

太陽コロナの微細構造

齊藤 国治*

1. 一般コロナの構造

太陽コロナの構造については、長年にわたる皆既日食の観測、コロナグラフによる常時観測、ラジオ・レーダーによる観測、ロケット・バルーン惑星間探測器による観測および地球電離層の観測など、多方面にわたる研究調査によって近年著しく解明されてきた。いま、太陽コロナの微細構造を論ずるに当たり、まず一般コロナについての知識を下にまとめておこう。

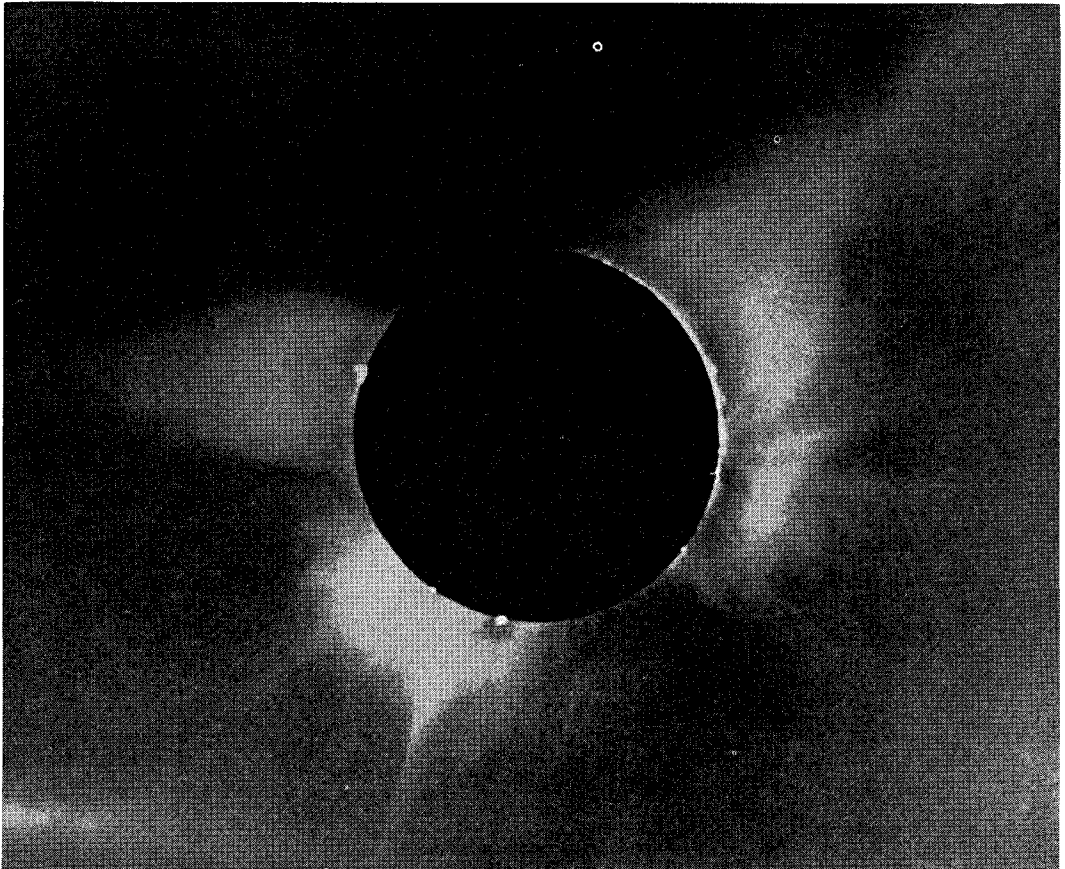
電子密度 (N_e)：太陽活動極小期に赤道方向の電子密度の分布は第1表のごとくである(ニューカーク, 1967)。活動極大期ではこの値を2倍にする。極方向の値は赤道方向の値より低い、その定量的なことは不確かである。

温度 (T_e)：静力学的平衡仮定の下で密度勾配から求めた電子温度は 1.5×10^6 °K、 $\lambda 5303$ 輝線幅から求めた

イオン温度は 2.0×10^6 °K、再結合理論から求めた電離温度は 2×10^6 °K (バージェス, 1965)。これらを総合して、一般に低コロナ域では 1.5×10^6 °K、活動極大期にはその2割増しとする(ワルドマイヤー, 1963)。太陽距離に伴っての温度勾配は第2表のとおり(ニューカーク, 1967)。

太陽風速度 (V)：密度勾配・温度勾配・レーダー反射波・惑星探測器などのデータを総合した太陽風プラズマ速度は第3表のごとくである(ニューカーク, 1967)。

コロナの自転：低部コロナは太陽表面に固着してこれと同一角速度で自転している。したがって、高緯度ほど自転角速度はおそくなる性質をもつ。しかし、この結末も太陽中心からの距離 $2.4R_{\odot}$ のあたりでゆるみはじめこれより遠くなるにつれ自転角速度はおちる。惑星間空



第1図 1966年11月12日の日食における太陽コロナ。特殊フィルターを使って撮影してある。左上が南極、右下が北極。(ニューカーク, 1967)

* 東京天文台

K. Saito: Fine Structures in the Solar Corona.

第 1 表

| | | | | | | |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| r/R_{\odot} | 1.02 | 1.10 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 2.0 |
| $Ne(\text{cm}^{-3})$ | 4×10^8 | 1.4×10^8 | 7.0×10^7 | 2.3×10^7 | 1.0×10^7 | 2.8×10^6 |
| r/R_{\odot} | 3.0 | 6.0 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| $Ne(\text{cm}^{-3})$ | 4.0×10^5 | 3.1×10^4 | 9.8×10^3 | 1.3×10^3 | (1×10^2) | (2×10) |

第 2 表

| | | | | | | |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| r/R_{\odot} | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 10 | 50 | 100 |
| $Te (\text{°K})$ | 1.8×10^6 | 1.5×10^6 | 1.0×10^6 | 0.7×10^6 | 0.4×10^6 | 0.15×10^6 |

第 3 表

| | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| r/R_{\odot} | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 10 | 50 | 100 | 1 A.U. |
| $V (\text{km/sec})$ | 4 | 16 | 28 | 56 | 100 | 175 | 233 | 400 |

間には、アルキメデス巻線に近い形で流出している。

コロナ磁場 (H) : 静かなコロナ内で太陽距離に伴なう磁場の変化は第4表にまとめられている。(ニューカーク, 1967) ただし, コロナ磁場の測定はなかなか困難で, 求値には種々の仮定がつきまとうので, 第4表の値

第 4 表

| | | | | | |
|------------------|------|------|-----|-----------|-----------|
| r/R_{\odot} | 1.01 | 1.10 | 5.0 | 10 | 100 |
| $H (\text{ガウス})$ | 5 | 5 | 1 | 10^{-2} | 10^{-4} |

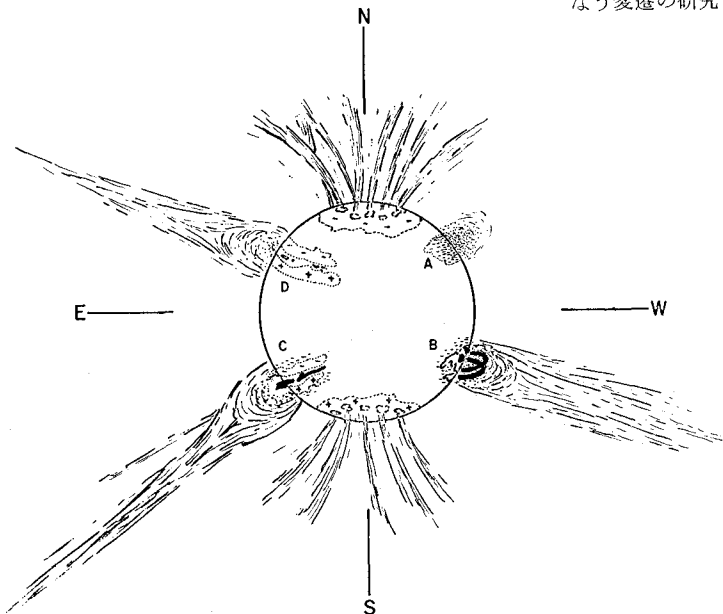
は $\times 10$ くらいの不確かさをもつ。

2. 活動領域の一生

前項の諸特性は, 一般太陽コロナの平均的モデルである。ところが, 第1図の日食コロナ写真に見るごとく, 実際の太陽コロナは複雑な模様を示しており, これが時々刻々変化しているのが実情である。したがって, 上記の平均的モデルは, 太陽コロナの構造の第1近似としては有効であるけれども, さらに詳しくは, コロナをその中に含まれる各種構造物の集合体として認識し, 各個を微分的に調査研究する必要がある。各構造物の時間に伴なう変遷の研究も興味ある課題の一つである。

太陽面上の局所的な活動領域の生成・発達および消滅の過程にわたって, コロナ中には密度・温度・磁場などに擾乱が起こり, それぞれに対応して種々の特徴ある構造物が太陽表面とコロナ中に見られる。ある瞬間に観測される太陽コロナ内各所には, 誕生の時期を異にするいくつかの活動領域の発達過程の姿が一度に出現しているわけである。ニューカーク (1967) は, その代表的発達過程をつぎの4段階に分けて説明しているので, それを以下で紹介しよう (第2図)。

A 段階 : 太陽表面のある個所に, 活動領域が頭をもたげるとすぐに, 該当域上空のコロナ中に密度の増強が見られる。これは物質およびエネルギーがコロナ中へ流入したためである。この流入は局部的磁場に誘致



第2図 太陽面活動領域の変化とそれに伴なうコロナ内の典型的構造物の生成・消滅の変遷のスケッチ。段階 A, B, C, D の順に時代を辿って変化する。南北の流線は極域流線である。(ニューカーク, 1967)。

されて移動したものと考えられる。この段階では、増強域の高さや幅はあまり著しいものではない。密度は平常コロナの2倍程度、温度は付近よりやや高いがあまり変わりはない。この状態は2ないし3週間つづいて消耗してしまうものと、そのころからさらに増強をつづけるものがあり、後者にあってはつぎのB段階へすすむ。

B段階：活動領域の発生期から2ないし4週間のうち、その活動域は発達に極に達する。太陽表面には、黒点・プラージュ・磁場・しばしばフレアを伴なう複雑な模様が生じている。直上のコロナ中にも永続的(数日間)および突発的(数十分ないし数時間)のコンデンセーションが現われる(後述)。コロナ低部にはしばしばループ状の構造物が観察され、上空では、これが開いて流線状となっている。おそらく、太陽フレアからの高エネルギー粒子の爆発があって、そのためループ磁場のいくらかは吹きとばされ、太陽系空間へ流出するのであろう。ブゴスラフスカヤ(1949)は、この流線模様をプッシュ(叢林)のごとしと形容している。近傍のコロナより高密度のこの流線の物質のうち、いくぶんかは太陽から逃脱するわけだが、その量についてはなお、議論があるようである。流線といっても、すべて流失しているわけではなく、いくぶんかは太陽に付随して離れぬものもあるであろう。この状態は3週間ほどつづくと見られている。

C段階：B段階において比較的局部に結集していた強力な磁場は、やがて付近のやや広い範囲に拡散して弱まる。A段階のはじめから8週間目くらいのことである。磁力線群は、太陽面上の正負磁極領域を連結して、美しいアーチ状構造(一名ヘルメット)がコロナ中にあらわれる。アーチの中心点に静穏な紅炎(暗条)が生ずる。これはおそらく、アーチ内側部のコロナ物質が冷却して、低温の紅炎に凝集したのであろう。アーチ構造は、しばしば二重ないし多重になって現われる。アーチ構造の外側を取りまいて、球根状の美しい曲線の幅広い流線が見られる。その延長は $10R_{\odot}$ にも及んでいる。この曲線の形は、そこのプラズマの密度分布できまり、密度分布はさらに局部磁場と太陽風と太陽重力と局部温度との釣合いで決められているのであろう。ここからコロナ物質の流失があるかどうか未詳である。アーチ構造は日面上比較的高緯度に出現するので、現在の惑星間探測器では調べにくくあり、また同一理由で地磁気変動との関係もはっきりつかめない(ダイザー, 1963)。C段階は、活動領域の一生中もっとも安定した状態で、数カ月の長きにわたって存在しつづける。

C段階の後期において、太陽自転の緯度によるちがいが効いてきて、局部磁場は等緯度圏に沿って引きのばされ、横長になってくる。したがって、付随する流線も等緯度圏に沿って拡がりをもつようになる。このような状

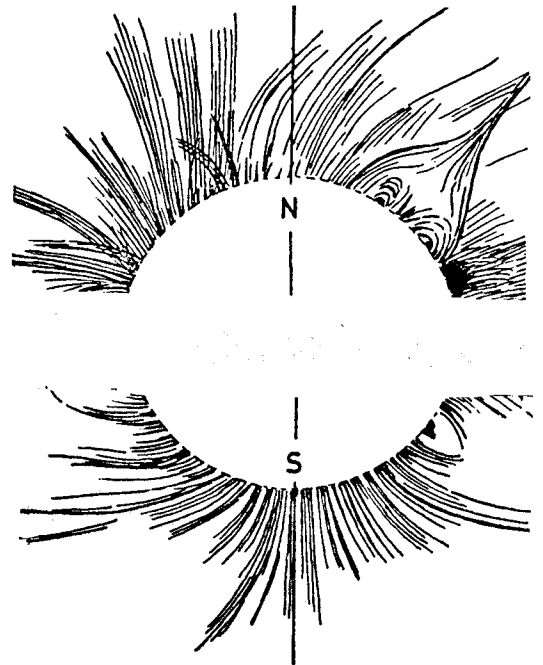
態の流線は、ファン(扇形)流線といわれている。数カ月にわたるこの段階中に、根元にあった紅炎はしばしば消滅して、上方のファンを残したままである時期がある。このときコロナからの補給が一時停止したための消滅であろうか。

D段階：長かったC段階の最終期には、活動域と磁場がさらに弱まって太陽風を流線内におくりこむ機能も失われ、やがて流線は一般コロナ中に拡散消失して、一つの活動領域の一生がおわる。

以上の記述はコロナ中の構造物を時代順に配列し、太陽表面現象と対応させたニューカークの試みである。大略はまちがいないと思われるが、コロナ中の構造物については、現在のところ皆既日食のわずかの機会を除いては他に十分正確なデータが得られないので、構造物の変遷については、かなりの程度の推定の下でこれらを連結してあることをおことわりしておいた方がよからう。また、時代順もA—B—C—Dの正規順になるとは限らず、例えばC段階になってから再噴火をしてB段階に舞いもどったと思われる例もある(斉藤・大脇, 1967)。

3. 微細構造の各論

前項では、現象を時代順に記述したが、つぎには一つ一つの微細構造についての知識を披露する。微細といっても、太陽に比較してのいい方で、その大きさは大略



第3図 1966年11月12日の日食時における南北西極域流線のスケッチ。北極域流線(上図)は付近の活動域の擾乱をうけているが、南極域流線(下図)は、きれいな磁束模様を示している(ワルドマイヤー, 1967)。

$0.05R_{\odot}$ 。またはそれ以下の構造物である。

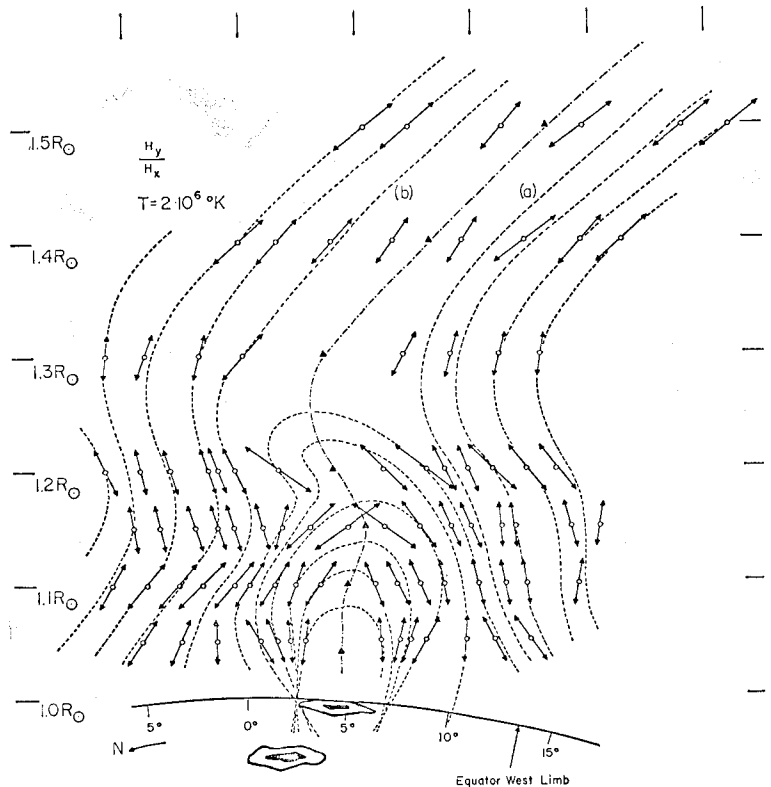
極域流線：太陽活動極小期を含む前後の数年の間、太陽の南北両極の上空に20本ないし30本の極域流線が観測される。活動の中間期で、たとえば北極圏は活動期、南極圏は静穏期という過渡的時期では、南極には極域流線があり、北極にはそれを欠くということがある。1966年ペルー日食コロナはそのよい例である(第3図)。

流線一本の直径は、根元で $0.04R_{\odot}$ ほどで、長さは数 R_{\odot} におよぶ。ラジオ星掩蔽観測から、極域流線が $10R_{\odot}$ にも延びていると出した人もいる(ウインドム, 1966)。密度はその付近のコロナ密度の4倍ないし7倍、温度は $1.2 \times 10^6 \text{K}$ (齊藤, 1965)。極域流線の年齢および寿命については全く不詳である。しかし、もし太陽表面から放出されたプラズマが、太陽の両極の磁場に拘束されている状態が極域流線の姿であると考えられると、一たん流線が形成されると、それが磁束をつきやぶって拡散消滅するのに約1カ月を要するという、ファン・デ・フルストの計算がある(1950)。極域流線はかなり安定したものとしてよい。

極域流線の形は、棒磁石の両極付近の磁束の描く模様と酷似している。しかも、この仮想的磁石の極間距離は太陽活動周期にわたって規則的変動をする。太陽活動極小期で最も長くなり(半長が $0.67R_{\odot}$)、その他の時期には半長が短縮して $0.40R_{\odot}$ くらいまでになる。太陽活動極大期では、この仮想的磁石の長さはゼロに近くなり、かつ一般磁場も消滅するのではなからうか。

極域流線群は、必ずしも太陽自転軸を対称軸として分布していない(ゴドリ, 1965)。南北流線群の対称軸をつなぐと、太陽中心を通過せぬことがしばしばある。つまり、南北両域は互いに独立採算制で活動しているのであろう。

極域流線と太陽表面上の極域白斑との頻度の太陽活動全周期にわたっての相関は著しくよい(齊藤・田中, 1957)。おそらく、極域白斑からプラズマの放出があって、これが極域流線となって現われるのであろう。しかし、統計的にいって、現在極域白斑7個につき極域流線1個の割合で観測されているので、両者間に1対1の因果



第4図 最も発達したコンデンセーション(1962年ニューギニア日食)の近傍の磁力線の方向を矢印で示してある。核の近くでは、磁力線は閉じているが、そとにいくと開いており、コロナ物質の惑星間空間への流出を暗示している。(齊藤・ピリングス, 1964)。

関係の存在を主張するのは時期尚早かもしれぬ。極域流線群が真の極上空を避けて分布するとの観測(齊藤, 1965)があるが、いまだ公認されていない。

コンデンセーション：コンデンセーションについては、本誌旧号にすでに数回の紹介記事がある(例えば、椿, 1967)。要するに、太陽面活動域の近くのコロナ中に現われる高温・高密度のガス塊である。発見者のワルドマイヤーは、これを半球状(半径 $0.09R_{\odot}$ 、中心密度 $6 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$)のモデルに単純化して考えたが、詳細な調査がすすむと、実体はなかなか複雑のようである。まず、半球状の核と思われたところは、高分解写真によると、太陽表面下におかれた一つの磁気双極子から、その軸を含む種々の子午面内に放出された十数個のループに分解されるという(椿, 1966)。

第4図は、コンデンセーションの最も発達した時期における磁力線分布を示す(齊藤・ピリングス, 1964)。核付近のコロナ物質は、この磁力線に沿い、太陽風に加速されて、惑星間空間に流出し去る。流線が $10R_{\odot}$ くらいまで延びていることは日食写真からも判かる。

前記のごとく、コンデンセーションには永続的と突発

第 5 表

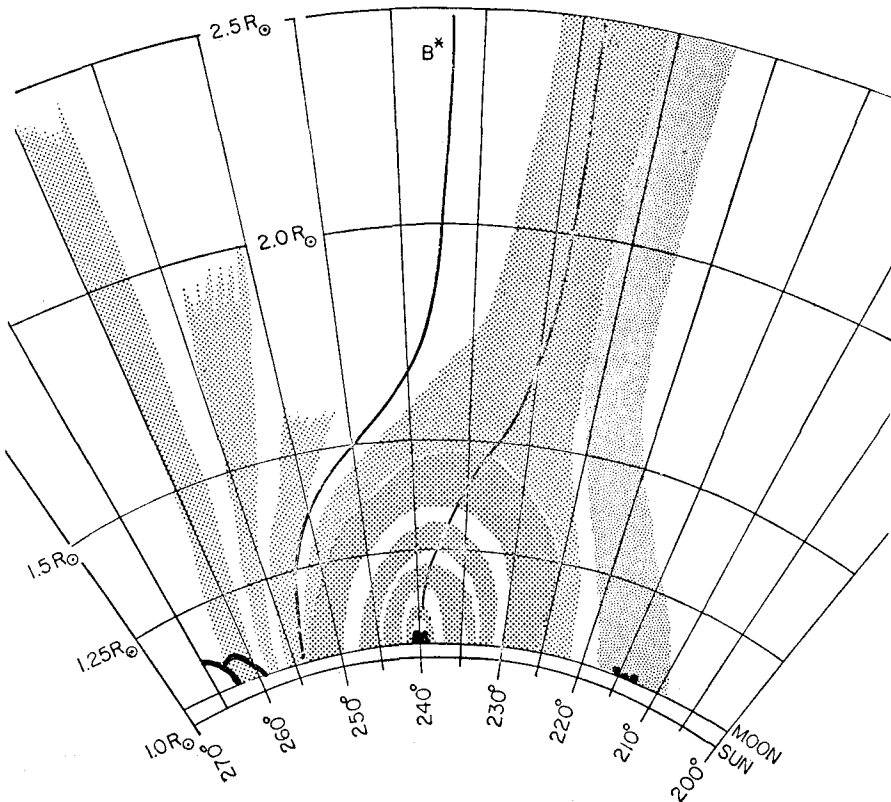
| | 電子密度 | 密度増加率 | 温度 |
|-----|------------------------|----------|----------------------------------|
| 永続的 | 10^9 cm^{-3} | 平常コロナの5倍 | $2 \sim 3 \times 10^6 \text{ K}$ |
| 突発的 | $10^{10} \sim 10^{11}$ | 50倍~500倍 | $4 \sim 5 \times 10^6$ |
| | 幅 (km) × 高さ (km) | 継続時間 | コロナ輝線 |
| 永続的 | 5万 × 8万 | 数日 | 赤線・緑線の増強 |
| 突発的 | 2万 × 2万 | 数十分~数時間 | 黄線 |

的との2種類があり、その性質は一括して第5表のごとくである。突発的コンデンセーションは、永続的コンデンセーションの一部区域が、突然強烈に輝きだしたものである。

アーチ構造：これは一名ヘルメット流線ともいわれ、発達したC段階に現われる。皆既日食時に、しばしば太陽へりに現われているのが観察されるが、1962年ニューギニア日食の際には、最も美事な四重アーチ構造が出現した(第5図)。アーチ構造の三次元的構成については諸説がある。すなわち、ドーム状・ドーナツ状・トンネル状・肋骨状などである。フォン・クリューバー(1961)は、紅炎からプラズマの瞬間的な放出があつて、これがコロナ内に拡がって、ドームができるとの説をたてている。したがって彼の説では、アーチとはプラズマの外向き運

動中の一瞬の姿であることになる。しかし、紅炎上方部に電子欠乏域(後述)が見られることから、ドーム状では話がうまく合わないのである。(齊藤・ハイダー, 1968)。おそらく、太陽面上の暗条の両側の正負磁極から出る磁束が、コロナ中に橋(アーチ)をかけ、その磁束中をプラズマが右往左往しているのが、コロナ・アーチ構造の姿なのであろう(川口, 1967)。実際のアーチの扁平度(アーチを楕円形の半分と見なし、その短半径と長半径との比)は、棒磁石の両極から棒に直角にとび出した磁力線の描く閉曲線の扁平度(計算から0.577)に一致する。

アーチの脚部の大きさおよび隣接アーチ脚間隔は、ともに $0.035R_{\odot}$ 程度で、これはスーパーグラニュールの大きさに対応する。つまり、アーチはその脚部を通し



第5図 最も発達したアーチ構造(1962年ニューギニア日食)。多重アーチの外側を球根状の流線が包んでいる。その左右に独立の流線(左に3本、右に1本)が付随している(齊藤・ハイダー, 1968)。

て、太陽面上のスピキュールからプラズマの補給を受けているのであろう。磁場が弱まると、補給されるプラズマよりも逃脱するプラズマの方が多くなり、やがてアーチは見えにくくなって、磁場の消滅とともにアーチも姿を消す。しかし、そうなるまでに数カ月の長きにわたって生存しつづける。アーチ内密度は、平常コロナ密度の2.6倍くらいであり、温度は付近コロナと平衡を保っている(斉藤・ハイダー, 1968)。

アーチの楕円形中心部に、しばしば静穏型の紅炎が観測される。この紅炎は太陽面に投影されると暗条になる(第2図参照)。おそらく、アーチの内部のコロナ物質が、凝集して、低温の紅炎をつくっているのであろう。その証拠には、紅炎の上方のコロナ内には、電子欠乏域が生じている。欠乏自由電子の全数と、紅炎内自由電子の全数とを比較すると、後者は前者の10倍くらいになる(斉藤・ハイダー, 1968)。どんな冷却機構でコロナが紅炎へ凝集するのかは、今のところ不明である。ただし、反対向きの磁力線が互いに接近する境界域、つまり磁気中和点にほそいフィラメントが凝集すると、それはかなりの寿命をもつとの説(ケペラス・タンドベルグハンセン, 1967)があり、これらが紅炎になるのかも知れない。

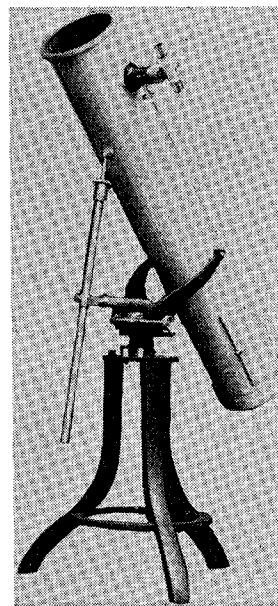
アーチ構造をかこんで、美しい球根状の流線が数 R_{\odot} の距離まで延びている。B段階の活動域流線が、強い太陽風のため直線状に流出してみえるのに反して、このアーチ流線の方は、極めて女性的な肩である。この流線は、近傍の磁場の圧力の影響を受けやすく、その軸はしばしば鉛直から左右いずれかに傾いていることが多い。

赤道流線：太陽活動極小期のコロナ中に、赤道方向に異常に延びた流線が観測される。太陽活動が下降するにつれて、黒点出現域は低緯度帯へ下がり、したがって活動域流線も低緯度に多く観測されるようになる。一方、ヘルメットの方は、黒点帯より高緯度の暗条最頻発部位へとあがっていく。そして、太陽活動極小期には、ヘルメットは消えてしまい、最小活動の残留物(名残り)が赤道近くにのこる。これが赤道流線といわれ、 $10R_{\odot}$ 以上も太陽赤道面に平行して延びており、その切口は円形または楕円形である(ポーリン, 1968)。電子密度は平常コロナの2~3倍、密度勾配は平常コロナと同じである(斉藤, 1959)。ヘルメットと似た球根状の外形をしているが、根元は幅広くて($0.45R_{\odot}$)、直接太陽面現象との関係を同定つけるのに困難である。ヘルメットのように直接対応づけられる紅炎も電子欠乏域も認めにくい。赤道流線は最も安定した存在で、数カ月から一年以上もの長寿を保つ。27日周期の地磁気擾乱をおこす原因を、この赤道流線にもとめる試みがある(アレン, 1964)が、

確定されていない。

細かい流線：太陽面上に対応する確たる活動域を同定しにくい、コロナ内には多数の細かい流線(長さは2~ $3R_{\odot}$)が放出しているのが認められる。ことに、BおよびC段階にある活動領域の左右には、これを衝るかのようにかなり太い流線(幅 $0.04R_{\odot}$)が立つことが多い(第5図参照)。その幅は、太陽距離に比例して拡がり、その中心輝度はこれと逆比例して弱まる。高分解の日食コロナ写真(例えば、スワスモア大学日食観測隊のものなど)を見ると、なんの模様もないと思っていたところにも、こまかい刷毛ではいたような繊細な濃淡の模様が見られる。その濃淡の差は目では認められるけれども、微測光機の性能を上まわるほどわずかなので、いまだにこの細かい流線の密度を評価した人はいない。それらはスピキュールのひとつひとつから流出した細かい流線の群なのかも知れない。

本文中随所に注記しておいたが、本解説文は Gordon Newkirk, Jr. の "Structure of the Solar Corona" (Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 5, 1967) を参考にし、これに筆者自身の研究等をまぜて、まとめたものである。



天体観測用 凹面鏡

口径 8 cm ~ 30 cm
焦点比 1:10 ~ 1:3

屈折対物レンズ

口径 8 cm ~ 15 cm
焦点比 1:15 ~ 1:11

接眼鏡

オルソー 5mm 9mm
ケルナー 12.5 25 40

太陽観測用

M. H. 12.5 18 25
10. cm 12. 15.

経緯台完成品
その他光学部品
金属部品

カタログ御希望の方は
郵券35円お送り下さい

有限
会社 足立光学レンズ製作所

東京都武蔵野市関前5-3-11
TEL 0422 51-8614 振替41970