

太陽コロナの熱い雲

——二千万度の高温高密度領域の生成について——

大木 健一郎*

1. まえがき

太陽から地球にふりそそぐ種々の輻射は、光に関する限りほとんど変化しないように見えるが、実は常に一定しているのではなく、たとえば太陽光球からの熱輻射が小さくなるような波長域、つまり電波とX線では、一瞬にして、何千倍何万倍かに変化することがある。そのような異常輻射は、普通は大きな黒点群に附随する強い磁場を持った領域に発生する何らかの原因によって、プラズマ中に不安定が起り、それまでに磁場の中に蓄積されたエネルギーがごく短時間の間に、物質の運動エネルギーや熱エネルギー、または非熱的粒子のエネルギーへと転化する。この“爆発現象”を、私たちは、フレアと呼んでいる。

この太陽フレアに見られる希薄プラズマ中における不安定現象、加熱現象、粒子の加速現象などは、宇宙における一般的現象であり、かつ最も興味ある事柄の一つであるが、現在の技術では、地上の実験室の中で、全く同じような状態のプラズマをつくり出すことは、到底不可能なことである。だから、そのようなプラズマ中で何が起っているのかを知るためには、私たちに、最も詳細なデータが得られる太陽フレア現象を、この宇宙における巨大な実験室とみなし、そこで起っている現象に細心の注意を払って観察する必要がある。

太陽フレアの観測は、長い間地上からの光学観測に限定されていて、もともとフレアという言葉は、 H_{α} で見たとき急激に明るい紐状のものが見え始めることを指している。そして H_{α} 線の形、時間的なふるまいなどからフレアの運動学、物理状態などが研究され、もちろん現在も新しい結果が次々として出ており、特に分解能が良いということでは、ほかの観測の追従を許していない。

ところが第二次大戦後、電波観測が行なわれるようになって、フレアの非熱的なふるまいについての研究に、飛躍的進歩がもたらされた。そして更に太陽宇宙線、ないしは準宇宙線 (sub cosmic ray) の地上観測がはじまり、非熱的粒子の発生機構の研究に手がつけられ始めた。

しかし非熱的粒子については、いずれの観測も間接的であり量化が難しかった。たとえば、電波については、電磁波が発生するには、磁場だとかプラズマ波が介在し、宇宙線については、太陽表面および惑星間空間での伝播の問題があるといったことである。

そこで 1960 年代のロケット・人工衛星による宇宙観測の登場により、硬X線・軟X線・紫外線などが観測できるようになり、非熱的粒子の直接的なふるまい、または高温の領域の温度・密度 (正確には emission measure) が決定できるようになった。

2. 軟 X 線観測

非熱的粒子のふるまいについては最後の章にゆずることにして、主として軟X線観測から得られた成果について、ふれてみたい。

地上数万 m の高さに気球を飛ばしても、20 keV (約 0.5 A) 以上の硬 X 線は何とか測定できるが、それ以下の軟 X 線は、大気による吸収のため受けることができない。だから、1960年以前の軟X線観測はすべてロケットによるもので、その飛翔時間が短いため、フレアをとらえることは、ほとんど不可能であったが、1960年に軌道に乗った SOLRAD 1 は、いわば世界で初めての X 線・UV の観測衛星となり。ここに初めて軟X線フレアの本格的研究が始まった。

それでも、はじめの SOLRAD 1 は、衛星自体のメモリー・システムは持たないので、世界中でも数少ない観測所の上空を通過する際の10数分間のリアル・タイム・データだけを供給するので、観測可能時間の全時間に占める割合は小さく、発見できるフレアの個数が少ないばかりでなく、フレアの継続時間のうち、その一部だけを観測できるだけであった。

しかし、この SOLRAD 1 は、私たちに、太陽X線に関して多くの新知識をもたらした。例えば、8A 以下の太陽X線が、この衛星の測定限界である $0.6 \times 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ より大きくなるのは、 H_{α} フレアもしくははアクティブ・プロミネンスやリム・サージのような活動があるときだけで、静かな太陽からのX線は、この測定限界以下であった。また、地球電離層の SID (Sudden Ionospheric Disturbance) を引き起こすのは、この軟X線強度が $2 \times 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 以上のときである。

* 東京天文台

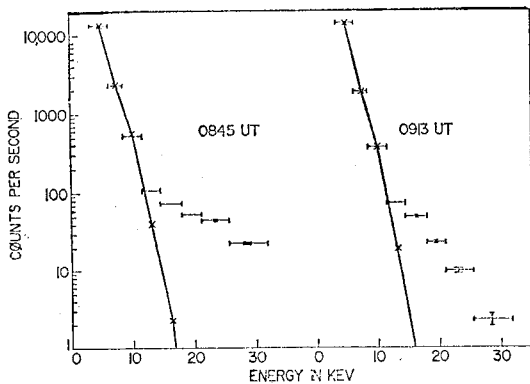
Ken-ichiro Ohki: Hot Regions in Solar Flares

その後アメリカの NRL (Naval Research Laboratory) は、現在に到るまでに SOLRAD 9 までの衛星観測を行い、0.5~3A, 1~8A, 8~20A を標準フォトメトリー・バンドとして、メモリー・システムを持つ衛星から、大量のデータを供給し続けている。

また SOLRAD の太陽モニターとは別に、OSO (Orbital Solar Observatory) では、軟X線のスペクトル線の観測が行われ、特に OSO III, OSO IV では、エルバート、河鱈らによって予言されていた Fe の K 殻にあたる Fe XXV や Fe XXVI からの輝線が発見された。そして Fe XX~XXV は強いが Fe XXVI からの輝線は弱いので、フレアー X 線を放射している領域の温度は 10^7 K よりは高いが 5×10^7 K までであろうと推定される。しかし、観測される各イオンの電離段階は単一の温度から予想されるものより、はるかに多く、フレアーが複雑な温度構造を持っていることを示唆し、また各々の輝線強度が複雑な時間変化をすることから、単一の温度領域の定常状態というのはいり得ないように見えた。

ここで、温度と E.M. (volume emission measure のことを今後このように書く) を出すのに便利だと思われた輝線のかわりに連続スペクトルを使うと、どうであろうか。フレアーに温度構造があり、様々な温度の領域があるとしても、もし連続スペクトルに最も寄与する温度が存在し、したがって、その温度を有する E.M. が最も大きく支配的であるならば、連続スペクトルの形から比較的簡単にその温度を求めることができよう。その場合約 8 A 以下の軟X線を使えば、輝線の影響は比較的少くなり、X線強度としては free-free と free-bound だけを計算しても、ほぼ正しい値を与えるようになる。また、連続スペクトルの幅を大きくとれば、輝線の影響は更に小さくなる。

第1図は、NRL グループが OGO-5 で 1968 年 6 月 9 日に観測した X 線バーストのスペクトルで 2~20 keV をエネルギー別に 8 チャンネルに分割したものである。



第1図

実線は単一の温度を持った領域からの熱輻射として計算された X 線強度で、はじめの 3 チャンネル、つまり 2~12 keV (約 6~1A) では、熱輻射スペクトルとはほぼ一致する。12 keV 以上では、それよりフラットになり非熱的輻射の存在を示す。約 12 keV 以下の軟 X 線で対数型のスペクトルになっているということは、上に述べたように連続スペクトルに大きく寄与する単一の温度を持った E.M. の大きい領域が存在することを示す。

ホランおよび NRL のケーラー達は、このような考え方に基ついて連続スペクトルの形から温度および E.M. を求め温度はフレアーの 1 時間程度の中に 2×10^7 K から 10^7 K の間を変化し、E.M. はフレアー以前より 2 桁以上増加することを見出した。ともかく、ここに到って、百万度コロナの中に浮ぶ千万度以上の“コロナの熱い雲”は、はじめて私たちの前にその姿を現わしたのである。

3. 電波観測との比較

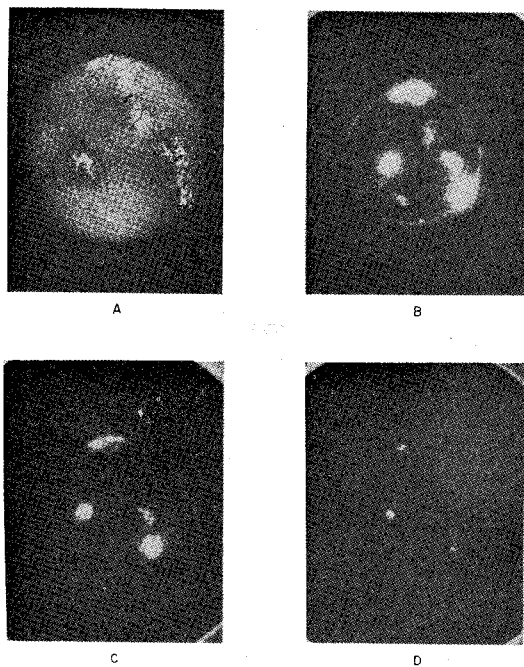
カリフォルニア大学サンディエゴのハドソン博士は、1970 年秋から一年間、東東天文台に滞在し、“コロナの熱い雲”が電波では果たしてどのように見えるのだろうかという問題に筆者と共に取り組み、意外な結論へと到達し、コロナの熱い雲を本格的に研究する第一歩となった。

当初、我々二人は次のように考え、仕事を開始した。

第2図に見られるように、フレアーの起こらないときのコロナ活動領域は、高温になるほど、つまり軟X線が短波長になるほど、小さな領域から放射されていることが分かる。フレアーの中でも、このような高温中心核が存在するはずだという必然性はないが、ともかく類似しているのではないだろうか考えたのである。

第2図Dの一番短波長の 3~13A は、ほぼコロナ凝縮、電波での S 成分を見ていることになるが、温度はせいぜい 3~4 百万度までで X 線フレアーというのは、多分、このコロナ凝縮の中心でプラズマ不安定が起こり、磁場エネルギーが熱エネルギーに変換され、千万度以上の領域が成長するという現象ではないだろうか。電子密度が約 10^8 cm^{-3} のコロナ中に $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の凝縮がフレアーの前になんてできていて、フレアーの際、その凝縮がさらに発達しながら中心部が高温になり、高温度に対して最も敏感な軟 X 線で見える。そして、 μ 波はその少し外側で、温度は少し低い、E.M. が、中心部より大きいところから放射されているのではないだろうか考えたわけである。

注意深く仕事を進めるため、われわれは、1~8 A と 0.5~3A のフォトメトリー・バンドを持っている OGO-4, SOLRAD-9, Vela の三種類の衛星からのデータを使い、重複している X 線バーストについては、両方を解



第2図 太陽の軟X線写真

A: H_{α} 写真, B: 44~60A と 3~13A,
C: 8~20A, D: 3~13A.

析して観測器による誤差を推定した。

μ 波としては、黒点磁場による放射がほとんどなくなり、純粋な free-free による熱放射だけになる 17 GHz を選んだ。実際は、大部分の μ 波観測結果は、インパルス状の非熱的放射と、時間的にもっとゆるやかに変動する GRF パースト (gradual rise and fall) の混合となっているので、両者を区別するために、豊川の 9.4, 3.75, 2.1 GHz の観測も使って電波スペクトルからも熱放射の部分を選び出した。

まずわれわれは、軟X線の2つのフォトメトリープバンドで観測された強度の比から温度を出し、次にX線強度は温度と E.M. だけの関数になることを使って E.M. を求めた。そして次に、先に述べたように、高温の中心核からは、軟X線のみ出ていることを証明するため、この軟X線を放射している高温部それ自身からの μ 波強度を求め、実際に観測される μ 波より小さいことを示そうとした。

ところが、第3図に示されているように、X線パーストを放射している高温領域のみから放射しているはずの μ 波強度が、15個のパーストについて、悉く実際に観測された μ 波強度と一致してしまったのである。

1971年初夏のある日、われわれ二人はここまで来て、頭をかかえ込んでしまったのである。と同時に、 μ 波と軟X線が全く同じ領域から出ているという事実を、非常

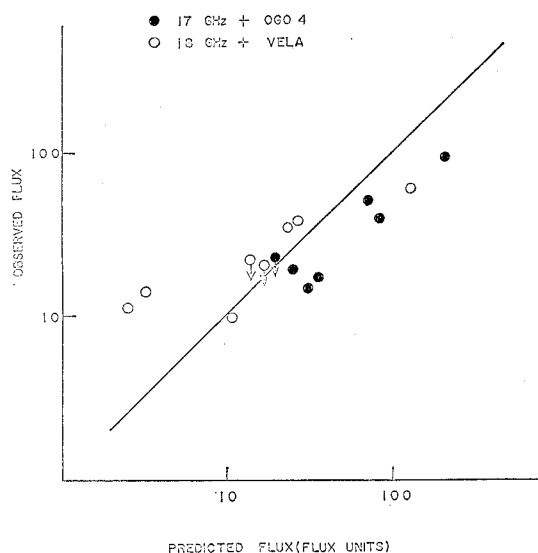
に驚いたのである。と言うのは、後でも述べるように、軟X線の観測では E.M. (つまり N_e が均一なときは $N_e^2 \cdot V$) しかわからないので、 N_e が高く、 V は非常に小さい領域から軟X線が出ていても、いっこうに差しつかえないが、実は V は大きく、したがって、その領域のエネルギーはフレアの全エネルギーに近くなってしまいうからである。

われわれは、深夜まで議論した末、もう少し見通しを良くするため、以下のようなステップをとることにした。

なるべく非熱放射が混じっていないで、純粋に熱的過程だけが見られるようなパーストを選び出し、軟X線から計算された温度と E.M. とを、 μ 波強度と、時間を追って比較してみたのが第4図である。下から順に、 H_{α} フレア、0.5~3A の軟X線強度、E.M. ($= \int N_e^2 dV \text{cm}^{-3}$)、温度、それに 17 GHz 強度の時間変化を示している。

第4図の中で、個々の時間について、X線から計算された温度と E.M. を使って計算した μ 波強度と、観測された μ 波強度について第3図のような比較ができるが、ここでも、常に両者が、ほぼ等しくなる。つまり、時間的にも常に軟X線と μ 波は共通の領域から放射されていることになる。

これは、 μ 波 GRF パーストは、フレアの際急激にでき上るコロナ凝縮によるもので、軟X線は、そのコロナ凝縮の加熱された部分からの放射であるという従来の考え方に基づけば、実は非常に奇妙な結果なのである。なぜなら、 μ 波強度は E.M. $\times T^{-1/2}$ に比例するが、軟X線強度は温度が増加すると対数関数的に増加する。そしてコロナの凝縮の効果が μ 波になり、加熱の効果が



第3図

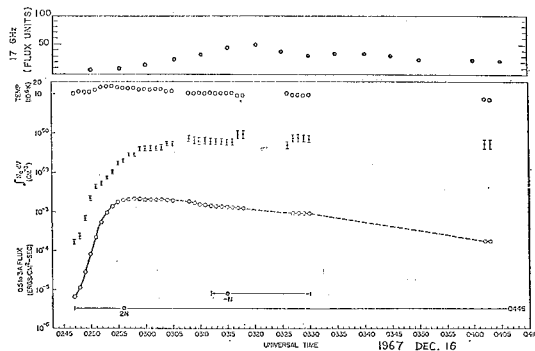
軟X線になるのだから、 μ 波と軟X線が常に共通の領域から輻射されるというのは、不自然なのである。

もう少し具体化すると、第4図で軟X線から求めた温度は H_{α} フレアー最大の少し前に最大となり、以後は徐々に減少している。ところが、E.M. の方はその後も増加を続け、約30分後に最大となっている。このことは、すでに凝縮された高密度の物質の中で千百度以上の領域が約30分位で徐々に燃え広がって行くことを示しているように見える。この場合 μ 波はどうなるかと言うと千百度の領域のE.M.が増加するよりも前に、それよりもっと低温の(多分、通常コロナの百万度程度)領域のE.M.が先に増加しているはずだから、 μ 波は第4図のE.M.が増加するより前に増加していなければならないが、観測された μ 波は、いずれも千百度領域のE.M.と、ほとんど同じ変化をしている。つまり、コロナは凝縮しながら、常に全体が同時に加熱されていなければならない。ほんとうに、このようなことが起こり得るのだろうか?

実は軟X線と μ 波が共通の領域から輻射されているという事実から、軟X線源の大きさとして、 μ 波干渉計によるGRFパーストの大きさを使うと、この領域の物質質量が決まってしまう。

いま、簡単のため $E.M. = N_e^2 V$ とすると、 μ 波源の一次元的大きさを使うので V の上限が決まり、 $n_e \geq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ となる。また3GHzの μ 波が伝播できるという条件から、 $n_e < 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ となる。このことから、全電子数 $N_e = n_e V$ は大きなパーストでは 10^{39} 以上にもなり、全コロナの N_e の10%近くにもなる。このように大量の物質が、フレアーの際に、活動領域の磁力線を横切って急激に収縮を始め、全体が同時に加熱されるというのは、益々起こりそうにないように思える。

そこで、考え方を変えて、このように大量の物質を供給しているのは、高密度の彩層だとしよう。彩層中で、急激に千百度以上に加熱された物質が膨張し下層コロナにまで広がり、黒点磁場に閉じ込められて、GRFパ-



第4図

ストおよび軟X線パーストの輻射源になっているとするならば、第4図の μ 波と軟X線の時間的ふるまいは、一挙に簡単に説明がついてしまう。

このようにして、われわれは、フレアーの大部分のエネルギーを含む“コロナの熱い雲”の生成について、コロナ物質の凝縮によるのではなく、彩層の高密度物質の膨張・希薄化 (rarefaction) によるのではないかという考えにたどりついたのである。

4. 熱い雲と光学的フレアー

1963年にスタインとネイは、光の連続スペクトルで見える白色光フレアーを MeV 以上の高エネルギー電子が黒点磁場の中で放射するシンクロトロン輻射で説明した。太陽周辺近くでも白色光フレアーが見えることがあるので、多くの人々は、この説を有力視した。しかし、その後、硬X線の観測が進むと高エネルギー電子のスペクトルは、エネルギーの高い方で急勾配で減少するのでシンクロトロンのスペクトルが、電波から光の波長域にまでフラットに伸びているとは考えられないので、シンクロトロンで説明するのは難しくなった。

それにも拘らず、依然として、白色光フレアーというのは、高エネルギー粒子が加速されている瞬間に見えているという事実がある。そこでスベスタカは、約20 MeV 以上の高エネルギー陽子なら光球にまで侵入できるので、そこで熱エネルギーに変わり、その部分だけ光球が少し明るく輝くことを証明した。

ともかく、このような加速された粒子の熱化が、彩層の中での“熱い雲”の起源かもしれない。もしそうだとすると、白色光フレアーというのは、彩層の高密度物がほとんど完全電離して出している free-free 輻射かも知れない。その場合、この輻射は第5図に示されているように、紫外および赤外領域でも観測可能である。事実、少し間接的な観測になるが、最近カネとドネリーによって、10~1,030 Å の紫外連続光が地球電離層に与える影響から紫外連続光も白色光フレアーと同じ時刻に増加することが示された。赤外での観測が待望されるが、実は筆者との共同研究を終えたハドソン博士は、昨年秋カリフォルニアに帰り、アリゾナ州にあるレモン山の上に、赤外望遠鏡を設置して、約1:5のビームでフレアーの起こりそうところだけを観測するフレアー・パトロールを開始し、ごく最近その予備観測に成功した。光でも受からない弱い白色光フレアーの連続スペクトルまで観測できるかもしれない。

第5図は、太陽からの種々の輻射をX線から電波域にわたって、かなり単純化して書いてみた。3. で述べた“熱い雲”のスペクトルも示してある。軟X線で良く見え、 μ 波でも何とか見える様子が分る。

それから、熱い雲が大量の物質を含む以上それからの

伝導熱も大きなものになる。大ざっぱに言えば、千万度以上の温度を持つ熱い雲の場合は、 10^{11}cm^{-3} より大きな密度なら、輻射によって冷えるが、それより小さな密度なら熱伝導によって冷える。そしてわれわれの結果は、熱い雲は、ほぼ 10^{11}cm^{-3} 以下なので、熱伝導が相当あることを示す。と言っても、黒点磁場に閉じ込められているので、あらゆる方向に伝導できるわけではなく、磁力線に沿った方向のみに伝わる。その結果、双極性磁場の場合、その根元だけが伝導熱で温められる。

軟X線バーストと H_{α} フレアの時間変化は非常によく似たものであるので、熱い雲からの伝導熱で磁力線の根元にある彩層の一部が、完全電離しない程度に温められ、 H_{α} フレアとして見えているのではないだろうか。

もしそうだとすれば、 H_{α} を出している領域のプラズマ自体からの free-free による熱輻射も、連続スペクトルとして観測できるはずである。それが第5図の H_{α} 領域の連続スペクトルで、この領域の電子密度 10^{13}cm^{-3} 、温度を $2 \times 10^4\text{K}$ 、厚さを 10^7cm として計算してある。 H_{α} フレアの厚さは光学観測からでもあまりよく決まらないが、たとえ 10^5cm としても、遠赤外では第5図の場合と同程度の強度となり、今の赤外技術で充分観測できるはずである。

5. 非熱的粒子と熱い雲の起源

熱い雲の持っているエネルギーもしくはフレアの全エネルギーを供給するのに、非熱的粒子の持っているエネルギーの熱化でこと足りるのであるだろうか、という命題を少し考えてみよう。

J.C. ブラウンによれば、硬X線を出す非熱的電子の個数を硬X線観測から求めようとすると、加速領域のプラズマ密度により、大きく話が違ってくる。プラズマ密

度が低く一度加速された非熱的粒子がそのエネルギーを失うまでの時間が硬X線バーストの継続時間となっている場合と、逆にプラズマ密度が高く、加速された粒子はすぐに熱化してそのエネルギーを失うが、加速機構が長時間続くため、それが硬X線バーストの継続時間を決めている場合とである。前者の場合、硬X線を出している非熱的粒子の個数ではフレアのエネルギーに足りないし、後者の場合でもぎりぎりである。

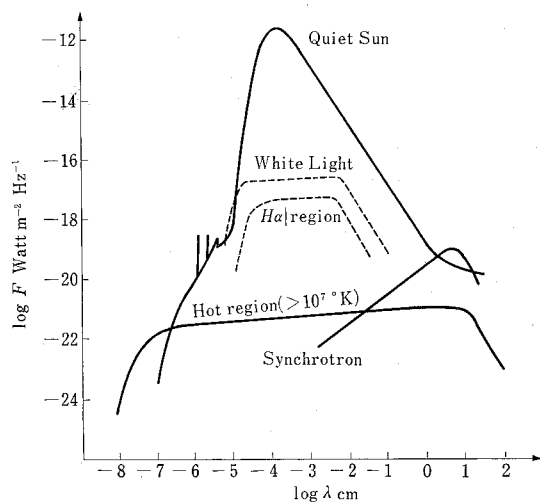
すでに1965年にド・ヤガーはフレアには準熱的フレアと非熱的粒子を伴ったフレアと大きく分けて2種類あることを提唱しているが、準熱的なフレアについては、非熱的粒子が数多くできているという観測的証拠は今だに見つかっていない。それにも拘わらずわれわれの計算では、準熱的フレアでも、“熱い雲”のエネルギーは相当大きなものになる。どうやら、すべてのフレアについて非熱的粒子による加熱だけで、その加熱現象を説明しようとしても無理なようである。

最後に、この加熱現象について、重要な示唆を含む観測がミリ波帯で最近行われたことをつけ加えておく。

フェイクスによる36GHzの観測で、ミリ波の大口徑アンテナを使い、 3.1×3.6 のビームで、太陽の活動領域のみを追跡してバーストをとらえた。その結果、信号対雑音比が大幅に向上し、 $0.8 \times 10^{-22}\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ までの変化まで分かるようになり、バーストの開始のときの微細な時間変化までつかめるようになった。

すべての非熱的バーストの始まる1, 2~15分前には、すでに電波強度のゆるやかな増加が見られ2~12Aの軟X線の始まる部分とよく似た時間変化をしている。ここでも軟X線だけでは、 $n_e V$ しか分からないので、熱エネルギーの量は分からないが、電波の観測があってはじめて、その熱エネルギーは大きいと言える。つまり、非熱的粒子を伴うフレアでも、その加速が起こるよりも前に、すでにフレアの加熱現象は始まっているのだろう。粒子の加速にはこのような予熱が必要なのかも知れない。

この章に関する詳しい議論は、紙面にも限りがあるので、また別の機会に書いてみたい。ともかく、この高エネルギー粒子の加速の問題は、太陽フレアのように観測データが豊富で、詳細に調べ得る対象ですら、最近の電波・X線などの観測により、やっとその研究の糸口を見つけたばかりである。観測天文学のあらゆる分野で、そうであろうが、私たちは、光・電波・X線以外にも、あらゆる波長域で、天体を観測する“目”を持ちたいという要求が、現在ほど強いときはないと思う。



第5図