

“Eruptive” プロミネンスのスペクトル

—主にその動力学的な一考察—

為 永 辰 郎*

§ 1. 初めに

もしわれわれが水素の H_{α} 線 (中心波長 $\lambda 6563 \text{ \AA}$) の光のみで物を見る力を持っていたら、太陽を見てこういでしょう。——太陽表面は、いつも、全体に芝生がなびいたような模様があり、所々 (特に赤道帯両側で周縁近く) に明るい模様が現われ、これは絶えず形や明るさを変えている。またこの明るい模様の周囲には小さな暗いすじが、絶えず形を変え、しばしば出没しているし、一方この模様から離れた所には、より大きい暗いすじがあり、これらは出没回数が少ない。ところで太陽の周縁の所々に、うす明くて様々の形をした炎のようなものが見られるが、これらは上の暗いすじが周縁にまわっていった時の見え方らしい。なお、特に明るい模様の出現と暗いすじの出没とは何か関係があるようだ。……

——この文の中に、これからわれわれが考えようとする問題が含まれているわけですが、そこに入る前に、いくつかの専門用語を紹介しておきますと、上の文中で

明るい模様……ファキュラ (白斑または彩層白斑)

特に明るい模様……フレアおよびフレア型ファキュラ

暗いすじ……フィラメント (暗条) } 同一物

炎のようなもの……プロミネンス (紅炎) }

が主なもので、その外に「芝生がなびいたような模様」は従来「彩層」とよばれた層にある微細構造でスパイクユールと考えられています。これをとりまいて有名なコロナがあるわけです。さて本題にもどって、プロミネンス (同一物であるため今後はフィラメントをも意味します) には、上記のように「静かな安定したものと、絶えず変化するものとがある」と今から 10 年以上前には考えられてきましたが、現在ではむしろ、「非常に長い寿命 (数ヶ月以上) を持つものから、全く短い寿命 (分単位) しか持たないものまで様々あり、短命のものが激しく変動するのは勿論、長命のものもその生涯には激しい変動を示すものが多い」といった方がより正確です。そしてまさに、この変動している時期のプロミネンスについて、その変動の様子と源を考えようとするのがこの文章の目標です。

§ 2. 歴史

小さなレンズとプリズムを使った簡単な分光器を使っ

ての太陽観測が 19 世紀初頭に始まって以来、大きな鏡と良質の回折格子を使った高分散分光器や任意の波長だけをとりだして使える器械 (ヘリオグラフ・ヘリオスコープ・フィルター) さらに人工日食を創る器械 (コロナグラフ) などを良い条件の土地に設置して使える現在までの約 150 年間の太陽物理学の発展は、まさに理論と実践 (観測技術を含む観測) の弁証法的発展の典型とさえ思えるのにくらべ、このプロミネンスの物理学は早くから取り組まれていながら歩みが遅いように思われます。これは恐らく一私見ながらプロミネンスが眼につきやすい現象でありながら、驚く程の多様性をまたそれ故にこそ美しいとさえいえる変化をわれわれに見せているため、かえって、たちうちのできない何かを感じさせるからだ、と考えるのは私のまちがいでしょうか。

それでも、探求は観測技術の発達と観測資料の集積につれて進められてきました。1890 年代から使われたヘリオグラフ (任意の波長の光を分光器でとりだして、その光だけで太陽の写真—単色像—を撮る) それにヘリオスコープ (残像を利用して、単色像を目で直接見る) によって観測されたプロミネンスの形や運動の資料は Pettit (1932) によって整理分類された。さらに変動の詳細は数分おきにとられた単色像写真を映画的手法で再現することによって、その美しさを実感させてくれるようになった。そしてこのプロミネンスの運動が Pettit, Waldmeier, D'Azambuja, Bruzek によって量的に扱われている。単色像写真撮影は特別に狭い波長中の光だけを通すフィルターの発明 (1930) によって一層進歩し、プロミネンスの激しい変動が何によってひきおこされるか、という他の現象との相関を観測し (Bruzek, Moreton), それを議論できる (1960 年以後 Athay, Moreton, Hyder, Bruzek) ようになった。

しかし今なお、変動するプロミネンスの分光観測の資料がきわめて少ないのは、やはり、機会をとらえることの困難さによるのだろうか。とにかく、不可欠である故に今後の課題として大きくクローズアップされることだろう。

§ 3. 観測手段・方法そして資料

1966 年 3 月 27 日の午前 (UT $1^{\text{h}}10^{\text{m}}-1^{\text{h}}35^{\text{m}}$) と午後 (UT $8^{\text{h}}00^{\text{m}}-8^{\text{h}}35^{\text{m}}$) の 2 回、太陽の北西周縁に見られたプロミネンスを分光眼視観測中、異常な H_{α} 輝線を示し

* 京大花山天文台

T. Tamenaga: The Spectrum of an Eruptive Prominence.

はじめたので、船越・黒河両氏の助けをうけて、できる限り多くのスペクトル写真を撮影しようとした結果、使用可能なものが5枚<アルバム写真>得られたので、これと、参考に眼視観測のスケッチ第2図、第3図をあげた。

使った観測器械は……太陽像直径 18.6 cm

○望遠鏡・シーロスタット (φ 70 cm) と凹面鏡 (f 20 m)

○分光器・小プリズム分光器 (モノクロメーター) と凹面鏡 (f 15 m) および回折格子 (600 本/mm)

○ヘリオスコープ

眼視観測および撮影は

○波長域・2次の H_{α} 近傍 (分散約 $0.5 \text{ \AA}/\text{mm}$)

○スリット巾・午前 (0.15 mm) 午後 (0.07 mm)

○フィルム・SSS ネオパン

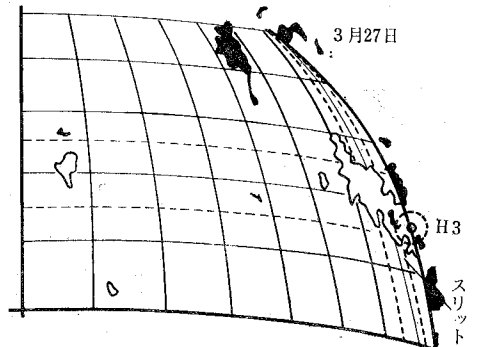
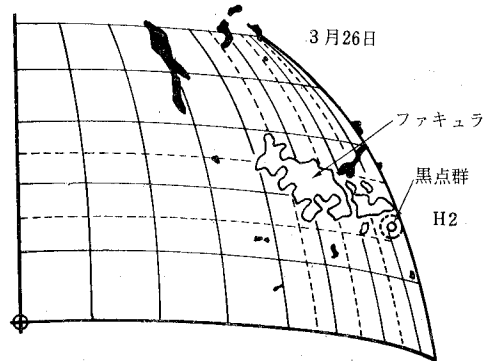
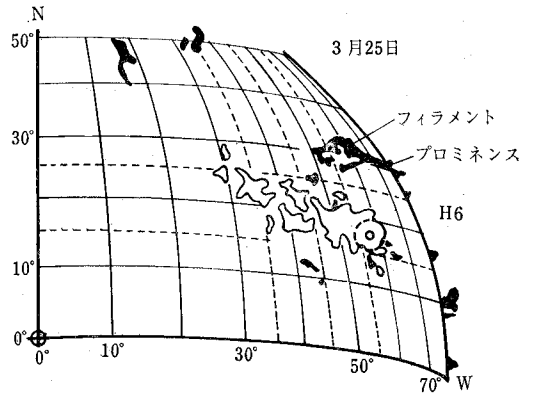
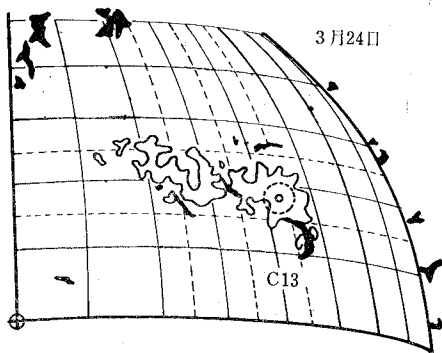
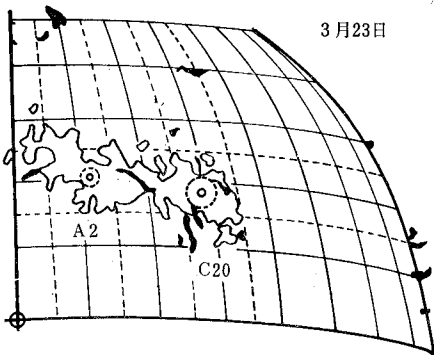
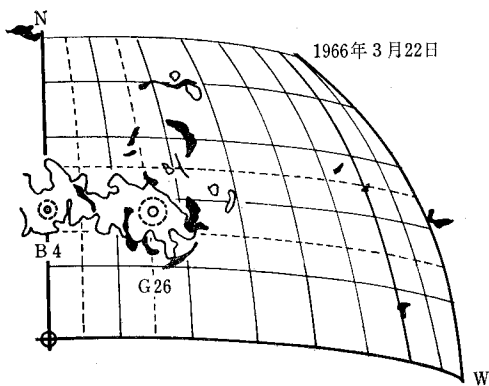
○露光時間・10 秒

撮影対象は

○プロミネンス・フラウンホーファー研究所出版の“Map of the Sun” から引用した 3月22日から27日までの各 UT 12^h の太陽表面第1図に見られる黒点-ファキュラ領域に27日現われたプロミネンス

○位置・第1図の27日の黒点の南、北緯約8°の西周縁にあるプロミネンス

○スリットの位置・第1図の27日の太陽に記入 (スリットと周縁の接線のなす角は約 30°)



第1図 フラウンホーファー日面図 (UT 12^h)

撮影条件は

○シーイング・悪い (5" 以上)

○観測者・3名がフィルム交換・露光・記録を分担. 時々, それぞれに眼視観測そしてスケッチ (このためスケッチは輝線の大まかな傾向のみを示す参考)

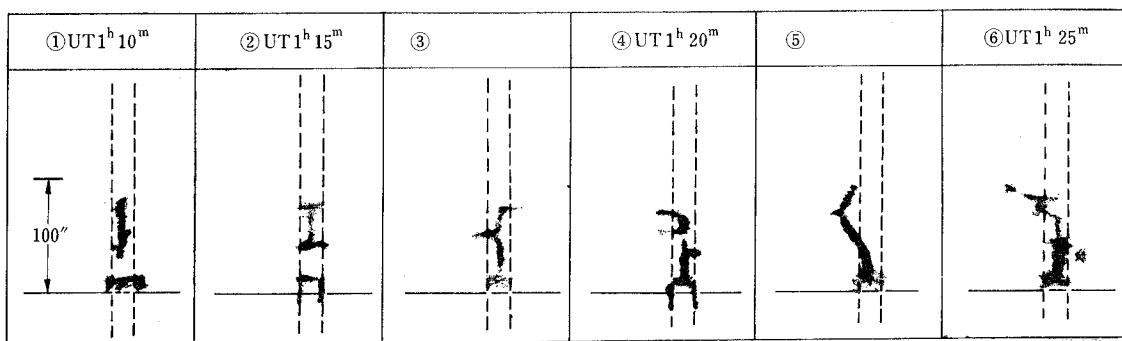
§ 4. 資料の説明

A. 観測されたプロミネンスの概観

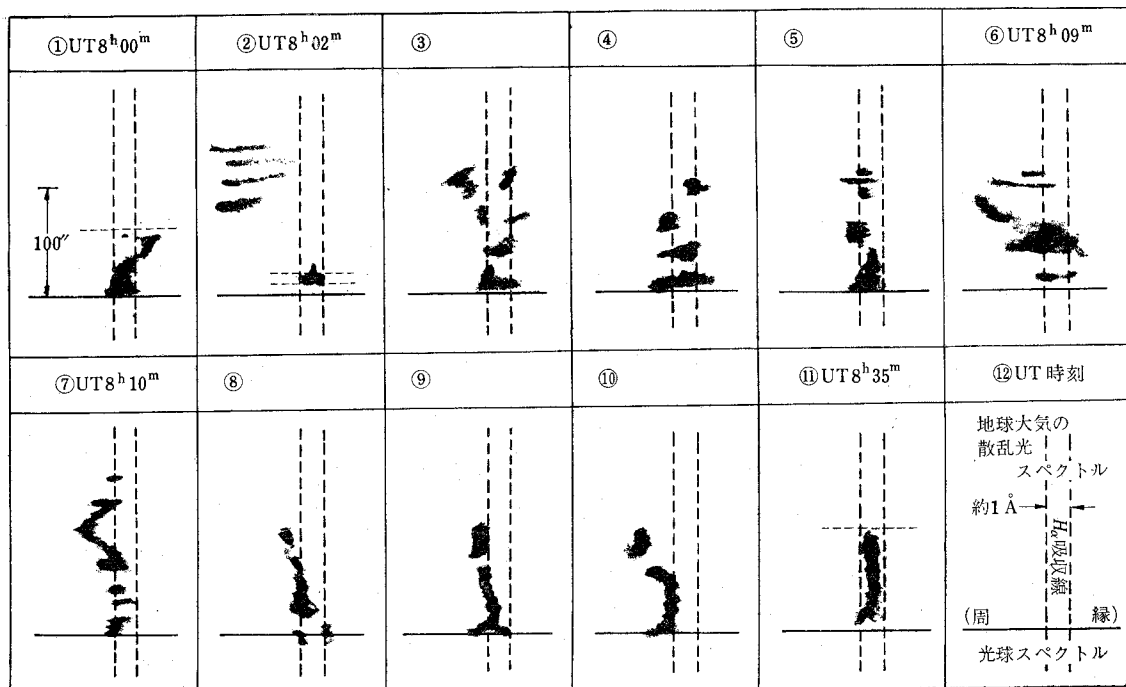
午前の分光観測の前に, ヘリオスコープで太陽周縁をプロミネンス・パトロールした際, 同位置 (8°N) に, 低く (高さ 20"~30") 長い (緯度差で 4°~6°) 台地状の明かるい (かなり明かるく, 光球と同じ位) 部分を見つけこれを分光観測したわけであるが, 日面図 (第1図の27日) には, 時刻が約11時間後の UT 12^h の観測として, 同位置にほぼ同じ大きさのプロミネンスが描か

れているのでこのプロミネンスは次のようなものと推定した. 即ち, かなり明かるいプロミネンスが UT 1^h 頃生まれ, 少なくとも一度 UT 8^h 頃にフレアの影響を受けて激しく変動しその後 UT 12^h までは存在していた. なお, この位置には以前に, また, 以後にも安定なプロミネンスは見られない (日面図より) から, それ程長い寿命は持たなかった (太陽の裏側を通過するに要する14日以内).

ここに引用したフレア現象は, 同日面図によれば, 普通の明かるさを持つ面積の狭いフレアで北緯 16°, 西経 80° (経度 90° が赤道近くではほぼ周縁になる) に発生したものである. ちなみに, この程度のフレアは同図には, 第1図の期間 (22~27日) 内に計17回. さらに大きい明かるいものでも計7回報告されている.



第2図 午前の分光眼視観測スケッチ. ④, ⑥はアルバム写真参照のこと



第3図 午後の分光眼視観測. ①, ②, ⑥, ⑦はアルバム写真参照のこと

B. 午前の観測資料

第2図は UT 1^a のスペクトルのスケッチである。この6枚のうち④と⑥は写真に基づくもので、他は同一人による眼視観測スケッチである。(スケッチの表し方は第3図の⑫参照)この図の留意点を以下に記すと、

1. 周縁からの高さ(径方向)の最大値:
約 50''=約 3.5×10⁴km
2. ドップラー偏移の最大値: 約 ± 2 Å
従って、視線速度の最大値: 約 ± 90 km/sec
3. “ひげ”(偏移した輝線)の径の最小値:
約 5''=約 3.5×10³km
4. 輝線の特徴の時間的变化:
 - a) 線巾の狭かったものが広くなり(①, ②)
 - b) 大部分は静止しているが、約 50 km/sec 前後の視線速度で飛び去っている部分もある。しかも、この偏移した輝線の線巾は広い(③, ④)
 - c) プロミネンスの一部が大きく遠ざかり、それにつれて、丁度カーテンのゆれるように他の部分もその方向にゆれる。(⑤)
 - d) b) にほぼ同じ。ただし、輝線の中には、線巾の狭いものもある。(⑥)

これらは、大きく2つにわけられる。すなわち、全体的運動(a), c))と部分的運動(b), d))である。

以上の特徴は次のような考え方で説明できる。

- イ) 温度や密度によってきまるプロミネンス本来の線巾は狭最も狭いものによく現れている。
- ロ) 線巾が広いのは、H_αの光を出す種々の視線速度を持った水素粒子団が、視線上に同時に見えるからである。
- ハ) 全体的な運動は、プロミネンスの磁場全体が、ゆれ動き、膨脹することによるのだろう。
- ニ) 部分的に異なる内部運動をすることは説明しにくい。が、他にも観測事実がある。

これらの詳細については、次節に譲る。

C. 午後の観測資料

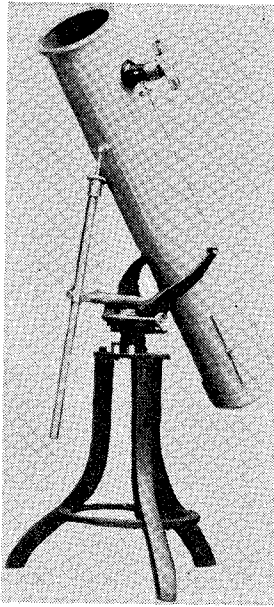
第3図に UT 8^b のスペクトルのスケッチを示す、この11枚のうち、①, ②, ⑥, ⑦の4枚は写真、他は3名の眼視観測に基づくものである。⑫はスケッチの表し方を示している。これらの留意点を次に記そう。

1. 周縁からの高さ(径方向)の最大値:
約 70''=約 5×10⁴km
2. ドップラー偏移の最大値: 約 + 4 Å, 約 - 1 Å
従って視線速度の最大値: 約 + 200 km/sec,
約 - 50 km/sec
3. “ひげ”の径の最小値: 約 3''=約 2000 km
4. 輝線の特徴:

- a) 赤方偏移(視線上を遠ざかる粒子団)が多い。
- b) ②の前が不十分で、②と⑥の間に写真が無いため、正確ではないが、偏移する部分の高さが、上(②)→下(④)→上(⑥または⑦)→下(⑩または⑪)と約1(または1.5)周期変化して衰えたと言える。
- c) “ひげ”の長さ(いわゆる線巾)には長いもの、短いものが種々ある。
- d) “ひげ”の中には、分散方向に対して傾いているものがいくつか見られる。
- e) 本体らしきものがなく、殆んど“ひげ”ばかりの輝線微細構造を持っているが、運動は、かなり全体的な傾向を示している。

この結果を説明するには、ほぼBと同じような考え方が出来るが、この場合には特徴的なものを加えると。

- イ) “ひげ”に少し傾きのあるものの存在は、粒子団の速度分布が線巾を大きくするというこの傍証になる。
- ロ) プロミネンスの磁場のゆれが、プロミネンスの全体的運動を示すことはBと同様だが、この運動は減衰振動の傾向を持つらしい。
- ハ) この場合、特に顕著な内部運動速度のちらばりは見られない。



**天体観測用
四面鏡**

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 5 mm 9 mm
ケルナー 12.5 25 40

太陽観測用
M. H. 12.5 18 25
10. cm 12. 15.

径緯台完成品
その他光学部品
金属部品

カタログ御希望
郵券 35 円送り下さい

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

二) プロミネンスのこの激しい変動が、近くで殆んど同時に発生したフレアに起因すると考えるのは次の理由から、妥当であろう。

○大きな視線速度。

○日面図でのフレアとプロミネンスとの位置関係 (プロミネンスの方が、周縁に近く、われわれより遠い) は、後退視線速度の優位を示す。

○最も高い所から変動が始まる。

なお、これらについては、次節で詳述する。

§ 5. 検 討

前節で、各々、留意すべき点をいくつか挙げたが、ここでは、各観測の対象が、一つのプロミネンスのどのような時期に相当するのかを、前節Aの推定に基いて、従来の結果と比較しつつ、できる限り推察してみよう。

仮定 UT 1^h・ファキュラ近傍にプロミネンスが発生
UT 8^h・できたてのプロミネンスが、フレアの影響で激しく変動。

1. プロミネンスの発生

まだ、詳しい解析の対象となっていないが、これは、対象の多様性 (案外、原因は単純なのかも知れないが) と観測機会の少いことによるように思われる。現在の所彩層から生まれる場合と、コロナから生まれる場合とがあり、前者の例としては、フレアが“サージ”型のプロミネンスになるという Bruzek (1966) の考えがあり、後者の例としては、コロナ・コンデンゼーション (本号主論文参照) から“ループ”型のプロミネンスが生まれるという Lüst および Zirin (1960) などの考えがある。いずれの場合も、その形状及び運動には、周囲の磁場が大きな役割を果していることは確実なので、どうしても電磁流体力学からの理論的考察が不可欠である。が、現在はそれ以前の課題として、分光観測資料の蓄積と、黒点—ファキュラ—フレアなどを統一する理論からのふえんが不可欠であるように思える。

2. プロミネンスの活動

安定なプロミネンスが活発な変動を始め、その結果として、消滅したり、再び同じ所に同じ形で現れたりする現象は、既に 19 世紀末から興味の対象であり、その変動の単色像観測は多く (分光学的観測はきわめて少ないが)、プロミネンスの分類上、大きな寄与をしてきたことは既に述べた。最近では、その変動をひき起こす源との関連が明らかにされて、いくつかの理論的な仮説も出ている。即ち、ファキュラ領域およびフレアから出る擾乱が伝わってプロミネンスが変動する (最も新しい言葉を使えばプロミネンスがウイंकする!) というものである。例えば Moreton (1959) は、フレアから伝わる波状の擾乱 (いわゆるモレトン波) が次々とプロミネンスを消滅させていくことを観測で示し、Ramsey-Smith

(1966) は変動するプロミネンスは、固有減衰振動 (周期 600~3000 秒, 減衰係数 500~1500 秒) することを示した。

理論的には前者を受けて Athay-Moreton (1961) は、この消滅は輻射過程によると考え、フレアからの中性水素粒子の流れを考え、Hyder (1966) は後者を受けて、何らかの擾乱がプロミネンスの磁場をゆり動かすと考えてその磁場 2~30 ガウスを求めた。そしてこの値は、Newton (1935) や Bruzek (1951) によって求められた視線速度 30~250 km/sec を説明できると述べている。さらに Hyder は、未知の擾乱がフレアに起源する時には、そのエネルギーが大きいため、プロミネンスは特に上部から加速されて上昇運動を起こし、消滅していくし、擾乱がファキュラ領域起源である時には、下降運動が起り (上昇・下降いずれの場合にも、多くは起源地からの放射線上を運動する) この場合には 1.5~4 回の減衰振動を起して、再び安定なプロミネンスにもどると述べている。この Hyder の結論のうち、変動の初期における視線速度の方向 (上部で後退運動) とその大きさの範囲 (30~250 km/sec) はわれわれのスペクトルの値とよく一致する。

3. 輝線のひろがり

前節の説明で述べたように、われわれのスペクトルに見られる“ひげ”状の輝線のひろがりや、分散方向に対するいくらかの傾きは、この輝線形成の過程に、従来通りの温度や密度だけではなく、粒子団の速度分布が関与していることを暗示していると考えられる。事実、内部運動はかなり複雑で、時には 110~690 km/sec のひろがりを持つ例も観測されている。従ってプロミネンスの微細構造 (糸状構造と言われる) の持つ物理的状態 (温度と密度) を最もよく表わすものは、最も巾の狭い輝線であって、それ以上の巾を持つもの多くは、その光を出す粒子団の視線速度のちがいが——速度分布が含まれていると考えられるわけである。このように輝線形成過程に、対象の微細構造の運動学的考察を入れる傾向は、安定したプロミネンスや彩層の輝線を解析する際に、最近現れている。ここにも、昔の小さな望遠鏡・低分散分光器・悪い立地条件による観測から、現在の大望遠鏡・高分散分光器・良い立地条件による観測への発達の影響があらわれている。とにかく、このような“より微細構造へ”という探求の方向は、まだ当分続きそうな気がする。