

貴金属に富む磁気特異星 HD 94660

加藤 賢一 (岡山理科大学)

概 要

南天にある恒星 HD94660 は 6.2kG という強い磁場をおびた特異星で、N、O は太陽に対し欠乏、Mg は同程度、Si、Ti、V、Mn、Fe、Ni、Zr は 0.7~2.0 dex 過剰で、Cr、Co、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Gd、Tb、Dy、Er、Lu、Pt、Pb は 2~5 dex 過剰であることを示す。また、他に Mo、W、Hg が存在する可能性があり、貴金属に富んでいる。白金 Pt 過剰は水銀マンガン HgMn 星にしばしば見られる特徴だが、HD 94660 は Mn も、そしておそらく Hg も、過剰である。HgMn 星では磁場を帶びた例は少ないが、HD 94660 はそうした希な例と言えるかも知れない。

1. はじめに

A型、B型主系列星の 10%程度はスペクトル線に異常が見られるため、特異星として分類されていて、磁場を帶びている場合が多い（磁気特異星）。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。一方、強度（ストークスパラメータの I）を観測すると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 1 kG を越えるのはしばしばだし、 $\langle B \rangle$ では数千から数万ガウスに達することがある。

特異星の組成は全く奇妙で、例えば、鉄族の Cr では太陽の 100 倍以上にもなっているし、さらに奇妙なのは希土類で、それは 1 万倍以上にもなる。

Si 星は ApSiCrEu と分類される特異星の中でも有効温度が 10000K 以上の高温の部類に属しており、名称通り、Si 線（特に Si II の 4128.053Å、4130.894Å 線）が同種の有効温度の通常星に比べて強く出ていて、磁気を帶びている場合が多い。Si 量が太陽の 10 倍以上という例が多いが、異常はむしろ Cr や Fe の方に強い場合も少なくなく、Si 星という分類が適當なのか、疑問が湧いてくる。こうした元素の異常性は元素の拡散現象により、沈殿や浮上によって生じていると考えられるものの、その条件については未知の部分があり、Si 線がどのような恒星で卓越しているかの追究とともになお研究の余地がある。

また、磁場強度が変化すると同期して変光している場合が多く、スペクトル線の強度とその輪郭は自転周期で変化するのが普通である。この変光は斜回転モデル（たとえば、Stibbs 1950）で説明できる。このモデルでは視線と磁場の向きは自転軸に対し角度 i と β だけ傾いていて、自転の間に磁場強度が変化して観測されるのは向きが変わって観測された結果である。また、巨大な太陽黒点のように、元素がまばらに非軸対象に分布しているためスペクトル変動が観測される。

HD 94660 (=HR 4263) は明るい南天の磁気特異星で偏光システムの試験を行う時の磁場の標準としてよく使われている。磁場は Borra & Landstreet (1975) によって H α マグネットグラフの観測から発見された。彼らは視線方向の磁場として $\langle B_z \rangle = -3300 \pm 510$ G と求めた。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 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。

本研究では各元素について元素量と等価幅の関係から元素拡散が起こっている可能性に注意しながら、プラチナ Pt や鉛 Pb が 4 dex 以上存在し、金 Au や水銀 Hg も存在している可能性が高いこと、また HgMn 星の特性を有していることを見していく。

2. 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 3 月 12 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 本を ESO のアーカイブからダウンロードして測定した。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。

線の同定は竹田洋一氏作成のスペクトル合成プログラ

ム `spshow` を用いて行い、その後、線測定ソフト `Nijiboshi` を用いて行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等価幅を測つた。

なお、`spshow` 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ておかなければならぬが、Bailey et al. (2015)が $(T_{\text{eff}}, \log g) = (11300\text{K}, 4.18)$ 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 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 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 Kurucz (1979) の大気モデルを内挿して求めた。

3. 磁場強度と傾斜角

Fe II の 6147.741A ($\chi=3.889$ 、 $\log gf=-2.721$) 線と 6149.258 ($\chi=3.889$ 、 $\log gf=-2.920$) 線は励起ボテンシャルや gf 値は同じだが、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 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係数を示している。 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。 x は深さを表す変数で、 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記述されている。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、観測と比較されるのは偏光成分のない強度 I である。

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

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、実線が計算された強度 I の分布である。これは鉄の含有量が太陽の 10 倍で、ミクロ乱流速度が 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 例である。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う。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。

4. 特異なスペクトル線

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は推察できるし、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、 $3100\text{A} \sim 8600\text{A}$ の間で注意深くスペクトル線の同定作業を行った。その結果、通常は見られないスペクトル線として Pt 線を 3 本、Pb 線を 3 本同定することができた (図 3, 4)。その他、信頼性が低いが、Ga II、Nb II、Mo II、Ru II、Ag I、Cd I、In II、W II、Re II、Au II、Hg I のスペクトル線がある可能性がある。

Hg I 線として 5769.593A 線を同定し、その結果を図 2 に示しておいた。Si 星 HR6958 には見られないものの、明瞭な吸収を確認することができる。水銀線では Hg II の 3983.890A 線が良く知られているが、この領域には Cr I の 3983.956A が卓越し、また Fe I の 3983.956A 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が、なお、HgMn 星である可能性は否定できない。

5. 元素によって異なるミクロ乱流速度

図 5、6、7 に Si II、Ti II、Fe II の吸収線の等価幅に対する各元素量の相関を示した。この元素量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。

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パターンを示している。ただし、通常というのは正常星 *normal stars* で見られるということで、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。

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、元素量はど

の等価幅でも同じである。

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

このように HD 94660 では元素によってミ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、ということである。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。しかし、それらの影響を考慮してもなお各元素による振る舞いの相違を消すことはできず、この HD 94660 にあっても元素拡散による層構造を想定するのが相当と考えられる。ただ、これに明確な解答を与えるにはよりきめ細かな解析が必要である。

6. 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 8)。典型的なミクロ乱流速度として 3.0 km/s を採用して求めているが、Cr や Fe のように元素ごとに決めることができた場合にはその値を採用している。

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おり。中でも 3 dex にもおよぶ Co の過剰が注目される。Pt と Pb は信頼性が低いのが残念だが、パターンには乗っている。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。

また、他に Mo, W, Hg が存在する可能性があり、貴金属に富んでいる。白金 Pt 過剰は水銀マンガン HgMn 星にしばしば見られる特徴だが、HD 94660 は Mn も、そしておそらく Hg も、過剰である。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。

References

- Bohlander, D. A., Landstreet, J. D., & Thompson, I. B. 1993, A&A, 269, 355
 Borra, E. F., & Landstreet, J. B. 1975, PASP, 87, 961
 Kato, K., & Sadakane, K. 1999, PASJ, 51, 23
 Kurucz, R. L., 1979, ApJS, 40, 1
 Mathys, G. 1990, A&A, 232, 151
 Stibbs, D. W. N., 1950, MNRAS, 110, 395

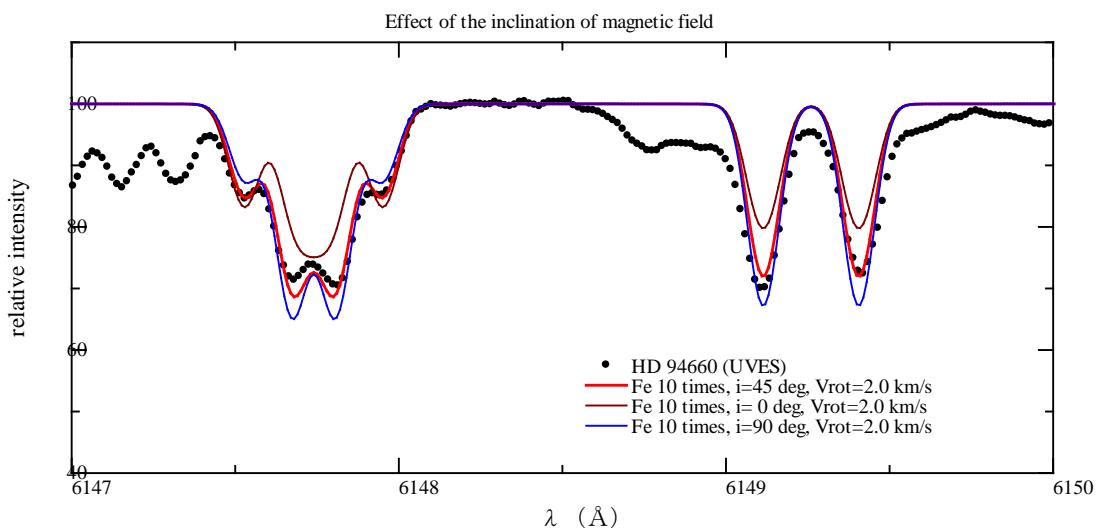


図 1. ゼーマン効果により分岐した 6147.741Å と 6149.258Å の 2 本の Fe II 線。

点・は観測された線輪郭で、Unno-Beckers 方程式から得られた 3 種類の磁場傾斜角に対する結果を重ねた

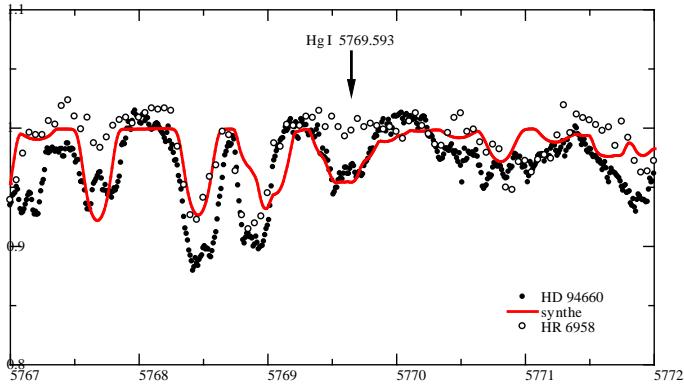


図2. 中性水銀線 5769.593A と思われる吸収。Si星 HR 6958 には見られない

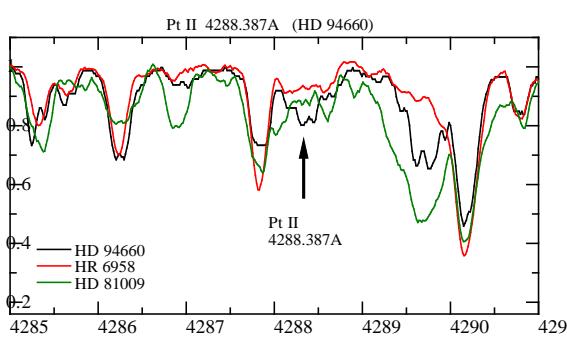


図3. 1階電離の白金 Pt 線の例

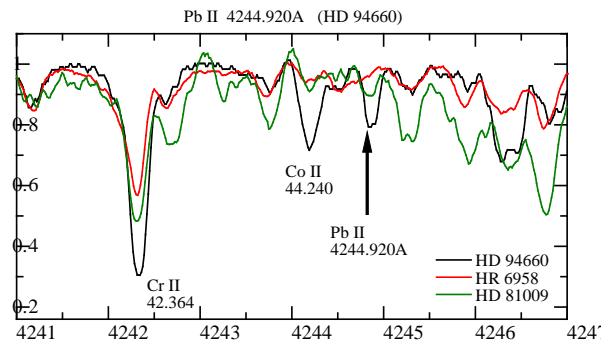


図4. 1階電離の鉛 Pb 線の例

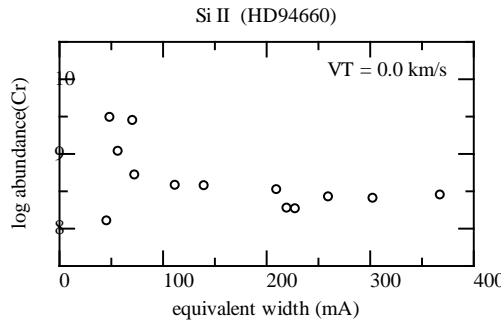


図5. Si II 線の等価幅-元素量関係。等価幅への依存性は見られない

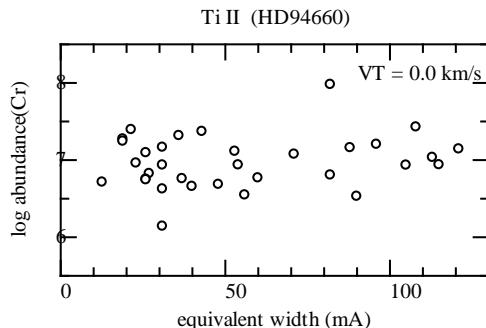


図6. Ti II 線の等価幅-元素量関係。等価幅への依存性は見られない

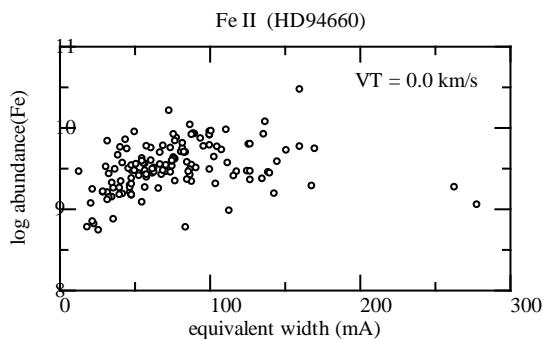


図7. Fe II 線の等価幅-元素量関係。Si II、Ti II 線と異なり、等価幅への依存性がある

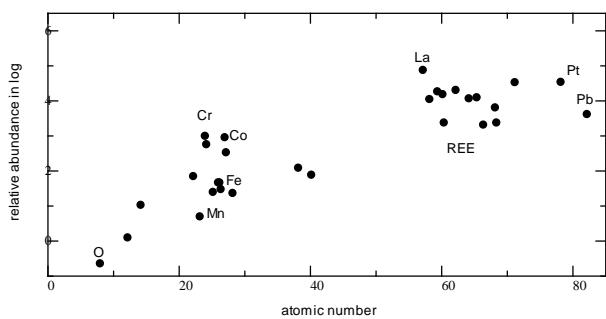


図8. 太陽に相対的な元素量 (対数)