

磁気特異星における元素の層状分布とその温度依存性

加藤 賢一

kato@sci-museum.jp

概要

磁場を帯びた化学特異星ではクロームや鉄が層状分布（上層で欠乏、下層で過剰）を示すことが多いが、代表的な磁気特異星 78 Vir (HR 5105、HD 118022) にはそのような兆候が見られない。その原因を探るため、ほぼ同じ表面温度および磁場強度を有する磁気特異星 HR 5623 (HD 133792) のスペクトルを解析し、層状構造の温度依存性を調査した。一様分布している 78 Vir とは異なり、HR 5623 ではクロームと鉄は層状分布を示しており、少なくとも両星においては、層状分布の有無が表面温度に起因するものではないことが明らかとなった。そこで、本稿では新たな要因として磁場の傾斜角の違いを提案する。HR 5623 では磁場が下層から表面にほぼ垂直に伸びているのに対し、78 Vir では表面に沿うように伸びているとするとゼーマン効果（磁場に垂直方向に最も強く出る）が大きくなり、その結果、元素の吸収率および放射圧が大きくなって混合がよく起こり、78 Vir では層状構造が見えにくくなると考えられる。

1. はじめに

HR 5623 (HD 133792) は南天のコンパス座にある実視等級 6.3 等の磁気特異星である。Kochukhov et al. (2006) によれば、その大気パラメータ (cgs 単位系) は (有効温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 平均磁場強度 mean magnetic field modulus) = (9400 K, 3.7, 1.1 kG) である。一方、加藤他 (2009) が本報告誌で示したように磁気特異星 78 Vir では、(T_{eff} , $\log g$, mean magnetic field modulus) = (9250 K, 3.5, 1.5 kG) であり、両星は類似した値を示している。磁気特異星 5 星について層構造を調べたところ (加藤他 2009)、有効温度 7450 K ~ 8730 K までの 4 星 (53 Cam, HR 4816, β CrB, HR 7575) は Cr と Fe が層状に分布 (表面より深部が多い) しているが、9250 K の 78 Vir では一様分布であった。層構造が放射圧によるものであるとすれば、その程度や有無が有効温度に依存することは十分考えられるところであり、その境界がどこにあるか特定できれば層構造と放射圧の関係をより詳細に知ることができる。78 Vir はそのため

の良いサンプルであり、大気パラメータの類似している HR 5623 はそれを補強する材料とすることができる。ところが、Kochukhov et al. (2006) は HR 5623 に Ca, Si, Mg, Fe, Cr、そして Sr に層構造を認めており、これが正しければ、一様分布を示す 78 Vir がむしろ例外という可能性が出てくる。そこで、Kochukhov et al. (2006) が主張するように本当に HR 5623 が層構造となっているかどうかを確かめ、78 Vir と比較することによって層構造の温度依存性を探ることが本研究の目的である。なお、加藤他 (2009) は Kochukhov et al. (2006) が示した層状分布を仮定すると 78 Vir の観測値をよく再現することを示したが、これについても検討を加える。

表 1 に HR 5623 の基本データを掲げておく。

2. スペクトル

本研究ではヨーロッパ南方天文台 (ESO) の分光器 (UVES、Ultra-violet and Visible Echelle Spectrograph) で得られた HR 5623 のスペクトルを

用いた。この分光器は、口径 8.2 m 望遠鏡 4 台と 1.8 m 望遠鏡 4 台の計 8 台の望遠鏡からなる VLT (Very Large Telescope) のうち 2 台目の 8.2 m 望遠鏡 Kueyen (UT2) に装着されている高分散分光器で、3000 Å から 11000 Å まで感度を有し、最大分解能は 110,000 とされている。わが国のすばる望遠鏡に付属している高分散分光器 HDS (High Dispersion Spectrograph) より解像力が劣るものの (HDS は最大分解能 160,000)、ほぼ同程度の性能を持っている。

使用したスペクトルは下記の ESO のデータアーカイブで一般公開されている。

<http://archive.eso.org/cms/>

そこから次の 2 本をダウンロードした。

- UV_SFLX_166909_2005-02-12T08_28_46.294_RED L580D1_1X1_03.FITS
- UV_SFLX_166909_2005-02-12T08_28_46.294_RED U580D1_1X1_03.FITS

Kochukhov et al. (2006) が使用したスペクトルは同じ UVES で撮影されたが、2002 年に観測されており、本アーカイブ・データとは異なるものである。

78 Vir のスペクトルは国立天文台岡山天体物理観測所の HIDES 分光器 (分解能 60,000) で得られたもので、その解析結果はすでに加藤他 (2005, 2009) で報告されており、ここではその結果を参照する。

図 1 にスペクトルのサンプルを掲げておいた。比較のため 78 Vir と HR 4816 のスペクトルを並べた。HR 4816 のスペクトルは 78 Vir と同時期に国立天文台岡山天体物理観測所の HIDES 分光器で得られたものである。HR 4816 の大気パラメータは、その後の研究で少し修正され、(T_{eff} , $\log g$, mean magnetic field modulus) = (9150 K, 3.74, 4.1 kG) となっており、HR 5623 や 78 Vir よりやや低温であるが、これらに連なる位置にある。

等価幅の測定は蓮井隆氏が開発したプログラム虹星を用いて行い、線の同定およびブレンドの調査は竹田洋一氏 (国立天文台) が開発したプログラム spshow を用いて行った。

図 2 に Cr および Fe の等価幅を 2 星について比較した結果を示した。2 星の大気パラメータに大きな差はないが、78 Vir の等価幅は HR 5623 の 2 倍程度あり、平均元素量が多いことを示唆している。

3. 自転速度、磁場強度

図 1 や 3 から推察されるように HR 5623 のスペクトル線は鋭く、自転速度は遅いものと思われる。スペクトル合成法によって得られた線輪郭を観測に合わそうとすると、その速度として

$$\langle v \rangle = 2.0 \sim 2.5 \text{ km/s}$$

が得られる。この速度 $\langle v \rangle$ には分光器に起因する instrumental broadening、星の自転、マクロ乱流、磁場による肥大化、などの効果が混じっている。以下ではこれを検討しよう。

HR 5623 のスペクトルについて Kochukhov et al. (2006) は UVES の instrumental broadening を補正すると自転によるスペクトル線の広がりはなくならないと言う。すなわち、自転は極めて遅く、見かけの自転速度 $v \sin i$ の最大値は $\sim 1.0 \text{ km/s}$ と主張する。その上で、有効ランデ因子 z が大きな線 (たとえば、Fe I 4878.21 Å, $z=3.00$; Cr II 5116.05 Å, $z=2.91$ など) について、線輪郭が instrumental broadening では説明できないほど広がっていて、それは磁束密度 1.1 kG の磁場によるものとして磁場強度を求めた。

なお、Mathys & Lanz (1992) は Fe II の 6147 Å, 6149 Å 線について磁場の影響を調べ、磁場による分岐は見えない星として HR 5623 を分類している。

以上を UVES スペクトルについて再検討しておこう。まず UVES の instrumental broadening であるが、比較スペクトルの Th 線から求めた FWHM は 5.13 ピクセルで、1 ピクセル当りの分散が 0.017 Å であるから、FWHM は 0.087 Å (5910 Å において) となる。これを速度場に換算すると 2.2 km/s である。この FWHM を持ったガウス関数型のウィンドーでスペクトル線を広げた例が図 5、6 である。これを見れば分るように、観測された線輪郭の広がりは大部分が instrumental broadening による

ものと言える。すなわち、先に求めた速度場 $\langle v \rangle$ 成分のほとんどは instrumental broadening であり、自転の効果は実質的にないものと見られる。従って、 $\langle v \rangle$ として 2.5 km/s を採用すると、 ~ 1.0 km/s 程度の自転速度があるとしても辻褃が合い、Kochukhov et al. (2006) の指摘は妥当なものと言える。

なお、岡山天体物理観測所の HIDES 分光器による 78 Vir の instrumental broadening は FWHM が 0.096 Å (6150 Å において) で、UVES とほぼ同じである。速度に換算すると 2.3 km/s となり、実質上、UVES と同じと見なせる。

一方、磁場について見ると、Kochukhov et al. (2006) が有効ランデ因子 z の小さな線として挙げている Fe I 5434.52 Å ($z=-0.10$) と z の大きな線 Cr II 5116.05 Å ($z=2.91$) を比較すると (図 7)、線幅に確かに違いが見られる。こうしたことから、Kochukhov et al. (2006) は 1.1 kG という値を導いた。この程度の磁場の場合、等価幅の変化はさほどではなく、たとえば Fe II の 6147 Å、6149 Å のペアのように同じ多重線の場合、強度比に差はほとんど見られない (Takeda 1991)。図 3、5、6 に Fe II の 6147 Å、6149 Å の例を、図 4 には Fe II の 4385.318 Å、4416.817 Å のペアの例を掲げておいた。理論スペクトル (図 5、6) には instrumental broadening を施してある。磁場強度は 1.1 kG とし、磁場の傾斜角を 45 度として求めた。以上から、Kochukhov et al. (2006) が主張するように、この程度の強度の磁場があると結論できる。

なお、磁場を考慮した線輪郭・線強度の計算は Kato & Sadakane (1999) で行ったように、4 つのストークス・パラメータに関する Unno-Beckers 方程式をラムダ・オペレータ法で解く方法で行った。ただし、恒星表面中心での specific intensity を輻射流速 (flux) と見なし、観測されたスペクトルとの比較を行った。磁場の傾斜角は 45 度と仮定した。スペクトル線のゼーマン分岐は LS カップリングの仮定が成立するものだけに限り、理論的な分岐幅と強度比を採用した。後述する元素の層

構造は考慮されていない。

4. 平均元素量

78 Vir の観測波長域である 5500 Å \sim 6670 Å の間の Cr および Fe 線の等価幅を測定し、平均元素量を得た。ここで平均元素量とは等価幅から通常の大気モデル法によって得られる元素量のこと、ゼーマン効果や層状分布などを考慮していないことを意味している。

元素量の計算には Kurucz (1993) のプログラム WIDTH9 を用いた。大気モデルは同じく Kurucz が求めた ATLAS9 大気モデルから内挿して得た。大気モデルを計算する際の元素量は太陽の 10 倍とした。

個々の線から求められた平均元素量を表 4 に、元素毎にまとめた値を表 2 に示した。図 8 にはその結果を図示した。Cr は太陽値より 2.41 \sim 2.70 dex 多く、Fe は 1.19 \sim 1.29 dex 多いという結果となった。Fe ではほぼ電離平衡になっているが、Cr では Cr I の示す元素量が Cr II のそれより 0.3 dex 大きく出ている。78 Vir に比べると、0.37 \sim 0.57 dex 少ない。

平均元素量に対する励起ポテンシャルと等価幅との相関を図 9、11 に示した。Cr では HR 5623、78 Vir 共に明瞭な相関は認められない。なお、元素量計算では通常のスเปクトル線解析では考慮するマイクロ乱流速度 (micro-turbulent velocity) を入れていない。それにも拘らず等価幅への依存性が見られず、少なくとも磁気特異星ではマイクロ乱流速度=0 と考えてよいことの傍証となっている。しかし、一方、図 11 の Fe では、78 Vir は等価幅とともに大きな元素量を示しており、一見するとマイクロ乱流速度を考慮しなければならないが、次の図 12 を見れば分るように、これはゼーマン効果を差し引くと消えてしまうので、見掛けの現象と言える。HR 5623 ではいずれにも依存性が見られず、マイクロ乱流速度のないやや奇妙な A 型星のように見える。先に 1.1 kG の磁場がある可能性が大きいことを指摘したとおり、実際にはゼーマン効果によってスペクトル線の肥大化が起っており、

それが見かけ上消えているのである。それが元素の層状分布に起因すると解釈できることは次に見るとおりである。

5. ゼーマン効果を考慮した元素量

表4、図10、12にゼーマン効果による肥大化を差し引いた元素量を示しておいた。図9、11に比べると、分散が小さくなっており、磁場が効いている兆候を窺うことができる。ちなみにHR 5623の等価幅への依存性を直線でフィットさせ（最小自乗法）、その相関係数を見ると、Cr IIでは平均元素量：ゼーマン効果考慮後の元素量=0.196：0.462、Fe IIでは0.341：0.762、となっており、視覚的に分散が小さく見えたとおりの結果である。

HR 5623の等価幅への依存性を見ると、図9、11ではほぼ依存性が無いように見えていたが、図10、12ではCr、Fe共に等価幅とともに元素量が小さくなる傾向を示している。これは層状分布している恒星でしばしば見られる現象である（加藤他2005、2009）。

なお、ゼーマン効果が及ぼす元素量への影響はCrで0.04~0.14 dex、Feで0.19~0.27 dexである。磁場の強いHR4816やHR7575より影響が小さいことがわかる。

表3にゼーマン効果を差し引いた後の元素量をまとめておいた。比較のためHR 4816の結果も併せて掲げておいた。HR 5623では中性Cr、1階電離Crの示す元素量に0.4 dexの差があり、電離平衡に問題があるように見える。

6. 層状分布

以上、述べたように78 Virとは異なり、HR 5623では層状分布している兆候が見えている。そこで、元素の層状分布と磁場の強度・構造を与え、そこでの線形成をシミュレートするプログラムZeeman2を作成し（Kato & Sadakane (1999)で使用したプログラムを改良）、観測値を再現できるかどうかを検討した。

まず、一様分布している場合のケースを図13、14に示しておいた。Crは太陽値とそれより2.40

dex大きい場合、Feでは太陽値とそれより1.20 dex大きい場合である。Cr、Feそれぞれで2.40 dex、1.20 dexの場合を見ると、20~30 mAより強い線ではほぼ観測値を再現しているが、それより弱い線では理論値は観測値より小さく出ている（図13、14で左下がり）。一方、比較のため78 Virの例を並べておいたが、Cr、Fe共に一様分布として観測値を再現することができる（図中で真横に並んでいる）。

このようにHR 5623の振る舞いは78 Virと異なっており、それが層状分布によるものと考え、弱い線は一般に深部で形成されるところから、深部におけるCr、Fe量は表面層より多いと考えられる。ただし、励起ポテンシャルにはそうした依存性が明瞭に見られず（高励起線ほど温度の高い深部で形成されやすい）、扱いには注意を要する。

図15、16に層状分布を仮定して求めた等価幅を観測値と比較した。単純な2層構造を仮定した場合、およびKochukhov et al. (2006)が示した分布を用いた場合について求めた。一様分布の場合より弱い線が観測値に近づいているように見えるが、今回の計算ではKochukhov et al. (2006)の示した層状分布によって観測を再現することはできず、なお改良の余地がある。中性元素と1階電離イオンが示す等価幅に依然差があり、層状分布だけでなく、大気パラメータにも不確実性がある可能性もある。このように定量的には課題が残っているものの、78 Virが一様分布で説明できるのに対し、HR 5623では層状構造を示していることは間違いどころである。

以上で得られたCrとFeの層状分布を図17に図示した。比較のためHR 5623（Kochukhov et al. 2006）、HR 4816（加藤他2009）、HD 66318（次章参照、Ryabchikova 2008）の結果を併載した。

7. 考察

Ryabchikova (2008)は磁気特異星のCrとFeの層状構造と磁場を結びつけた考察を行っている。それによれば、まず、層構造を有する恒星の有効温度は7250Kから11250Kに分布している。上下層

での元素量の差は磁場強度が強くなるに従って大きくなり、またその境界面は深くなる傾向があるという。境界面は $\log \tau (5000) = -1.0 \sim +0.0$ あたりである。

また、Ryabchikova (2008) は HR 5623 に似た大気パラメータを持つ特異星として HD 66318 ($T_{\text{eff}}=9200$ K、 $\langle B_s \rangle=14.5$ kG) を挙げている。非常に磁場が強く、上層、下層で 2.0 dex に及ぶ Fe の差があり、下層には上層の 100 倍の濃さで Fe が沈殿していると言う（上層はほぼ太陽値）。図 17 で比較のため示した HR 4816 の層状分布も Cr、Fe で 1.2、1.6 dex の違いを見せている。78 Vir に層構造が見られないという特異性を解釈することは現在のところ困難と言わざるを得ない。

加藤他 (2009) は 78 Vir の Cr 分布が HR 5623 と同じような層状分布であれば Cr 線強度を説明できることを示したが、図 17 から推察できるように 78 Vir の Cr 量は HR 5623 の平均値に匹敵し、かつ上下差は余り大きくないため、結果的に一様分布している場合とのスペクトル線の強度差を認めがたかったためと思われる。しかし、図 13、14 を見れば明らかなように、HR 5623 のスペクトル線強度は一様分布では説明できず、78 Vir との差は歴然としている。

理論サイドから見ると、Michaud (1970) の最初の拡散理論（元素が光を吸収すると運動量を得て大気内を上下する。その程度は元素により異なるため、元素により沈殿したり浮上したりして元素により多寡が生まれるとする説）によれば、Cr も Fe もどちらかと言えば大気奥深く沈殿してしまい、見かけ上少なくなる元素とされた。その後、Michaud et al. (1976) でも Fe に働く放射圧は小さく、欠乏しているように観測されることを予言していた。これに対し、最近の計算によれば（たとえば、LeBlanc & Monin (2004)、Alecian & Stift (2007)）、Cr も Fe も $\log \tau (5000) = 0.0$ 前後にステップがある階段状の分布を示すことが分かった。Cr や Fe が沈殿しているというイメージに観測と理論の矛盾はない。

なお、層状構造は磁場の向きによって大きな影

響を受けることが Alecian & Stift (2007) によって示されている。磁場があっても半径方向に向いていれば磁場が無い時とほぼ同じような振る舞いとなり（拡散効果が大）、表面で元素量が大きく減少するような分布となり、磁場が半径方向に直行する向きであれば拡散の上下差が少なくなり、元素量の上下差も小さくなり、層状分布が不明瞭になる。これはゼーマン効果の大きさが磁場の傾斜角に依存するため、視線に垂直であればゼーマン成分である π 成分も σ 成分も出現するのに対し、磁場が水平であれば σ 成分しか見えず、吸収係数が半減するためである。

78 Vir も HR 5623 も同程度の強度の磁場が観測されているが、両者で傾斜角が異なり、78 Vir では水平か、水平に近い向きであるとすれば層状分布が不明瞭となっていることを説明することができる。

また、HR 4816 が 4.1 kG、HD 66318 は 14.5 kG と、磁場の強い星が大きな差を持った層構造を見せていることも自然に説明できる。本来、磁場が強ければ磁場の傾斜角が小さくてもゼーマン効果は大きく出るからである。

Leone & Catanzaro (2001) によれば、78 Vir は周期 3.722084 日で磁場強度 ($-0.2 \sim -1.0$ kG) 及び光度 (Hipparcos 衛星の V 等級で約 0.015 等) が変化しているという。磁場強度が変化すればゼーマン効果の大きさも変化することになり、大気構造に変化が生じるものと思われるが、今回使用した HIDES スペクトルとそれとは位相の異なる UVES スペクトルを比較したところでは Fe II の 6147 Å、6149 Å 線には強度・輪郭ともに変化が認められず、そうした兆候は見えない。

Ryabchikova (2008) が提示した層状分布を示す星の有効温度は 7250K から 11250K であった。78 Vir や HR 5623 はその間に入っており、78 Vir に層状構造が見られないのは温度の上限値にあるためとするのは妥当ではない。その原因として、上では磁場の傾斜角の相違を指摘したが、それを証明するにはなお同種の特異星のサンプルが必要である。

参考文献

- 加藤賢一・西村昌能・大西高司・定金晃三、2005、
大阪市立科学館研究報告, 15, 11.
- 加藤賢一・西村昌能・大西高司・定金晃三、2009、
大阪市立科学館研究報告, 19, 15.
- Alecian, G., & Stift, M. J. 2007, A&A, 475, 659.
- Hoffleit, D., Warren Jr., W. H. 1991, The Bright
Star Catalogue, 5th Revised Ed.
(Preliminary Version), Astronomical Data
Center, NSSDC/ADC.
- Kato, K., & Sadakane, K. 1999, PASJ, 51, 23.
- Kochukhov, O., Tsybal, V., Ryabchikova, T.,
Makaganyk, V., & Bagnulo, S. 2006, A&A, 460,
831.
- Kurucz, R. L. 1993, ATLAS9 Stellar Atmosphere
Programs and 2km/s Grid (Kurucz CD-ROM
No. 13), Harvard-Smithsonian Center for
Astrophysics, Cambridge, MA.
- LeBlanc F., & Monin D. 2004, in The A-Star
Puzzle, IAU Symp., 224, p.193.
- Leone F., & Catanzaro G. 2001, A&A 365, 118.
- Mathys, G., Lanz, T. 1992, A&A, 256, 169.
- Michaud, G. 1970, ApJ, 160, 641.
- Michaud, G., Charland, Y., Vauclair, S., &
Vauclair, G. 1976, ApJ, 210, 447.
- Renson, P., Gerbaldi, M., Catalano, F.A. 1991,
A&AS, 89, 429.
- Ryabchikova, T. 2008, Contrib. Astron. Obs.
Skalnate Pleso, 38, 257.
- Takeda Y. 2001, PASJ 43, 823.

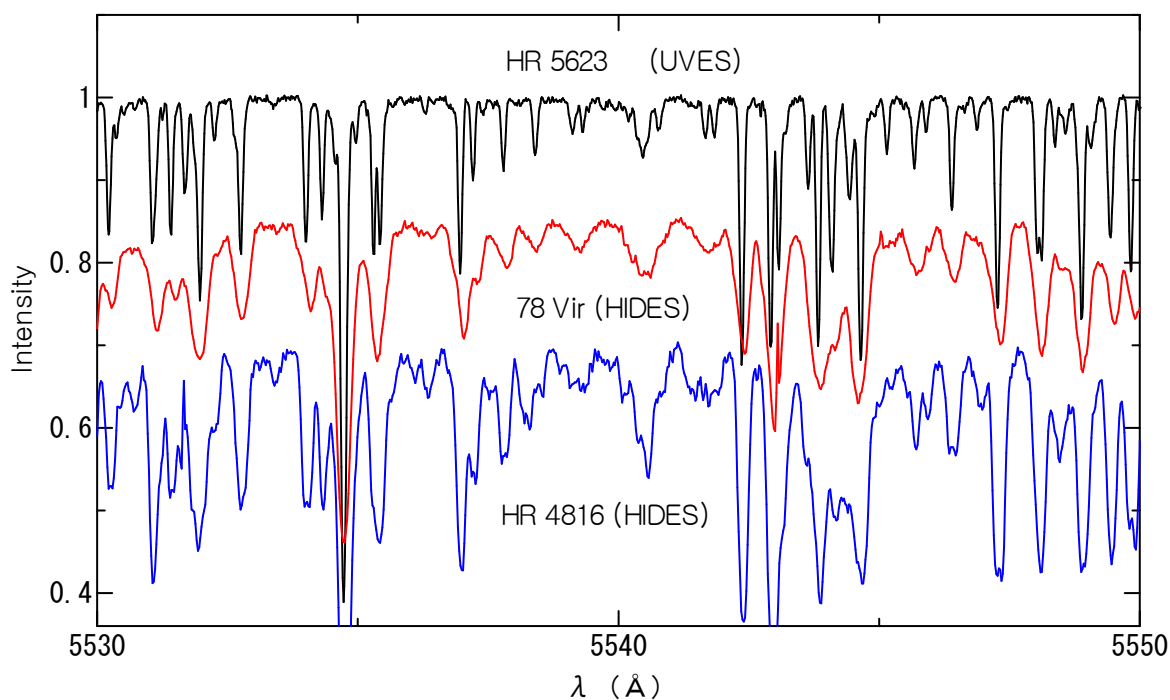


図 1. スペクトルのサンプル。下に磁気特異星 HR4816 のスペクトルを添えた。この星は自転速度 ($v \sin i$) が 4.4 km/s ほどと自転の遅い星だが、HR 5623 はこれよりさらに線が鋭く、これから推定される自転速度はほぼ 0 km/s である。したがって、スペクトル線の広がりには自然幅の他、分光器の特性による instrumental broadening と呼ばれる効果による。自然幅の中にはマイクロ乱流 micro-turbulence のような速度は入っておらず、通常の natural damping, quadratic Stark damping, van der Waals damping だけが効いている

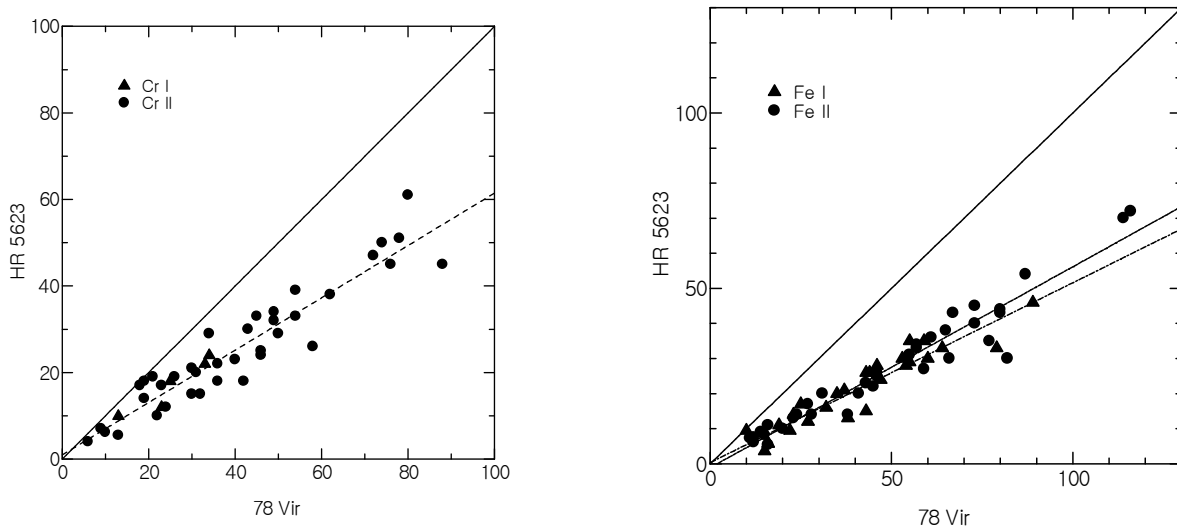


図2. HR 5623 と 78 Vir の等価幅比較。Cr (左) と Fe (右)

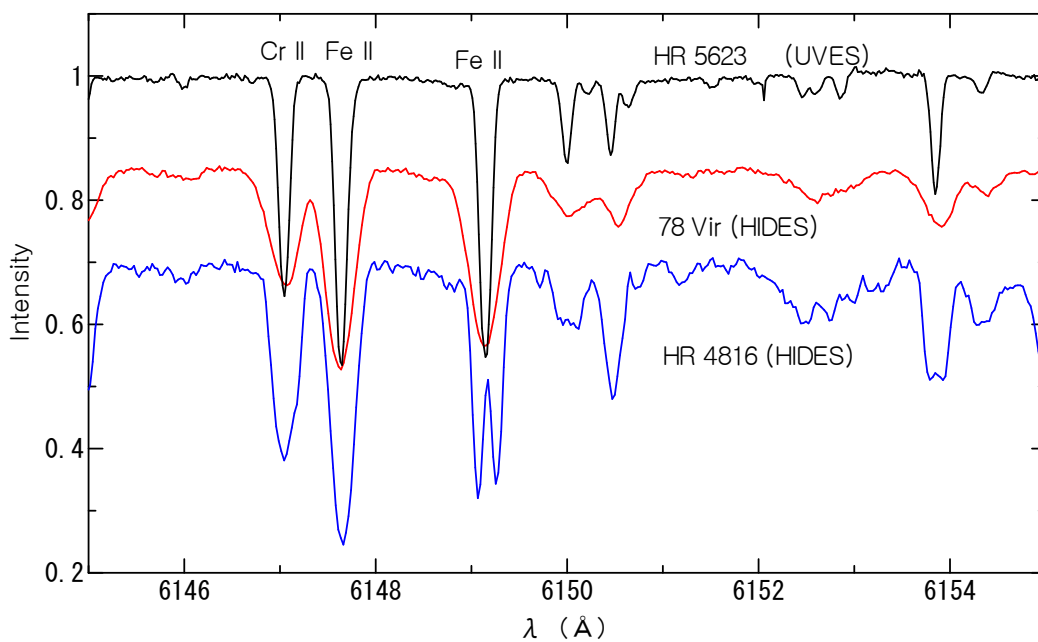


図3. 同じマルチプレットに属するFeの2重線6147.74 Å、6149.26 Å線付近。磁場の強いHR 4816では6149.26 Å線はゼーマン分岐している。6147.74 Å線はランダのg因子が小さく、磁場の影響が小さい。HR 5623と78 Virでは両者の線強度・輪郭はよく似ており、磁場が弱いことを示している。HR 5623の6147.74 Åの等価幅は71 mA、6149.26 Å線は70 mAで、測定誤差内で一致している

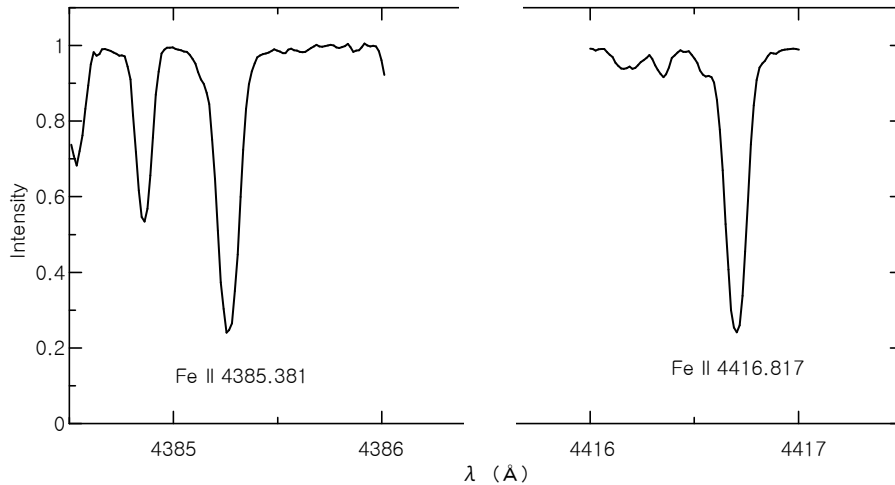


図4. HR 5623 の同じマルチプレットに属する Fe II ペア。4385.381 Å 線のランダの g 因子は 1.333、4416.817 Å 線は 0.833 で、ゼーマン効果の程度が異なる。しかし、観測された線強度はほぼ等しく、ゼーマン効果が現れているようには見えない。4385.381 Å 線の等価幅は 96 mÅ、4416.817 Å 線も 96 mÅ で、測定誤差内で一致している

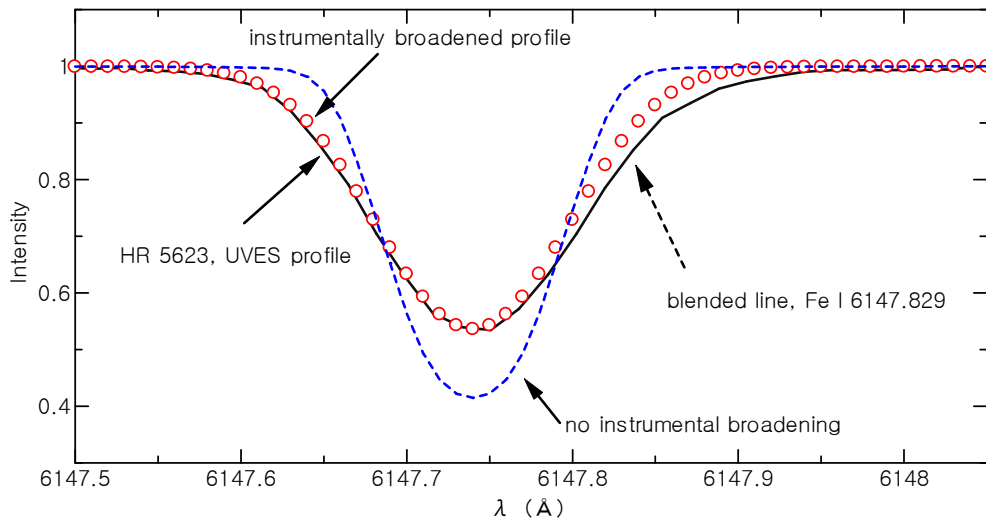


図5. UVES の instrumental profile 効果。Fe II 6147.74 Å。1.1 kG の磁場（傾斜角 45 度を仮定）を考慮して理論的線輪郭を計算した（実線）。破線は instrumental broadening が効いていない場合（自然幅）で、○が UVES による観測されたスペクトル線輪郭。次の図6 と併せて見ると、線輪郭は instrumental broadening にほぼ一致しており、自転効果はほとんど効いていないことが分る。なお、この線には Fe II 6147.775 Å 線、および Fe II 6147.829 Å 線が隣接しており、右翼部の輪郭にそれによる吸収が見えている

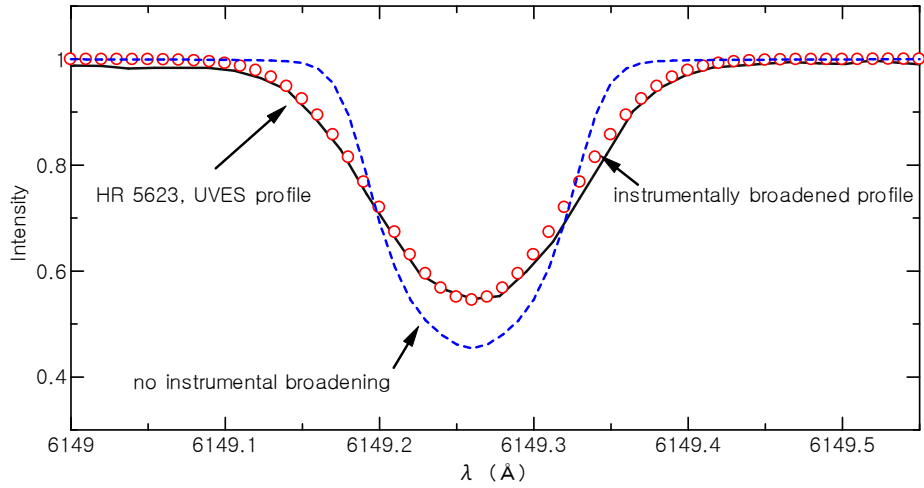
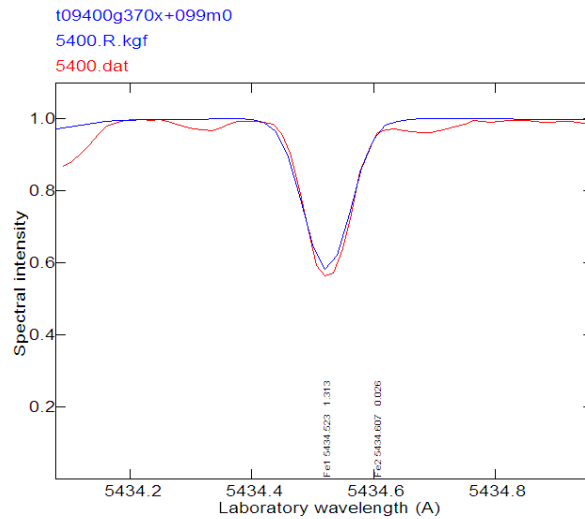


図6. UVES の instrumental profile 効果。Fe II 6149.26 Å。1.1 kG の磁場 (傾斜角 45 度を仮定) を考慮して理論的線輪郭を計算した (実線)。○が UVES による観測されたスペクトル線輪郭。図5の6147.74 Å線と instrumental broadening が効いていない場合の理論曲線 (破線) を比較すると、こちらの方が 5%ほど底が浅い。ゼーマン効果が効いているからだが、instrumental broadening により観測された線 (○) ではほとんど差がなくなっている

a)



b)

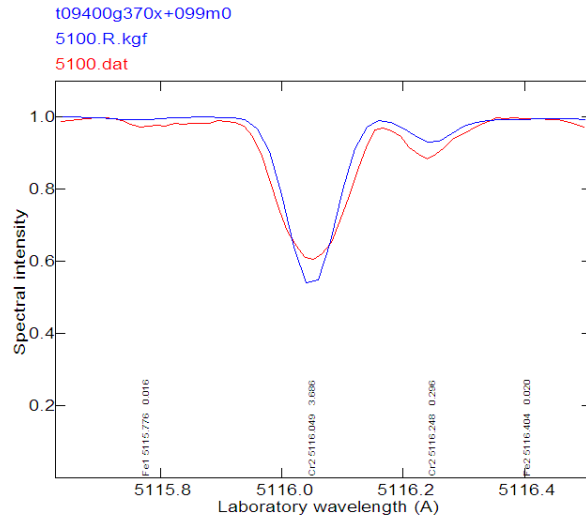


図7. 有効ランデ因子 z の大小による線輪郭の相異。理論スペクトルには 2.0 km/s の速度場 (instrumental broadening に相当する) を与えた。a) Fe I 5434.52 Å, $z=0.10$ 、b) Cr II 5116.05 Å, $z=2.91$ 。b) は a) と異なり、明らかに理論スペクトルより太い。竹田洋一氏が開発したプログラム spshow にて表示

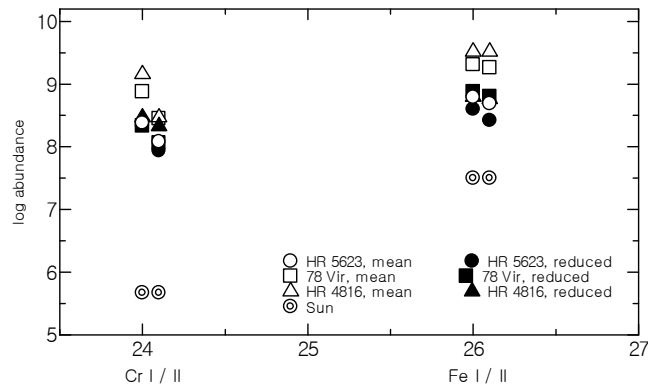


図8. 平均元素量 (Cr, Fe)。+は太陽値、1階電離イオンの値は右にややずらして表示。

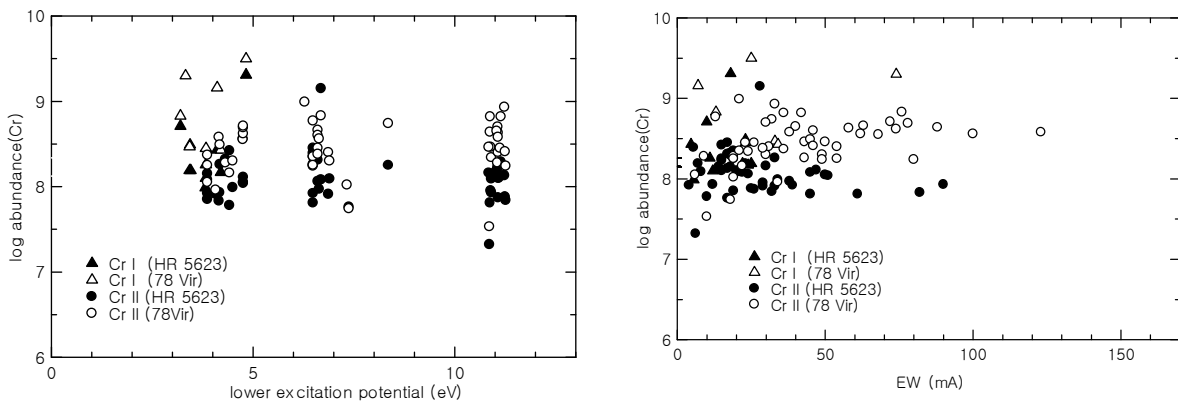


図9. 平均 Cr 量の励起ポテンシャル、等価幅への依存性。HR 5623 では、78 Vir 同様、励起ポテンシャルへも、等価幅についてもさほど依存性がないように見える

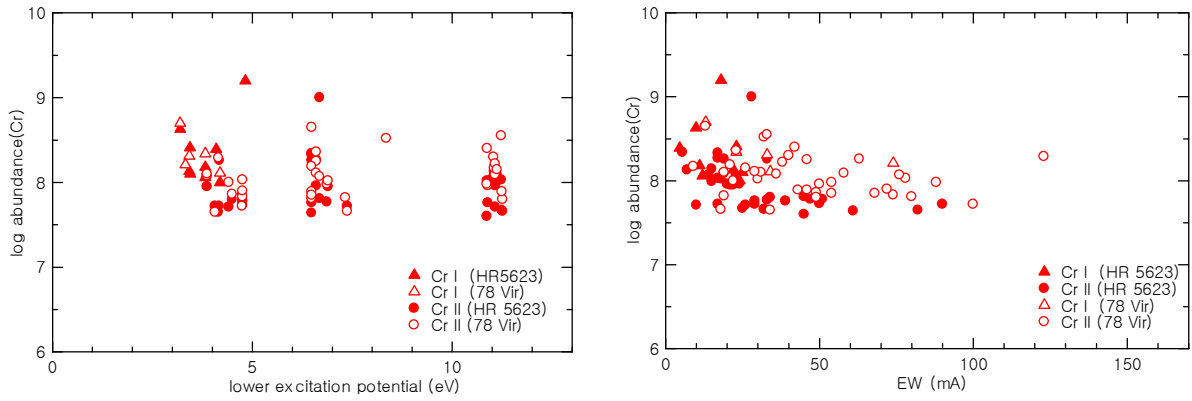


図 10. ゼーマン効果による肥大化を差し引いた Cr 量の比較。左：励起ポテンシャルに対する量、右：等価幅に対する量。磁場による肥大化の程度は線により異なる。磁場の効果を引いたため、線による元素量の分散度は小さくなっている。また、強い線が多い 78 Vir ではゼーマン効果による影響が大きく、右の等価幅に対する Cr 量の関係にそれがよく見えている

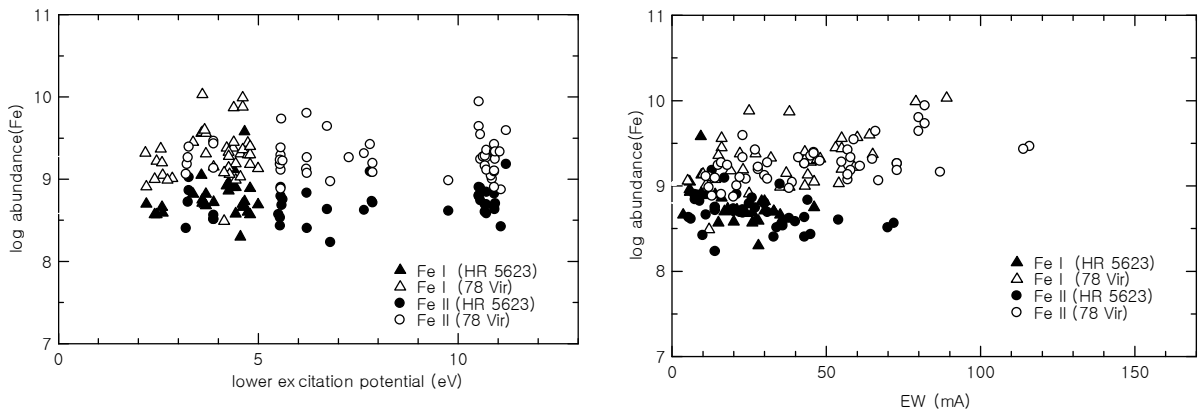


図 11. 平均 Fe 量の励起ポテンシャル (左)、等価幅への依存性 (右)。励起ポテンシャルへの依存性は HR 5623 と 78 Vir 共に見られないが、等価幅については傾向が異なっている

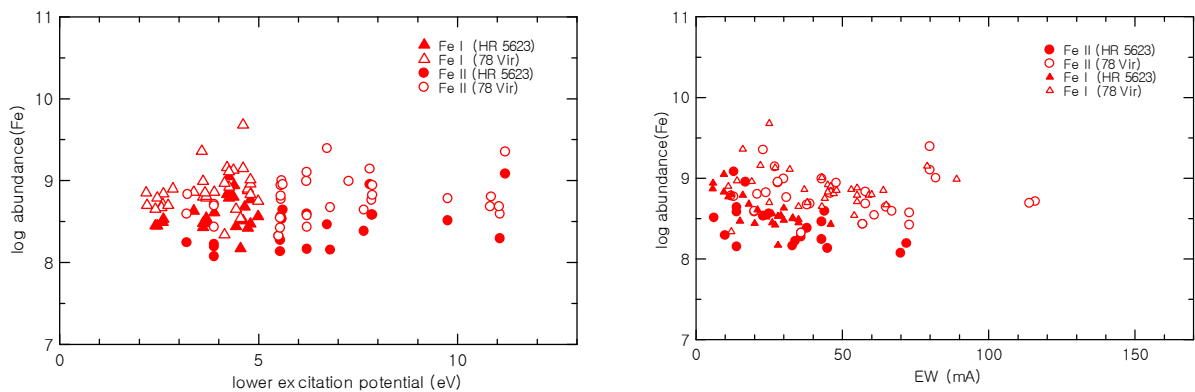


図 12. ゼーマン効果による肥大化を差し引いた Fe 量の比較。左：励起ポテンシャルに対し、右：等価幅に対する量。強い線が多い 78 Vir ではゼーマン効果による影響が大きく、右の等価幅に対する Fe 量の関係を見ると、等価幅への依存関係は消え、ほぼ水平に分布している。上の図でもやや右下がり傾向を示していた HR 5623 ではその傾向が一段と強まり、層状分布の傾向がより明瞭になった

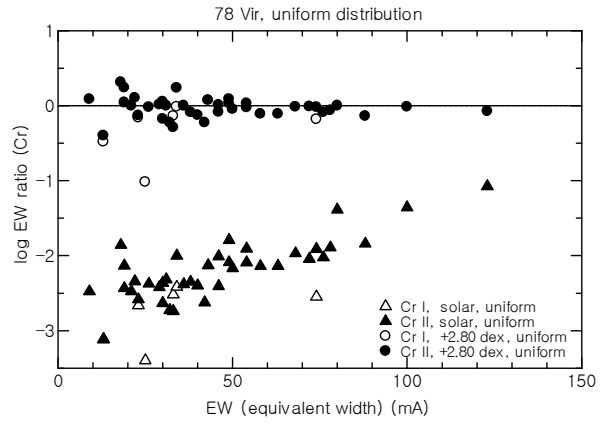
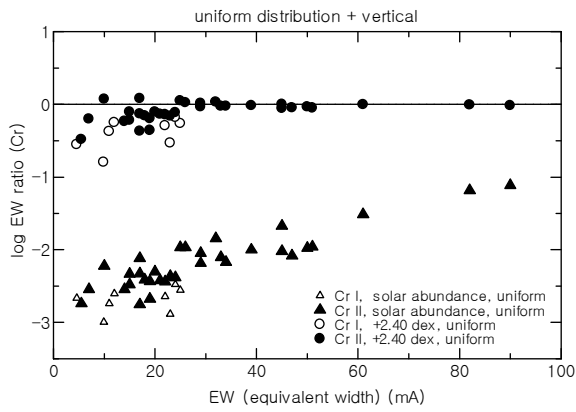


図 13. 左は HR 5623、右は 78 Vir。Cr 量を太陽値 (図中、下)、それより大きくとった場合 (図中、上。HR 5623 では+2.40 dex、78 Vir では+2.80 dex) の等価幅 EW の比較。縦軸は理論的に得られた等価幅と観測値との比の対数。共に一様分布していると仮定した。78 Vir では観測値とよく合っているが、HR 5623 では弱い線は観測値より明らかに小さい。

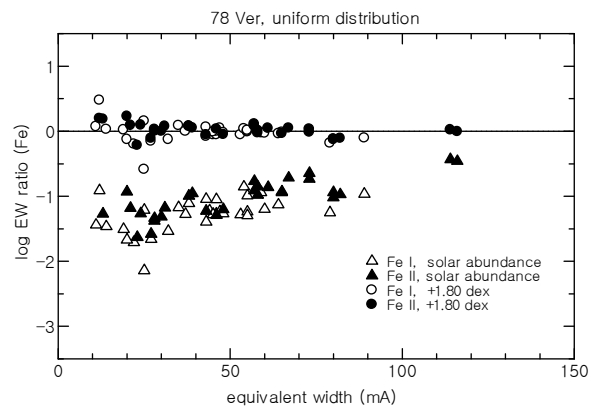
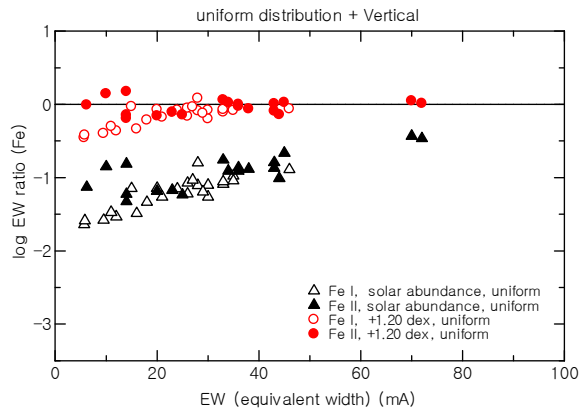


図 14. 左は HR 5623、右は 78 Vir。Fe 量を太陽値 (図中、下)、それより大きくとった場合 (図中、した) の等価幅 EW の比較。縦軸は理論的に得られた等価幅と観測値との比の対数。共に一様分布していると仮定した。Cr の振る舞いと似ている

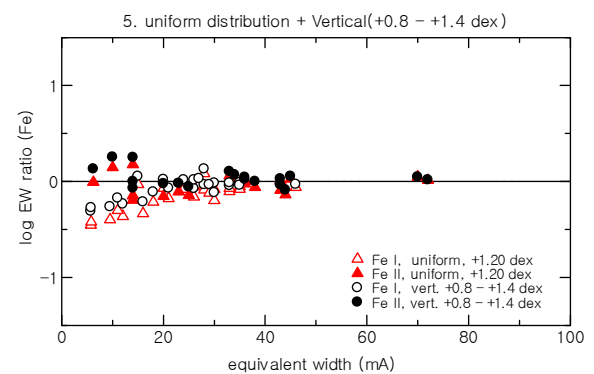
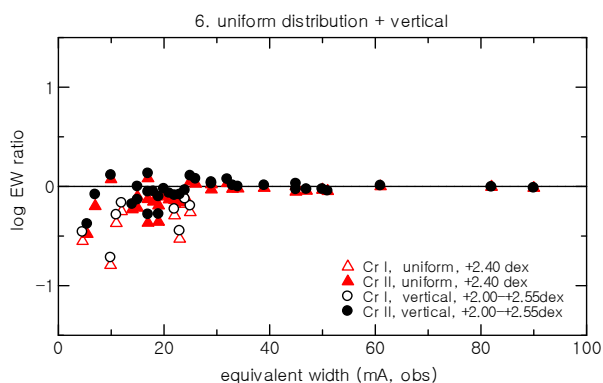


図 15. HR 5623 の Cr と Fe。層状分布 (2 層) を成している場合の等価幅比較。横軸は等価幅の観測値、縦軸は理論的に期待される等価幅と観測値の比 (対数值)。Cr は表面層+2.00dex、深部で+2.55dex、Fe では表面層+0.90dex、深部で+1.40dex とした例。△と▲は一様分布の場合 (図 13、14 参照)。弱い線ではまだ観測値と差がある

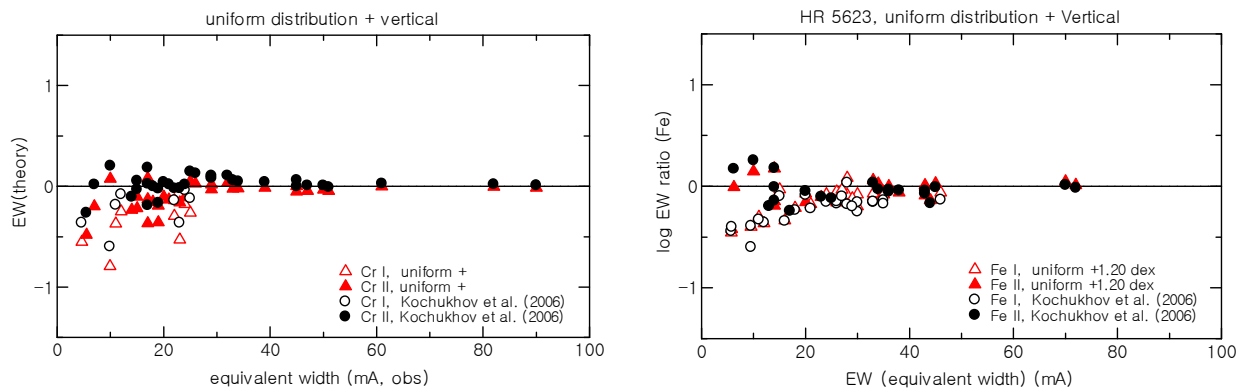


図 16. HR 5623 の Cr と Fe。Kochukhove et al. (2006) が示した層状分布に基づき計算された等価幅。△と▲は一様分布の場合 (図 13、14 参照)。一様分布より観測値に近いが、Cr, Fe 共に中性元素と 1 回電離イオンでは差が大きく、図 15 の単純な 2 層構造と大きな違いは見られない

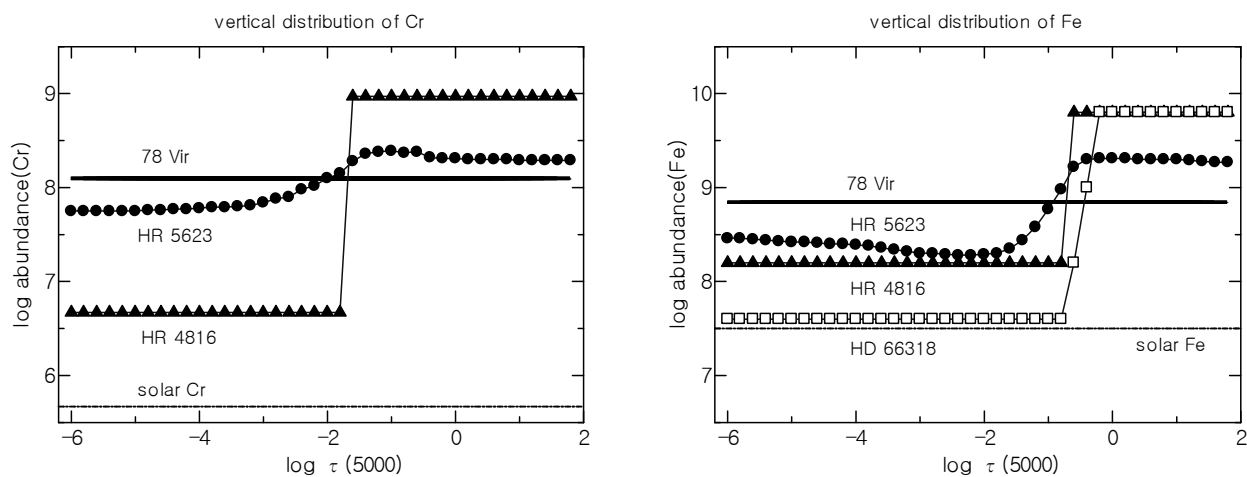


図 17. HR 5623 (Kochukhov et al. 2006) と 78 Vir の Cr および Fe の層状分布。比較のため HR 4816 (加藤他 2009)、HD 66318 (Ryabchikova 2008) を掲げた

表 1. HR 5623 (= HD 133792) および 78 Vir (HR 5105, HD 118022) の基本データ

事項	HR 5623		78 Vir		出典
位置 (2000)	α	15h 09m 25.5s	α	13h 34m 7.9s	1
	δ	-63° 38' 34"	δ	+3° 39' 32"	
実視等級	6.28		4.94		1
スペクトル型	A0pSrCrEu		A1pSrCrEu		1
B-V	+0.06		+0.03		1
U-B	---		0.00		
b-y	0.026		-0.011		2
m1	0.180		0.232		
c1	1.110		0.936		
β	2.866		2.883		
自転速度 $V \sin i$ (kms ⁻¹)	~1		15		3, 1
視線速度 (kms ⁻¹)	+12		-12		1

出典リスト:

1. HOFFLEIT & WARREN (1991)
2. RENSON et al. (1991)
3. Kochukhov et al. (2006)

表 2. 平均的元素量。nは使用されたスペクトル線の数、元素量は $\log \epsilon$ (H) = 12.00 というスケールで、水素量に対する相対的に表した。比較のため、HR 4816 と太陽の値を示す

Atom	HR 5623		78 Vir		HR 4816		Sun
	n	$\log \epsilon$	n	$\log \epsilon$	n	$\log \epsilon$	$\log \epsilon$
Cr I	10	8.38	7	8.88	10	9.16	5.67
Cr II	49	8.08	48	8.45	54	8.47	5.67
Fe I	31	8.79	40	9.31	36	9.52	7.50
Fe II	38	8.69	50	9.26	51	9.52	7.50
T_{eff}	9400		9250		9150		5777
$\log g$	3.7		3.5		3.7		4.44

表 3. ゼーマン効果による肥大化を差し引いた後の元素量

Atom	HR 5623		78 Vir		HR 4816		Sun
	n	$\log \epsilon$	n	$\log \epsilon$	n	$\log \epsilon$	$\log \epsilon$
Cr I	9	8.34	5	8.33	9	8.47	5.67
Cr II	33	7.94	38	8.06	43	8.33	5.67
Fe I	25	8.60	33	8.88	31	8.80	7.50
Fe II	21	8.42	30	8.80	32	8.76	7.50
T_{eff}	9400		9250		9150		5777
$\log g$	3.7		3.5		3.7		4.44

表4. スペクトル線リスト。EWは等価幅 (mÅ)、EWの後の(:)は測定値の重みを示す。:が多いほどブレンドや形の崩れ具合が顕著になり、不確実性が大きくなる。log ϵ 1 は等価幅から直接得られた平均元素量、log ϵ 2 はゼーマン効果を差し引いた後の元素量 (log ϵ (H)=12.00のスケールで表示)

Atom	λ (Å)	χ (eV)	log gf	EW	log ϵ 1	log ϵ 2	EW	log ϵ 1	log ϵ 2
Cr I				HR 5623			78 Vir		
24.00	5628.621	3.422	-0.772	22.0	8.19	8.13	33.0	:	8.47 8.31
24.00	5647.853	3.817	-1.073	5.5	7.99				
24.00	5648.230	3.826	-1.000	11.0	8.26	8.18			
24.00	5664.041	3.435	-1.026	23.0	8.49	8.41			
24.00	5664.555	3.826	-0.787	12.0	8.10	8.06	23.0		8.45 8.34
24.00	5702.323	3.449	-0.667	25.0	8.19	8.10			
24.00	5783.093	3.323	-0.500				74.0		9.30 8.21
24.00	6062.728	3.195	-1.874	9.9	8.71	8.63	13.0	:	8.83 8.70
24.00	6135.734	4.824	-1.157	18.0	:	9.31 9.20	25.0	:	9.50
24.00	6261.248	4.099	-1.409	4.6	:	8.43 8.39			
24.00	6603.789	4.105	-1.944				7.0	::	9.16
24.00	6661.078	4.193	-0.190	24.0	8.17	8.00	34.0		8.43 8.11
Cr I				Mean	8.38	8.34			8.88 8.33
Cr II									
24.01	5502.067	4.168	-1.990	90.0	7.93	7.72			
24.01	5508.606	4.156	-2.110	82.0	7.83	7.65	123.0	::	8.58 8.29
24.01	5534.078	10.880	-0.312	18.0	:::	8.15 8.02	42.0	::	8.82 8.40
24.01	5542.488	6.868	-1.902	33.0		7.91 7.77	54.0		8.40 7.98
24.01	5550.353	10.893	0.250	29.0		7.95 7.76	50.0		8.46 7.96
24.01	5563.985	10.845	0.043	30.0	::	8.16	43.0		8.46
24.01	5569.075	10.872	0.824	45.0	::	7.81 7.60	88.0		8.64 7.98
24.01	5611.960	10.860	-0.085	6.2		7.32	10.0	::	7.53
24.01	5622.486	6.897	-2.419	21.0		8.09 7.95	30.0		8.30 8.02
24.01	5635.014	10.910	-0.690	8.0		8.09			
24.01	5678.390	6.484	-1.238	61.0		7.81 7.64	80.0		8.24 7.81
24.01	5710.518	10.910	-0.295	12.0		7.93	24.0	:	8.34
24.01	5724.628	3.864	-4.936	4.0	:	7.92	6.0	::	8.05
24.01	5741.319	3.871	-4.056	19.0		7.85			
24.01	5820.033	6.487	-2.273				43.0		8.26 7.89
24.01	5827.263	6.605	-2.042				63.0		8.66 8.26
24.01	5836.179	4.316	-4.288	18.0		8.32	19.0		8.28
24.01	5864.919	6.605	-2.446	24.0		8.06 7.96	46.0		8.60 8.25
24.01	5939.980	8.354	-1.903	15.0		8.25	32.0	:::	8.74 8.52
24.01	5940.859	6.641	-1.934	38.0		7.97	62.0	:	8.56
24.01	5947.514	4.071	-3.693	29.0		7.91 7.72	34.0	:	7.96 7.65
24.01	5966.519	6.686	-3.373	28.0		9.15 9.00			
24.01	5996.639	6.487	-3.659	5.5	:	8.39 8.34	13.0	:	8.77 8.65
24.01	6010.675	6.605	-2.920	17.0		8.31 8.27	23.0	:	8.45 8.36
24.01	6053.466	4.745	-2.160				100.0		8.56 7.72
24.01	6071.904	11.075	-0.002	20.0		8.10 7.96	31.0		8.40 8.10

24.01	6072.885	6.484	-2.952	19.0		8.35	8.26	21.0	:	8.35	8.19
24.01	6081.456	6.487	-1.934	39.0		7.92	7.76	54.0		8.25	7.85
24.01	6107.963	6.605	-2.678					29.0		8.38	8.11
24.01	6112.261	4.745	-2.943					68.0		8.55	7.85
24.01	6121.123	4.415	-4.427	15.0	:	8.42					
24.01	6147.154	4.756	-2.843	50.0		8.05	7.73	74.0		8.62	7.83
24.01	6150.543	11.069	-0.313	15.0		8.23	8.14	30.0	:	8.70	
24.01	6153.961	3.871	-4.184	22.0		8.08	7.95	36.0		8.37	8.08
24.01	6178.233	4.415	-4.000	10.0		7.78	7.71	22.0	:	8.16	8.00
24.01	6182.340	11.076	0.452	26.0		7.87	7.71	58.0	:	8.63	8.09
24.01	6192.450	4.177	-3.868	33.0		8.26		45.0	:	8.49	
24.01	6193.551	11.041	0.012	23.0		8.19	8.06	40.0		8.65	8.30
24.01	6195.190	4.756	-2.802	51.0		8.04	7.78	78.0		8.69	8.03
24.01	6206.186	11.056	-0.695	7.0		8.19	8.13	9.0	:	8.28	8.17
24.01	6208.193	4.760	-2.984	47.0		8.11	7.78	72.0		8.71	7.90
24.01	6225.095	6.282	-3.700					21.0	::	8.99	
24.01	6231.676	11.075	0.061					38.0	:	8.58	8.22
24.01	6245.192	3.871	-4.520	14.0		8.15	8.07	19.0	:	8.25	8.10
24.01	6248.467	11.097	-0.144	15.0		8.10	7.99				
24.01	6311.509	11.144	-0.190	18.0		8.29		36.0		8.82	
24.01	6324.198	11.124	-0.121	19.0	:	8.25	8.09	26.0	:	8.45	8.15
24.01	6358.153	7.331	-2.146					19.0	:	8.02	7.82
24.01	6379.792	4.497	-3.362	34.0		7.99	7.80	49.0	:	8.30	7.86
24.01	6418.903	6.686	-1.791	45.0	::	8.08	7.81	76.0		8.83	8.07
24.01	6501.575	11.234	-0.310					33.0		8.93	8.55
24.01	6522.581	7.380	-1.856	17.0		7.76	7.72	18.0		7.74	7.66
24.01	6536.680	11.234	0.026	17.0	:	8.13	8.03				
24.01	6585.241	11.264	0.829	32.0	::	7.84	7.66	49.0		8.24	7.80
24.01	6608.626	6.487	-3.089	17.0		8.45	8.33				
24.01	6636.427	11.248	0.573	25.0	::	7.88	7.67	46.0		8.41	7.89

Cr II

Mean

8.08

7.94

8.45

8.06

Fe I

26.00	5522.447	4.209	-1.550	9.5		8.92	8.83	22.0		9.38	9.16
26.00	5546.500	4.371	-1.310	12.0		8.90	8.80	27.0		9.38	9.13
26.00	5560.207	4.434	-1.190	14.0		8.90		23.0		9.19	
26.00	5562.706	4.434	-0.659	20.0		8.58	8.44	35.0		8.99	8.65
26.00	5584.764	3.573	-2.320	5.7		9.05		16.0	:	9.56	9.36
26.00	5600.226	4.260	-1.808	5.7	:	8.96	8.87				
26.00	5619.587	4.386	-1.700	5.8		8.93	8.94	16.0	:	9.45	
26.00	5624.038	4.386	-1.480	13.0		9.12		38.0	:	9.87	
26.00	5633.975	4.991	-0.270	26.0		8.69	8.56	44.0		9.13	8.75
26.00	5641.436	4.256	-1.180	16.0	:	8.86	8.79	32.0		9.33	9.11
26.00	5709.378	3.368	-1.240	30.0		8.82	8.63	53.0		9.45	8.86
26.00	5741.846	4.256	-1.730	9.5	::	9.13	9.05	10.0	:	9.14	
26.00	5753.121	4.260	-0.760					45.0		9.28	8.92

26.00	5814.805	4.283	-1.970				5.0	:	9.06		
26.00	5816.367	4.548	-0.680				43.0		9.31		
26.00	5862.353	4.548	-0.058	28.0	8.30	8.17	54.0		9.03	8.54	
26.00	5905.689	4.652	-0.730	18.0	8.73	8.68					
26.00	5984.814	4.733	-0.343				55.0		9.44	8.88	
26.00	5997.775	4.607	-1.704				25.0	:	9.88	9.68	
26.00	6008.554	3.883	-1.078	21.0	8.72	8.61	37.0		9.15	8.86	
26.00	6020.170	4.607	-0.270	33.0	8.70	8.51	79.0		9.99	9.15	
26.00	6055.992	4.733	-0.460				46.0	:	9.30	8.90	
26.00	6065.482	2.608	-1.530	28.0	8.59	8.53	46.0		9.05	8.84	
26.00	6093.666	4.607	-1.500	3.6	:	8.66	15.0	:	9.36		
26.00	6094.364	4.652	-1.940	9.3		9.58					
26.00	6136.615	2.453	-1.400	35.0	8.57	8.45	59.0		9.22	8.79	
26.00	6137.694	2.588	-1.403	35.0	8.66	8.49	55.0		9.20	8.71	
26.00	6165.361	4.143	-1.550				14.0	::	9.08	8.97	
26.00	6170.504	4.795	-0.440				45.0		9.30	8.83	
26.00	6230.726	2.559	-1.281				65.0		9.37	8.67	
26.00	6246.317	3.602	-0.960	30.0	8.71	8.48	60.0		9.57	8.80	
26.00	6252.554	2.404	-1.687	26.0	8.57	8.45	43.0		9.00	8.65	
26.00	6335.328	2.198	-2.230	17.0	8.70		25.0		8.91	8.70	
26.00	6336.823	3.686	-1.050	29.0	8.82	8.54	55.0		9.56	8.79	
26.00	6338.896	4.795	-1.060	11.0	8.89	8.77	19.0	:	9.18	8.96	
26.00	6355.027	2.845	-2.420				11.0		9.01	8.90	
26.00	6358.631	4.143	-1.040				12.0		8.49	8.34	
26.00	6400.000	3.602	-0.520	46.0	8.75	8.43	89.0	10.03	8.99		
26.00	6408.016	3.686	-1.048	24.0	8.68	8.52	47.0		9.31	8.81	
26.00	6411.647	3.654	-0.820	33.0	8.70	8.50	64.0		9.60	8.85	
26.00	6419.942	4.733	-0.240	27.0	:	8.60	8.42				
26.00	6430.844	2.176	-2.006				48.0	:	9.32	8.85	
26.00	6496.469	4.795	-0.570	15.0	:	8.57	8.47	43.0	:	9.40	9.01
26.00	6592.913	2.727	-1.600				38.0		8.99	8.70	

Fe I				Mean	8.79	8.60			9.31	8.88
-------------	--	--	--	-------------	-------------	-------------	--	--	-------------	-------------

Fe II

26.01	5503.897	10.522	-0.645	21.0		8.90					
26.01	5525.125	3.267	-4.609	35.0		9.02					
26.01	5529.053	10.522	-0.250	30.0		8.80	82.0		9.94		
26.01	5529.932	6.729	-1.875	43.0		8.63	8.46	80.0	9.64	9.39	
26.01	5549.001	10.522	-0.230	30.0	:b	8.79		66.0	9.64		
26.01	5591.368	3.267	-4.685	26.0		8.86		46.0	9.39		
26.01	5643.880	7.653	-1.458	38.0		8.62	8.38	65.0	:	9.31	8.64
26.01	5647.389	10.561	-1.171	8.3		8.89		15.0		9.24	
26.01	5648.904	10.561	-0.242	27.0		8.74		59.0		9.54	
26.01	5768.458	10.853	-0.505					21.0		9.00	8.80
26.01	5776.756	10.629	-0.580					31.0		9.27	
26.01	5795.845	7.274	-2.163					43.0		9.26	8.99

26.01	5804.913	5.570	-3.726				13.0	8.88	8.77	
26.01	5813.046	6.208	-3.025				30.0	9.12	8.99	
26.01	5823.155	5.569	-3.070				48.0	9.29	8.94	
26.01	5871.799	10.829	0.017				39.0	9.04	8.68	
26.01	5878.562	10.918	-0.908	5.4	8.63		16.0	::	9.27	
26.01	5902.825	10.714	0.424	40.0	:	8.58	73.0	:	9.26	
26.01	5907.380	7.806	-2.445	17.0	9.09	8.95	27.0		9.42	9.14
26.01	5961.705	10.678	0.699	54.0	8.60		87.0		9.16	
26.01	5965.622	10.678	0.070	31.0	8.69		55.0		9.28	
26.01	5981.757	7.868	-2.145				28.0		9.19	8.94
26.01	6017.891	7.845	-1.948	20.0	8.73	8.58	31.0		9.08	8.76
26.01	6019.543	10.714	-1.019	7.5	:	8.84	12.0	::	9.11	
26.01	6023.304	5.569	-4.035	7.3	::	8.90	11.0		9.11	
26.01	6071.426	10.714	-0.188	22.0	:	8.69	45.0		9.35	
26.01	6084.111	3.199	-3.808	43.0	8.40	8.24	67.0		9.06	8.59
26.01	6088.306	7.868	-2.138	14.0	8.71	8.58	24.0		9.08	8.82
26.01	6113.322	3.221	-4.158				58.0		9.18	8.83
26.01	6124.141	11.208	-0.752	13.0	:	9.18	9.08	23.0	9.59	9.35
26.01	6147.741	3.889	-2.721	72.0	8.56	8.19	116.0		9.46	8.71
26.01	6149.258	3.889	-2.724	70.0	8.51	8.07	114.0		9.43	8.69
26.01	6175.146	6.222	-1.983				73.0		9.26	8.57
26.01	6199.181	5.569	-3.191	25.0	8.79	8.56	46.0		9.38	8.81
26.01	6224.648	10.909	-0.648				23.0	:	9.33	
26.01	6248.898	5.511	-2.696	36.0	8.57	8.32				
26.01	6269.967	3.245	-4.625	23.0	8.72		43.0	:	9.26	
26.01	6317.394	6.222	-2.158	33.0	8.40	8.16	57.0	:	9.07	8.43
26.01	6357.162	10.909	0.169				57.0		9.42	
26.01	6367.413	10.930	-0.697				18.0	:	9.24	
26.01	6375.792	10.934	-0.085	20.0	8.70		41.0		9.33	
26.01	6377.679	10.909	-0.722	9.0	8.82		14.0		9.09	
26.01	6383.722	5.552	-2.271	45.0	8.43	8.13	73.0		9.18	8.42
26.01	6385.451	5.552	-2.618	36.0	8.53	8.27	61.0		9.23	8.54
26.01	6407.251	3.889	-3.699	34.0	8.51	8.22	57.0	:	9.13	8.43
26.01	6451.094	11.075	-0.152	10.0	8.42	8.29	20.0		8.87	8.59
26.01	6482.204	6.219	-2.268	44.0	8.83	8.59	80.0		9.80	9.10
26.01	6487.339	6.807	-2.248	14.0	8.23	8.15	38.0	:	8.97	8.67
26.01	6493.035	5.585	-2.575				82.0		9.73	9.00
26.01	6500.488	10.909	-0.395				22.0		9.10	
26.01	6506.333	5.589	-3.111	23.0	:	8.68	8.53			
26.01	6510.733	10.909	-0.423	11.0	8.66		16.0	:	8.90	
26.01	6541.356	11.050	0.452				58.0		9.33	8.68
26.01	6598.301	5.615	-3.477	14.0	:	8.75	8.64	28.0	9.22	8.95
26.01	6618.414	9.761	-1.324	6.2	8.61	8.51	12.0		8.98	8.78

Fe II

Mean

8.69

8.42

9.26

8.80