

化学特異星の元素垂直分布

京都府立洛東高等学校 西村昌能

1) はじめに

我々は最近の数年間、化学特異星の化学組成比決定に興味を持ち、研究を進めてきた。化学特異星は正常星に比べると、吸収線一本、一本ごとから求まる元素組成比にはばらつきが多く、解析に困難な面がある。この元素組成比のばらつきの原因は、モデルの不備や原子線データの不備、線肥大の未知の効果の存在にあるのかと悩む所であるが、逆にそれが、恒星に本質的なものであると考えると、恒星光球での元素の成層現象、つまり、元素の垂直分布が見てくる。

2) 化学特異星とは

我々が研究対象としている化学特異星について簡単に説明しよう。HR図上を左上から右下にかけて、帯状に多くの恒星が分布する。これを主系列というが、このうち、B型からA型の恒星の内20%以上の恒星は、化学組成比が太陽値と大きく異なる。これらの恒星を化学特異星(CP星)といい、表面温度はおよそ7000K ~ 15000Kである。表面温度の低い方から強い磁場が観察されないAm型星、HgMn星、強ヘリウム星に、また、強い磁場が観察されるCP2星(マグネティックAp型星=磁変星)、シリコン星、弱ヘリウム星に細分類されている。

これらの内、我々はCP2星の解析を行っている。CP2星の特徴は

表面温度 7000K から 12000K の主系列星

数 kG の強い磁場が観察される。

自転速度が小さい。

He、C、N、O の存在量比は太陽値に比べ小さく、一方、Cr、Fe、REE は多い。

双極磁場、4重極子、8重極子の磁場が観察され、恒星の自転軸と双極磁場の磁極がずれるため、磁場強度が周期的に観察される。

上記の磁極の変化に伴ってスペクトルの変光、吸収線強度が大きく変動し、よって得られる化学組成比も大きく変動する。これを磁場に結びついた元素大陸が恒星の自転によって周期的に見え隠れすると考える。

CP2星の理解には二つの道筋がある。それは

(1) 恒星表面の元素分布 いわゆる斜回転モデルで、ドップラートモグラフィーなど、吸収線のシフトや変形を利用して求める。

(2) 光球内での元素の垂直分布(元素の成層構造) これが今回、話題にするテーマである。元素の垂直分布の理論的裏付けはすでに30年前も昔にカナダ人 Michaud 氏が提案した拡散理論である。

拡散理論では 静穏な恒星大気では、内部からの輻射を受ける強い吸収線がある元素は光圧を得て、重力に打ち勝ち大気上層に持ち上げられるとする。上昇した元素は恒星風に

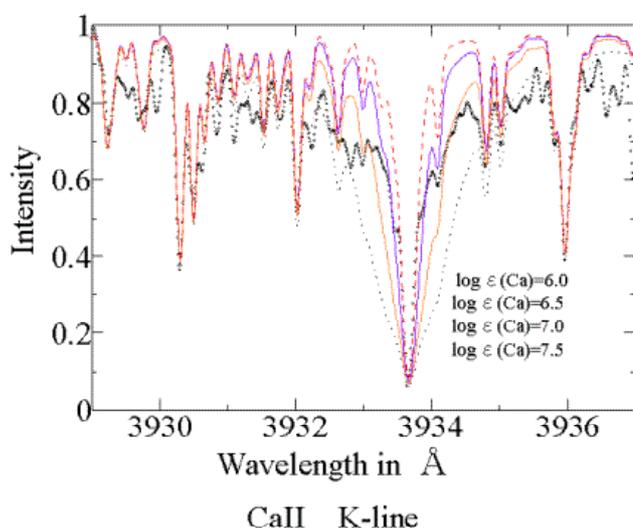
伴って恒星の外に飛び出し、恒星磁気トラスに捕まる。そして適当な吸収線を持たない元素は沈んでいく。というものである。拡散理論によれば、元素は恒星大気内で層構造 (Stratification) を形成する。つまり元素の垂直分布をみせる。ところで実際に、そのようなことがあるのだろうか？

3) 元素垂直分布の観測的証拠

CaII K線、SiII線などの飽和した強い吸収線は線中央のコアと線周辺のウイングで元素組成比が合わない(図1)

高励起線から求めた元素組成比は平均値と合わない。(弱い線と強い線で値が異なる。)
微視的乱流速度が元素ごとで異なる。

電離平衡からずれた元素組成比。



これらの現象は多かれ少なかれほとんどの CP2 星で観測されている。

たとえば、図1()はすばる望遠鏡 HDS で観測された HD221568 (大沢星、A0P (Sr-Cr-Eu)、 $T_{\text{eff}}=10300$ 、 $\text{Log}g=3.7$) の CaII K線の輪郭を示す。ラインセンターでの Ca 組成比は 6.0 であるがウイングは 7.5 でフィットする。

元素の垂直分布を調べる方法には次のようなことがある。

ポテンシャルが同じで等価幅の異なるラインで、アバundanceを求める。

バルマーラインのウイング上にあるライン群からアバundanceを求める。

バルマー端の両側(連続吸収係数が大きく異なる。)のライン群からアバundanceを求める。ESO VLT UVES (波長域 3000 ~ 10000) やすばるのデータが利用できる。

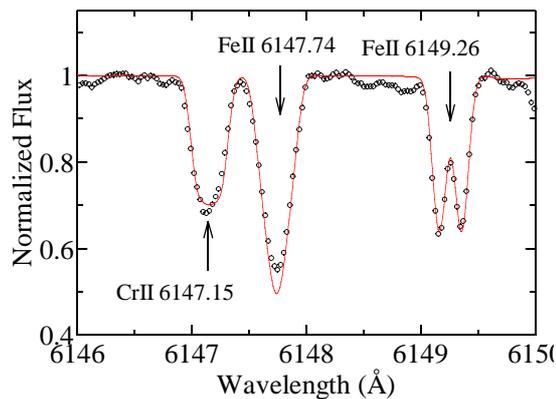
4) 今回の観測から

2003年4月に国立天文台岡山天体物理観測所(OAO)の188cm鏡+HIDESを利用して幾いつかの化学特異星の高分散分光観測を実施した。そのうちの低温 CP2 星4星について多数の吸収線が見られる Ca、Cr、Fe について、元素の垂直分布を調べてみた。

観測は加藤、西村、大西、定金が行い、分解能およそ60000、SN比が300程度、波長域5500 ~ 6700 のスペクトルを次の各星について得た。

恒星名	表面温度	重力加速度	磁場強度	自転周期	Vsini
CrB	7447K	3.74	5.5kG	18.5日	5km/s
HR7575	8110K	3.79	3.7kG	224日	2km/s
53Cam	8241K	3.94	8.0kG	8日	12km/s
HR4816	8730K	3.74	4.1kG	4900日	3km/s

恒星の物理量は文献(Hubrig et al. 2000)から引用した。微視的乱流速度 $t = 0\text{km/s}$ とし、磁場強度は FeII6149 線で見積もり、文献と比較した。Vsini も吸収線から見積もる。利用したツールは竹田洋一さん制作の SPTOOL である。原子線データは VLAD データベースを利用した。恒星のモデル大気は上表の物理量から ATLAS 9 を利用して構築し LTE を仮定した。各吸収線からの元素組成比は、磁場を考慮に入れたスペクトル合成を利用したフィッティングから求めた。また、光学的深さは別個に測定した吸収線の等価幅から WIDTH9 を利用して求めた。利用した吸収線にはブレンドの少ないものを選び、各星と



HR 4816 4/17/2003
 $T_{\text{eff}}=8730$ $\log=3.74$ $V_{\text{sini}}=3.0\text{km/s}$
 $t=0.0\text{km/s}$ $\langle H \rangle=4.1\text{kG}$
 $\text{Fe}=8.37$ $\text{Cr}=7.90$

も共通のものを利用した。また、地球大気起源の吸収線の影響は Spica のスペクトルを参照して除去した。

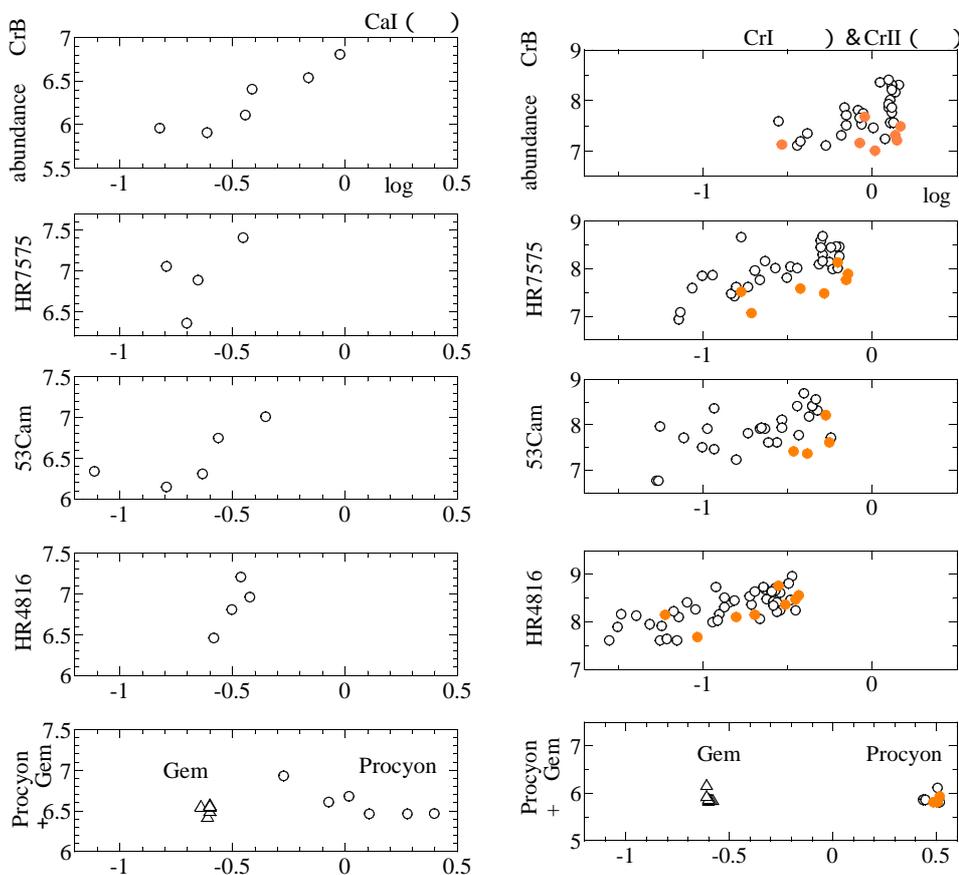
図 2 は HR4816 のスペクトル合成の例である。観測を示し、実線が合成されたスペクトルである。

図 2

5) 結果

CaI, CrI, CrII, FeI, FeII についてそれぞれの光学的深さに対する化学組成比の分布が次の図のように求まった。

図 3 () 図 4 ()



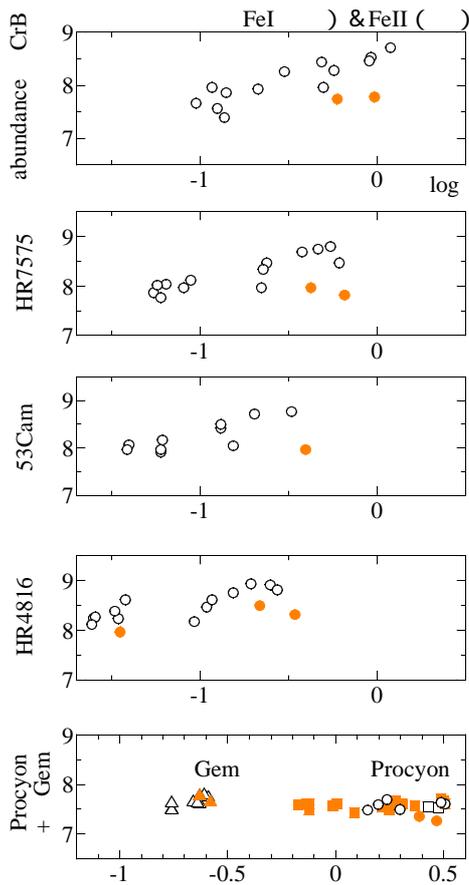


図 5

図 3 は CaI、図 4 は CrI、CrII、図 5 は FeI、FeII のそれぞれの恒星の光球での元素の垂直分布を表す。

Ca 以外は τ は中性原子、 τ は一回電離イオンを表す。なお、標準星として同じ観測で得られた Procyon (6650K, $\log g = 4.0$, $\tau = 1.8\text{km/s}$) と Gem (9260K, $\log g=3.6$, $\tau = 2.0\text{km/s}$)の結果を比較として掲載してある。(これらの標準星は同じ図にプロットしたが、主に表面温度の違いから、吸収線形成の深さが異なるため旨い具合に吸収線の強さをカバーできる図になった。Gem は τ と、Procyon は τ で中性と一回電離イオンを表す。また、Procyon の Fe では、プロジェクトに利用した吸収線以外のものも利用しそれらは τ と τ で表してある。)

6) 考察とまとめ

観測対象の CP2 星は 4 星とも $\log \tau$ が小さくなる (光球上層) につれ、元素組成比が小さくなることが明らかになった。それは Ca で $\log \tau = -0.5$ 、Cr、Fe で $-0.5 \sim -1$ を境としている。一方、標準星ではそのような傾向は見られず、光球の深さによらず、Procyon の強い Ca 線を除き、元素組成比はほぼ一定の値となっている。

Wade et al (2001) は CrB の元素組成比が Cr : $\log \tau = -0.6$ を境に上層で 5.5、下層で 8.4 のそれぞれ、極値を示し、Fe : $\log \tau = -0.7$ を境に上層で 6.2、下層で 9.4 を、Babel(1992) と Babel & Lanz(1992) は 53Cam で、Cr : $\log \tau = -0.9$ を境に上層で 5.5、下層で 8.3、Fe : $\log \tau = -0.9$ で上層 6.7、下層 9.3 の垂直元素分布を見出した。彼らの結果は我々のものと調和している。また、Ryabchikova et al (2002) は、roAp 星である Equ (7700K, $\log g=4.2$) で我々の結果と同様の傾向を見いだ。このように、元素の垂直分布が低温の CP2 星で確認された。

今後の課題として 10000K 以上の表面温度を持つ CP 星 (CP 2 以外も) の観測数を増やすこと、多くの元素種で解析を行うこと、恒星表面の元素分布 (元素大陸) と垂直分布の関係などを論じなければならない。