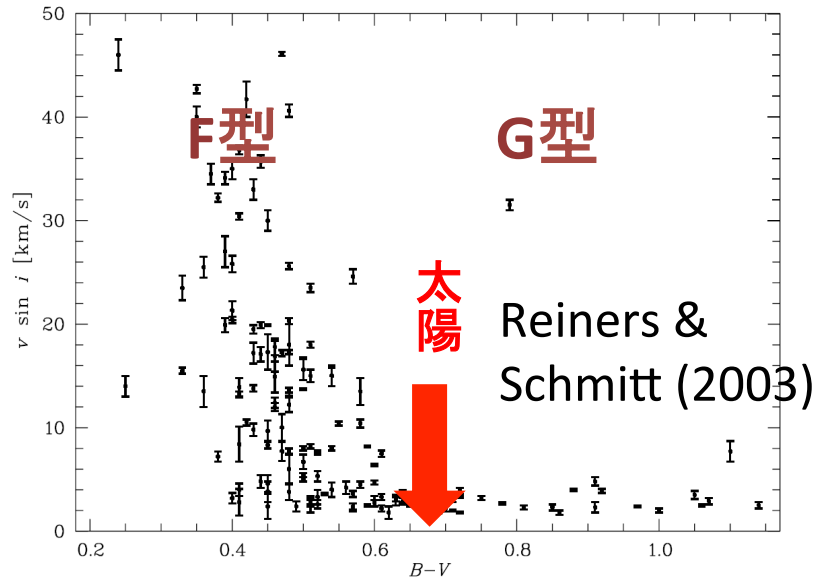
*Keplerの後継機で2017年打ち上げ*

特に地球型惑星多数の発見をめざしている

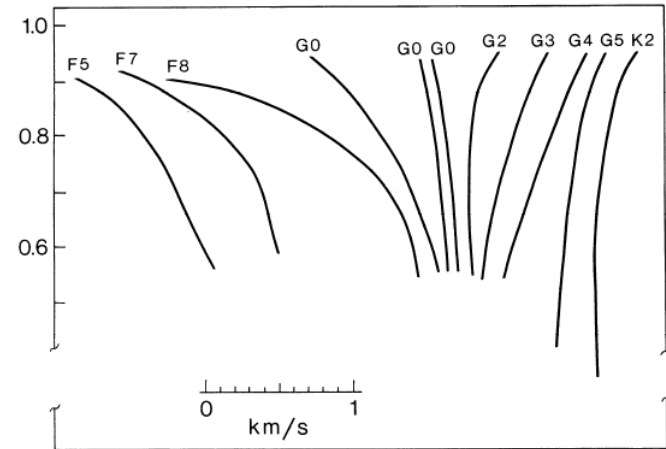
# 太陽と恒星の研究のコラボに新たな局面

- 衛星観測による超高精度測光で(高分散分光観測による線輪郭解析と併せ)恒星表面の黒点白斑など活動領域分布、大気速度場、活動や自転周期がかなりの確度でわかるようになる
- 星震学的手法、また位置天文衛星のおかげで恒星の質量・半径などのパラメータもよく決まる
- つまり色々なパラメータの恒星の表面大気構造や長期的活動などについて太陽との比較研究が可能になる
- これにはこの分野を専門とする太陽研究者の手を借りたい → 両者の協力体制が重要では

## F-G型での対流境界と自転の相転移

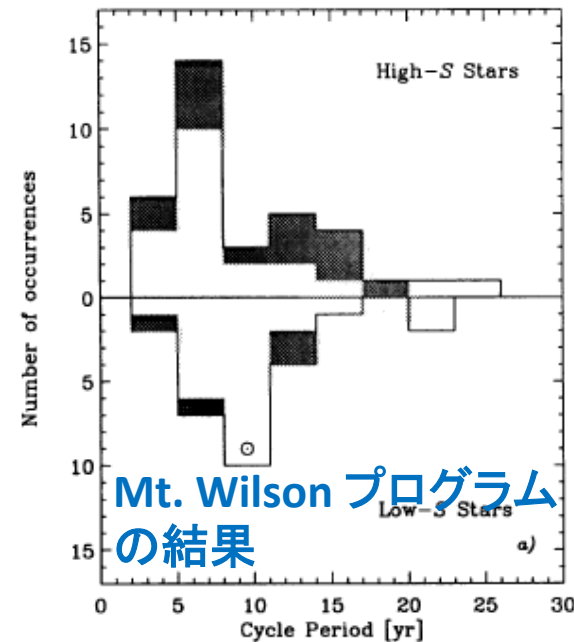


## スペクトル型の違いによる輪郭の非対称性(大気速度場)の変化



Gray & Toner (1986)

共にごういう傾向の素性がより明らかになると共に太陽自体の理解も一層進むだろう



活動度と活動周期の関係



# まとめ

- 比較基準として重要な恒星である太陽の理解が深まることは恒星物理学にも大きく裨益することは確実なのでSolar-C計画は是非実現してほしい
- 特にSUVITなどの特長を生かした動的非均一大気構造の十分な解明に大いに期待したい
- スペクトル線形成機構や大気速度場がより良く理解され組成解析や線輪郭解析に新たな進展をもたらすだろう
- 一方では恒星研究の側も衛星観測などにより近い将来情報量が飛躍的に増えることは確実なので、色々なパラメータの恒星の表面大気構造や長期的活動などについて太陽との比較研究が可能になる
- 従って太陽研究者の側からのこういう分野への積極的な参入で緊密な協力体制が実現すれば望ましいだろう