

恒星の彩層

—そのエネルギー収支と線形成—

渡 辺 鉄 哉*

1. はじめに

大気圏外から晩期型星の紫外高分散分光観測が IUE 衛星などにより可能となった。太陽と同程度の有効温度を持つ晩期型星では、この波長域に多くの輝線を見出すことができ、これらの殆んどが太陽と同様の所謂“彩層”と呼ばれる外層大気からの輻射であることが理解される様になった訳である。彩層とはその名通り、日食時に光球の外側に H α 線で赤く色づいてみえる薄い層に由来するのだが、近年では、太陽のそれと物理的状态を同じくする恒星の外層大気も呼ぶようになった。即ち、彩層とは、輻射平衡のエネルギーの流れに較べて無視できない非輻射エネルギーを（水素を電離させることにより）電子密度を維持しつつ、いくつかの輝線や連続輻射による散逸によりバランスさせる大気層のことと言ってよかろう。晩期型星の大気構造については、天文月報 76 巻 7 月号の筆者の記事も参照されたい。

太陽以外の恒星の彩層が直接観測される様になり、太陽彩層との比較検討が可能となったことにより、近年、彩層の物理に関する理解が大きく進んだ。そこでこの項

では彩層物理の現状と問題点を筆者流にピックアップして見ようとする次第である。

2. 太陽の彩層

太陽の彩層は日食を通じてその存在が古くから知られているが、その物理状態を定量的に捕えるということは極く最近のことであり、到底充分とは言い難い。可視領域の数多くの吸収線の解析から、Holweger は彩層への温度の逆転を見出すことができなかった。HSRA (Harvard Smithsonian Reference Atmosphere) や VAL (Vernazza, Avrett and Roeser) のモデル大気は、極紫外から赤外に亘る幅広い波長域の連続光の振舞いや、幾つかの吸収線、輝線の輪郭の解析から彩層の温度、密度構造を導き出した。Kurucz は輻射平衡 (RE)、局所熱力学平衡 (LTE) を仮定した。Ayres と Linsky は Mg II, Ca II の共鳴線に注目し、非局所熱力学平衡 (NLTE) 且つ光子の相互作用に部分的に振動数の再分配を行なう (PRD: 後述) 点を考慮してモデル大気を作った。結果は、図 1 の通りである。光球より下の部分は、チャット話が別なのでふれないが、光球上層-彩層の温度の一致

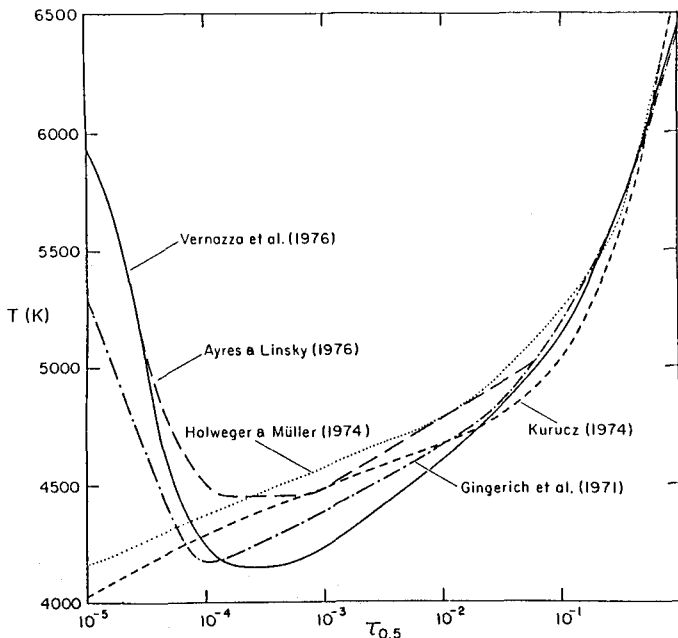


図 1 太陽の大気モデル

* 東京天文台 Tetsuya Watanabe: Stellar Chromosphere —Its Energy Balance and Line Formation—

性は、この程度である。勿論、ひとつには彩層の非均一性という問題があり、 H_α 線、 $Ca II K$ 線のフィルタグラムで理解される様に彩層は決してのっぺりとした顔をしている訳ではなく、様々のスケールにおける構造で満ち満ちており、実際 VAL も代表的な構造に対応すると思われるモデルをいくつか提案している。後述の様に、彩層にとって非均一性は重要だが、しかしそれだけで問題が解決する訳ではない。今考えているのは、平均、代表としての静穏領域についてなのであるから。RE、あるいは Holweger 的な経験的 RE はエネルギー収支を考慮すれば明らかに否定される。彩層内には、エネルギーが注入されているし、輻射・熱のやりとりは勿論 LTE であろうはずがない。いくつかの彩層内の線形成の問題を NLTE よりうまく説明ができる。基本的には、中心に輝線核を持つ様な衝突に支配されるような源泉関数を持つ共鳴線 ($Ca II H \& K$ 線, $Mg II h \& k$ 線, Lyman α 線) や、光電離に支配される源泉関数を持つ線 (H_α 線他) など所謂、彩層線の問題は、この手法により随分解明がなされ

て来た。しかし同じ原理に則る計算を光球まで戻して来ると、実は不思議なことに Holweger のモデルがまだ一番線形成をうまく説明する。最近、 $Fe I$ の遷移強度が精密に測定されて増々そうになった。それだけまだ考慮されていない、かつ光球上層から彩層にかけての線形成に欠けている要因があることを示唆している。中性水素原子による衝突というのもそのひとつかも知れないし、無数と言える弱い吸収線による連続光の吸収も寄与しているかも知れない。NLTE という計算手法は不完全であると同時に、数多くのパラメータであんばいできる部分が多い。未だに温度最低層の温度が実際何度なのか不明といっても過言ではなからう。

もう一点だけ、太陽彩層のエネルギー収支にかかわる問題としてとりあげたいのは、彩層最下部付近の振舞いである。図 2 は、彩層の各部分における輻射損失の量を VAL モデルから計算したものである。彩層は光学的に薄くなった輝線を通じて注入されたエネルギーのはけ口としている。 $Ca II H \& K$ 線, $Mg II h \& k$ 線などが大きく

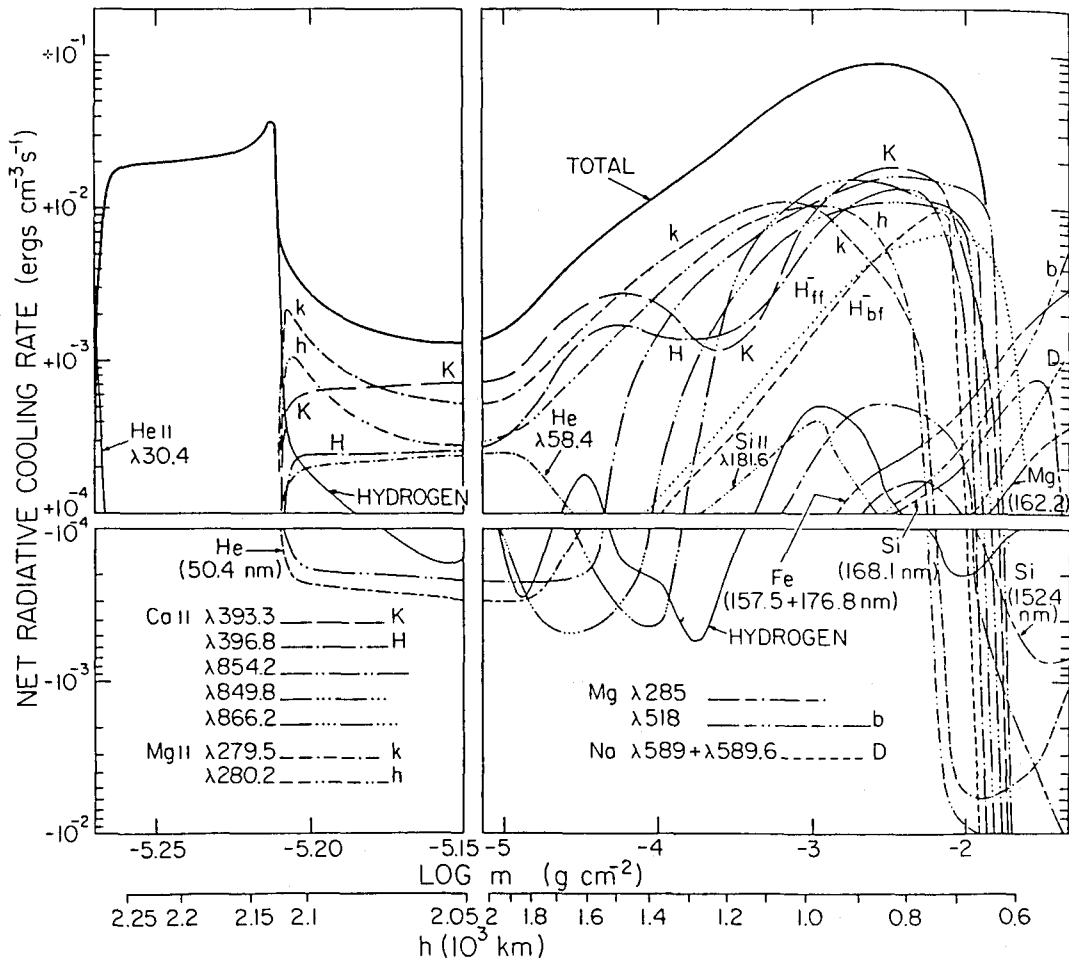


図 2 太陽彩層内における輻射損失量

寄与していることがわかる。しかし彩層下層部を見てもらいたい。この部分はまだ密度が高いため、ちょっとした輻射平衡からのズレでも大きなエネルギーの流出を作り出せる。既に温度の逆転が始まっているにも拘わらずエネルギーは差し引き吸収されているのである。彩層下部では上記の線に加えて陰性水素 (H^-) の寄与も大きくなっているが一番の候補者が発熱器に転じてしまい、冷却器としての能力を失っている。現在までにこの矛盾に対する明快な解答は得られていない。最近この領域における一酸化炭素 (CO) の役割の重要性を説く人がいる。 CO は解離エネルギーが大きいため恒星の中で最も高い温度層まで存在する分子である。また振動回転遷移が近赤外に存在し強い線強度を誇っている。このため、遷移レベルの間は LTE に支配されていると考えられている。この CO が十分に存在すれば強力な冷却器の役目をする。しかしちょうど彩層下部は CO の解離の温度と一致し、言わば熱的に不安定な状態にあるのではないかと示唆されている。従って陰性水素の冷却が充分になる高温 (≥ 5000 K) と CO の冷却能力が発揮できる低温 (≤ 3000 K) の二つの極に分化的な可能性がある訳である。Ayres の提案に基づき、Muchmore と Ulmschneider がシミュレーションを試みているが、注入するエネルギーの量に応じて外層の大気の温度が激しく変化するという結論を得ている。一方、最近赤外域における水酸基 (OH) の回転遷移の観測から既に光球上層より Holweger のモデルの温度構造とは異なる様な構造があるという結果が示されている。これは前に述べた様なモデル間の 300 K (それでも勿論大きい!) 程度の話ではなく 800-1000 K にもなる大幅な温度のフラツキである。しかも、太陽中心から周辺へ向けてこの回転遷移線の振舞いを追求してゆくと線ごとに異なる様相を呈しているのである。同じ深さの場所で 1000 度にも及ぶ変化が本当にあるのだろうか。また先程 CO について述べたが、観測的にも、 CO の強い回転振動遷移線は彩層の中で奇妙に振舞っている様に見える。言われる様に CO の LTE 形成を信ずれば彩層内に低温の CO が数多く存在する冷たい場所が存在することになる。これらの事実は前述の理論的モデルによって示される上層大気分化 (Bifurcation) と矛盾しなく良い様に見えるが、当然従来までの (今も)、 $Ca II H$ & K 線や波長 1600 Å 付近の紫外連続光での写真による太陽面上、1 秒 (角度) 以上の構造でその様に大きな温度変化を示すものは見つかっていないという事実は矛盾する。

一体、光球上層から彩層下部というのはどうなっているのであろうか。言われている様に光球内で微小なスケール (≤ 50 km) に押し込められ、点在していた磁束管が朝顔の花の様に開き始めているに違いない。磁束管の内

部の領域の占める割合が、急激に膨張し始めている。磁束管の中の温度構造はその周辺の部分と較べてそう大きく違わないのか、はたまた一次元的な温度構造では全く説明できない領域なのか大変興味深いところである。熱的な不安定性が存在すれば、その収支決算として加熱・冷却が起こる訳であるからこの辺の領域が彩層の加熱に本質的な役割をしているかも分らないし、その様な不安定性は物質の膨張、収縮を誘発するので、物の流れや渦が作られているのであろう。スピキュールの発生の根源もこの辺にあるのかも知れない。

以上のシナリオをより根拠あるものにするには、太陽の彩層を基本にして、恒星彩層の全貌を明らかにする上でも極めて重要な部分だと確信している。

3. 恒星の彩層

恒星にも彩層があることは晩期型星の $Ca II H$ & K 線など通じて知られていたが、やはりそれに決定的インパクトを与えたのは IUE であろう。紫外域の高分散スペクトルは、太陽と恒星の外層大気の類似性と相違性を明快に印象付けた。その結果は図 3 に見るように HR 図上において特徴が大変シャープに分類されることになった。この辺のことについて詳しくは天文月報 76 巻 7 月号の筆者記事を参照されたい。

当初上記の様に明快な差異が認められたのは遷移層から上の大気の様に見える。即ち対比されるのは、コロナの消失と冷たく大量な質量放出の開始であり、彩層自体には、速度場の侵入ということはあるかも知れないが、質的な差異があるとは考えられなかった。事実、 $Mg II k$ 線を利用して推定された恒星彩層からの全輻射損失量は、図 3 (=表紙) の HR 図のどちらの領域でも大きな変化はなかった。また図 2 でもわかる様に $Mg II k$ 線は全輻射損失の 1/3 程度を担う彩層線を代表する輝線であり、その支配が巨星超巨星で崩れているとは思えないからであった。

古くから、恒星彩層を特徴づけるものとして、Wilson-Bappu 効果というのが存在する。 $Ca II K$ 線の輝線幅とその星の絶対等級に相関があるというもので、よく距離の較正に用いられている。この Wilson-Bappu 効果の物理的意味に関しては随分長い間研究が続けられて来ており、輻射輸送問題と線形成理論のヒナ型と言っても過言ではない。通常 $Ca II H$ & K 線、 $Mg II h$ & k 線、Lyman α 線などは、図 4 (左) に示す様な線輪郭をしている。今、輝線の基底に 1 という添字をつけ、輝線のピークを 2、中心のディップの底を 3 とする。長短両側にあるときは、それぞれ V , R を更に付す。同様に輝線基底幅を W_1 , 輝線ピーク幅を W_2 とする。Wilson が 10 \AA/mm の乾板をコンパレータで測った幅はおそらく輝線の FWHM

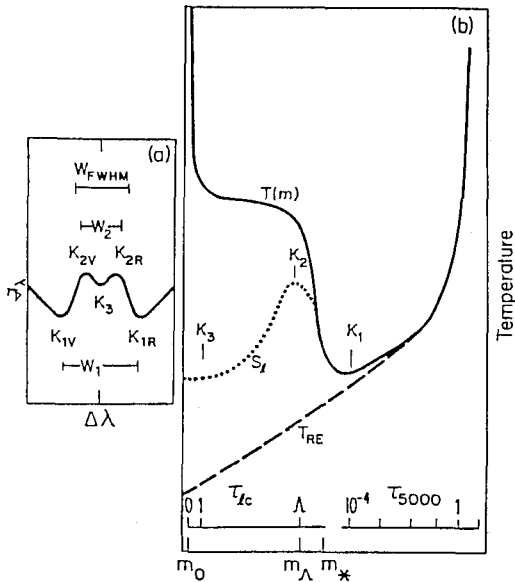


図 4 K線輪郭とその源泉関数

に相当する幅だろうと言われている。このような複雑な形の輪郭を理解するには現在、図 4 (右) の様な図を示すのが通常である。これは例として K 線の源泉関数を模式的に書いたものである。これらの強い共鳴線は電子衝突に支配されているので、その源泉関数は温度最低層若しくは彩層下部まで、その場所の電子温度に追従する。やがて、大気から逃げだす光子の数がふえ、局所的な温度に相当するまで上の準位にあるものの個数が減り、源泉関数はその場所の電子温度のプランク関数を下廻る様になる。その結果が図 4 (右) の様な形となり、Ed-dington-Barbier 的な理由で図 4 (左) の様な輪郭を示すと言う訳だ。だが残念ながらこれだけでは不十分なのである。この説明は、線の源泉関数が波長に依らずに一つで記述できる、即ち、吸収光子の再分配が吸収波長に依らずに完全に本来の輪郭の形で再分配される (完全再分配 CRD) の仮定に則っているからである。自然は残念ながらそうではない。この解釈に従えば、太陽を観測すれば K_1 ディップは周辺増光するはずであるが、実際はやはり周辺減光をするのである。即ち、再分配は完全には起っておらず、減衰翼の遠くの方で吸収された光子は、ドップラ核内と交渉なくやはり遠くの減衰翼から放出される可能性が高いことを示している。もちろん、ドップラ核内は干渉が充分であるので、再分配されていると考えるから部分的な再分配 (PRD) である。この考え方によれば、線の源泉関数はひとつではなく、波長ごとに独立に存在する。この PRD の導入により、太陽の K_1 の周辺減光、輝線輪郭のフィッティングが、かなりうま

く説明できた。また、Wilson-Bappu 効果を彩層内の速度場でしか説明できないという観念から脱却することに成功したのである。CRD に頼る限り、 K_2 ピークの場所は、速度場=ドップラ幅と比例関係にある。従って巨星、超巨星の幅を説明するためには、超音速場を導入しないといけないことになっていた訳である。しかし PRD という立場に立つと K_2 ピークといえども減衰翼へ持って来ることができる訳である。特に、 W_1 に関しては完全に減衰翼で説明することができ、大きな速度場を必要としない。そのかわり彩層の厚さが厚くなることを必要とする。Wilson-Bappu 効果は彩層のパラメータであるという訳だ。この Ayres のスケール法則はかなり説得力がある様に思えた。しかし、まだ困難がかなり多く残っている。そのひとつは観測的には、 W_1 と W_2 が全く同じ振舞いをするのである。PRD と言えども W_1 と W_2 を結びつけるにはドップラ幅が役割を持っている。この様な相関を説明するには、やはりなんらかの恒星のパラメータと速度場の関係が必要である。もうひとつは PRD の定式化の問題である。現在多く用いられているものは、PRD をその名の如く CRD とコヒーレント散乱の足し算とするものが多い (PCS)。この方法では、減衰翼の遠くに入った光子は、ほとんどコヒーレントにまた放出されるが実際は原子の熱運動によるドップラ幅分だけは再分配されているはずでこの分が考慮されていない。まだまだ、Wilson-Bappu 効果と PRD の問題はしばらく楽めそうな問題である。

最近、図 3 の HR 図上の境界より右上側の巨星・超巨星の彩層はえらく広がっているという話題が拡がりつつある。前述の様に、Mg II k 線で見たエネルギー収支は、そう大きな違いがあるとは思えなかった。しかし、ある巨星を月の掩蔽を利用して、 H_α 線と連続光で星の直径を測定してみると彩層が光球の数倍にふくらんでいることが判明したり、彩層線 C II の共鳴線、禁制線その絶対強度を利用して求めた発光領域の大きさも星の大きさの数倍に広がっていると、また、彩層の出す熱的なマイクロ波のスペクトルがやはり拡がったモデルで説明できるとか、数多くの傍証が揃って来ている。このことは、コロナの消失と同時に発生する冷い質量放出と関連して、彩層も一度にワッと拡がるということを示唆しており、晩期型星の質量放出機構を推測する上にも興味深い。筆者も前述の Wilson-Bappu を利用して少し調べて見た。図 5 に示す様にできる限り多くの恒星のデータを集めて、Ayres の提案に従って規格された輝線基底幅と $\log g$ の図を作ってみると $\log g = 2.5$ 付近で折れ曲っている様に見える。Ayres によれば、 $\log W_1^* \propto -0.25 \log g$ となるはずだが、 $\log g \geq 2.5$ まではその通りに近い値が得られる。一方 $\log g < 2.5$ の領域ではその傾きが半分程度に

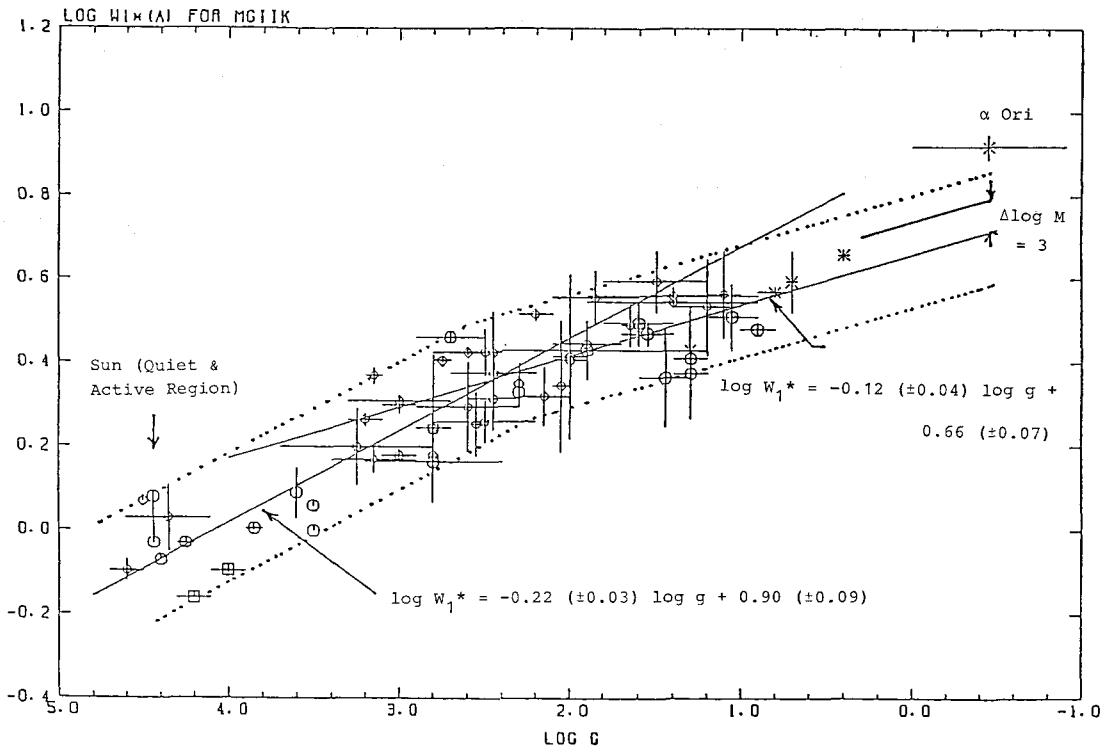


図5 規格化されたMg II k線の輝線基底幅と重力の対数

なっている様に見える。これはAyresと同じ発想で、静水圧平衡の仮定を密度が半径のベキに関わる様な関係に変更してやれば良く、まさに拡がった彩層の存在を示すことになっているのではないかと考えている。詳しくはふれないが、K線とk線の比較からも前述のPCSの妥当性が崩れている様に筆者は感じており、上記の推論はある程度正しいと思っている。もし、実際に、コロナ・恒星風の境界を以て、彩層も拡がるのであるとするとエネルギー収支、運動学的に色々多くの問題を投げかける。理解しやすい後者からは勿論、質量放出の最終速度、放出量と重力ポテンシャルの関係が挙げられる。まだワリと深い重力の井戸から大量の物を静々と持ち出す機構が是非とも必要な訳だが、その問題を拡がった彩層に肩変わりさせることができる。当然今度は、拡がった彩層を作る機構が必要だが、それには筆者は、球対称、時間的に定常な解というのは不可能だろうと考えており、スピキュールだか、噴水だか非一様な小さなスケールの運動による支持というのが望ましいのではないだろうか。エネルギーの問題では、拡がった彩層の密度、温度、それからの放射量のおよそがわかっているの、エネルギー

収支の様子から彩層内の温度構造を決定することができるはずである。まだ推測の域を出ないが、拡がっていることも相増して、輻射損失の効率がよいため、水素の電離があまり進まない中性の彩層が支配的になるだろうと思われる。

4. まとめ

章のタイトルは必らずも適当であったとは思わないが、今まさにそういう時期に入りつつあるのだと考えていただきお許し願いたい。

太陽の彩層で培った理論を超巨星まで適用するには多くの困難と大幅な変更が必要だろう。しかし、太陽で試されないことがいきなり恒星彩層へ適用されることもないだろうと信じている。太陽はいつまでたってもワン・オブ・ゼム為りえない。同等に比較できないことを知りつつ比較することの重要性を認識する様にしたいと思っている。

彩層としては下部、光球上層に近いところの話が多くなったが、彩層、コロナの加熱機構を理解するには究極的に一番大切なところなのではないかと信じている。