

# 静止型プロミネンス

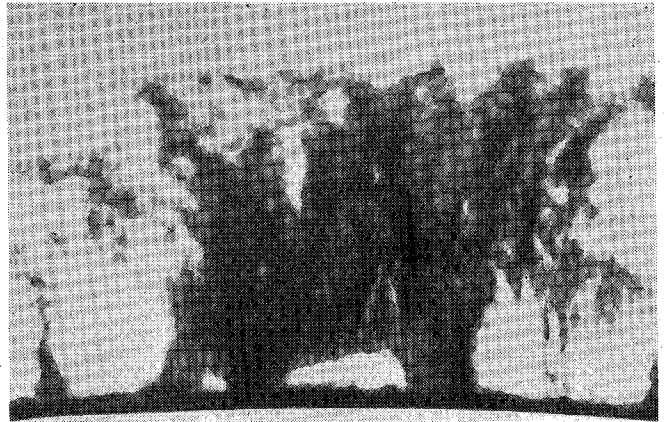
平 山 淳\*

## § 1 はじめに

1940年以降太陽の物理学はいくたの飛躍的進歩を経験した。中でもコロナ輝線の同定とそれに引続く百万度の高温の理論的解釈は劇的はものであった。またフレアーの物理が華やかに展開され、電波という新手段が大活躍をした。ところが今日の主題のプロミネンスは、画期的な進歩を経験することなく今日に至っている。けれども時折突発的に提出される理論を除くと、統計的研究や分光学的研究が歩みは遅いけれども着実に進められている。とりわけ静止型プロミネンスの $H\alpha$ でみた統計的な仕事は、ダザンブジャ夫妻によって徹底的に行なわれた。ここにお話する静止型プロミネンスは $H\alpha$ で見ると光球上では暗くみえる。形は背丈けの高いみみず、あるいはまがりくねったびょうぶのようで、細長く横たわり、太陽の縁で見るとコロナの中に浮いていてところどころ足を彩層に突っこんでいる。条件の良いときに写真をとると、第1図のようなこまかい繊維状の構造から成立していることがわかる。プロミネンスの分光学的研究は、他の多くの部門と同様やはりカール・シュバルツシルドによつて始められた。しかし定量的なことがはっきり分り出したのはここ数年で、その理由は1つには母体であるコロナが1940年以前は全く分っていなかったことと、それ以後は熱平衡からのずれの程度が見当つかなかったことによる。もう1つにはプロミネンスの輝線も連続光もきわめて弱いのでスペクトルがとりにくいということがあった。しかし、5,6年前からサクラメント・ピーク、クリミヤなどで高分散でしかも弱い輝線をとるようになり、かなりのことが分るようになってきた。加えて末元、日江井両氏が1958年の日食で線の幅と強度とが同時に分り、かつ高さ、分布も知れるという今までにない良いスペクトルを得て来たので、その解析の結果を中心にして話をすすめて行くことにする。

## § 2 基礎的な物理量の決定

プロミネンスは $H\alpha$ で見えるのだからコロナの百万度よりはるかに低いわけであるが、これまでに出示された温度は $2000^\circ$ という低いものから $20$ 万度というものまである。プロミネンスには静止型、黒点型、噴出型などいろ



第1図 静止型プロシネンスの微細構造  
(サクラメント・ピーク天文台)

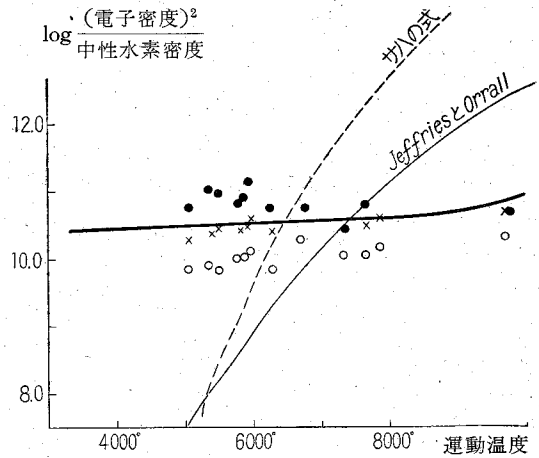
いろあるので、これらの型ないし個々のプロミネンスによって温度が上のように違うのかも思われるが、その多くは観測された何らかの量から温度への換算が悪いと解釈してよさそうである。また温度として、どういう意味の温度をとって来るかにも依っている。その例として Unsöld の第2版 (1955) には電子温度として  $3700^\circ$  と採用しているが、これは静止型の  $H\alpha$  の中心強度を温度に換算したものであって、ほんとうは励起温度なのであるが、 $H\alpha$  線の励起が局所熱平衡の状態で行なわれることを仮定したために電子温度として採用したらしいのである。実は後でのべるようにその仮定は成立せず実際の電子温度  $6500^\circ$  とかなり違っている。同様に中性ないし電離ヘリウムの強度を説明するために必要な温度を求めると、これはかなり高く出てしまう。プロミネンスはかなり稀薄な低温度のガス体であるために、電子・原子間の衝突がひんばんに行なわれず、電離、励起は主として光球や彩層の輻射で行なわれていることが分ってきた。したがってプロミネンスの温度といっても電離度や励起度から求めたものは、まわりの大気の輻射温度を求めているに過ぎない。一方プロミネンスの自身の温度は原子や電子の運動温度で表わされると考えられる。これは輝線の幅を測って求められるものである。その際に自己吸収・乱流速度・シュタルク効果の影響をきちんと取り除かないと全く無意味な温度が出てしまう。この悪い例のいくつかは、Aller の教科書の第2版 (1962) にも、またハンドプーフの de Jager の書いたプロミネンスの項にも堂々と顔を出しているので注意する必要がある。

\* 東京天文台  
T. Hirayama; Quiescent Prominence.

さて、自己吸収などを取除き、水素と金属の線の幅を比べることによって更に乱流速度を取除くという正しい手続きを踏んでやったのは主としてクリミヤ天文台の人達で、その他ブルッゲンカーテ等もやっている。その結果静止型の運動温度は  $4000^{\circ}$  から  $9000^{\circ}$  の中におさまり、平均は大  $6500^{\circ}$  位という事が分った。58年の日食に現われた静止型は、いわばみみずの横腹をみせているので各場所ごとに温度をきめることができた。結果は上の値と一致し、さらにプロミネンスの両端と高いところは温度が高いところことになった。すなわちコロナに接している付近は温度が高いというももらしいことなのであるが、温度の内部分布が得られたのはプロミネンスではこれだけなので、他のプロミネンスでやってみるのか今後調べてみる必要がある。つまり  $6500^{\circ}$  からコロナの百万度に至る境界領域が観測にかかるほど大きいかどうか問題なのである。

温度の次に電子密度を求めることにする。ふつうは連続光やバルマー線の強度を知ってそれを視線方向の厚みで割って求めている。ところがこの厚みが曲者で、第1図のようにフィラメント状の繊維の集まりのようになっているためにみかけの厚みより小さい可能性がある。すでに末元等は、フレアーがみかけの厚み約1万kmに対し、実質的な繊維だけの厚みが10kmから100kmにしかならず、 $10^2$ から $10^3$ 透けていることを見出している。これに対して平山はサクラメント・ピークで得られた2つの静止型に対してシュタルク効果から繊維の電子密度を求め、バルマー線の強度から繊維もすき間もならした電子密度を求めて比べたところ、みかけの厚み約1万kmに対し実質の厚みが3000kmぐらいになった。つまり1/3程度しか透けていないということであって、第1図から想像できるような透け方である。日食で得られた静止型のプロミネンスについてもやはり同様な結論が得られたし、またフレアの方も光球面上とリムとの両方で透け方がきわめて大きいということが分っているので、この静止型プロミネンスとフレアーの透け方の差は本当であろう。静止型とフレアーとでは温度の差もあろうが、フレアー自身は  $5000^{\circ}$  ぐらいから  $10^7$ 度の温度を内部でもっているのも、両者の本質的な差はむしろ温度というより密度の不齊にあるのであろう。活動型は恐らくこの中間程度の透け方になっているものと予想されるがまだ実際の測定はない。なお天体においては、いろいろなところにこのフィラメント状ないし繊維状構造が現われるので、どなたかにこの一般論を展開していただきたいと考えている。

さきほど輝線の幅から温度を求める話をしたが、その際に乱流速度も求まる。静止型ではこれがほぼ6km/secになり、なぜこういう値になるかということも不思議で



第2図 水素の電離度

あるが、更に58年の日食からは2つの静止型について輝線の強度が強い場所程乱流速度が小さいという結果が出ていて、ますます乱流のよってきたるゆえんを分らなくしている。

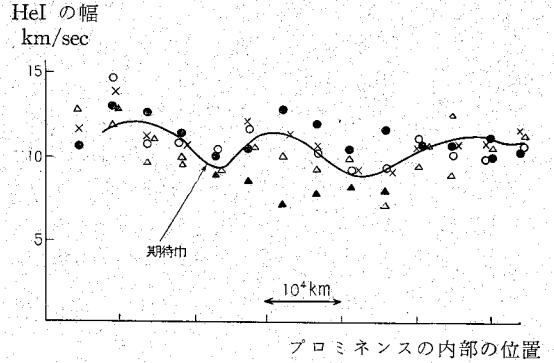
### §3 紫外放射の影響

さて、運動温度が少くとも静止型についてはよく分ったので、水素の電離度をしらべてみて星の大気のように高い温度のもの程電離が進んでいるかどうか調べてみることにする。プロミネンスで最初に水素の電離度を得たのは Wurm で、彼は陽子の数をバルマー線の強度から推定し、中性水素の数は水素の電離ポテンシャルと似かよった電離ポテンシャルをもつカルシウム、チタン等の一回電離した輝線の強度から間接に推定するという方法をとった。Wurm や Ivanov-Kholodnyi が電離度を求めた時のデータではまだ運動温度が良く分っていなかったが、1962年にクリミヤ天文台で Shih-Huei が良い観測データを出したので、それを用いて平山が水素の電離度を求めてみたところ、おもしろいことがわかった。それはプロミネンスによって温度が異っても電離度はどれもほぼ同じであるということである。この事情が1つの静止型の内部の温度の違う各点についても成立つかどうかを日食のデータを使って求めたのが第2図である。縦軸は電子と陽子密度を掛けたものを中性水素で割ったものの対数で、横軸は運動温度であって図中の丸印等が観測値である。光球や星で成立しているサハの式が鎖線に入れてある。まず気付くことは先にも述べたように電離は温度に依存せずほぼ一定になっていて、サハから予想される値と甚しい場合には3桁以上も違っている。実はサハの式から外れていることは予想されていたことであって、Jeffries と Orrall が各準位間出入りを考えて、プロミネンスに適用するべく得た曲線が細い実線である。これはライマン線とライマン連続光で詳細平衡が成立つと仮定したもので、事実ライマン連続光の端である912Åの

ところで静止型の光学的厚みは  $10^2$  程度になっているのである。ところがこれも2桁程度観測とくい違ってしまう。そこでライマン線では詳細平衡が成立しているが、ライマン連続光では成立せず外からの輻射が入ってくると仮定し、外からのライマン連続光としてロケットのデータを使うと観測値とよく合う。これが太い実線である。光学的厚さが  $10^2$  もあるのに彩層上部から来る輻射が浸透するのは、第1に先にのべた繊維状構造のために繊維間のすきまをぬって光が入って来ることが考えられる。第2に川口が指摘したように、プロミネンスの中では光球や惑星状星雲と比べて輻射密度のわりに電子密度が小さく、電子の衝突によって輻射のエネルギーが熱運動エネルギーに変る確率が小さいために、ふつうは光学的厚さが1のところでは強さが  $1/e$  に減るのにプロミネンスでは光学的厚さが10程度でやっと  $1/e$  に減るということであるが、恐らくこの両者があまって  $10^2$  まで浸透するのであろう。

プロミネンスでは以上の水素金属の他に中性ヘリウムの輝線が出ているが、この強度の解釈をめぐって2つの説が出されている。1つは電子衝突でヘリウムの電離を、従って中性ヘリウム線の強度を説明する人達で Jefferies などはその一人である。このうち平均温度が  $11000^\circ$  以上あると考えた者は水素とヘリウムは同じ領域から出るとしたが、水素と金属の中から  $6000^\circ$  程度の温度を得た人はヘリウムは別的高温領域から出ると考えた。もう1つは彩層上部からの葦外線による電離を考えた人達で、Unsöld などがその例である。しかしこの場合でも、ヘリウムはもっと高温の領域から電子衝突で出ると考えても何ら矛盾はないはずであった。さきに分ったように現在では平均温度を  $11000^\circ$  以上にとることは、静止型に対しては受入れられないことである。従って衝突か輻射かをきめるにはヘリウムと水素、金属が同じ領域から出ているか否かを調べればよい。

58年の日食の静止型について調べてみたところ、第3図のような結果になった。観測されたヘリウムの幅(丸印等)はこの静止型の内部のどの場所においても水素と金属の幅から計算されるヘリウムの幅の期待値(実線)に等しいことが分ったのであるが、これはヘリウムが  $6500^\circ$  程度で  $6 \text{ km/sec}$  の乱流速度をもつ領域から出ていることを示す。なおこれは各元素の分子量の違いが同じ物理状態の大気の中で幅の違いとなって現われることを利用したものである。さらに他のクリミア・ゲッチングンのデータを使ってみても、例外はあるが、同じ結果になった。また最近のロケット観測はヘリウムを電離する波長  $504\text{\AA}$  のところで  $10800^\circ$  の輻射温度を示すが、これは丁度観測された中性ヘリウムの強度を説明できる大きさである。また光学的厚みが10くらいなのに浸透



第3図 中性ヘリウムの幅

しているらしいという理由は水素と似たように考えてよさそうである。

水素に対してやったと同じ方法を中性カルシウムに適用してみると、第2図と同様電離が運動温度によらないことが分った。以上をまとめて、静止状プロミネンスはまわりからの葦外線によって照らされて光っているということ、単なる仮定としてでなく結論することができよう。

よく知られているように、彩層ではヘリウムはスピキュルの芯からは出ず、少し高温のサヤから出ているということになっているのであるが、ある種の黒点型プロミネンスにおいては同様に高温による電子衝突で出ると考えないと葦外線による説明では強度が充分出て来ない場合が Zirin 等により報告されている。したがって上の結論には静止型という制限が必要なのである。

静止型の輝線の発光機構が分ってきたので、これを土台にして密度分布を得ることができる。58年の日食の例しか分らないが、光球上  $18000 \text{ km}$  の高さで電子密度  $8 \cdot 10^{19}$ 、全水素密度  $3 \times 10^{14}$ 、後者のスケールハイトが約  $2 \text{ 万 km}$  となっている。水平方向の分布は全く分らない。電子密度、電離度が他の静止型と大して変わらず、また  $H\alpha$  でみえるみかけの高さもそう違わないので、このスケールハイトを一般の静止型プロミネンスにも当てはまるとしてもよいだろう。

これまでのスペクトルの話はまだ全ては受け入れられていず、例えば以下のような批判を筆者は受けている。まず非局所熱平衡論の大家 Thomas は、光学的に厚い静止型にライマン連続光が浸透することに疑問をもち、Thomas 以上の非熱平衡を主張している我々の場合を信用していない。また Ivanov-Kholodnyi はプロミネンスもフレヤーと同じくらい激しい透け方をしているというゆずらないし、Jefferies は静止型のヘリウムと水素が同じところから出るという結論に同意していない。こういう大家にみならって易々と自説をまげることがをさげ、あたかも真理のごとく私見をのべて来たので、この先か

らはどうか注意して読んでいただきたい。

#### § 4 圧力とエネルギーのバランス

これまでのスペクトル分析と  $H\alpha$  でみた静止型プロミネンスの消長などを手掛りに、静止型は平衡状態にあるかどうか調べてみる。まず太陽表面に平行な方向の釣り合いをみると、Zanstra が言ったように、コロナとプロミネンスのガス圧は大ざっぱにいえばほぼ等しくなっている。しかし、日食の結果などからももう少し細かくみるとガス圧はプロミネンスの方が3から10倍大きい。これは平衡をうるためにはコロナの磁気圧がプロミネンスのそれより大きいことを暗示している。

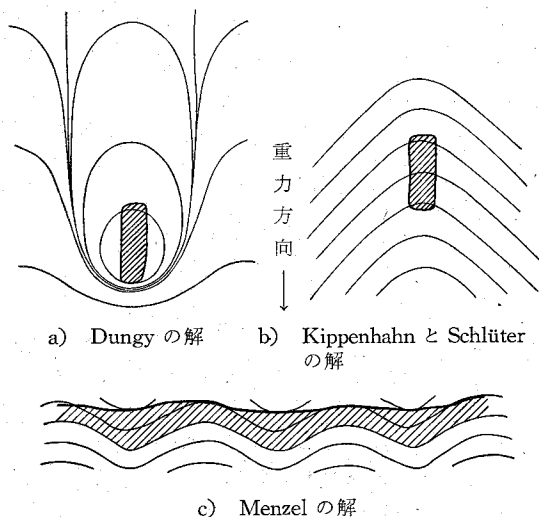
次に重力方向の釣り合いであるが、ガス圧だけで平衡にあるとすると、スケール・ハイトは約300 km で観測値の百分の1にしかならない。2万 km 程度のスケール・ハイトを保たせるには、20から30 Gauss 程度の磁場があって、4万 km 程度のスケール・ハイトで高い所ほど減少している必要がある。Zirin が静止型の磁場を  $H\beta$  線で観測して、約50 Gauss を得たが、これは上の期待値とほぼ一致する。ところが Babcock の光球での測定は静止型の存在する近くは1 Gauss 程度しかないことを示している。両者の値を生かすと、2万 km 程度の高さの静止型プロミネンスの下部あたりで最大になる磁場を考えねばならない。このような分布の磁場で、しかも静止型全体の重みを支える形は、かなり難しいのではないと思われる。静止型のガスの運動は、大勢が落下の方向であるという観測事実があるので、もしかすると、これがコロナの中に浮いていられないということを示すのかもしれない。重力と粘性抵抗が釣り合うとして十数 km/sec の落下速度を Unsöld が求めているが、これによれば数時間でプロミネンスのガスは全く更新されるこ

とになる。

一方理論的にプロミネンスがコロナの中に浮いていると仮定して磁場の分布を求めることができる。静止型の軸方向が磁力線に対して垂直の場合の例が第4図 a と b で、平行の場合が c である。第4図 b はコロナからの熱伝導を全く防ぐことができないので適用不可能と考えられる。Pikelner と Gershberg や Gold と Hoyle はらせん型の軸対称の磁場の平衡を考えたが、これに重力を入れた解をしらべてみるのも面白いであろう。以上のような理論のどれが一番真理に近いか速断を許さないが、日食時のコロナの流線の形や、バブコックが静止型は双極磁場領域 (BM) の極の向きが変わる境界に多く存在するとのべたことを考慮すると、静止型プロミネンスの周囲の磁力線の想像図 (第5図) をかくことができる。静止型の内部の磁場の様子は、第1図から読者が自由に想像していただきたい。手段はどうあれ、磁場の形をきめていくことは最も大切な仕事の1つと考えてよいだろう。

静止型プロミネンスには100日以上寿命をもっているものがかなりある。この寿命よりずっと短い間に暖まったり、冷えて  $H\alpha$  でもみえなくなってしまうようなことのないために、エネルギーの出入りがバランスしている必要がある。まず放射エネルギーの損失であるが、3万度以上の温度に対しては多くの計算があり、それを Orrall と Zirker がまとめて発表している。実際の静止型の温度である1万度以下に対しては、各種の波長に対し静止型が光学的に厚くなるので問題が極めてやっかいになり、きちんとした計算はまだ行なわれていない。しかし、先にのべたように水素やヘリウムのライマン連続光では光学的に厚いにもかかわらず外からの光が浸透しているらしいという観測事実の助けをかりると、かなり粗いやり方ではあるが放射損失のおよその見当をつけることができる。それをやってみると運動温度が低くなり、光球彩層の放射温度に近くなると放射で失うエネルギーはどんどんへり、まわりの放射温度より低くなると逆に放射によってまわりから暖められるという結果になっている。もし他のメカニズムが何も働かなければ、静止型の安定に存在しうる温度は放射損失がゼロになるところで、これは主として彩層上部から発する水素のライマン連続光の放射温度できまりほぼ  $6300^\circ$  である。このことは静止型の平均の運動温度が約  $6500^\circ$  くらいであって、1万度以上であることも  $4000^\circ$  以下であることもないという観測事実と一致しているように思える。以上の考え方は定性的には理解し易いが、ライマン放射などの放射輸送をかなりの精度で解かなければほんとうに正しいかどうか分らない。

下層からの圧力波による加熱はコロナより密度の大きいプロミネンスには効かないので、次に熱伝導によって



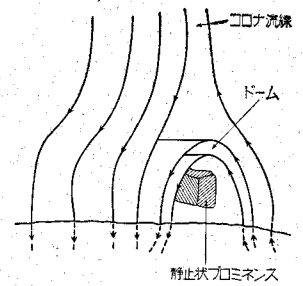
第4図 磁力線の方法

コロナからエネルギーが運ばれる問題を考える。これは Rosseland などが指摘し、Orrall と Zirker が精しく計算したように、磁場の向きに平行な方向には熱伝導率がきわめて良いために、数十秒の程度でコロナと同じ温度になってしまう。磁場に垂直方向には1 Gauss 程度の磁場があれば静止型の寿命の間コロナからの熱流を防ぐことができる。

### § 5 プロミネンスの成因

どうしてプロミネンスができるかという問題に対しては、どの型のプロミネンスに対しても解答はないようである。分っていることは、もしコロナの物質が何らかの原因で圧縮されれば、その部分は輻射を多く出し、最初の圧縮の仕方によっては一時温度が上がることはあっても、いずれは冷えていくということだけである。このことを初めて言い出したのは Alfvén と Kiepenheuer で、その後 Kleczek, Lüst と Zirin, Orrall とそれに筆者などが輻射損失を計算した。圧縮がどのように起るかという基本的な問題については、まず Alfvén が放電説を唱えた。これはピンチ効果と同じであり、放電の原因については太陽の自転の極と赤道による不齊のために電場が生じるといふ。また Kiepenheuer は磁極の衝突が圧縮をひき起すと考えた。どちらもそれぞれ難点があり、またあまりくわしく調べられていない。その他 Menzel だとか Marshal だとかいろいろの人が、極端な言い方をすれば、放言をしているといつてよいくらい、いろいろな説を呈出している。その中でたった1つプロミネンス

生成の物語を、ともかくも最後まで書き上げた論文がある。これが内田の宇宙線説である。それによると、フレヤーが発生する際に宇宙線が飛び出す、まわりの磁場のエネルギーよりも宇宙線のエネルギーの方が大きい



第5図 磁力線の想像図

ときには宇宙線が飛び出す方向と直角な方向に磁気圧を及ぼし、まわりの磁場を押しよけて空洞を作る。宇宙線が継続的に発生している間に、その空洞へ磁場の中性点付近からガスが噴出される。宇宙線の発生が止むと、そのガスが断熱圧縮され、さらにまわりの圧力と釣り合いを保ちながら徐々に冷えてプロミネンスができるという。フレヤーと関係があるのだから黒点型あるいは活動型が対応しているのであろうが、実際こういうプロセスが起るかどうかわしく検討する必要がある。

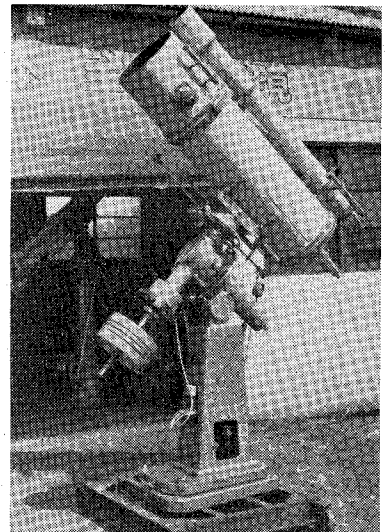
まえにも述べたように、理論的にも観測的にもきわめて重要なことは、静止型の場合平衡状態にあるか否かである。つまり、コロナのガスが絶えず冷却されそれが落下しているのかどうかである。観測的には磁場の測定はもちろんのこと、日食などを利用してスペクトルをとり、エネルギーと圧力の平衡の問題をしらべていく必要がある。

## 西村製の

# 30 cm 反射望遠鏡

下記へ納入して好評を博しております

- 米 ゴッダード・スペース・フライト・センター  
ハインド J R短期大学  
ムレ大学
- 英 オックスフォード大学
- スイス バーゼル大学



株式会社 西村製作所

京都市左京区吉田二本松町 27  
電話 (77) 1 5 7 0, (69) 9 5 8 9

30 cm 反射望遠鏡

ニュートン・カセグレン兼用