

研究会  
「日本における高分散分光の到達点と将来」

# 見えた恒星大気中の 元素分布

大阪市立科学館 加藤 賢一  
2010.5.11-12. メルパルク岡山

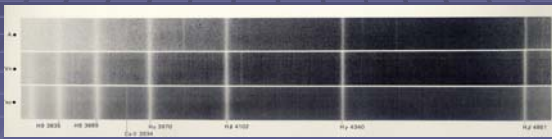
## 話の流れ

- High dispersion, high SN, long range スペクトルが得られるようになった時代の成果の一つとして、mCP星の大気に元素が雲のように浮かんでいるのが見えるようになったことを紹介。HgMn星やHB星での報告もあるが、mCPに話を限る。
- 磁気特異星 1990年代までの問題
- 2000年代の課題と高分散分光の成果
  - 理論の産物でしかなかった層構造が実際に見えてきて、roApとの関連も
  - わけの分らなかった複雑なスペクトル線の振る舞いが素直に分るように
  - 磁場+拡散を入れた大気モデルの構築へ

## 発見史、特徴

$\alpha^2$  CVn などのスペクトル線異常

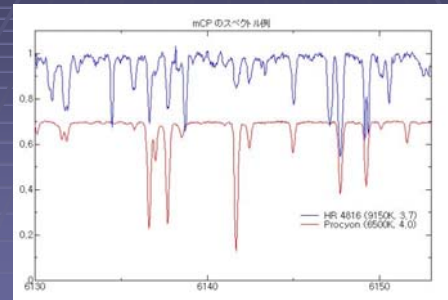
発見 1897 Maury



磁場の発見 78 Vir, 1947, Babcock

## どちらが高温か？ 卓越する鉄属線

温度はA型、スペクトル線はK型



## 特異星の分類

magnetic

\*they're not just A stars!

Name	Criteria	SP*	T <sub>eff</sub> (K)	
λ Boö	Weak Mg II & weak metals	A0-F0	7500-9500	
Am-Fm	Weak Ca II, Sc II; enhanced metals	A0-F4	7000-10000	CP1
Bp-Ap	Enhanced Sr, Cr, Eu &/or Si	B6-F4	7000-16000	CP2
HgMn	Enhanced Hg II &/or Mn II	B6-A0	10500-16000	CP3
He-weak	Weak He I	B2-B8	14000-20000	CP4
He-rich	Enhanced He I	B2	20000-25000	

(Smith 1996)

## 1. 1990年代までの問題

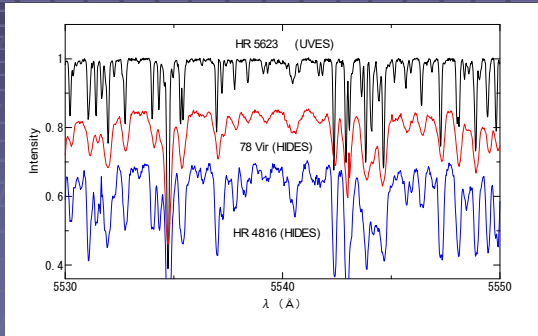
- (1) 強い金属線 — 未同定+変動
- (2) 元素による振舞いの相異 —  $-3 \sim +5$  dex
- (3) 磁場 — 変動
- (4) roAp
- (5) その他



(2) ⇒ Michaud の diffusion model で  
(1)(3) ⇒ Oblique rotator model

有効温度の問題、spectrophotometry  
元素の定量、REEの重要性 ⇒ 5200Å凹み解決

(1) 強い金属線  
未同定 恐ろしいほどのスペクトル線の森



変光と、線の視線速度、強度変化

Because of the patchy distribution of elements on the surface of an Ap star, periodic shifts of equivalent width (line strength) and radial velocity can be seen.

The star's spots can be mapped this way.

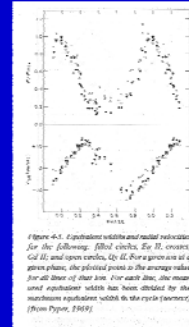
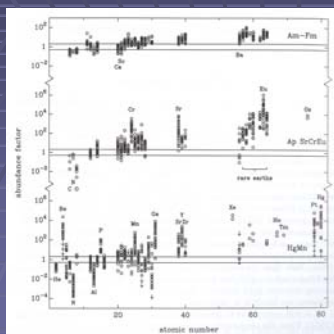


Figure 4-1. Equivalent widths and radial velocities for the following: filled circles, Fe II, Cr II, Ca II, and open circles, Sr II, Ba II. For a given star at a given phase, the plotted points in the average value for all lines of that line. For each line, the measured equivalent width has been divided by the maximum equivalent width in the cycle (arbitrary) (from Payne, 1969).

(2) 元素のよる振舞いの相異 — -3 ~ +5 dex  
— 多い元素、少ない元素が同居 —



- overabundances of heavy elements (Sr, Cr, Eu)
- He underabundance
- light elements underabundance

(Smith 1996)

Cr, Fe と有効温度と平均元素量との関係

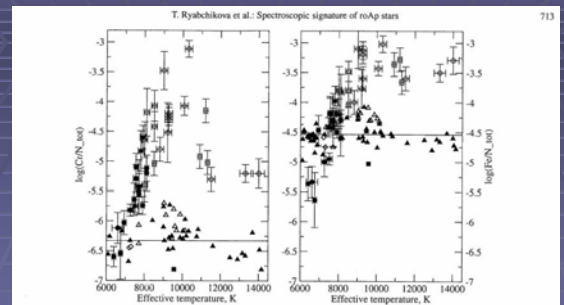


Fig. 5. Cr (left panel) and Fe (right panel) abundances versus effective temperature for 13 roAp stars (filled circles), 23 non-pulsating Ap stars (open circles) and 4 spectroscopic roAp candidates: HD 29578, HD 75445, HD 62140, and HD 115708 (asterisks). Also shown are abundances for normal and superficially normal stars (filled triangles), Am stars (open triangles), δ Scuti-type stars (open diamonds) and for Vega (filled square). Solar abundances are indicated by a horizontal line.

REEと有効温度との関係

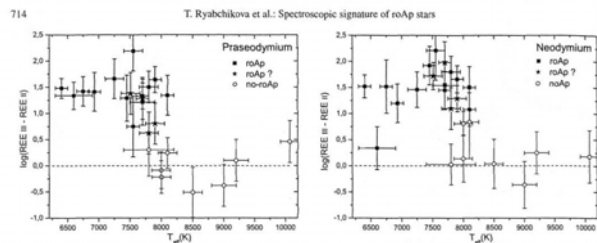
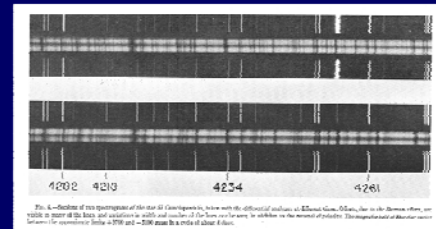


Fig. 7. Dependence of the Pr (left panel) and Nd (right panel) anomaly on temperature.

(3) 変動する磁場



53 Cam, a typical Ap star with a period of rotation about 8 days.

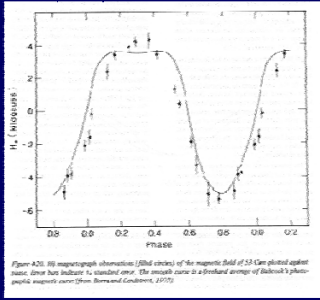


Figure A20. 16 magnetograph observations (filled circles) of the magnetic field of 53 Ceti plotted against phase. Open circles indicate 1-s standard error. The smooth curve is a sinusoidal average of 160000 phase-averaged magnetic vector (Don, *Stellar Wind*, 2002).

- dipolar field
- $B \approx 10^2$  to  $\sim 10^4$  G

### (4) roAp

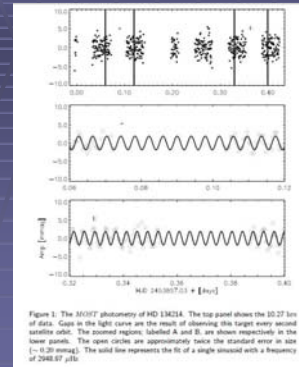
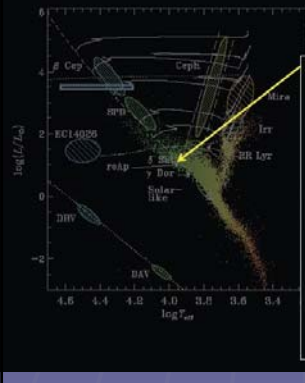


Figure 1. The MOST photometry of HD 184214. The top panel shows the 10.27 line of data. Gaps in the light curve are the result of obscuring the target every second satellite orbit. The zoomed regions, labelled A and B, are shown respectively in the lower panels. The open circles are approximately twice the standard error in size ( $\sim 0.20$  mag). The solid line represents the fit of a single sinusoid with a frequency of 2948.97  $\mu$ Hz.

### rapidly oscillating Ap

### roAp stars



- ✓ discovered by Don Kurtz in 1978
- ✓ ~35 members of the class  
Ask Don how many as of this morning
- ✓ periods: 6 ~ 21 minutes
- ✓ amplitudes: few mmag and less
- ✓ p-modes of low-degree, high-overtone
- ✓ global magnetic fields:  $B \sim 1 - 35$  kG

### roAp

$T_{\text{eff}}$	Magnetic stars	Non-magnetic stars
7000 - 10000	Ap SrCrEu (A3-F0)	Am, $\lambda$ Boo (A0-F1)
10000 - 14000	Ap Si (B8-A2)	Ap HgMn (B6-B9)
13000 - 18000	He-weak Si, SrTi (B3-B7)	He weak PGa (B4-B5)
18000 - 22000	He-rich (B1-B2)	

non oscillating Ap

32 rapidly oscillating Ap

high frequency p modes  
periods : 4 - 16 min ( $1.0 \leq \nu \leq 4.2$  mHz)

### 1990年代までの課題への答

### (1)(3)への答 $\Rightarrow$ Oblique rotator model

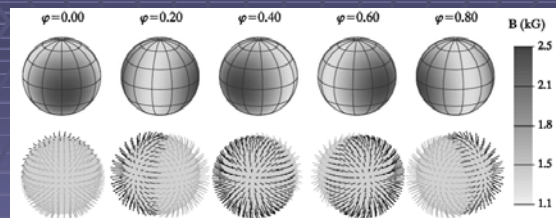
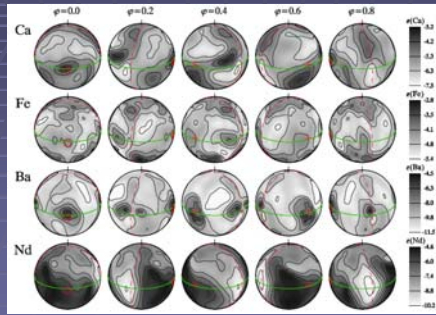


Fig. 4. Dipolar magnetic field geometry of HR 3831. The star is shown at five equidistant rotation phases as indicated at the top of the figure. The aspect corresponds to the inclination angle  $i = 68^\circ$  and vertically oriented rotation axis. The grayscale plot in the upper panel visualizes the distribution of field strength, while the lower panel shows the orientation of the magnetic vectors. In these vector maps the black arrows show field vectors pointing outwards from the stellar surface and the grey arrows correspond to the vectors pointing inwards. The arrow length is proportional to the field strength.

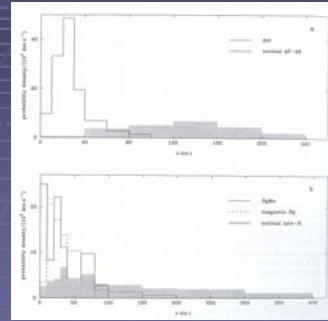
roAp star HR 3831 (Kochukhov et al. 2004)

## 斜回転モデル(2)



roAp star HR 3831 (Kochukhov et al. 2004)

## (2)への答 ⇒ Michaud の diffusion model



自転が遅い  
対流がない  
強い磁場



静穏な大気中で放射  
圧が効いて、元素の  
分離が起る

(Smith 1996)

## Diffusion

これで一応納得していたが、この層構造が見えたわけではなかった

Diffusion Processes in Peculiar A Stars, Michaud G. 1970, ApJ 160, 641

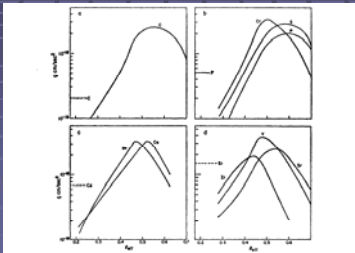
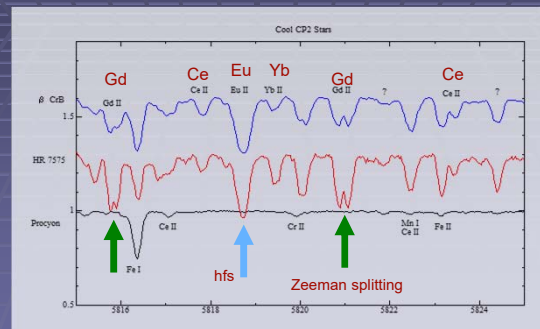


FIG. 3.—Radiation force transferred through photoionization to a number of elements. All calculations were done at  $\tau = 0.1$  in atmosphere with  $\log g = 4.0$ . Dashed lines, gravitational forces. Note that increase of the relatively large abundance of C in normal stars, the radiation field could support overabundance of C by a factor of at most 5.

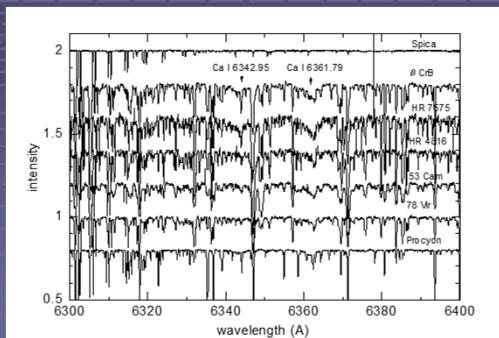
## (1)への答

①REE + ②高励起線 + ③ゼーマン効果



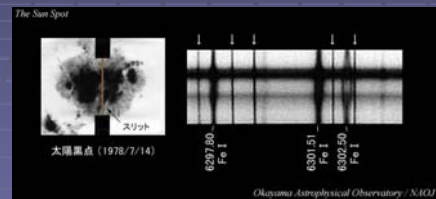
## ②静穏大気中の高励起線 ?

Ca I auto-ionization lines · Michaud theory では重要 Si

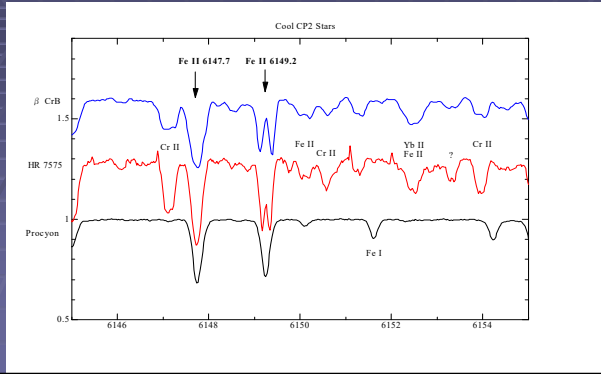


## ③ゼーマン効果

- ゼーマン効果により線が広がり、吸収率アップ
- 見かけ上の効果  
⇒ リアルな元素量



# ゼーマン効果 Fe II 6149.24



# Unno-Beckers の方程式

磁場中で偏光した放射の Transfer

intensity, flux ではない、  
localな磁場構造に依存

- Takeda, Y. 1991, PASJ, 43, 823
- Takeda, Y. 1993, PASJ, 45, 453

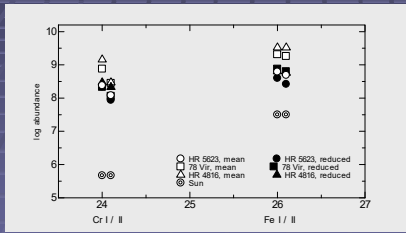
- 加藤(1994) LAMBDA  
科学館研究報告 4, 1  
lambda operator method (Rees & Murphy 1987)

・ゼーマン効果による元素量への影響

$$\mu \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \kappa_c + \kappa_I & \kappa_Q & \kappa_U & \kappa_V \\ \kappa_Q & \kappa_c + \kappa_I & \rho_V & -\rho_U \\ \kappa_U & -\rho_V & \kappa_c + \kappa_I & \rho_Q \\ \kappa_V & \rho_U & -\rho_Q & \kappa_c + \kappa_I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \kappa_c S_c + \kappa_I S_I \\ \kappa_Q S_Q \\ \kappa_U S_U \\ \kappa_V S_V \end{pmatrix}, \quad (2)$$

where  $S_c$  and  $S_l$  are the line and continuum source functions;  $\kappa_c$  is the continuum opacity;  $\kappa_I, \kappa_Q, \kappa_U,$  and  $\kappa_V$  are the line opacities in each polarization mode;  $\rho_Q, \rho_U,$  and  $\rho_V$  describe magneto-optical effects;  $\mu$  is the direction cosine of a ray; and  $x$  is the geometrical depth measured from the stellar surface. Unlike the opacities appearing in the transfer equation of unpolarized light, the  $\kappa$ 's and  $\rho$ 's are generally dependent on the angle of the magnetic field to the line of sight and on the azimuthal angle of the magnetic field.

# ゼーマン効果の元素量への影響



- Na I 0.30 - 1.15 dex
- Ca I 0.15 - 0.95 dex
- Cr I 0.20 - 0.48 dex
- Cr II 0.11 - 0.60 dex
- Fe I 0.14 - 0.86 dex
- Fe II 0.23 - 0.81 dex
- Ce II 0.37 - 0.55 dex
- Eu II 1.26 - 1.97 dex
- Gd II 0.51 - 1.55 dex

1~4 kGの例: せいぜい1~1.5 dex しか下がらない!

# 2. 2000年代の課題と高分散分光の成果

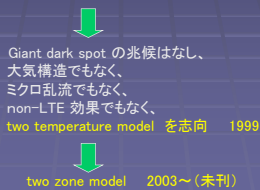
広波長域の高分散分光データにより明らかになった分光上の特徴  
線ごと、元素ごとに振る舞いが異なる。ばらばら!

1990年代補正を施しても、なお課題が

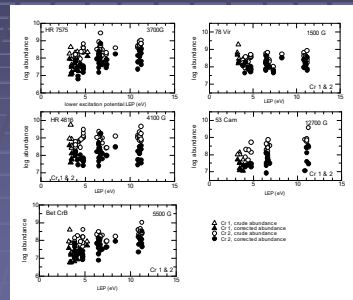
- 強いスペクトル線の場合、コア部とウイング部を一つの元素量で合わせるのが難しい
- 高い励起ポテンシャルを持つ線から得られた元素量が平均値と大きく異なる  
= 励起ポテンシャルによって元素量が異なる
- 通常の元素量解析で得られる小規模乱流速度が元素ごとに異なる  
= 等価幅によって元素量が異なる
- 電離段階の異なる線から得られた元素量が一致しない(電離平衡の破れ)

# 思い出 mCP星 HR7575

- K. Kato & K. Sadakane 1999, PASJ 51, 23
- DAO plate, 4194-4602A (狭い!), 2.4A/mm,  $(T_{\text{eff}}, \log g, \xi) = (8500\text{K}, 3.5, 0.0)$
- 結果
  - 磁場による肥大化を差し引いても, Cr:+2.3dex, Fe:+1.2dex, REE:+2.7-4.6dex
  - ionization balance の破れ (mCP一般)。T換算1000K以上
  - 強い線と弱い線の示す元素量のずれ (mCP一般)、線によってばらばら
  - 励起ポテンシャルによって元素量が異なる



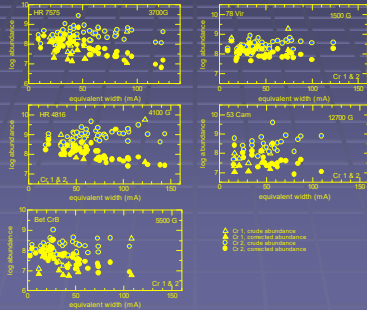
- 高い励起ポテンシャルを持つ線から得られた元素量が平均値と大きく異なる
- 電離段階の異なる線から得られた元素量が一致しない(電離平衡の破れ)





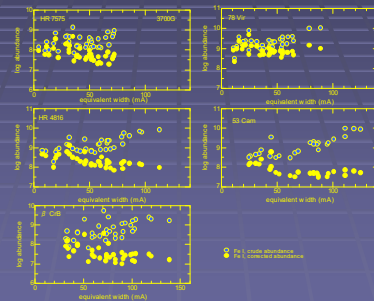
(3) 通常の元素量解析で得られる小規模乱流速度が元素ごとに異なる  
 = 等価幅によって元素量が異なる

1. Cr 元素量:等価幅(mA) — 逆マイクロ乱流 (ゼーマン効果による肥大化は補正)



(3) 通常の元素量解析で得られる小規模乱流速度が元素ごとに異なる  
 = 等価幅によって元素量が異なる

2. Fe I 元素量:等価幅(mA)



### 課題解決へ

高解像度の良質な線データ (UVES)  
 ⇒ 複雑なスペクトル線の振る舞いが明らかに



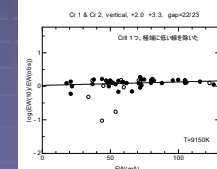
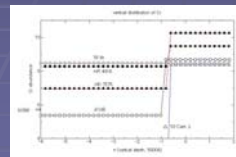
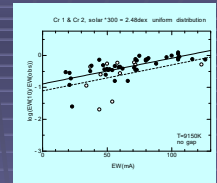
元素の層状分布というアイデア  
 + diffusion理論の精緻化

<残された課題>

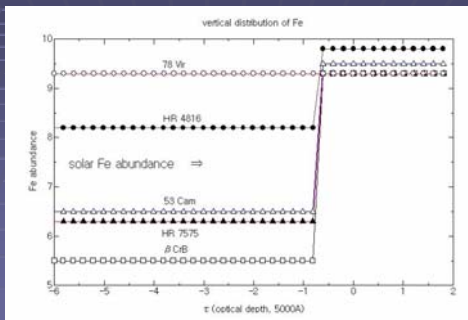
- Q 1. 複雑なスペクトル線の振る舞い
- Q 2. 放射圧、磁場を入れた大気モデル
- Q 3. roApの正体

### Q1へ 層構造による解釈

HR4816、Cr  
 太陽の300倍で一様分布  
 単純に元素量を増やしただけでは説明できない



### Q1へ 層構造による解釈



### Q1へ 磁場+層構造の成果

- 磁場 — 線による元素量のばらつきが小さくなる
- 層構造
  - 逆マイクロ乱流効果が説明できる
  - 励起ポテンシャルへの等価幅の依存性が消える
  - 電離平衡が達成される

## Q2. 拡散、磁場を入れた大気モデル 層構造に基づくコンシステントな解析へ

- 先駆的 - Babel (1994) Ca line profile  
Savanov (1994:.)
- Savanov, I. S., & Kochukhov, O. P. 1998, Astron. Let., 24, 516  
H $\beta$  wing Cr lines. Line formation region
- Two zone 提唱 - Wade et al. (2001) in Magnetic Fields across the HR Diagrams, ASP Conf. Ser. 248, 373  
-  $\beta$  CrBのCr line profiles  
初めて(多分)具体的に層分布を入れて線強度・輪郭を再現

この段階では一様大気モデル(磁場なし、拡散なし)に基づく解析はコンシステントではない

## Q2. 拡散、磁場を入れた大気モデルへ

<磁場を与えて線解析> ・加藤 LAMBDA 他、いろいろ  
<層構造か、のアイデア>

2000年代

<磁場と層構造を与えて線解析><一様分布大気モデル採用>  
・加藤 zeeman2 他、いろいろ

Empirical に求められた層構造を無矛盾に理論的に求めよう  
- 磁場+拡散を入れた大気モデル - それに基づいた解析

- <層構造を与えて大気モデルを決める>  
▪ Shulyak et al. (2004) LLmodels, A&A 428, 993
- <磁場を与えて大気モデルを求める>  
▪ Kochukhov, O. 2007 SYNTH3, SYNTHMAG (層構造に対応)  
▪ Bischof, K. M. 2007, CAMAS Code
- <拡散プロセスを入れ、層構造を持った大気モデルを求める>  
▪ LeBlanc, F., & Monin, D. 2004, The A-Star Puzzle, Proceedings of IAU Symposium 224, 193
- <拡散プロセスに磁場を加え、層構造を持った大気モデルを求める>  
▪ Alecian, G., & Stift, M. J. 2007 磁場を入れたdiffusion,  $\kappa$  &  $\tau$  flux constant, zero effective acceleration  
▪ LeBlanc, F., et al. 2009, Stellar model atmospheres with abundance stratification, ApJ 495, 937

## Q2. LL model (Shulyak et al. 2004)

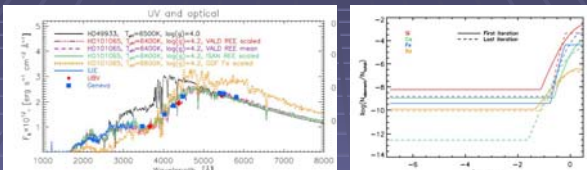


Fig. 7. Observed and theoretical energy distributions of HD 191065 calculated using line lists. For comparison purposes the theoretical energy distribution of a normal F-type star HD 49933 is also presented with 20Å Gaussian.

層構造はinitial condition. そこで、観測に合うようにiterative に層構造を決める。Diffusion が入っているわけではない。磁場下での transfer は入っている。これは Przybylski星で、実際は normal F star HD 49933 の flux (計算)、観測されたfluxに合うように決めた? それとも lines から? Shulyak D. et al. 2010 A&A to be appeared

## Q2. Alecian, G., & Stift, M. J. 2007, A&A 475, 659.

漂うCa, Mg, Feの雲。現在、最も consistent に近いコード?

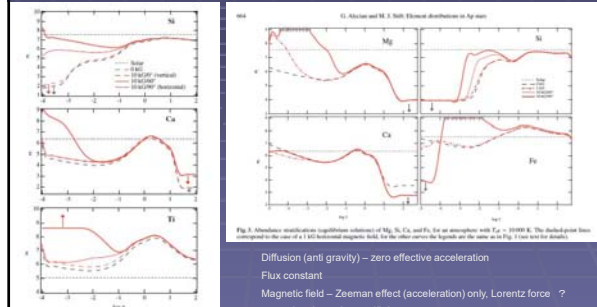
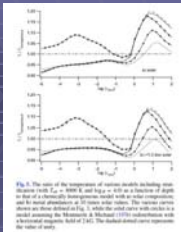


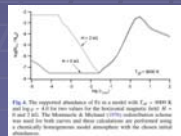
Fig. 8. Abundance stratification (logarithmic abundance) of Mg, Si, Ca, and Fe, for an atmosphere with  $T_{\text{eff}} = 6700$  K, and  $\log g = 4.0$ . The logarithm of the abundance (x with respect to hydrogen) in units of  $\log \epsilon = 12$  is plotted against  $\log \tau$ . The meaning of the different curves is given in the text panel. (C1), the arrows indicate that the equilibrium relations are not reached in some layers and that equilibrium abundances should be smaller (or larger) than those displayed.

Diffusion (anti gravity) - zero effective acceleration  
Flux constant  
Magnetic field - Zeeman effect (acceleration) only, Lorentz force ?  
⇒ 元素分布、温度、圧力構造  
磁場の傾斜角による差

## Q2. LeBlanc, F., et al. 2009, ApJ 495, 937



温度の逆転層。線はdiffusionの違い



水平磁場が 0.2 kG, Fe分布

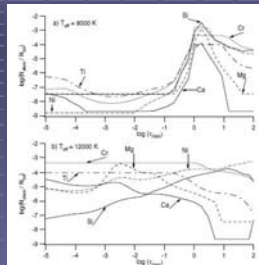
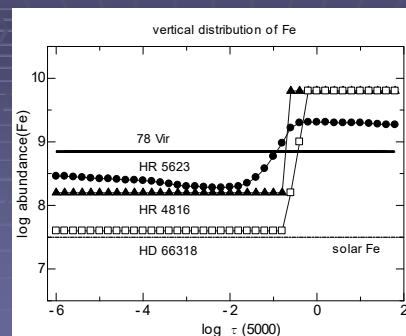


Fig. 9. The abundance of the elements Mg, Si, Ca, Ti, Cr and Ni as a function of optical depth for models with  $T_{\text{eff}} = 8000$  K and  $T_{\text{eff}} = 12000$  K (both for  $\log g = 4.0$ ) assuming the Mieske & Michael (1977) redistribution.

- Diffusion - Alecian, G., & Stift, M. J. 2007 類似
- Magnetic field - Lorentz force - diffusionに効く。Zeeman effectは入れず

## Q2. こんなサンプルが!

Ex.層構造が見えないmCP 78 Vir!



## Q2. Ex.層構造が見えないmCP 78 Vir!

HR4816	9150 K, 4.1 kG	13
HD 66318	9200 K, 14.5 kG	
<b>78 Vir</b>	<b>9250 K, 1.5 kG</b>	<b>15</b>
HR 5623	9400 K, 1.1 kG	~1

mCPの全てが層状分布しているわけではない

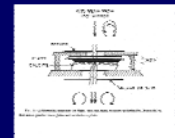
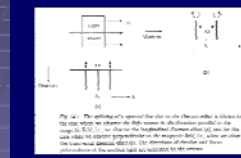
磁場の傾斜角？

他の混合メカニズムは？

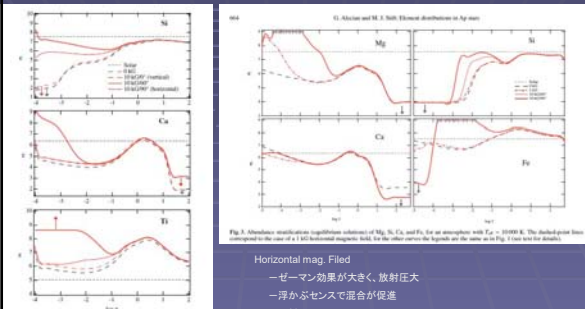
Heなど軽元素はどうなっている？

roAp現象は、ないか

## Q2.ゼーマン効果は磁場の角度に依存



## Q2. Alecian, G., & Stift, M. J. 2007, A&A 475, 659. 磁場の傾斜角による違いに注意！



Horizontal mag. field  
 -ゼーマン効果が大きく、放射圧大  
 -厚かぶセンサーで混合が促進  
 -一様化へ

こんな単純にいくのかな？

## Q3. roAp研究の進展

- 1) the direct influence of the Lorentz force (Dziembowski 1984; Dziembowski & Goode 1985),
  - 2) the magnetic overstability (Shibahashi 1983; Cox 1984),
  - 3) the stochastic excitation (see Houdek et al. 1999),
  - 4) the  $\kappa$ -mechanism (Dolez & Gough 1982; Matthews 1988; Dolez et al. 1988; Dziembowski & Goode 1996; Balmforth et al. 2001)
- <1> inhomogeneous elemental distribution (Ex. Théado et al. 2009, A&A 493, 159)
  - The inhomogeneous and abnormal distribution of heavy elements observed at the surface of the magnetic Ap stars as well as the vertical stratification detected in their atmospheres
  - stellar winds
  - Turbulent transport
  - <2> Magnetic field effects (Saio & Gautschi, 2004, MN 350, 485)

最近の傾向 - Excitation mechanism に元素の不均衡分布、磁場の働きが必要  
 mCPの分光観測、層構造解釈と密接になってきた

## まとめ

- 複雑なスペクトル線の振る舞い  
 層構造で解決。しかし、一様なmCPもある  
 磁場、拡散を入れた大気モデル  
 ⇒ 層構造が得られる  
 自然にroApの振動と結びつく？
- 表面構造との関係  
 依然、不明  
 磁場、拡散を入れた大気モデルを2Dに拡張  
 ⇒ 自然にroApの振動と結びつく？
- roApからの追究  
 東大、東北大グループ

わが国の現状 roApの理論はまずまず。スペクトル線関係+大気理論が弱い



恒星気象学

## 御礼

OA0 + HIDES  
 (+ELODIE, UVES)

ここまできれいに示すことができたのは、HIDESにより  
 高品質のスペクトルが得られたため

終