

## 晚期型星のコロナと質量放出

渡辺 鉄哉\*

### 1. はじめに

ほぼ時を同じくして打ち上げられた IUE (International Ultraviolet Explorer) と EINSTEIN という有名な二つの紫外、X線衛星により、この五年間は恒星外層大気の観測が事実上可能になったといえるかと思います。そのデータが今日だいたい出揃ったところで、晚期型星の外層大気についてどの様な理解が進み今後更にどの様な観測をすればどの様なことがわかるのだろうかということを整理してみると有意義だろうと思います。そこで、果して筆者が適任であるかどうかは疑問ではありますかがその一端を垣間見る水先案内をさせてもらおうかと思う訳です。

### 2. 晚期型星の“外層大気”

まず一番最初にはやはりある程度、用語の使い方の話をして置く必要があるかと思います。と言いますのも起源的には、太陽物理学で現象論的に使われていた単語に物理的な解釈を付け加えてその前に‘恒星の (Stellar)’という形容詞をかぶせた言葉が数多く使われているからです。今日でも果して厳密な定義というのがあるのかどうかも定かではありませんのでこの記事での使い方が非常に普遍的であるかと言わると筆者の偏見が多少入って居りますので注意が必要かと思われます。

ご承知の様に恒星は内部で発生した核エネルギーを大部分外界に輻射として捨てている訳です。従って恒星の大気はほぼ輻射平衡にある訳ですが、ここでいう外層大気というのは、にもかかわらず光球より外側で輻射平衡から外れている領域で、かつその恒星からのエネルギーが他からのエネルギーに較べて圧倒的である領域のことと理解して下さい。即ち、局部的に散逸したエネルギーの流れが輻射平衡によるエネルギーの流れに較べて無視できない程度になっている領域といつても良いと思います。

この外層大気にも色々な構造があり種々の名称が与えられている訳ですが、ここでは彩層、遷移層、コロナ、恒星風といった主に晚期型星に特有な構造に関するものについて説明したいと思います。それにはその領域が効率的に利用している輻射平衡以外のエネルギーの流し方で区別するのがよいかと思います。まず彩層というのは大

きの電離状態をかえていくつかの線や連続光の発光（輻射損失）という形でエネルギーを流している領域のことをいいます。通常の場合は水素の電離が有効ですので数千度から二万度ぐらいの温度域になり、ちょっと温度をかえてやれば電子の数が指数的にかわりますのでこの領域の温度勾配は比較的ゆるやかです。それに対して遷移層というのは、温度を少し上げても輻射損失を有効に担ってくれる線スペクトルが特にないとか、へたをする逆に有効でなくなるために急激に温度がかわる領域で更に上層からの熱伝導によるエネルギーの逆流などが重要な要素になって来る領域です。従って幾何学的には薄く、圧力のスケールハイド程度の厚さになっている場合が普通です。また温度範囲は彩層と次に述べるコロナの間になります。それではコロナというのはどういう領域かと申しますと、今まで述べた領域のエネルギーの運び方に加えて更に恒星風による運動エネルギーあるいは磁場によるエネルギーが重要になって来る領域です。もちろんそれに加わる要因として恒星の重力の井戸の深さという因子も重要であることはいうまでもありません。これらの因子の組み合わせで、温度や大きさ、形は様々だらうと考えられます。

以上の様な外層大気の典型的な構造がだいたい理解できたところで、それでは、晚期型星の外層大気はどの様になっているのか見てゆくことにしましょう。

### 3. 晚期型星の外層大気構造

図1に示すのが、現在の時点で考えられている晚期型星の外層大気の構造を簡単にまとめた図です。ここでは、とりあえず連星などという状況は考えずに、一応単独星に話を限ることにしたいと思います。太陽は G2V という典型的な晚期型星ですので、こういう話をすると時には、雛型として出てくるのが通例です。それより右側

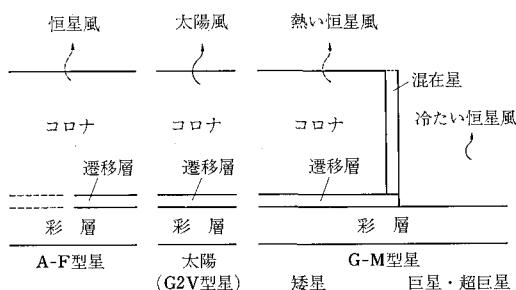


図1 晩期型星の外層大気構造

\* 東京天文台 Tetsuya Watanabe: Coronae and Mass Losses in Late-Type Stars

に書いてあるのは太陽より表面温度の低い星です。ここで面白いことは、太陽より表面温度の低い星は矮星と巨星、超巨星では、随分違った外層大気構造をもっている点です。これが、この数年の大気圏外観測でわかつて来た最も重要な結論です。これについてはあとで詳しく見てみることに致します。一方、図の太陽より左側は太陽より表面温度の高い晚期型星です。これも同じく近年わかつたことですが、恒星のコロナからとおぼしきX線は早期型星(O-B型星)からも出ていることがわかり、表面对流層がほとんどない様なA型星からも受かったわけです。従って、晚期型星に典型的な外層大気がどの程度表面温度の高い星まで延びているかを調べることは、この外層大気の形成の要因を知る上にも重要な訳です。今のところF型星には、図に示す様に太陽に非常に近い

外層大気が存在することが確認されています。しかし、A型星ではコロナとおぼしきX線は検出されていますし、彩層もありそうなのですが、遷移層からの輻射はまだ受かっていないので、A型星の外層大気がどんな様になっているかはもう少し観測を重ねないといけないかもしれません。

#### 4. 熱いコロナと冷たい恒星風

まず IUE で撮られた高分散スペクトル(図2)を見て下さい。ひとつは、 $\alpha$ CenA(リゲル・ケント)という太陽と同じG2V型星、もうひとつは $\alpha$ Boo(アーフルス)と呼ばれるK2III型です。このふたつの星の紫外スペクトルは随分違っています。まず、 $\alpha$ CenAで見えているSiIV, CIVといった遷移層から出ていると思わ

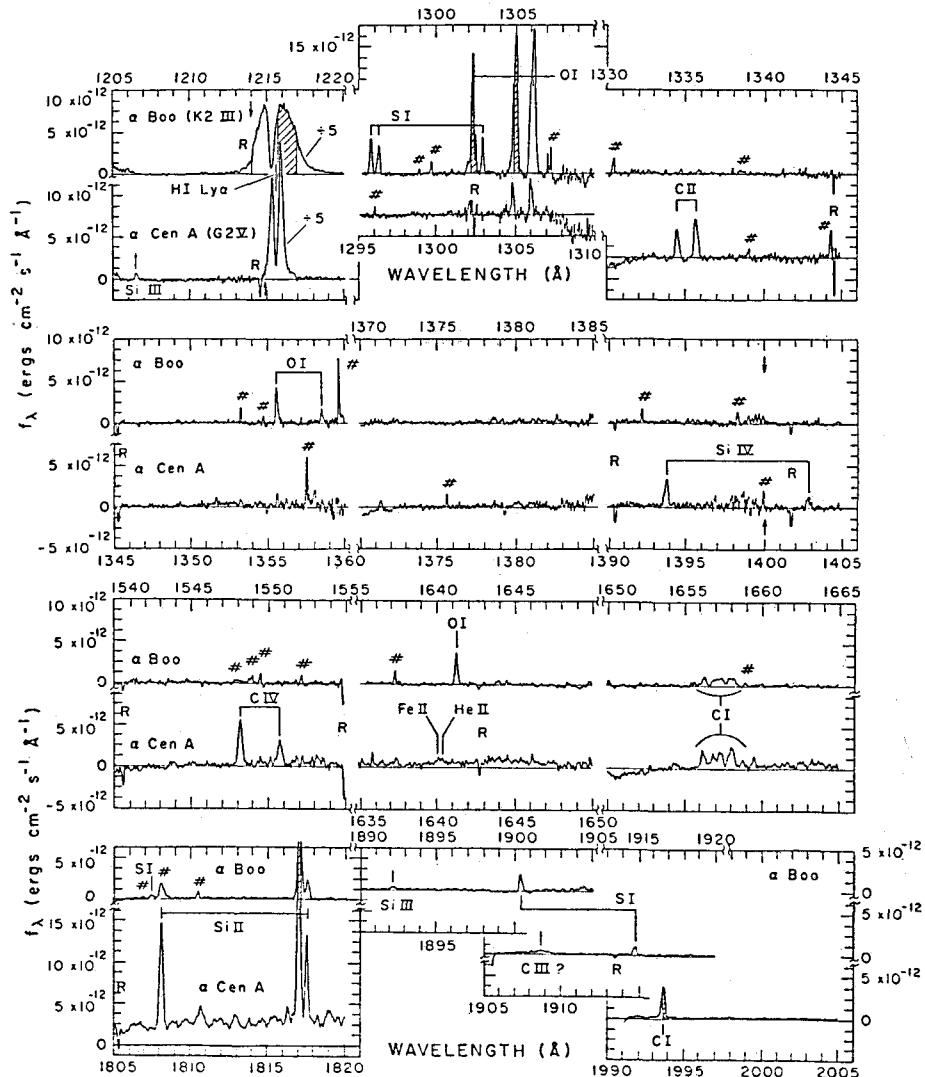


図2 晚期型矮星  $\alpha$ CenA (G2V) と巨星  $\alpha$ Boo (K2III) の紫外域スペクトル (IUE)

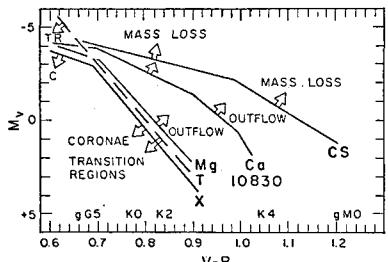


図3 HR 図上にみる外層大気構造の違い

れる高温（数万度～数十万度）の輝線が  $\alpha$ Boo では見えないことです。また  $\alpha$ Boo に見えている輝線でも六千度で光る MgII は  $\alpha$ CenA の三分の一、八千度の SiII は二十分の一と温度が高くなる程弱くなっています。また当然ながら  $\alpha$ Boo からの X 線は検出されていません。これらのことから、 $\alpha$ Boo の外層大気には二万度以上の温度を持つ場所がないということになります。ところが一方、 $\alpha$ Boo では、 $3 \times 10^{-10} M_{\odot}/y$  という様な、太陽や  $\alpha$ CenA に較べると桁違いに大量の恒星風が吹き出していることが色々な証拠、例えは、MgII や CaII が対称でないとか、青方偏位した温度の低い吸収線が存在するとか、で明らかになっています。ということは、熱いコロナとは背反の事象として冷たい恒星風が存在するということになります。本当でしょうか。そのことはこの 2 ～ 3 年随分詳しく調べられたのですがどうも本当の様です。そのまとめとなっているのが図3 の HR 図です。（その前に図2 のスペクトルに興味ある人の為にもう少しだけ。Ly の  $\lambda 1216$  の幅が違うのが、今は亡き Bappu さんの見つけた Wilson-Bappu 効果の紫外版です。それから  $\alpha$ Boo で OI の三重線が異常に強いのは Ly $\beta$  による螢光という解釈になっています。又、図中の R は、reseau, # は particle radiation hits で人為的なものです。）図で X という境界より右上側ではコロナからと思われる X 線が検出されず、左下側では検出される——以下同様に Mg, Ca というのは MgII h, k 線、CaII H K 線の V/R 比が 1 でなくなる／1 である。CS というのは、circumstellar lines が見える／見えない、10830 は HeII 10830 と CaIIK 線との相関がくずれる／くずれないの境い目で、系統的に右上にゆく程、低温の外層大気の特長を著しくしています。しかし特に強調しておかなくてはならないのは、一昔前言われていた様な「数十万度のコロナ」という様なものはなく、境界のところでおよそ百万度から二万度に、ガックリ外層大気が変化することです。これは、ひとことで言えば、重力の入れ物だけでは説明できないことを物語っている訳です。

更にもう少し、この HR 図上の境界線の様子を調べていきますと次の様なことが判明して来ました。ひとつ

はコロナの X 線は受かっていないが、遷移層の高温輝線は存在し、しかも恒星風の吹き出しを示す混在星が若干あることです。これはまだはっきりとは申せませんが、純粹な（？）巨星（光度階級 III）ではない様です。もうひとつは、コロナの検出されているグループの中でも、コロナからの X 線の強さ、遷移層線や彩層線の強さには、同じスペクトル型でも、大きな差で、色々な強さのものが存在するということです。これは、晚期型星の外層大気の構造を表面温度と表面重力あるいは光度という二つのパラメータだけでは特長づけられずに、まだ隠れた要因あるいはパラメータが存在するということになるかと思われます。

### 5. 晚期型星の外層大気構造を決定する要因

サブ・タイトルの本質が明確に答えられれば、万万歳な訳ですが、それ程簡単ではありません。その一番の原因は、非常に細かい現象をよく観測できる太陽でも外層大気の形成、現象の説明が、ほとんどできていないからです。むしろ最近は逆に太陽物理を研究している人が、太陽以外のパラメータを持つ恒星の外層大気を調べて、人のフリから我身を考えようという傾向さえあるくらいです。従ってこのサブタイトルに対する答えはできない訳ですが、今どの辺の外堀まで埋まりつつあるかをお話ししたいと思います。

まず一番の進展は、例の EINSTEIN によって言われだした晚期型星ではコロナの X 線の強度と恒星の自転速度に相関があるという事実です。これは皆さん、どこかで何回となく聞いた話だと思いますので重複は避けたいと思いますが、このことはコロナの X 線のみにとどまらず、彩層の CaII H.K. 線にもあてはまりますし、遷移層線の CIV の輝線にもあてはまります。即ち、自転が速いと微分回転も大きく恒星のダイナモ機構も活発で磁場の活動もさかんであるという訳です。スカイラブのコロナの X 線写真以来、コロナの加熱機構に音波加熱説は意気が上ががらず、磁場を原因とする説が有力となって来ましたので、上記の様な自転との相関を説明するには都合がよさそうです。それではもし、自転速度に起因する磁場の活動性を考えれば晚期型星の外層大気は統一的に説明されるのでしょうか。筆者としては、それに乗りたいひとりではありますが、現在では必ずしもはっきりしていません。手始めには、前述の熱いコロナと冷たい恒星風の境界が説明できなくてはなりません。ある人の説明に依れば、境界の右側は太陽質量程度の星が進化したので年命が古く、自転速度が遅いのに対して、左側では典型的に太陽質量の三倍ぐらいの星が進化して来るのでまだ比較的若く自転速度が早いのだといいます。また、晚期型星の自転速度を長年測定して来たグレイによ

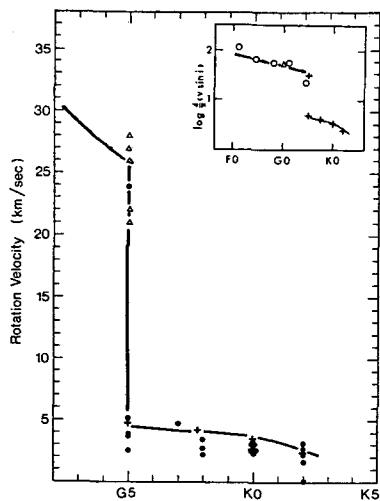


図4 晩期型巨星の自転速度

れば図4に示す様に、G5型の巨星のところで、何らかの機構により自転速度が急激に落ちてしまうのだとも言われています（これは、スクマニッチが発見した様な時間の逆平方根に比例する様なゆっくりとした制動ではなく、ダイナモの機構が変化する様なものだと思われています）。いずれにしても、境界の左側では自転速度が早く、コロナが閉ループの中に閉じ込められて加熱されるのに対して右側では、磁場の活動性が弱いために磁力線が開いて、恒星風を加速しやすい形状にしているという説です。しかし、それだけでは二万度より低温の恒星風は吹かない説で、何らかの加速の機構が必要なことになっていますが、そのひとつと考えられているのがアルペン波による運動量の輸送により加速するもので、重力の井戸が浅くなつて来たことによりガス圧が下つて来たことと相まって有効になる説です。筆者も数年前、光学的にも幾何学的にも薄い狭い領域に、恒星風を加速できるだけの暖い場所がちょっとあれば、外はすぐ冷めた

くなつても何とか加速できるという説を発表しましたがあまり信じられない様です。又ある人は境界の右側では安定にループ状のコロナが出来なくて、浮き上つて来た磁気ループは自然と上空へ抜けていってしまうという風に考えてもいますが果してどうでしょうか。という訳で、充分という程の説明はまだできない状態ですが、解釈の方向はある程度定まりつつある様な気がしています。

## 6. おわりに——今後どの様な観測が望まれるか——

以上のように、晩期型星の外層大気の構造は、近年上ったX線、紫外線という様な大気圏外の観測により急速の進歩をとげたと言えるかと思いますが、当然の帰結としてわからないことを数多くふやした訳です。相変わらずコロナの加熱の方法とか恒星風の加速方法の究極的な機構は不明のままであります。静的な現象とそれらを記述するパラメータの候補が、ある程度の統計的な議論に足りうる数だけ集ったという所でしょうか。従って今後重要になって来るは上記の様な実際の物理現象が起っている現場に直接乗り込む様な観測をすることだと考えられます。例えば、前述の境界線の付近の恒星ではある時は恒星風の吹き出しが顕著であったり、又ある時はよく見えなかったりしている訳ですが、その様な時間変化がどの様な場所で起つて、どこへどの様に伝播してゆくかを確めるることは非常に興味深いことだと考えられます。これは言わば、点源である恒星を部分的ではありますが空間的に分解して観測していることに相当するかと考えます。この様な観測を行うためには可視域から紫外域にかけてその局所的な場所の情報をよく反映する共鳴線等の同時高分散モニターが必要で、たとえば、UVSAT/HRS（高分散分光器）などが実現できれば興味深い進展があるものと確信しています。

### お知らせ

現在会員事務のOA化を進めており、天文月報の宛名書きも、6月号のものからコンピューター打ち出しに

変わりました。移行作業には間違いないよう万全を期しておりますが、もし誤字・誤記等がありましたら天文学会事務所に御連絡ください。

天文学会 庶務理事