

最近の黒点理論

牧 田 貢*

§1. Biermann と Hoyle

黒点の温度がなぜ低いかというのを説明するのに、昔は太陽面に地球大気の中で起るような低気圧を考えた。上昇気団が膨脹で冷えるというわけである。しかしこれは断熱上昇が起るとかえって温度が上がるように太陽大気の状態はなっていることがわかってだめになった。その後太陽には表面のすぐ下に対流層のあることがわかり、まずドイツの Biermann (1941年) によってこれが黒点と結びつけられた。

そもそも対流層ができるのは輻射でエネルギーを運ぶよりも、対流でエネルギーを運んだ方が能率がよいからである(このようなことはいつも起るわけではなく、例えば水素の電離が中途半端な層で起る)。もしこの対流層に磁場がかかったとすると、電磁流体力学の教える通り磁場は対流をとめる働きをする。従って対流エネルギーが運べないとなると、どうしても能率の悪い輻射で運ぶより仕方がない。第1図左に示したように、太陽大気にエネルギーの通りの悪いところができて、それが黒点になるというのが Biermann の考えであった。

その後戦後になって、イギリスの Hoyle (1949年) が別の考えを出した。彼は物質の流れが磁力線を横切って進むことはむずかしいけれども、磁力線に沿って進むことはかまわないという点に着目したのである。第1図右に示すように対流のエネルギーは磁力線に沿って運ばれる。すなわち下の狭い入口から入ったエネルギーが、上の広い出口にバラまかれるわけである。

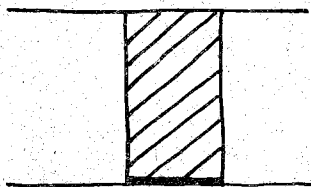
以上2つのアイディアの流れをくむ計算が最近ドイツ

の Deinzer (1962年) イギリスの Citre (1963年) によってなされたので、以下彼らの話をもとにして話をすすめよう。

§2. 輻射だけでエネルギーが運ばれる?

黒点大気をつくるには、まず黒点の中心軸での温度や圧力を考えてみればよい。そこでは磁力線は対称性から考えて垂直であるとしてよからう。従って磁場による垂直方向の力は働かず($\therefore \mathbf{j} \times \mathbf{H} \perp \mathbf{H}$) 縦方向については光球と同じように静水圧平衡を考えればよい。今、Biermannの考えを極端にして、エネルギーが全て輻射で運ばれるとして、表面から黒点大気を計算して行く。Deinzerも Citreもこの計算を行なってみたが、2人の結果は一致して NO であった。そのわけは深いところへ行くに従って黒点の圧力・密度が光球のそれらよりもどんどん小さくなってしまふからである。特に密度差は浮力となって作用するので、黒点はたちまち浮き上がってしまわなければならない。

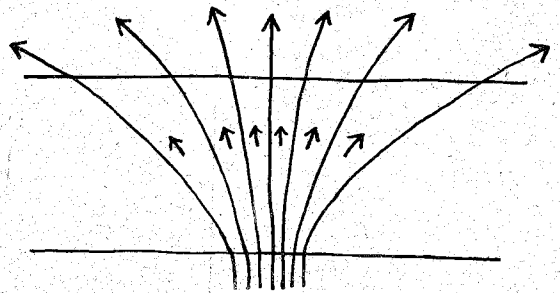
このようにエネルギーを輻射だけで運ぶことができないとすると、次には当然対流のことを考えるのが順序だろう。磁場はなるほど対流の働きを邪魔するけれども、それを完全にとめてしまうわけではない。例えば大きな渦とか、磁力線の方に細長い渦とかはかなり磁場を強くしないとめにくい。このことを Deinzer は、有効にエネルギーを運んでいた対流渦のエネルギーを運ぶことのできる距離(混合距離)が、磁場があると短くなるとして表わした。これを障害物競争にたとえれば、第2図左のように、磁場という網に足をとられて、対流渦がなかなか前に進めない有様を思い浮べばよいだろう。一方 Citre は対流で運ばれるエネルギーが、磁場のない時



Biermann

対流層の中に磁場ができるとそこだけエネルギーの流れが悪くなる(斜線部分)

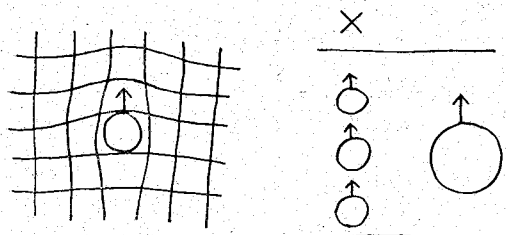
↑対流層↓



Hoyle

対流層の中では磁力線(扇型に開いた実線)に沿ってのみ対流エネルギーが運ばれる

* 東京天文台
M. Makita: On the Recent Theories of Sun-spots.



Deinzer

磁場という網に足をとられて対流渦がなかなか前に進めない

Citre

磁場があると小さい渦はとめられてしまう(X)ので大きい渦だけでエネルギーを運ばなければならない

第 2 図

にくらべて、或割合だけで少くなると考えた。磁場の対流をとめる効果は小さい渦ほど著しいから、今まで小さい渦で運ばれていたエネルギーがとめられてしまう。すなわち第2図右のように、エネルギーを運ぶ渦の種類（あるいは数）が減ったと理解してもよさそう。

このように対流の影響を考えるほかに、もう一つ注意すべきことがある。それは黒点大気の各深さを通るエネルギーの流れを一定としてよいかどうかである。太陽の中心ではエネルギーは四方八方へ一様に出ているはずである。従って黒点ができるためには余分のエネルギーはよその方へまわらなければならない。Hoyle の考えというのもともとこのへんと結びついているのであろう。また熱い光球から冷い黒点へと輻射のにじみこみがあるかもしれない。Deinzer がそう考えて計算してみたところ、 10^4 km の深さまでは横方向の吸収が大きくて、輻射はとてにじみこめないことがわかった。

§ 3. Citre の計算

Citre はまず対流の影響を考えてみた。エネルギーの流れのうち割合 β だけが対流で運ばれるとすると、 β がある値よりも大きければ、輻射だけの場合に起った不都合は起らない。しかし β が或一定値より小さいと、不安定な黒点大気になってしまう。これは一見うまいようであるが、 $\beta=1$ として計算したことに実は矛盾を含んでいる。黒点では下へ行くほど磁場が強くなっているが、その強くなり方は気体の圧力ほどではない。従って気体の圧力が磁場の圧力よりずっと大きくなっていくので、磁場の対流をとめる働きはきかなくなってくる (β が 1 に近づく)。ここで β が深さで変る場合の計算をすればよいわけであるが、イギリス人の Citre は Hoyle の考えをためしている。すなわち対流は全然とめられないで ($\beta=1$)、磁力線の拡りに沿ってエネルギーがバラまかれるとして計算した。観測される黒点磁場の分布をつかうとエネルギーの流れは下へ行くほど増して行くが、気体の圧力がまわりの光球と等しくなっても、エネルギーの流れは光球と同じにならない。

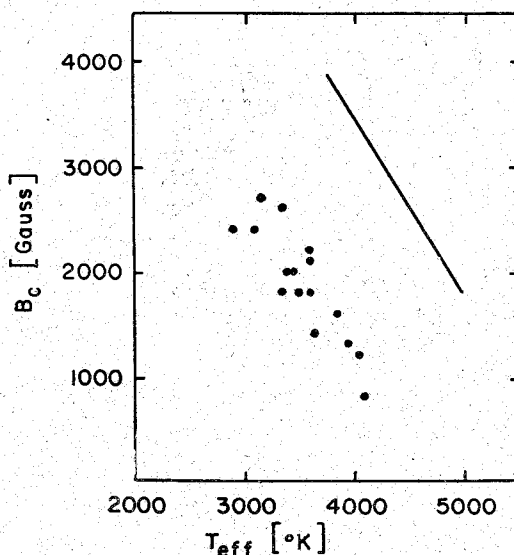
ここまできて、彼の結論は対流の影響は深さと共に増

さなければならない、また黒点を暗くするためにエネルギーの流れを上へ行くほど減らさなければならないということであった。ただこういう計算をチャートで行うのはなかなかむずかしい。そこで彼は $\beta=1$ 一定、エネルギーの流れ=一定、の計算を各深さで行なっておのおのの温度・圧力がうまくつながるようにして試験的なつぎはぎモデルをつくりあげた。このモデルは深さ 3000 km ちよつとでまわりの光球と同じになってしまうが、これは後でべる理由で少し浅すぎるのではないと思う。

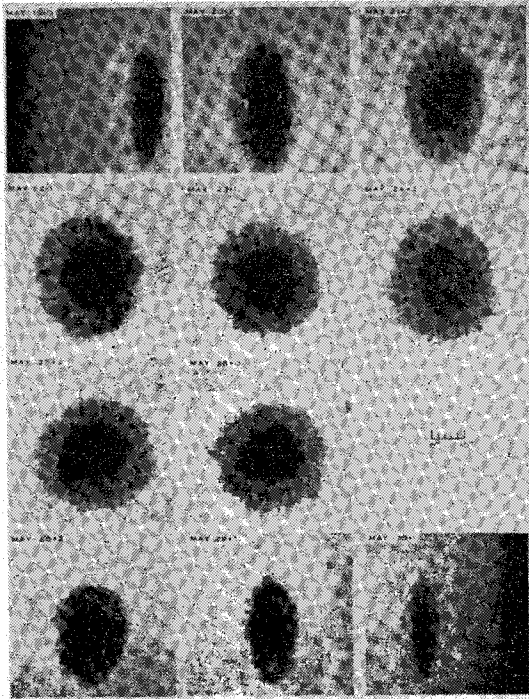
§ 4. Deinzer の計算

Deinzer は先にも述べた通り、 10^4 km の深さまでを考える限り輻射によるエネルギーの横方向の出入りはないと考え、エネルギーの流れは各深さで一定として計算した。いいかえると黒点全体からみれば上層の方だけを考えたわけである。彼は対流による横方向のエネルギーの流れを考えなかったけれども、Citre とちがってモデルをつくるのに成功した。そのわけは磁場による対流のとめられ方の表現が異なっているためと思われる。混合距離がモデルに影響するのは対流層の上層だけである。従っても深い層で混合距離が上層とちがうことがあっても、モデルはほとんどちがわないものができる。これが Citre のように深さと共に β を変えるハンザツさから救っている。すなわち彼は Citre の言葉でいえば、 β が一定でない、エネルギーの流れが一定のモデルを計算したことになる。そしてこれは Citre の考えなかった場合に相当している。

最後に彼は計算結果を観測と合せてみている。黒点の温度（明るさ）を横軸に、縦に黒点中心で観測される磁場の強さをとると、第3図に示すように観測点は計算値の下側にくる。このちがいは、エネルギーの流れが一定



第 3 図



第 4 図

ウィルソン効果を説明する一群の写真 (Longhead & Bray)。(一黒点が東から出て西へ沈むまで)

とした影響かもしれないが、仮定した横方向の磁力線の分布のせいかもしれない。

§5. ウィルソン効果

黒点の表面が光球に比べて低いということは、ウィルソン効果として古くからいわれてきた。第4図に示すようにこの話は黒点の見かけが太陽面の位置によって変わっていくことからでてきている。黒点が太陽の縁に近づくとき太陽の中心側の半暗部が逆側のそれと比べて著しく狭くなる。これは黒点の表面が凹んでいると考えれば解釈できる。そしてこれは理論からも期待されることである。

ごく大ざっぱにいうと、黒点の気体圧と磁場のもつ圧力との和がまわりの光球と釣り合うためには、黒点の表面を 500 km ほど引き下げる必要がある。これは Citre などのやり方であるが、Deinzer は表面条件をもっとよく考えて同じ程度の凹みを導いている。こうして求められた 500 km という値は、今までの観測の値と同じ程度のものである。

§6. エネルギーの行方

太陽の中心でエネルギーが各方向に一様に出ているか

ぎり、黒点というフタをすれば、妨げられたエネルギーはよそへ行かなければならない。それでは実際問題として、黒点のまわりの光球がそれだけ明るいということ、決してそんなことはない(ブライド・リングという明るい輪が黒点を取りまわっていることがあるけれども、とてもそれでは妨げられたエネルギーを説明できない)。

今、エネルギーの流れが或面積で 1/4 だけしか許されなかったとすると、そしてあとの 3/4 がまわりの光球に目立たない程度に散らばる一例えば 1% だけ光球を明るくすると考えると、妨げられたエネルギーのばらまかれる範囲はフタの直径の 10 倍近くでなければならない。こんな広い範囲にエネルギーがばらまかれるためには、恐らくフタの直径の数倍の深さからエネルギーの流れが妨げられはじめなければならぬ。対流層の底の深さは Vitense によれば 6 万 km であるから、黒点の直径を 1 万 km とか 2 万 km とかにとると、黒点とは対流層にしっかりと根を下した構造だといえるであろう。最近の太陽磁場の支配的な考え方によると、黒点は赤道に平行な磁束管が浮き上って光球に顔を出したものとされている。とすると、光球下の見えないところ—対流層にいつも長い磁力管がながながと横たわっている。それがエネルギーの流れを妨げているとすると、広い範囲にエネルギーがばらまかれてよいかもしれない。

ところがここに全然新しい考えが、エネルギーの行方という観点から現れつつある。それは、黒点是对流に対してはフタの役割をするけれども、エネルギーの流れにフターするものではない。エネルギーの流れはそれまでの対流という形から、磁場のために磁場内に生ずる電磁流体力学的な波という形に変えられるだけである、という考えである。これは黒点上層が明るいこと、太陽からの微粒子放射の説明に都合がよいかもしれない。が、ここではあまり深入りしないことにする。

§7. むすび

黒点理論のむずかしさ—というようなものを以上のようなわけで、御了解頂けたのではないかと思う。ほんとに上つ面のことだけならともかく、見えない深いところがどうなっているかを、しっかり考えない限り、黒点理論の納得いくものはでてこないのではなからうか。

文 献

- Willi Deinzer: Ap. J. 141 548, 1965 (実際には preprint として 1962 あるいは 1963 年に出ている)
S.M. Citre: M.N. 126 432, 1963