

元素の層状分布とマイクロ乱流

加藤 賢一 (岡山理科大学)

1. はじめに

磁気特異星 mCP は HgMn 星や Am 星などと共にスペクトル線に異常が見られる特異星として分類されていて、軽元素線は弱く、Si、Cr、Fe、Sr や希土類元素の線が強いという特徴がある。名前のようにほとんどが磁場を帯びていて、自転と共に強度が変動する 경우가多く、地磁気のように自転軸と磁極がずれた双極子磁場であろうと推定されている。また、その変化と共に Cr などのある特定の元素のスペクトル線が同じ周期で強度変化を見せることがある。これは、大陸のように斑点状に特定の元素が集中しているためという斑点モデルで解釈されている。

以上に加え、磁気特異星のスペクトル線は通常の恒星に見られない様相を示している。たとえば、

- ・電離平衡になっていない、

- ・1本のスペクトル線輪郭を一つの元素量では表せない、
- ・同じイオンのスペクトル線でも推定される元素量がひどくばらつく、

といったことで、この現象は元素の浮上・沈殿という拡散によって説明されるようになり、大きな成功を取ってきた。元素拡散については、既に 1970 年代には詳しい理論的研究がなされていたが、それを裏付ける観測的素材がなく、決定打に欠いていた。だが、ここ 15 年ほどの間に高解像度、高 SN 比のスペクトルが得られるようになり、観測的にも明らかになってきた。

磁気特異星の典型例として HD204411 (A6EuCrSr, 8750 K, $\log g = 3.4$) をとり上げ、Fe I/II の等価幅-元素量関係を紹介したい (図 1、2)。特異星の通例に従い、マイクロ乱流速度=0km/s と仮定して元素量を求めて

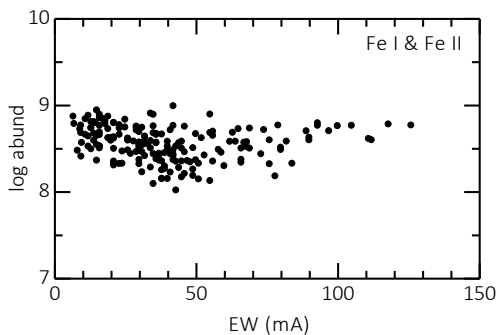


図 1. 磁気特異星 HD204411 の Fe I の等価幅-元素量関係。

マイクロ乱流速度は 0.0km/s。太陽では $[Fe/H]=7.5$ 。

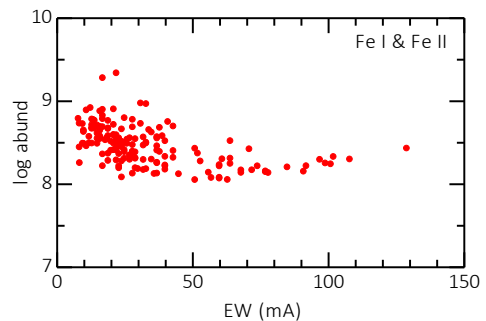


図 2. HD204411 の Fe II の等価幅-元素量関係。ミク

ロ乱流速度は 0.0km/s

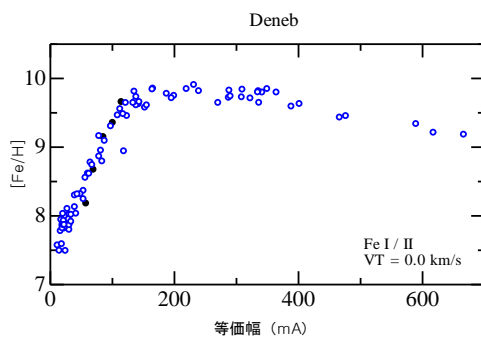


図 3. デネブの Fe の等価幅-元素量関係。マイクロ乱流

速度は 0.0km/s

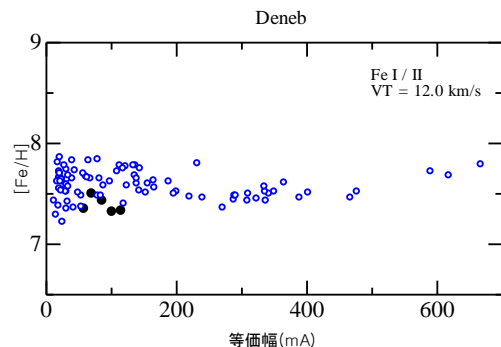


図 4. デネブ。マイクロ乱流速度は 12.0km/s (深さによ

らず、一定)

いる。太陽値に比べ1桁近く多く出ているのに加え、等価幅 50mA 辺りまで $[Fe/H]$ は減少し、それ以上になると上昇に転じる。FeI では $[Fe/H]=一定$ という系列もあるように見える。また、50mA 以下では $[Fe/H]$ に大きなばらつきがあると言ったように、その様相は通常の恒星の場合と大きく異なっている。このような等価幅-元素量関係を通常の恒星について描けば右上がりになる。図3にデネブ (A2Iae) の例を示した。デネブを通常の星とするには異論が多いと思うが、傾向としては太陽などと同じで、等価幅と共に元素量が増している。これが普通で、これを横一線となるように、つまり線強度によらず一定の元素量となるように、マイクロ乱流速度というパラメータを導入してこれを救済してきた。マイクロ乱流速度はスペクトル線を太らせる効果があるからである。

磁気特異星で等価幅-元素量関係が右下がりになっているのはマイクロ乱流速度の効果と反対であり、何か別の要素が作用していると見なければならぬが、それが元素拡散による層状分布であった。

2. 層状分布に基づくモデル計算

元素量が大气層の上下で異なるとした層状分布を仮定し、そこで形成されるスペクトル線の様子を求めてみたい。元素は鉄で、単純化のため、上層:太陽値の半分(7.2)、中層:太陽値の2倍(7.8)、下層:その70倍(9.4)、とした例が図5、6である。HD204411を想定している。強い線は上層で、弱い線は下層で形成される傾向があるので、上層の鉄量を減らしてやれば強い線の出方が抑えられるだろうという予想からこうしたわけだが、その通りの効果が現れた。

それはその通りだが、図5・6の違いが面白い。図5

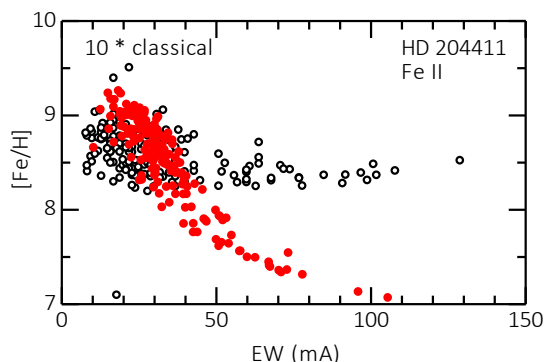


図5. ダンピングは古典値の10倍。周囲の粒子との作用を無視したことに相当。○はHD204411のFeII

はダンピングに放射ダンピング(の10倍)だけを考慮したのに対し、図6では周囲にある電子や水素原子との相互作用がダンピング項に入っていて、これが右下がりになる傾向を補償している。つまり、上下の元素量の差と周囲の粒子との相互作用でHD204411の等価幅-元素量関係は決まっていたのである。さらに50mA以下の弱い線で元素量に幅が出たのも元素量の差とダンピング効果が混じって現れた傾向だったことが分る。

3. 静穏な大気と動的な大気

磁気特異星(だけではないが)が層状分布を示すのはこうした星の大气が静穏で(確かに自転は遅いし、磁場による抑え込みもあるらしい)、輻射による拡散効果が効いてくるからとされている。となれば、反対にダイナミックな動きのある恒星では様相が一変するだろう。それと比較すれば、磁気特異星の特異性により迫ることができるかも知れない。

ダイナミックと言えばケフェイドである。ケフェウス座δなどは5.3日で片道260万kmを往復していて、最大膨張速度が20km/sに達する大暴風状態だから、元素が層状になっているなどという心配はない。そこで、北極星(ほとんど脈動していないらしい)とケフェウス座δについて調べてみた(図7~10)。

マイクロ乱流速度を考慮しなければならないことは他の通常星と同様だが、その値はデネブとは随分異なる。また、北極星では4.0km/sあたりで一定として了解したとしても、ケフェウス座δではそうはいかない。キープポイントは図9、10の極小値のようで、マイクロ乱流からダンピングが効いてくる領域への繋がりが問題のようだ。北極星やケフェウス座δではデネブよりダンピングが効くようなメカニズムがあるのだろうか？

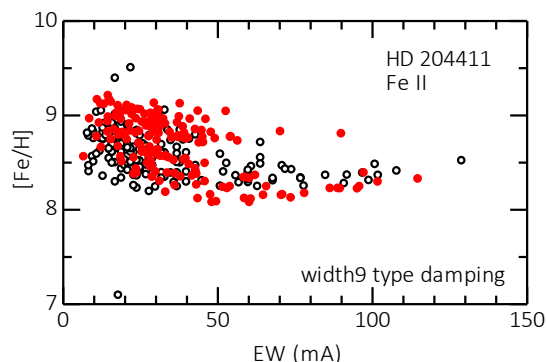


図6. ダンピングをwidth9と同じようにquadratic Stark項、van der Waals項も考慮

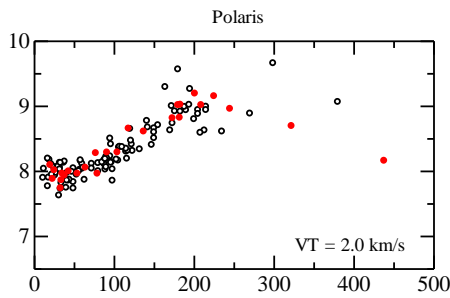


図7. 北極星の Fe の等価幅—元素量関係。マイクロ乱流速度は 2.0km/s。マイクロ乱流が良く効くのは 150mÅ 辺りまで

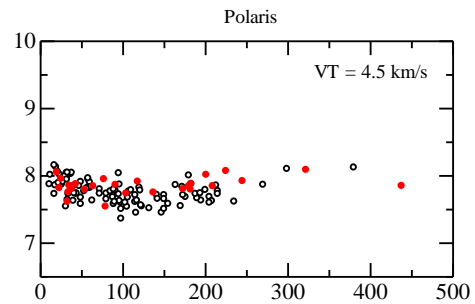


図8. 北極星の Fe。深さによらず一定速度のマイクロ乱流を仮定。Fe 量が一定になるマイクロ乱流速度が見つからない

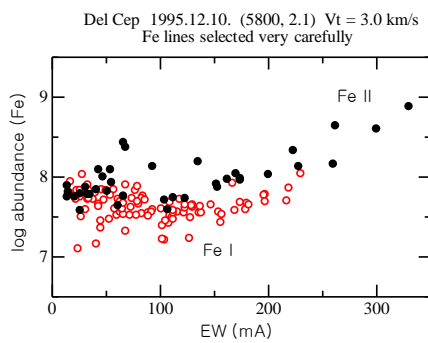


図9. ケフェウス座 δ の Fe の等価幅—元素量関係。マイクロ乱流速度は 3.0km/s。この日は最大サイズまで膨張し、脈動運動は止まり、比較的静かな状態だった

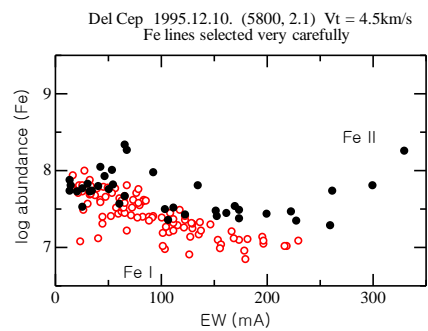


図10. ケフェウス座 δ の Fe。図9より大きなマイクロ乱流速度を仮定した。北極星同様、Fe 量が一定になるマイクロ乱流速度が見つからない

4. 深さによって異なるマイクロ乱流速度

デネブなどの超巨星ではマイクロ乱流速度は深さによって異なるのではないかと指摘されている。それによって上の現象が説明できるかも知れない。そこで、モデル計算を試みることにした。

まず、HD204411 の観測データと大気モデルに基づき、上層（深さ点 1~35）で 5.0km/s、中層（深さ点 36~44）で 2.0km/s、下層（深さ点 45~71）で 1.0km/s と、上層

ほど速いマイクロ乱流を仮定して等価幅を求め、その後、改めて一定のマイクロ乱流を仮定して元素量を求めてみた。

結果が図 11 である。150mÅ 前後が結節点で、4.0km/s では 150mÅ まで下がり、その後、上昇に転じていて、図 8 や図 10 を彷彿とさせる。詳細を述べるには検討が必要だが、結節点は、やはり、マイクロ乱流とダンピングの役割が交代する場所である。

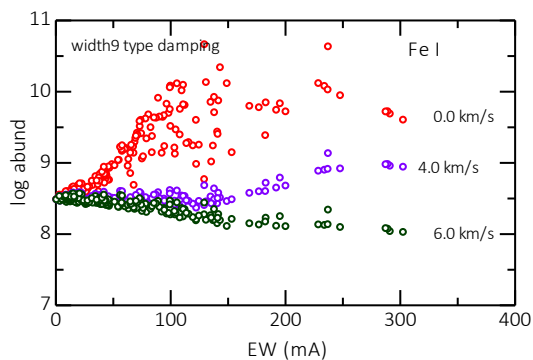


図11. 上層ほど速いマイクロ乱流を仮定した場合の等価幅—元素量関係の例。等価幅を求めた後、改めて一定のマイクロ乱流を仮定して元素量を計算した。深さによって異なるマイクロ乱流速度は魅力的だが、その実体がよく分らないままでは種々の仮定が許されるだけに注意が必要

5. 等価幅—元素量関係は何を教えるか

恒星のスペクトル線解析から元素量を得ようとする場合に遭遇するのがマイクロ乱流速度である。

恒星大気は良く混合しているから、同じ種類の原子に起因するスペクトル線であればどの線からでも同じ元素量が得られるはずである。ただ、スペクトル線強度はその線固有の要因の他に、他の原子や電子等との相互作用や運動状態にも依存するので、実際はそう単純ではない。

原子は熱運動により大気中を飛び交っている。その速度は 8000K あたりで鉄原子なら秒速 2km 程度である。これによるドップラー効果により、5000Å にある鉄原子のスペクトル線なら幅約 60mÅ 内に来る光を捕らえることができ、スペクトル線のドップラー幅というものになる。しかし、実際のスペクトル線はもっと広がっている。それは周囲にある他の原子や電子等の影響によるもので、対象原子から放たれた放射がそこで途切れて位相差が生じる。これがフーリエ成分を増やしてしまっ最終的にスペクトル線が広がることになる。減衰=ダンピング効果である。

では、このあたりまで考慮すれば観測されたスペクトル線から期待通りの元素量を求められるかと言えば、そうはいかないことが分かり、もう一つの速度場—マイクロ乱流—が導入された。太陽では 1km/s ほどだから熱運動に匹敵し、前述のデネブ (A2Iae) では 10km/s 以上もあって熱運動より圧倒的に大きい。厄介なのは A 型特異星で、A 型星の 10%ほどあるというこの一群の星ではマイクロ乱流はない (0km/s) として良いということになっている。

当然「マイクロ乱流ってなに？」と疑問になるが、対流ではない、とされている。対流なら上昇、下降によるドップラー効果が生じるから良さそうに思えるが、これは群になっての運動だからそこで生じたスペクトル線が全体としてドップラー効果によって前後するだけで、線を太らすことにはならない。これはマクロ乱流と呼ばれ

るもので、マイクロ乱流はそうではなく、個々の原子に直接作用し、動かすようなものでなければならない。そこで「光子の平均自由行程よりずっと小さいスケールの乱流:熱運動のように線吸収係数に効き飽和した線の強度を増大」(竹田 2004) させる速度場という定義になる。分かったような気にもなるが、これは定義であって、実体ではない。

それにしても大混乱状態のケフェウス座 δ で 4km/s ほど、それより静かだと思われるデネブで 10km/s ほどという熱運動より大きな乱流とは如何なるものであろうか? そして、そのエネルギー源はどこにあるのだろうか? ケフェウス座 δ では脈動の慣性と見られないこともなかろうが、デネブでは何を考えたら良いのか? 磁気特異星の特異性の一つはマイクロ乱流速度を考慮しなくても良いことであつたが、マイクロ乱流の実体が分からぬままでは納得がいかない。

磁気特異星のスペクトル線強度は元素の層状分布とダンピングが絡んで決まることを見てきたが、超巨星やその他の通常の恒星では元素の層状分布の代りにマイクロ乱流が入ってくる。両者に共通しているのはダンピングである。となると、このダンピングの効果の評価が問題になる。ダンピングでは他の原子や電子との衝突という厄介な問題を扱わなければならない。恒星大気の教科書では随分たくさんページ数をこれに充てていることから分かるように、一筋縄ではいかないようだ。磁気特異星ではマイクロ乱流を考慮しなくても良くなり、ダンピングの役割が大きく浮上してきた。これは恒星大気論における特異星の意義の一つと言えるかも知れない。

マイクロ乱流は実体不明、ダンピングも問題となったら、何をかいわんやである。観測精度が上がったため、近似で良しとしてきた事柄が浮かんできたということであろうか。ただ、ここでの議論は細かい話であって、通常の恒星の元素量を求めるような場合にはこだわることはないだろうと思う。

それにしても不可解なのはマイクロ乱流である。