

Si 星は実在するか？

加藤 賢一 (岡山理科大学)

概要

化学特異星である Si 星 33 星の Si、Cr、Fe についてスペクトル合成法による元素量解析を行ったところ、Si 星が示す Si の吸収線は確かに強いものの、Cr や Fe に対する量は決して多くはなく、Si だけを特異とするような星は見当たらなかった。そこで、Si 線強度の異常は Si だけに固有の現象ではなく、その他の各種元素の特異性と並行して出現するものであり、Si だけに注目した分類法については疑義があることを示し、元素拡散理論との整合性について議論する。

1. はじめに

スペクトルに同種の他の恒星とは異なる特徴が見られる特異星 peculiar stars は天体分光の黎明期にすでに発見されていた。たとえば、ハーバード大学天文台の Antonia Maury は 1897 年、Ap 星と Am 星を記載し、 α CVn の Si II 線 (4128.5 Å, 4131.4 Å) が他の星より非常に強いことを注記している (図 1 参照)。こうした特異性に着目し、これを明確に定義したのは Morgan だったが (1931-35 年頃)、Si 線異常は他の特異星にも見られることから Si 星を明示することはなかった。1958 年、Mercedes & Carlos Jaschek は特異星の再分類を行い、 λ 4200、Mn、Si、Eu-Cr、& Sr 星の 5 種類に分け、ここに Si 星が特異星の 1 グループとして定義されることになった。 λ 4200 星は Si 星と重なることから、その後は一体のものとして扱われることになった (以上、Hearnshaw (1986) による)。

その前後から、Si 星は一般に磁場を帯びていることや見かけの自転速度が遅いことなどが明らかになった。元素の特異性は元素量の多寡によるものではなく、恒星大気中で何らかの選択作用によるものであろうという考えは当初より提案されていたが、それを最初に具体的に示したのは Michaud (1970) であった。この拡散の研究は理論が先行し、観測的に元素の拡散・集積が見えてきたのは 1980 年代に入ってからで、特に 1990 年代になって高解像度のスペクトルが得られるようになってからのことであった。また、同時期にマグネトグラフなどのような偏光検出装置を用いることなく、ゼーマン効果によるスペクトル線の肥大効果を直接検出することで磁場強度を測ることができるようになり、改めて磁気特異星と元素の拡散・集積に注目が集まり、スペクトル線の強度と輪郭の詳細な解析から、恒星大気中で元素が層をなしてい

る様子が次第に明らかにされてきた。

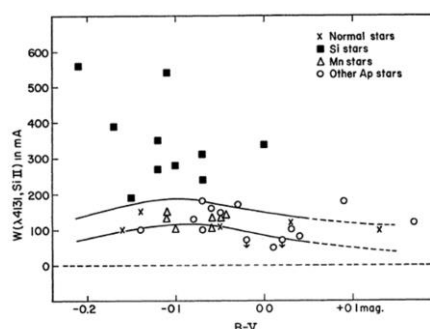


FIG. 1.—Equivalent width of the Si II line at λ 4131 as a function by $B - V$ color. Parallel curves define a band within which the normal stars lie. Arrows indicate upper limits.

図 1. Si 星の Si 線強度 (縦軸、等価幅)。正常星より明らかに強く見えている。横軸は色指数 $B-V$ で、左ほど高温。Searle & Sargent (1964)

このような恒星大気を考える場合、従来の大気モデルを構築する場合より考慮しなければならない要素が増えるため、理論的に首尾一貫したモデルを構築するまでには至っていない。たとえば、Kurucz (2005) の大気モデル計算プログラム ATLAS12 は大気の高さによって元素量比が異なる場合に対応できるように意図して開発されてきたが、まだ完成していない。これから推察されるように、通常の大気モデルを計算する時と異なり、ある種のパラメータを入れてやれば自然に元素の層状分布が求められるというような状況には遠く、なお、観測との比較を行い、理論が説明すべき項目を明らかにすることが求められている。

以上のような現況を背景に、ここでは Si 星の特徴を把握し、他の特異星との相違を現代的視点から明らかにしようという意図の下で行った解析例を紹介する。なお、まだ予備的な段階であることをお断りしておきたい。

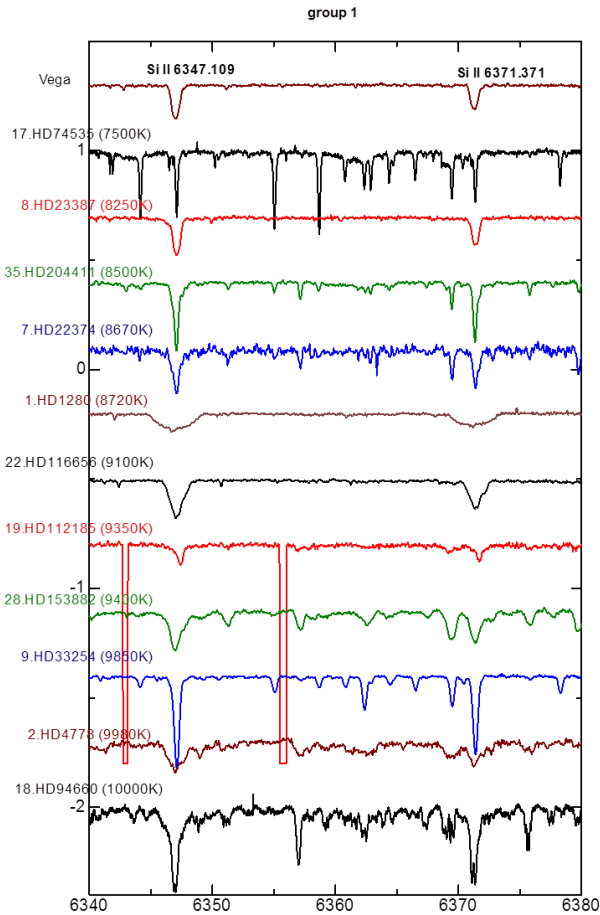


図2. 解析した Si 星のスペクトルの一部。Si II 線 6347Å、6371Å を含む部分

2. 対象星とスペクトル

今回、対象としたのは Si 星と分類されている 33 星、CrEuSr 星 (Si 星より低温) として分類されていて Si 線に異常があるとされている 11 星、比較のために選んだ通常星 (Am 星も含む。以下同様) 10 星である。スペクトルはオートプロバンス天文台の分光器 ELODIE と ESO の UVES 分光器で得られたものが大部分で、1 星については HARPS 分光器データを使用した。いずれも公開されているもので、ほとんどの整約が終わっているので扱いが容易である。波長範囲は 4000~6700Å で、SN 比は 66~480 であった。

これらをスペクトル処理プログラム nijiboshi (開発: 蓮井 隆さん) で連続部を引き、吸収線の等価幅を測定した。また、これを ELODIE スペクトルは 0.05Å、UVES スペクトルは 0.02 Å 毎にデジタル化し、スペクトル合成プログラム spshow (開発: 竹田洋一さん+Kurucz) によって理論スペクトルと比較して各元素量や見かけの自転速度等を決定した。スペクトルの例を図 2 に示す。

3. 解析結果

(1) Si 線強度

Si 線のうち中性線はほとんど見えず、5 本の Si II 線が測定対象となった。それは表 1 のとおりである。なお、表 1 はそれぞれ波長、下のレベルの励起ポテンシャル、振動子強度、最後は (有効温度、表面重力加速度 (対数)、元素量) = (15000K, 4.0(cgs 単位系)、太陽値) の場合に期待される線の等価幅である (WID77 で計算)。

図 3 にこれらの等価幅の測定値をまとめて示した。

正常星 (一部、Am 星も含む) では表 1 の期待される等価幅に近い値を示しているが、Si 星は明らかに強い。サンプルが少なく、明確ではないが、有効温度 14000K あたりまでは温度と共に強くなり、それより高温では弱くなっていくように見える。これは電離が効いてくる効果である。

図 3 は図 1 と同種のもので、Si 星の Si II 線は確かに強いことを示している。

表 1. 測定対象の Si II 線

波長(Å)	χ (eV)	log gf	EW(mÅ)
4128.05	9.84	+0.32	100
4130.87	9.84	-0.82	49
5056.32	10.07	-0.35	60
6347.11	8.12	+0.30	124
6371.37	8.12	+0.00	109

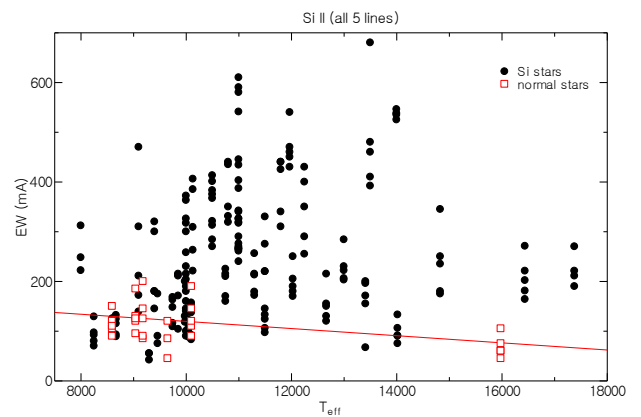


図3. Si II 線強度。□は正常星で (Am 星も含む)、その系列を実線で示した。右の方が高温

(2) Cr と Fe 線強度

Si 線の振る舞いを他の元素と比較するため Cr と Fe を選び、これらの線強度と比較してみた (図 4)。両者ともに Si 星では強く、その傾向は Si 線 (図 3) と類似していることが分かる。

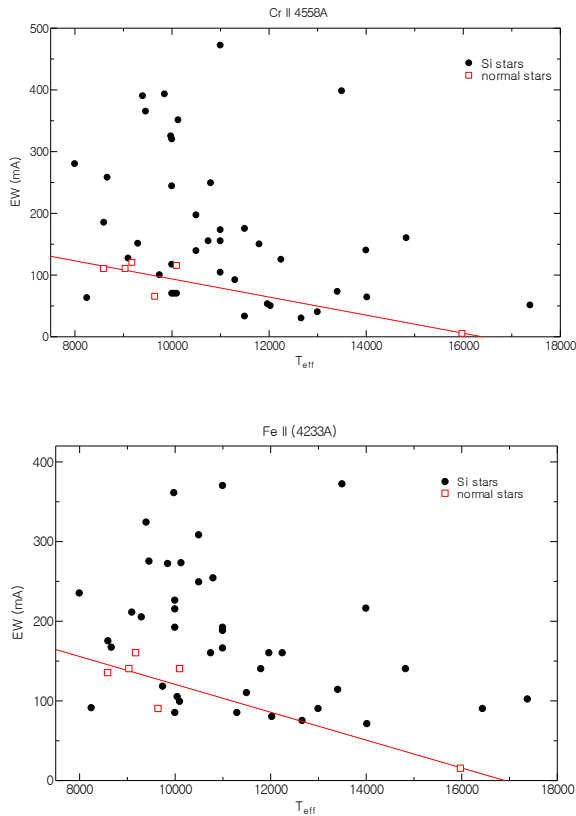


図 4. Cr 線と Fe 線の強度

(3) 元素量解析の結果

以上で示した線強度を再現するのに必要な元素量を求めるため、竹田洋一氏が開発したスペクトル合成プログラム `spshow` を用いた。このプログラムは Kurucz の ATLAS 付属のスペクトル合成プログラム `SYNTHE` を基に、大変便利な入出力ルーチンを付加したもので、非常に分かりやすく、また観測との比較が容易にできる使い勝手の良いプログラムである。

得られた Si 量を図 5 に示した。色指数 $b-y$ を横軸にとった。縦軸 0 は太陽の Si 量である。確かに平均値は太陽値より大きく、 $b-y$ が小さくなり、有効温度 T_{eff} が高くなるほど増える傾向にあるように見える。これは図 3 から類推できることで、 $T_{\text{eff}}=15000\text{K}$ あたりまで等価幅が大きくなっていくことに対応している。

よく見ると、正常星でも相当の散らばりがあり、Si 星の

Si 量異常はそれほど大きなものではない。希土類や水銀のように、特異星では通常星より 1 万~10 万倍も多いというような異常性ではない。また、明らかに太陽値より少ない Si 星もあり、これらは分類に問題があるのではないかと疑われる。

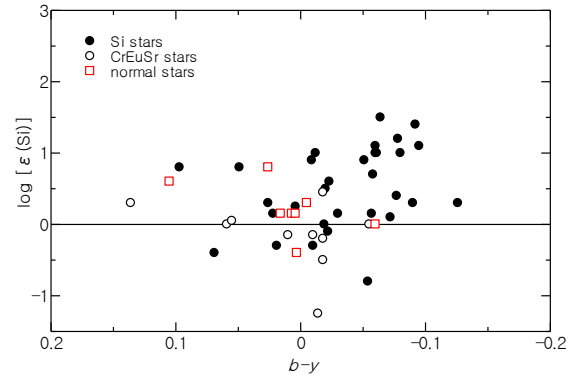


図 5. Si 量分布

次に Si 量を Cr や Fe と比較してみよう。結果は図 6 のとおりで、縦軸はそれぞれの元素について太陽値に相対的な量を求め、それらの比を求めたもので、0 が太陽値を示している。Cr や Fe は Si に劣らず多いため、0 以下に多くの星が群がる分布となっている。Si は Cr や Fe に比べ、むしろ異常性は低いと言うべき結果となっている。

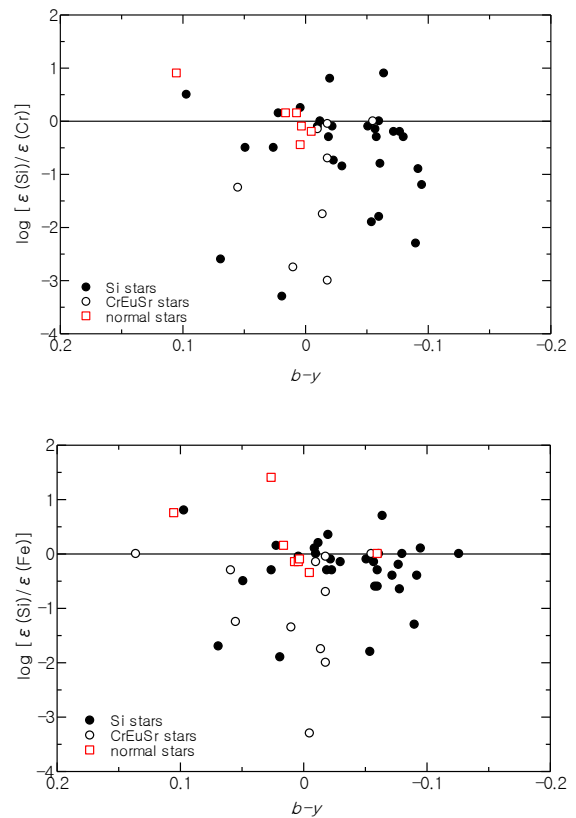


図 6. Cr と Fe に対する Si 量

以上を要するに、Si 星は Si 量に異常があると言うより、Cr や Fe 量の異常性の方が大きく、それに付随する現象と見た方が良く、という結果となった。Morgan が Si 線異常を殊更問題としなかったのは的を射ていたと言うべきであろう。

4. 議論 — 層構造との関連

Si の異常は元素の拡散理論が登場した時から注目を集め、原子が受ける放射圧によって原子が浮力を受け、ある層に集中・蓄積するというストーリーで理論的には説明できることになったが、実際、Si が集中していることが観測的に示されるようになったのは 1980 年代後半からで、2000 年代に入って低温の磁気特異星についてはほぼ明確にされた (図 7)。これは高解像度のスペクトルが得られるようになったことと、低温の磁気特異星は見かけの自転速度が小さいものが多く、スペクトル線の強度と輪郭がより精確に分かるようになったためであった。Si 星は磁気特異星の中では高温部に属するため、低温の磁気特異星のスペクトルよりも質が劣り、まだ観測的に層状分布が明瞭に見えたとは言いが、それを類推しても奇妙なことはない。

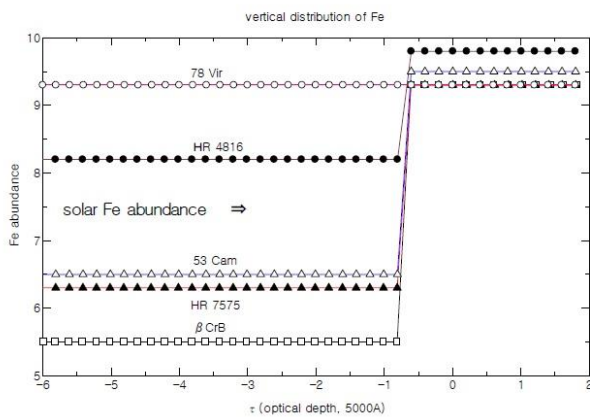


図9. 2層分布モデルによる Fe の分布。78Vir には層構造は見られない

図 7. 低温の磁気特異星に見られる元素の集積。HR 4816、53 Cam、HR 7575、 β CrB では大気深部に Fe が沈殿している。同じ種類の星でも強い磁場を持つことで知られている 78 Vir には観測されない。左が表面方向、2層近似により求めた。加藤 (2010)

(1) 元素量の大气構造への影響

そうした解釈へ進む前の試みとして、一様に元素量を増やした場合、どの層にどのような影響が出るかを求めてみた。使用したのは Kurucz (2005) のモデル大気計算プログラム ATLAS12 で、種々の有効温度モデルについて求めた。その

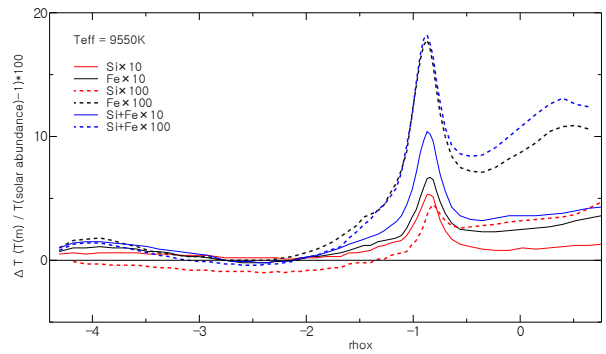


図 8. Si、Fe が太陽値の 10 倍、100 倍の時の温度変化。太陽量の場合の温度構造と比較。縦軸はパーセント表示、横軸は密度と深さの積分値で深さに対応、左方向が表面。有効温度 9550K のベガに相当

一例を図 8 に掲げた。Si、Fe、および Cr と Fe をそれぞれ太陽値の 10 倍、100 倍にした時の温度構造の変化を描いたものである。Si、Fe が放射の吸収源として最も効く層、すなわち吸収線の形成領域であり、放射圧を最も敏感に感じる層でもある。

等倍増やした場合を見れば分かるように、Fe の方が Si より大気構造への影響は大きい。前章で、Si 量異常は Cr・Fe 量異常に付随する現象と見る方が正当であることを述べたが、それを示唆する結果である。

なお、当然ながら放射平衡は達成されているので、温度上昇の影響は他の物理量の増減で相殺されなければならない。温度変化をスペクトル線形成に単純に直結すると考えてはならない。

(2) 放射圧と磁場を考慮した大気モデル理論

Si 星は一般に磁場を帯びているのでこれを無視するのは適切ではない。しかし、それを考慮し、さらに放射圧も取り入れた大気モデルを求めることは容易ではない。そこで、大気モデルは所与のもので不変とし、そこで磁場や放射圧の効果がどう効くか、それがスペクトル線にどのような影響を与えるかが計算されてきて、観測が解釈されてきた。

放射圧は原子が放射を吸収・放出する際、同時に運動量の交換を行うことに伴う現象で、その結果、原子の移動が起こり、ある層に蓄積されたり、浮上し、あるいは星圏から恒星風として放出されたりすると考えられている。これはもっぱら放射場とその原子の特性で決まる。

磁場の効果は 2 つある。1 つは磁力線による力学的効果で、磁場から電離原子や電子がローレンツ力を受け、運動が妨げ

られる効果で、磁力線方向と直行方向では効果が大きく異なるため、磁場構造に依存する。もう一つは光学的効果で、ゼーマン効果によってスペクトル線が分離し、通常は見かけ上吸収係数が増大し、放射圧が大きくなる効果となって現れる。ゼーマン効果も磁場の方向によって異なるため、光学的効果も磁場構造に依存する。

通常、大気モデルを求めるには、有効温度、表面重力加速度、元素量（一様分布）、マイクロ乱流速度などのマクロな量を初期値として与えれば、それに応じた構造が求まるという流れとなっている。もし放射圧と磁場が Si 量異常の原因ならば、これらの初期値に磁場強度や方向を新たな初期値として加えてやった時、同じように大気モデルが計算できるなら、その結果、Si がどの層に集まって来るか、が自然に導かれるはずである。実際、こうした研究が 1970 年代から続いてきたが、成功したと言えるような現状ではないように思われる。初めに書いたように、ATLAS12 も完成していないが、こうした試みに成功したと言う研究者もいるので、彼らの結果を見てみよう。例を図 9、10 に示しておく。一様な元素分布から出発して、逐次近似によりこのような層構造が得られると言う（図 9）。図 9 は有効温度 1 万度で、Si 星に相当する。Mg や Fe は下層の数十倍、雲のように浮かび、Si は太陽値にほぼ同じ、という結果である。それはまた磁場強度や方向に依存し、磁場が大気に平行の場合、ガスの移動が妨げられ、より蓄積しやすくなる。Si については磁場があれば大気上層では希薄となり、相対的に沈殿したような形になるが、それでも太陽値より少なく、これは Si 欠乏星となる傾向である。残念ながら、Si 星の説明とはなっていない。

図 10 の 8000K の場合、Si、Cr が同じ場所に集中しており、今回の結果と付合するが、12000K では随分異なっているように見える。

(3) 他のパラメータ ①自転速度

拡散の他に Si 量を規定する要素はないか、を考えてみる。まず、元素の拡散現象は自転の遅い静穏な大気で実現されると言われているので、自転速度と元素量の関係を見てみよう。

図 11 の横軸には見かけの自転速度 $v \sin i$ 、縦軸には Si 量をとった。自転速度と共に増えていくように見えるが、一般に自転速度は有効温度と共に大きくなるから、実は図 11 は図 5 と同値であって、必ずしも自転速度に依存するとは言えない。それでも、少なくとも自転速度が大きくなると Si 量が減少する傾向ではなく、自転速度が元素拡散効果のキー

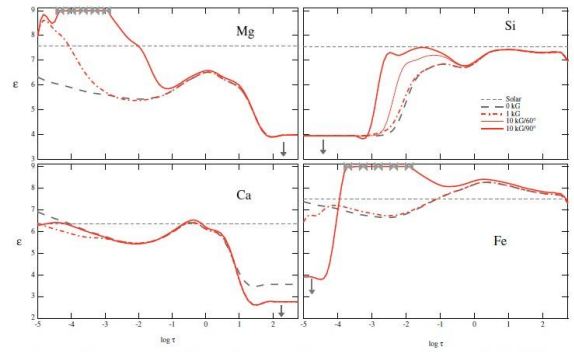


Fig. 3. Abundance stratifications (equilibrium solutions) of Mg, Si, Ca, and Fe for an atmosphere with $T_{\text{eff}} = 10000$ K. The dashed-point lines correspond to the case of a 1 KG horizontal magnetic field, for the other curves the legends are the same as in Fig. 1 (see text for details).

図 9. Alecian & Stifft (2007) が求めた磁気特異星の層構造。有効温度 10000K

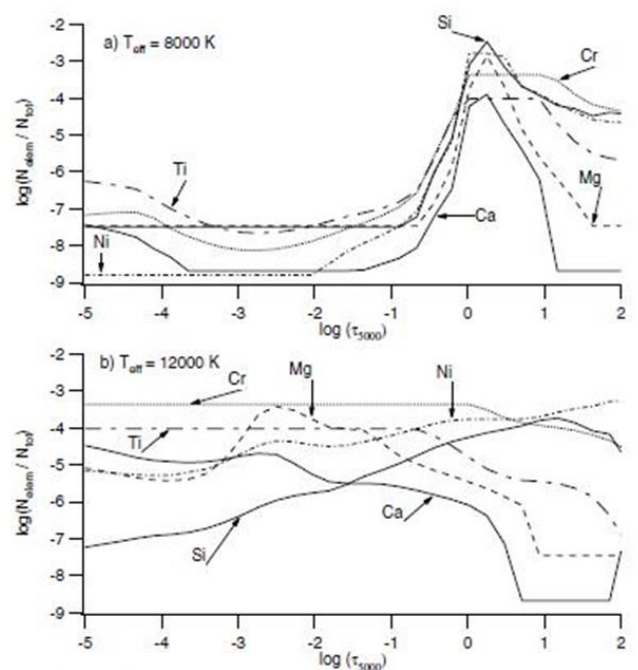


Fig. 9. The abundance of the elements Mg, Si, Ca, Ti, Cr and Ni as a function of optical depth for models with a) $T_{\text{eff}} = 8000$ K and b) $T_{\text{eff}} = 12000$ K (both for $\log g = 4.0$) assuming the Montmerle & Michaud (1976) redistribution.

図 10. LeBlanc et al. (2009) の計算結果。有効温度 8000K と 12000K で、Si の振る舞いは大きく異なる

パラメータとは思えない

(4) 他のパラメータ ②磁場強度

先に磁場の理論的扱いについて記したので、観測結果を示しておきたい。磁場強度と Si 量の間には何か相関があるのではないかと期待されるので、磁場強度と元素量の関係を調べてみた（図 12）。なお、磁場強度は Bychkov et al. (2009) カタログから採用した。特に強い相関はないようである。ただ、CrSrEu 星が Si 量に磁場強度が全く関与していないのに Si 星では CrSrEu 星の系列とは全く別物のように分布している

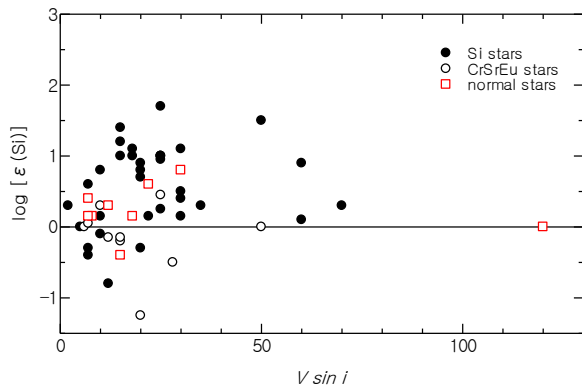


図 11. 見かけの自転速度に対する Si 量

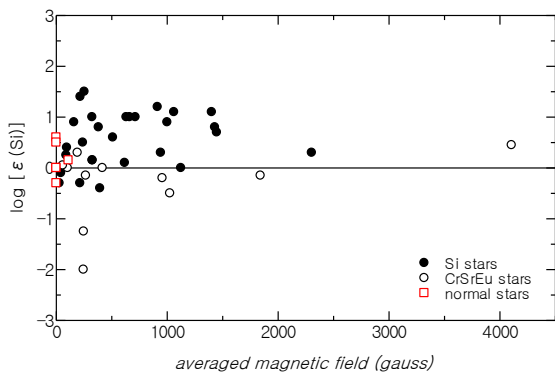


図 12. 平均磁場強度に対する Si 量

から、両者では Si への作用が異なっているとは言えるかも知れない。

図 9、10 で示した理論計算では磁場の向きに強く依存することが示されたが、残念ながら、観測的には磁場の向きを求めるのは極めて難しい。

5. まとめ

ここでは現在入手でき得る最高の解像度、SN 比の可視域スペクトルをもとに 33 の Si 星について、Si、Cr、Fe 量、および自転速度を決定し、その結果を用いて元素拡散理論との整合性について議論した。

Si 星では Si 量の異常が確かに見られるが、Si 星ではそれ以上に Cr や Fe 量が異常であって、必ずしも Si だけが異常性を示しているわけではなく、可視域スペクトルに Si 線が目立つことから設定された Si 星という分類には正当性がないと言える。

Si 量異常は Si が大気の上層に蓄積することによれば観測的に説明することが可能で、それは放射圧による拡散効果によつて理論的に説明されており、かなり確かなこ

とである。しかし、Si 量は同じ有効温度でも大きな幅があり (Si 量の二重性)、さらに磁場強度や自転速度にも依存していないという観測結果は現在の拡散理論と矛盾するように見える。Si 星を規定しているパラメータは依然、不明とすべきである。では、それは何なのか？ それはまた観測的に知ることができるものなのだろうか？

参考文献

- Alecian, G., Stift, M. J. 2007, *A&A*, 475, 659
- Bychkov, V. D., Bychkova, L. V., Madej, J. 2009, *MNRAS*, 394, 1338
- Hearnshaw, J. B. 1986, *The Analysis Of Starlight*, Cambridge University Press
- Kurucz, R. L. 2005, *Mem. Soc. At. Italia*, 75, 9
- LeBlanc, F., Monin, D., Hui-Bon-Hoa, A., Hauschildt, P. H. 2009, *A&A*, 495, 937
- Michaud, G. 1970, *ApJ*, 160, 641
- Searle, L., Sargent, W. L. W. 1964, *ApJ*, 139, 793
- 加藤賢一 2010, 大阪市立科学館研究報告, 20, 3