

貴金属に富む磁気特異星HD 94660

加藤 賢一

岡山理科大学生物地球学部生物地球学科

(2017年10月13日受付、2017年12月4日受理)

1. はじめに

スペクトル型がA型、B型の主系列星のうち10%程度の星にはスペクトル線異常が見られることから、これらの特異星（化学特異星、chemically peculiar stars, CP stars）として分類している。Preston (1974)は主に温度系列に従い、表1のように大きく4種類に分類した。共通の特徴として自転速度が遅いことが知られており、同種の他の恒星に比べ静穏な環境にあって、それがスペクトル線に異常をもたらす背景となっているのではないかと考えられている。また、CP1の金属線星ではほとんど全部が連星系であるため（他の特異星での頻度は明確ではないが）、連星系を成していることもスペクトル線異常の要因となっているものと推定されている。

表1 Preston(1974)による特異星の分類

分類	従来の名称	特徴
CP1	Am、金属線星	CaIIやScII線が弱く、重金属線が卓越。 有効温度：7000-10000K
CP2	磁気Ap星	Si、Cr、Sr、Euなどの線が卓越。 有効温度：8000-15000K
CP3	HgMn星、水銀マンガン星	Hg II λ 3984、Mn II線が強い。 有効温度：10000-15000K
CP4	弱He星	Color factors $Q(\text{Sp}) > Q(\text{UBV})$ 。 有効温度：13000-20000K

本研究において対象とするHD 94660はCP2に分類される強い磁場を持った星（磁気特異星）で、太陽の平均磁場5ガウス（たとえば、理科年表など）に対し7500ガウスという磁束密度を示している。また、一般的にCP2星のスペクトル線は周期的に強度変化を示しており、その変動率や位相が元素によって異なっている。そこで、太陽黒点のように大陸状に各元素が分布している、自転によりスペクトル線に周期的変化が生じると考えられている。また、スペクトル線とともに全光度、磁場強度も周期的変動を見せており、磁極と自転軸が傾斜しているとして説明されている（以上、斜回転モデル。たとえば、Stibbs (1950)、Babcock (1960)）。

その磁場特性はスペクトルの円偏光成分（平均磁場の視線方向成分 $\langle B_z \rangle$ ）を観測して得られている。偏光成分に分けることなくスペクトルを観測すると（各偏光成分が合成された値。ストークスパラメータのI）ゼーマン効果で分岐していることがあるが、それは表面での平均磁場強度 $\langle B \rangle$ を与える。A型、B型磁気特異星では $\langle B_z \rangle$ は1000ガウスを越えるのは珍しくなく、平均磁場強度 $\langle B \rangle$ では数千から数万ガウスに達することもある。

特異星の組成はスペクトル線の強度から推定されているが、それは全く奇妙で、例えば、鉄族のCrでは太陽の100倍以上を示しているし、さらに奇妙なのはEuに代表される希土類で、1万倍以上にもなる。

CP2星は有効温度（ほぼ表面温度）の違いにより大きく2つのグループに分けられている。有効温度が10000K以上のグループは特にSi星とも呼ばれることがあるように、Si線（特にSi IIの4128.053A、4130.894A線）が同種の有効温度の通常星に比べて強く見える場合が多い。そのSi量は太陽の10倍以上で、加えてCrやFeや他の金属も過剰と、Si星という名称が適当なのか、疑問が湧くほど各種の元素量に異常が見られる。

こうした異常性は元素の拡散現象によって説明できることをMichaud (1970) が理論的に示して以来定説になっており、最近、高分散で高SN比を持ったスペクトルが得られるようになり、観測的にもそれが示されている。拡散とは、対流や乱流などのない静かな大気では、質量の大きな元素は内部に沈んでいくが、適当な吸収線を持つ元素であれば、輻射圧を受けて上部に浮上するという現象のことである。観測的にはロシヤのRyabchikovaらのグループやその他ヨーロッパの研究者によって精力的に解析が行われ（たとえば、Ryabchikova et al. 2006）、CP2星に見られるスペクトル強度の異常が各元素の大気内分布に偏りがあることで生じることが示されて、一応の理解が得られている。

本研究ではCP2星の一つであるHD 94660について、磁場の特性を求め、等価幅—元素量が元素によって異なっていて元素拡散が起こっている可能性があることに注意しながら、白金Ptや鉛Pbが太陽の1万倍以上も存在し、金Auや銀Ag、水銀Hgも同様の過剰を示していること、またHgMn星の特性を有していることなどを見ていく。

2. HD 94660について

HD 94660 (=HR 4263) は明るい南天の磁気特異星で偏光システム試験時の標準光源としてよく使われている。磁場はBorra & Landstreet (1975) によってH α マグネトグラフの観測から発見されて、 $\langle Bz \rangle = -3300 \pm 510$ G という視線方向の磁場強度が得られた。また、スペクトル線は極めて鋭く、いくつかの線はきれいにゼーマン分岐していて、その分岐量から求めた平均磁場は6.3 kG であった (Mathys 1990)。Bohlender et al. (1993) は自転速度 $v \sin i$ の値として6 km/s未満という値を、水平磁場強度 $\langle B \rangle$ として2.47 kG を与えている。

元素量解析は、磁場の解析と同時に、Bailey et al. (2015) によって初めて行われ、平均磁場は平均約6.2 kG、Cr、Co、希土類元素REEが2.5 dex (対数値の差) 以上過剰であることが示された。また、視線速度が変動しているのは周期840日の伴星を持つ連星系によるものとして、その軌道要素を求めた。

表2にHD 94660の一般的な特性をまとめておく。

特性	値	出典
赤経 (2000.0)	10 ^h 55 ^m 1 ^s	Hoffleit & Warren (1991)
赤緯 (2000.0)	-42° 15' 4"	
実視等級	6.11	
スペクトル型	A0EuCrSi	Renson & Manfroid (2009)
自転速度 $v \sin i$ (km/s)	30	Glebocki & Gnacinski (2005)
自転速度 $v \sin i$	< 2.0	Bailey et al. (2015)
有効温度 T_{eff}	11300	
表面重力加速度 $\log g$ (cm/s ²)	4.18	
平均磁場強度 (gauss)	-7500	

3. 使用したスペクトルと測定

チリにあるヨーロッパ南方天文台ESOの口径8.2mのKueyen望遠鏡のNasmyth B 焦点に装着された分光器UVESにより2005年12月3日に取得されたスペクトルならびに同じESOのLa Sillaにある3.6m鏡に装着されている高精度視線速度測定用分光器HARPSにより2009年5月25日に取得されたスペクトルの2本のESOデータを利用した。SN比は233から675あるが、UV部は一部データの欠陥により公称通りの質は得られなかった。使用したスペクトルの一覧を表3にまとめておく。

線の同定は竹田洋一氏 (国立天文台) 作成のスペクトル合成プログラムsps show (ハーバード・スミソニア

ン天文台のR. L. Kuruczが開発したスペクトルのシミュレーション・コードsynthe (Kurucz 1993b) に強力なマンマシン・インターフェースが付加されていて、インタラクティブに各種作業を行うことができる) を使用し、その後、線測定ソフトNijiboshi (蓮井隆氏作成) を用いて等価幅を測定した。多くの場合はガウス曲線でフィットさせて強度を得たが、磁場で拡張したり、分岐している場合には輪郭をなぞるモードで測定した。

なお、sps showを動かしたり、次の磁場強度の計算などを行うには星の大気環境を表す大気モデルを用意しなければならない。そこで、Bailey et al. (2015) が ($T_{\text{eff}}, \log g$) = (11300K, 4.18) と与えているのを参考にして有効温度 T_{eff} として11300Kを採用し、これに対してH α 、H β 線輪郭が最も良く合う場合として表面重力加速度が $\log g = 3.7$ と得られたので、この表面重力加速度を採用した上で、これらのパラメータに見合う大気モデルをATLAS12 (Kurucz (1979, 1993a), および Kurucz のウェブサイト <http://kurucz.harvard.edu>) のLester版 (Lester & Neilson 2008) を用いて計算した。ATLAS12は輻射の吸収源として各種元素の束縛・自由遷移、自由・自由遷移の他、約1億本に及ぶ原子・分子の線吸収を直接扱って恒星大気各層の温度、圧力、電子数密度などを求めることができる恒星大気モデル計算コードである。

表3 使用したスペクトル一覧

分光器	名称	観測日
UVES	ADP.2013-09-26T15_44_47.727	2005-12
	ADP.2013-09-26T15_44_47.733	-03
	ADP.2013-09-26T15_44_47.740	
	ADP.2013-09-26T15_44_47.767	
HARPS	HARP.2009-05-25T00:52:19.938	2009-05
	s1d A	-25

4. 磁場強度と傾斜角

Fe IIの6147.741Å線 ($\chi=3.889$, $\log gf = -2.721$) と6149.258Å線 ($\chi=3.889$, $\log gf = -2.920$) は励起ポテンシャル χ や gf 値はほぼ同じだが、Landeの g 因子が異なるという特性があり、磁場の存在やその強度を示す指標としてしばしば使われている。HD 94660では双方ともゼーマン効果により分岐していて、強い磁場の存在を示している。そこで、これらのゼーマン効果を評価するため、磁場中の放射場を記述する次のUnno-Beckersの方程式 (Kato & Sadakane 1999) を解き、線輪郭を観測と比較した。なお、ここで (I , Q , U , V) はストークスの4パラメータで通常の用法と記法に従っている。 κ_l は4パラメータに応じた線吸収係数を表し、 κ_c はこの放射場の背景となっている連続吸収を示している。 ρ

は磁気光学効果を表し、 S は源泉関数で、スペクトル線と背景の連続スペクトルに対する量である。ここでは局所的熱平衡 (local thermodynamic equilibrium, LTE) を仮定し、 S としてそれぞれの光学的深さに対するプランク関数を採用する。 x は深さを表す変数で、通常は光学的深さをとるが、深さに対応する変数なら任意に選ぶことができる。 μ は方向余弦である。 κ と ρ は磁場の傾斜角や方位角に依存しており、これでゼーマン効果が評価される。ここでは予め用意された大気モデルと磁場強度や傾斜角や方位角等を与えて (I, Q, U, V) を求める。そして、偏光成分のない強度 I を観測と比較する。

$$\mu \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \kappa_c + \kappa_I & \kappa_Q & \kappa_U & \kappa_V \\ \kappa_Q & \kappa_c + \kappa_I & \rho_V & -\rho_U \\ \kappa_U & -\rho_V & \kappa_c + \kappa_I & \rho_Q \\ \kappa_V & \rho_U & -\rho_Q & \kappa_c + \kappa_I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \kappa_c S_c + \kappa_I S_L \\ \kappa_Q S_L \\ \kappa_U S_L \\ \kappa_V S_L \end{pmatrix}$$

結果の例を図1に示しておいた。点が観測されたスペクトルで、実線や破線が上で求めた強度 I の分布である。鉄の含有量が太陽の10倍、マイクロ乱流速度が2.0km/s、平均の磁場強度が6.2kGの場合で、磁場の傾斜角が0°、45°、90°の3例を示している。傾斜角が0°では観測より弱くなってしまい、90°では線の底部が深

くなってしまふ。観測と最も良く合うのは45°前後というのがここでの結果である。なお、Bailey et al. (2015)の求めた傾斜角は46°であり、同じ結果であった。

5. スペクトル線の同定

HD 94660は磁気星であることから種々の元素に異常があることが推察できるし、Bailey et al. (2015)が一部示しているように、Cr、Co、希土類元素REEが2.5 dex以上過剰であるから、他の元素についても吟味する価値がある。そこで、3100A~8600Aの間で注意深くスペクトル線の同定作業を行った。

前述のように同定作業はスペクトル合成プログラム spshowを用いて行った。スペクトル線の g 値などの物理量は主にVALD (Vienna Atomic Line Database, たとえばRyabchikova et al. (2015))を用い、紫外線部や近赤外部ではKurucz & Bell (1995)の線データを採用した。

同定結果の一部を図示しておいた。図2は最強の2本のSi II線の例で、元素量にすると太陽値の7倍程度である。後で示すように、Ti、Cr、Feなどは20~400倍もあり、こちらの特異性の方が大きい。

このHD 94660には通常は見られない元素のスペクトル線がたくさん検出された。Ru、Ag、Pt、Au、Pbなどである。

白金Ptは通常は検出されることのない元素で、これまでHgMn星に限って見られることが知られていた(たとえば,Dworetsky & Vaughan 1973)が、今回、HD 94660に5本の吸収線を同定することができたので特に記しておきたい。図3、4を見ると、シリウス(金属線星)やHD 30963にはPt線が見えないが、HD 89822 (HgMn星)、HD 143807 (HgMn星)と共にSi星のHR

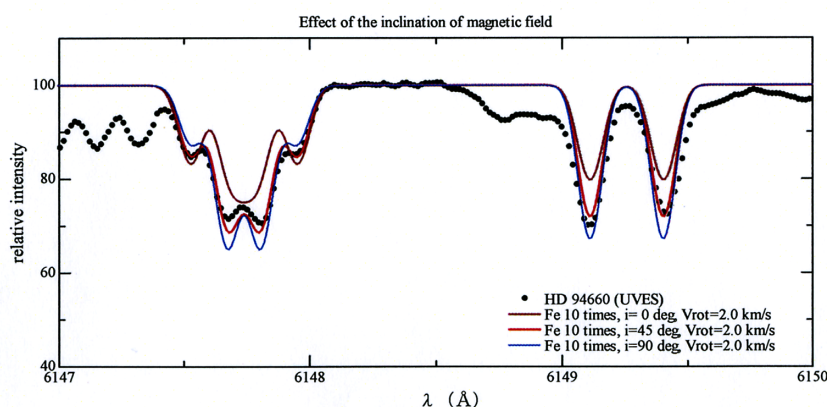


図1 ゼーマン効果により分岐した6147.741Aと6149.258Aの2本のFe II線。点・は観測された線輪郭で、Unno-Beckers方程式から得られた3種類の磁場傾斜角(上から0°、45°、90°)に対する結果を重ねた。自転速度は2.0 km/sとし、自転で生じたドップラー効果によるスペクトル線の広がりを考慮した

6958 (磁場は観測されていない。Kato 2003)および対象星のHD 94660に明瞭に見ることができる。Monier et al. (2016)はHD 30963は新発見のHgMn星であり、Pt線が見えていて、その元素量は太陽の2500倍と報告しているが、今回の調査ではHD 30963にPt線を認めることはできなかった。

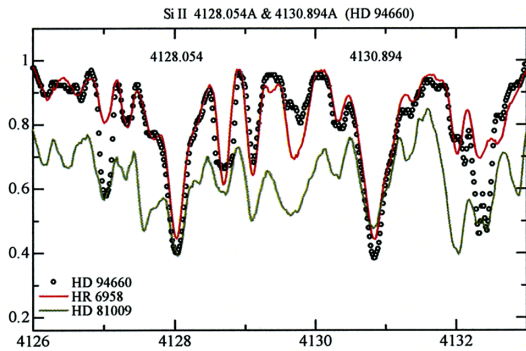


図2 4128Åと4130ÅにあるSi II線 (○)。Si量は太陽の7倍ほど。Si異常とされているが、その特異性はさほどではない

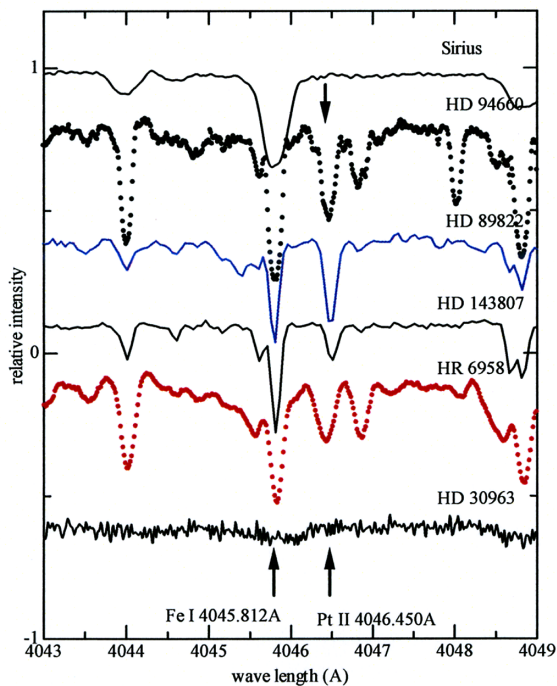


図3 Pt IIの4046.450Å線。シリウスやHD 30963には見られない

Hgも天体では希少な珍しい元素で、HgMn型の特異星に限って太陽の1~10万倍ほどと観測されている。このHD 94660ではHg I線の5769.593Å線が同定された(図5)。Si星HR 6958には見られないものの、HD 94660

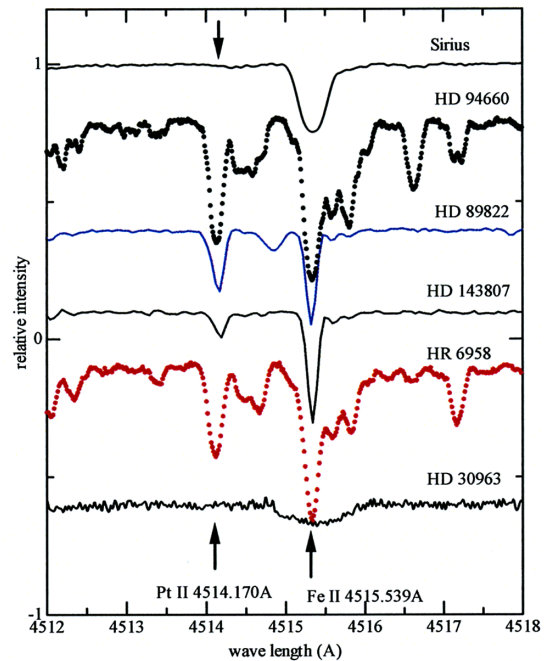


図4 Pt IIの4514.170Å線。シリウスやHD 30963には見られない

には明瞭な吸収を確認することができる。強い水銀線ではHg IIの3983.890Åが良く知られているが、この領域にはCr Iの3983.956Åが卓越し、またFe Iの3983.956Å線もブレンドしていて、水銀量を太陽の10万倍に設定してもこのCr I線とFe I線がなお強く、水銀量を推定することはできなかった。したがって、Hgの存在ならびにその量については曖昧なままである。

加えて、Pb線を3本同定することができた。一例が図6で、この強度を再現するには太陽の30万倍の含有量が必要となる。

同定した全元素を最後の表4にまとめておいた。

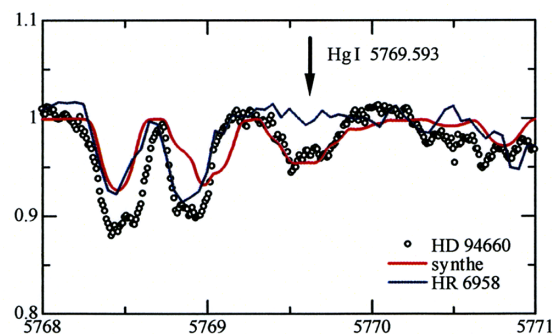


図5 中性水銀線5769.593Åと思われる吸収 (○)。Si星HR 6958には見られない。超微細構造hfsを考慮して線輪郭を計算した (synthe)

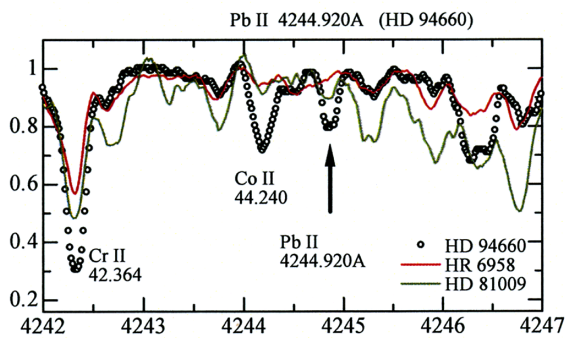


図6 1階電離鉛Pb線の例。Si星のHR 6958やHD 81009に比べ明らかに強い

6. スペクトル線強度と元素量の計算

スペクトル線の同定作業により477本の等価幅（強度）を測定し、元素量計算プログラムWIDTH9 (Kurucz 1993a)を用いて各スペクトル線の示す元素量を求めた。

ここで必要とされる大気モデルには先に求めておいた大気プログラム(ATLAS12)による計算結果と、また、同定作業で用いたVALD及びKuruczのスペクトル線データを用いた

計算結果は長大になるので割愛し、筆者のホームページ (<http://www.big.ous.ac.jp/~kato/>) に譲りたい。

7. 元素によって異なる等価幅—元素量関係

前章で求めた元素量に基づき、図7~10にSi II、Ti II、Cr II、Fe II線の等価幅に対する各元素量の相関を示した。ここでの元素量には磁場の影響は加味されておらず、見かけ上の線強度=測定されたままの等価幅から計算されたものである。

なお元素量計算では、通常、数km/sのマイクロ乱流速度を入れるが、磁気特異星ではマイクロ乱流速度が観察されない例が多く、それを考慮しないのが慣例なのでそれに従いここでも0 km/sとしている。

Cr IIやFe IIの場合、線強度が増すと元素量が上がり、等価幅が150mAあたりで極大となった後は徐々に下がり一定値に落ち着くという通常良く見られる山型パターンを示している（通常というのは正常星normal starsのことで、HD 94660などの特異星やK型の矮星などではこうした振る舞いは、通常、観察できない）。

一方、特異星に典型的な元素量—等価幅関係を示しているのがSi IIとTi IIである。図を見てのとおりで、Si IIとTi IIの元素量はどの等価幅でも一定である。

以上の元素量はいわゆるマイクロ乱流速度がないものとして（0km/s）として求めた元素量であり、これを2.0~3.0km/sに設定するとFe IIでも等価幅への依存性は消える。

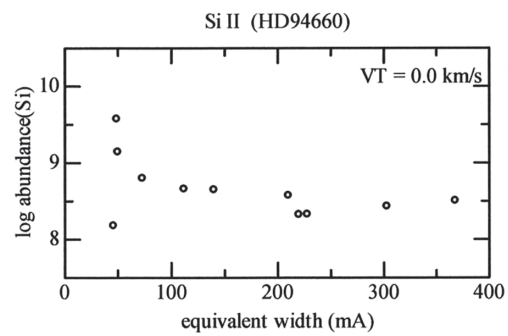


図7 Si II線の等価幅—元素量関係。等価幅への依存性は見られない。log ε (Si)>9.0の2本の線の形状は箱型で、Zeeman効果による線の肥大化により見かけの元素量が大きく出ている

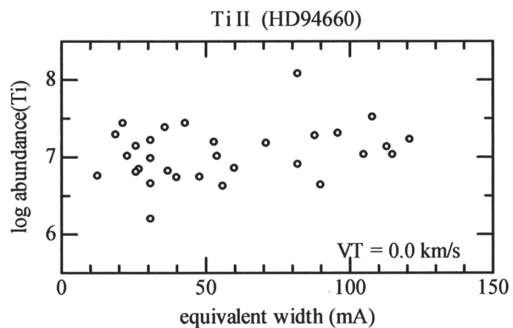


図8 Ti II線の等価幅—元素量関係。等価幅への依存性は見られない

このようにHD 94660では元素によってマイクロ乱流速度が微妙に違っている。Si IIとTi IIは典型的な特異星の特性を示しているが、Fe IIやCr I、Cr II、Fe I、Co IIなどはむしろ正常星と似た振る舞いをしている。ただし、これらの元素は磁場の影響を強く受けていて吸収線が肥大化あるいは分岐し、通常星のそれとは異なっていることに注意が必要である。

8. 磁場による肥大化の可能性

HD 94660は前述のように強い磁場を有し、スペクトル線の肥大化が見られる。Cr IIやFe IIのような山型の等価幅—元素量関係にも何らかの影響があると考えられるので、その可能性を検討しておこう。もっとも、ゼーマン効果が元素によって異なることは考えにくいから、各種元素の等価幅—元素量関係が磁場効果によるものとするのは無理があると言わねばならない。

ゼーマン効果による元素量への影響を調べるには各スペクトル線について先に紹介したUnno-Beckersの方程式を解くべきであるが、これはいかにも煩雑であるためここではランダのg因子を指標とし、磁場の効果を

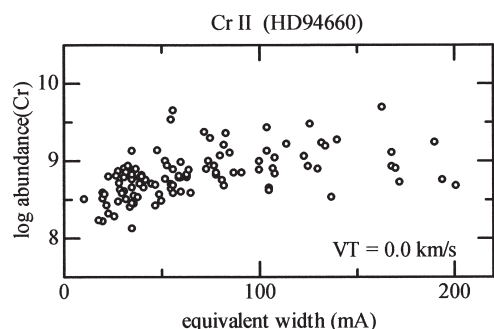


図9 Cr II線の等価幅—元素量関係。Si II、Ti II線と異なり、等価幅と共に元素量が増えて、やがて減少するという相関が見られる

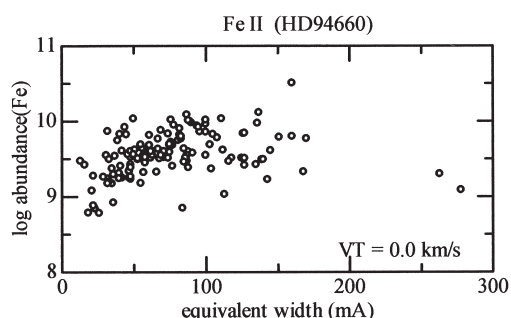


図10 Fe II線の等価幅—元素量関係。Si II、Ti II線と異なり、Cr IIと同様の相関となっている

見ていくことにする。図11は図10に掲げたFe II線のうち、LSカップリング近似でg因子を求めることができた線の元素量との関係である。また、図12は線強度（等価幅）との関係で、共に、g因子が大きくなるにつれて緩やかに大きくなる傾向がうかがえる。g因子はゼーマン分岐量の指標であり、値が大きくなると磁場の効果をより強く受けると解釈できるので、この2図はFe IIが総体としても磁場の影響を受けていて、線の肥大化が起こっていることを示していると言える。

以上により、図10のFe II線の等価幅—元素量関係の一部には磁場が効いており、それを考慮すると本来の等価幅—元素量関係はより緩やかな山型、あるいはフラットに近づくと思われる。しかし、これを認めるとフラットなSi IIやTi IIでは凹型の等価幅—元素量関係になるため、別の問題が生じることになる。

9. 層状分布の可能性

以上の等価幅—元素量関係を説明するには元素に固有の特性を考えなければならないが、速度場が元素に依存することは想定しにくいのでマイクロ乱流速度で図7~10の等価幅—元素量関係を説明することは極めて難しいし、磁場で説明することも無理なことは前述のとおりである。そこで新たな可能性として考えられる

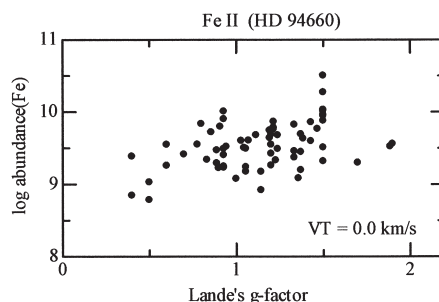


図11 ランデのg因子に対するFe量の関係

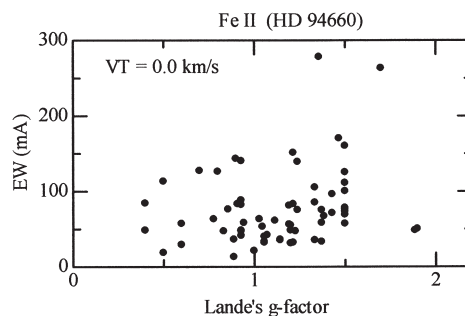


図12 ランデのg因子に対する等価幅の関係

のが拡散現象による元素の浮上・沈殿によって生じた元素の層状分布である。元素によって溜まっている層が違うため、元素によって等価幅—元素量関係に違いが生じたと考えるのは無理がない。

そこで、この層状分布の仮定に立ち、実際に図10のような等価幅—元素量関係が導かれるか、また導かれるとするとその条件はいかなるものかを考察したい。典型例として図10のFeをとり上げ、深さによるFe量の違い、つまり層状分布を仮定してスペクトル線強度を求めてみる。

ここではLTEを仮定し、大気内での外向きの輻射輸送を求める。そのため、大気モデル大気中の表面でのネットの輻射流束fluxを次のようにして求める。

$$F_{\nu}(0) = 2 \int_0^{\infty} B_{\nu}(t_{\nu}) E_2(t_{\nu}) dt_{\nu}$$

ここで、 B はプランク関数で、 E_2 は2nd exponential integral と呼ばれる下記のような関数である。

$$E_2(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-xy}}{y^2} dy$$

ここでは吸収線も連続部の輻射もLTEという条件下で形成されると仮定しているため放射源をプランク関数で記述し、観測者に届く放射は恒星大気中で斜めに射出した成分もあるところからそれを E_2 で考慮し、表面に達する輻射量を求める。

輻射流束 F を求める際の変数 t_v は波長に依存しており、その波長における光学的な深さに対応しており、強い吸収線の波長であれば t_v は表面近くの温度の低い層にピークを持ち、吸収が弱い波長であれば反対に深い層でピークを持つ、ということで、最終的にこの輻射流束 F がスペクトルを表すことになる。

ここでは吸収源として、 H^0 、 H^- (negative hydrogen ion)、C、Si、Mgの連続・連続遷移、連続・束縛遷移の連続吸収に加え、各スペクトル線を形成する原子の束縛・束縛遷移による線吸収を考えた。また、電子の供給源としてはH、He、C、O、Na、Mg、Al、Si、S、Feの10元素を採用した。大気内の温度・圧力分布は前述のATLAS12で求めたものを採用し、各層において鉄量が異なるとして輻射流束 F を求める。

なお、以上の定式化はwidth9やsyntheなどの計算コードでも基本原理となっているものでもあり、その詳細は、たとえば竹田 (2009) を参照して戴きたい。

以上、概説した層状分布下における輻射流束を求めるプログラムとしてsynverW5を作成した。種々の層構造を仮定し、これを用いて図10のFe IIの各吸収線に対し期待される輻射流束 F を計算し、吸収線の等価幅を求めた。そして、図10と比較するため、その等価幅からプログラムwidth9を用いて改めて元素量（一様分布大気中で期待される）を求めた。

その結果の一例を次の図13に示した。図中下の分布(o)が観測から求めた等価幅に対するFe量(図10)で、上の黒丸●の分布がsynverW5を用いたモデル計算から得られた値である。下のo分布と重なるため+2 dexだけ上にずらしている。ここでは最も単純な二層構造を仮定し、上層に鉄が浮かんでいるとし、上層で太陽値($\log \epsilon(\text{Fe}) = 7.50$ 、水素についてその量を $\log \epsilon(\text{H}) = 12.00$ とした時の相対表示)の200倍、下層で5倍と設定している(図14)。等価幅の小さな弱い線では元素量が低く、等価幅100mA前後で極大を迎え、その後、徐々に下がり200mAより強いところではほぼ一定になるという観測値をほぼ再現していることが分かる。

以上では前述した磁場の肥大化は考慮されていないので、それを入れればもっと緩やかな層状分布構造になると思われる。

10. 元素量分布

最後に各元素の量(太陽に相対的に対数値で示す)を掲げておいた(図15、表4。太陽の元素量はAsplund

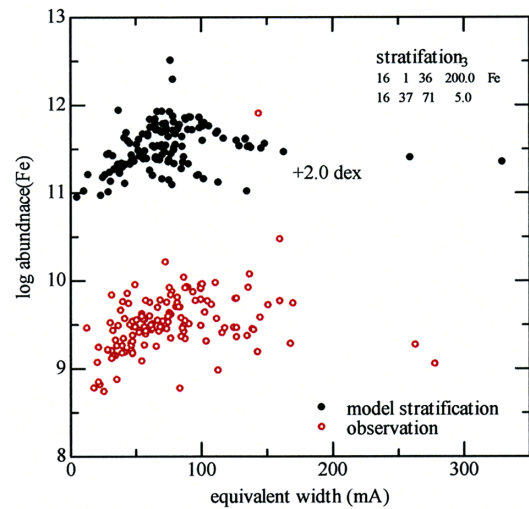


図13 Feの分布が層をなしていると仮定した時のFe II線の等価幅—元素量関係(上)。下は観測から得られた関係で、図11と同じもの。

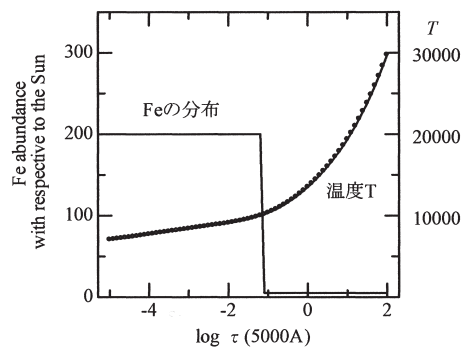


図14 仮定したFeの層状分布(太陽のFe量に対する値)と温度分布 T 。横軸は5000Åにおける光学的な深さ(対数表示)

et al. (2009)から引用)。SiとTiには0.0 km/sのマイクロ乱流速度を採用し、他は3.0 km/sを採用して求めた。

見ると、原子番号とともに、つまり原子構造が複雑になるとともに量が増すという典型的な化学特異星の様相を見せている。Ag、Auは通常は全く姿を見せない元素だけに興味深い、信頼性が低く、残念である。ランタノイド系列の希土類REEではLa II、Ce II、Pr III、Nd II、Nd III、Sm II、Gd II、Tb III、Dy III、Er II、Er III、Lu IIと多くの元素の定量を行うことができた。いずれも3 dex以上の過剰を示している。

以上のようにHD 94660は白金Pt過剰であり、Ag、Auの過剰傾向も窺える。貴金属に富んだ数少ない特異星と言えよう。また、Hgも過剰傾向が窺えるし、Mnも

過剰であるから、HgMn星の特性を備えている。HgMn星では磁場を帯びた例は少ないが、HD 94660はそうした希な例と言えるかも知れない。

2章で紹介したようにスペクトル型はA0pEuSiCrと表記されているものの、Eu線は検出されず、Si過剰もさほどでなく、この分類表記を再考しなければならないようである。

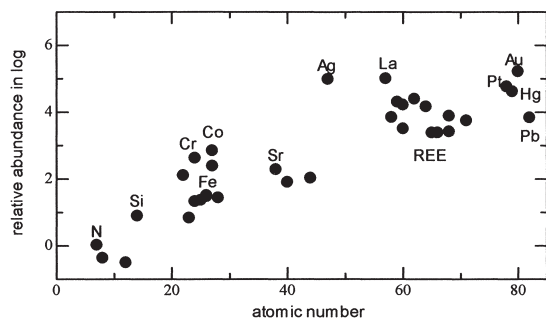


図15 太陽に相対的な元素量 (対数)

1.1. まとめ

南天にある強い磁場をおびた特異星恒星HD 94660の高分散スペクトルの解析を行い、35元素477本の吸収線の強度を測定し、それから各元素・各吸収線の元素量を求めた。その結果、軽元素では太陽値より少なく、原子番号と共に過剰になるというCP2型特異星の典型的なパターンを示していた。また、Ag、Au、Ptなどの貴金属の吸収線を検出することができた。

ゼーマン分岐した吸収線の輪郭より磁場の強度と視線に対する傾きを求め、6.2Kガウスの平均磁場と視線に対し45°前後の傾斜角が得られた。

線の等価幅-元素量関係が元素によって異なり、元素の大気内分布にむらがある層状分布を示唆していた。そこで、Fe原子が上層に濃縮されていると仮定して期待される吸収線強度をモデル計算してみたところ、Fe IIの等価幅-元素量関係を再現することができた。

本研究にあたってはフランス・オートプロバンス天文台のELODIE分光器で得られたデータおよびESO(ヨーロッパ南方天文台)のUVESならびにHARPS分光器で得られた高解像度・高SN比のスペクトルを利用した。提供戴いた両機関に感謝申し上げる。

参考文献

- Asplund, M., Grevesse, N., & Sauval, A. J. 2009, *ARA&A*, 47, 481
- Babcock, H. W. 1960, in *Stellar Atmospheres*, ed. J. L. Greenstein, The University of Chicago Press, p.282
- Bailey, J. D., Grunhut, J., & Landstreet, J. D. 2015, *A&A*, 575, A115
- Bohlender, D. A., Landstreet, J. D., & Thompson, I. B. 1993, *A&A*, 269, 355
- Borra, E. F., & Landstreet, J. B. 1975, *PASP*, 87, 961
- Dworetzky, M. M., & Vaughan, A. H., Jr. 1973, *ApJ*, 181, 811
- Glebocki, R., & Gnacinski, P. 2005, *The Catalogue of Rotational Velocities of Stars*, SP-560, 571 (ESA)
- Hoffleit, D., & Warren, W. H., Jr. 1991, *Preliminary Version of the Bright Star Catalogue, 5th Revised Edition* (Yale University)
- Kato, K. 2003, *PASJ*, 55, 1133
- Kato, K., & Sadakane, K. 1999, *PASJ*, 51, 23
- Kurucz, R. L., 1979, *ApJS*, 40, 1
- Kurucz, R.L. 1993a, *Kurucz CD-ROM No.13*, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
- Kurucz, R. L. 1993b, *Kurucz CD-ROM No.18*, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
- Kurucz, R. L., & Bell, B. 1995, *Kurucz CD-ROM No.23*, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
- Lester, J. B., & Neilson, H. R. 2008, *A&A*, 491, 633
- Mathys, G. 1990, *A&A*, 232, 151
- Michaud, G. 1970, *ApJ*, 160, 641
- Monier, R., Gebran, M., & Royer, F. 2016, *SF2A 2016*, ed. C. Reyle et al., p.213
- Preston, G. W. 1974, *ARA&A*, 12, 257
- Renson, P., & Manfroid, J. 2009, *A&A*, 498, 961
- Ryabchikova, T., Piskunov, N., Kurucz, R. L., Stempels, H. C., Heiter, U., Pakhomov, Yu., & Barklem, P. S. 2015, *Phys. Scr.*, 90, 054005
- Ryabchikova, T., Ryabtsev, A., Kochukhov, O., & Bagnulo, S. 2006, *A&A*, 456, 329
- Stibbs, D. W. N. 1950, *MNRAS*, 110, 395
- 竹田洋一, 2009, 恒星(シリーズ現代の天文学7, 野本他編), 日本評論社, p.91

表 4 求められた元素量 ($\log \epsilon(\text{H}) = 12.00$)

atom	lines	this study		Bailey et al. (2015)	Sun
		$\log \epsilon$	[ϵ]	$\log \epsilon$	$\log \epsilon$
N I	1	7.85	0.02		7.83
O I	3	8.32	-0.37	8.23	8.69
Mg II	4	7.09	-0.51	6.97	7.60
Si II	13	8.40	0.89	8.79	7.51
Ti II	34	7.05	2.10	6.45	4.95
V II	5	4.76	0.83		3.93
Cr I	9	6.96	1.32		5.64
Cr II	109	8.26	2.62	8.14	5.64
Mn II	6	6.79	1.36	6.33	5.43
Fe I	16	9.00	1.50		7.50
Fe II	134	9.00	1.50	8.9	7.50
Fe III	2	8.97	1.47		7.50
Co I	4	7.83	2.84		4.99
Co II	20	7.37	2.38	7.49	4.99
Ni II	2	7.65	1.43	6.76	6.22
Sr II	2	5.15	2.28	4.22	2.87
Zr II	4	4.48	1.90		2.58
Ru II	2	3.77	2.02		1.75
La II	2	6.10	5.00	4.32	1.10
Ce II	25	5.42	3.84	5.14	1.58
Pr III	12	5.02	4.30	5.2	0.72
Nd II	7	5.63	4.21		1.42
Nd III	22	4.92	3.50	5.46	1.42
Sm II	3	5.35	4.39		0.96
Gd II	8	5.23	4.16		1.07
Tb III	2	3.68	3.38		0.30
Dy III	5	4.48	3.38		1.10
Er II	3	4.80	3.88		0.92
Er III	4	4.33	3.41		0.92
Lu II	3	3.84	3.74		0.10

Pt II	5	6.38	4.76	(1.62)
Pb II	3	5.58	3.83	1.75
less reliable				
Ag I	1	5.92	4.88	0.94
Au II	1	5.53	4.61	0.92
Hg I	1	6.38	5.21	(1.17)

Noble-Metal Rich Magnetic CP star HD 94660

Ken-ichi Kato

*Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science,
Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 13, 2017; accepted December 4, 2017)

High dispersion and high SN spectrograms kindly provided from the European Southern Observatory (ESO) are examined to investigate atmospheric structure and elemental abundances of a southern magnetic CP star HD 94660. We report the presence of some spectral lines of noble-metals such as silver, gold, and platinum as well as of strong lines of heavy metals of iron group, lanthanoid rare earths, mercury, and lead. The strength of the magnetic field is found to be 6200 gauss and its inclination to the radial direction is 45° . Although elemental abundances of Cr and Fe are similar to those of normal stars, where their abundances increase with equivalent width until 100 mÅ and decrease slowly afterward, those of Si and Ti are constant for their equivalent widths. These unusual contradicting equivalent width–abundance relations suggest the stratified distributions of these elements in the atmosphere. We show that the relation for Fe will be reproduced by the assumption that iron atoms are accumulated at upper atmosphere by 200 times the solar value and at lower layers by 5 times, based on model calculations of line formation under such stratified atmospheres.

Keywords: magnetic chemically peculiar (mCP) stars; HD 94660; noble-metals; Zeeman splitting; equivalent width–abundance relation; elemental stratification.