

晩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 という有名なふたつの紫外、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えます。そのデータが今日だいたい出揃ったところで、晩期型星の外層大気についてどのような理解が進み今後更にどのような観測をすればどのようなことがわかるのだろうかということ整理してみることは有意義だろうと思えます。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. 晩期型星の“外層大気”

まず一番最初にはやはりある程度、用語の使い方の話しをして置く必要があるかと思えます。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と言われ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比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比べて無視できない程度になっている領域といっても良いと思えます。

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晩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有効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えます。まず彩層というのは大

気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、へたをすると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ト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、今までに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、形は様々だろうと考えられます。

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、晩期型星の外層大気はどのようなになっているのか見てゆくことにしましょう。

3. 晩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晩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 という典型的な晩期型星ですので、こういう話をする時には、雛型として出てくるのが通例です。それより右側

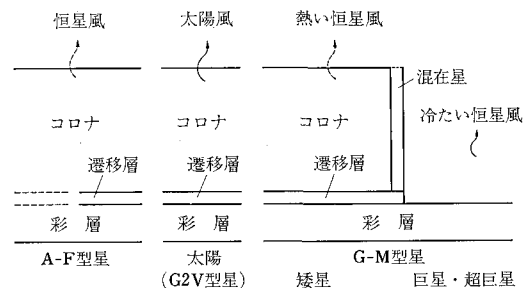


図1 晩期型星の外層大気構造

* 東京天文台 Tetsuya Watanabe: Coronal 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っ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晩期型星です。これも同じく近年わかったことですが、恒星のコロナからおぼしき X 線は早期型星 (O-B 型星) から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、晩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、遷移層からの放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、 α CenA (リゲル・ケント) という太陽と同じ G2V 型星、もうひとつは α Boo (アークツルス) 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、 α 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

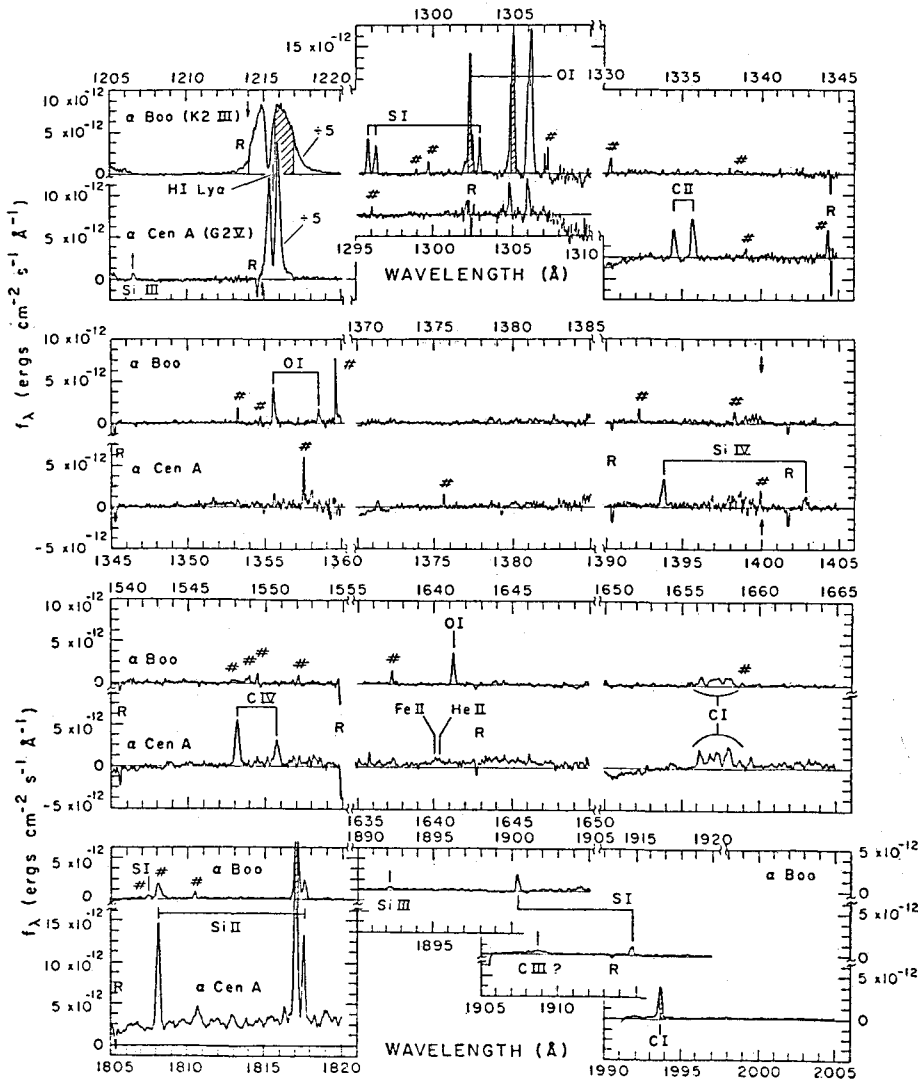


図 2 晩期型矮星 α CenA (G2V) と巨星 α Boo (K2III) の紫外域スペクトル (IUE)

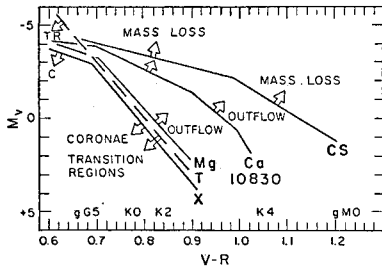


図 3 HR 図上に見る外層大気構造の違い

れる高温(数万度~数十万度)の輝線が α Boo では見えないことです。また α Boo に見えている輝線でも六千度で光る MgII は α 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 α Boo からの X線は検出されていません。これらのことから、 α 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、 α Boo では、 $3 \times 10^{-10} M_{\odot}/y$ という様な、太陽や α 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、例えば、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 α Boo で OI の三重線が異常に強いのは Ly β による蛍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 HeI $\lambda 10830$ と CaIIK 線との相関がくずれる/くずれないの境目で、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、ガクリ外層大気に変化することです。これは、ひとこと言えば、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、純粋な(?)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、大きな巾で、色々な強さのものが存在するという事です。これは、晩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事になるかと思われます。

5. 晩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。むしろ最近では逆に太陽物理学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、今こ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 によって言われた晩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さげたいと思いますが、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。それでも、自転速度に起因する磁場の活動性を考えれば晩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、自転速度が遅いものに対して、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ているのでまだ比較的若く自転速度が早いのだといひます。また、晩期型星の自転速度を長年測定して来たグレイによ

