

冷たいフレアと熱いコロナ —フレアの温度—

渡邊 鉄 哉

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

高温プラズマの電子温度やエミッション・メジャーを求める軟X線高分散分光の基本的な診断方法を示し、太陽フレア観測への応用を紹介する。フレア・プラズマの多温度性がますます明らかになってきた；軟X線観測から得られるフレアの最大温度はフレアの強度に対する依存性が非常に弱く、普遍的な微分エミッション・メジャーの分布や変遷を示す。活動領域の高温成分や恒星フレアの温度についても推論する。

1. 「ようこう」の見た太陽フレア

太陽面に爆発現象が観測され、太陽フレアの本質が解ってきたのは、決して古いことではない。筆者がまだ若かりしころ、太陽に関する解説書では、「彩層面爆発」という言葉が頻繁に見受けられた。「白色光フレア」を除くと、白色光でフレアを認知するのは大変で、彩層を見るフィルター、 $H\alpha$ 線で観測して、やっとなつりボンと呼ばれる、フレアに対する彩層の反応が観測され、電波やX線を用いて初めて、そのエネルギーがコロナ中で解放される現象であることが理解されたのである。

太陽フレアとは何か？ 日本の科学衛星「ようこう」が、この4年半以上にわたって観測してきた太陽フレアがどんなものであるかは、天文月報2月号の柴田氏の記事に詳しいのでここでは述べないが、「ようこう」のもたらした、太陽コロナ・フレアの描像は画期的なものといえよう。

柴田氏の記事によれば、フレアとは「エネルギーが突然解放される現象」で、プロミネンスに対して、フレアでは「数1000万度のプラズマが生成される」となっている。そもそも、フレアの温度ってどうやって観測・測定しているのだろうか？ 数1000万度って何1000万度なのかしら？ フレアごとに温度は違うのだろうか？ 冷たい(?)フ

レアってあるのだろうか？ いやいや、もっとさかのぼって、コロナはどうして100万度であると言われているのだろうか？ コロナのガスはどのようにフレアで高温に熱せられるのだろうか？ このような質問に答えたいと思うのが、そもそものスタートで、「ようこう」にも軟X線の高分散分光器・ブラッグ分光器が搭載されているのである。そのお話を少しして見ることにする。

「ようこう」のブラッグ分光器は4つのチャンネル即ち、観測波長域を観測している。SXV、CaXIX、FeXXV及びFeXXVIの共鳴線付近の軟X線スペクトルを観測する。詳細は表を参照して戴きたい。この内、FeXXVIは鉄の水素様イオンで、鉄の原子核の回りに、電子が1個しか廻っていない状態である。残りの3つのチャンネルはそれぞれの元素のヘリウム様イオン即ち、残留電子が2個の状態である。この分光器の特徴は、大きなゲルマニウムの結晶と太陽全面の視野をもつことにより、衛星に搭載された分光器としては、最高の感度を誇っていることである。特にSXVのチャンネルでは、フレア時以外にも活動領域をおもな寄与とするような太陽全体からの硫黄輝線放射をも測定することができる。

図1 ようこうBCSの観測輝線

イオン	波長 (Å)	分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$)
FeXXVI	1.7636-1.8044	4700
FeXXV	1.8298-1.8942	3500
CaXIX	3.1631-3.1912	6000
SXV	5.0160-5.1143	2700

2. フレアの温度を調べる

このような高階電離のイオンのスペクトルを調べるとどのようにして温度がわかるのであろうか？ いつもここからすぐに拒否反応が始まるのだが、ちょっと我慢して、次の図1をみてほしい。ヘリウム様イオン(鉄)付近のグロトリアン図である。この図は、各イオンの励起状態や、その間の遷移状態を示した図である。

まず、太陽のコロナの条件下(高温、希薄)では、イオンの各エネルギー準位のポピュレーションを決めている基本的なプロセスは、イオンと自由

電子との衝突による励起・電離と輻射による減衰・再結合である。光電子励起・電離や衝突減衰・再結合は利かない。

次に、第一電離ポテンシアル(FIP)に対して、低エネルギーの遷移に馴染みのある人にとって、二電子再結合というプロセスが関連することはめったにないが、ここでは、それが重要な働きをするのである。特にリチウム様イオンとヘリウム様イオンとの場合は、価電子の関与する殻が変化するので、電子のもっているエネルギー(電子温度)が、リチウム様イオンのFIP対しては十分浅いが、ヘリウム様イオンには十分深いような場合が起こる。この場合は、リチウム様イオンへの、自動電離準位を介しての二電子再結合が(直接再結合より)頻繁に起こるようになることが多い。

今、ヘリウム様イオンの共鳴線、トリプレット->シングレットのインターシステム線、禁制線にw, x/y, zと名を付ける。一方、リチウム様イオンのn(主量子数)=2の準位の係る内殻励起線群はa-uと呼ぶことにする。ガブリエルの定義した慣習である。後者はいずれも、自動電離準位からの輝線である。このうち例えば、jとかkと呼ばれる輝線は、リチウム様イオンの基底状態と分離されていることもあって、専らこの線の上の準位への励起はヘリウム様イオンからの二電子再結合を経由して行われる。従って今、wとjの強度比を採ったとすると、両線の上の準位は、ヘリウム様イオンの基底状態からの電子衝突によって支配されるため、その結果は、両線の上の準位とヘリウム様イオンの基底状態との衝突励起率(電子温度の関数)だけによる。両線は波長が近接しているため(このため、この二電子再結合線群は、(二電子再結合)衛星線と呼ばれる)、同じ観測装置で線強度を測定でき、電子温度の診断を精度よく行うことができる。

一方もちろん、ヘリウム様イオンのw/x, y/z間の線強度比は、電子衝突の起こる頻度の目安となるので、ある電子密度の範囲で、電子密度の診断

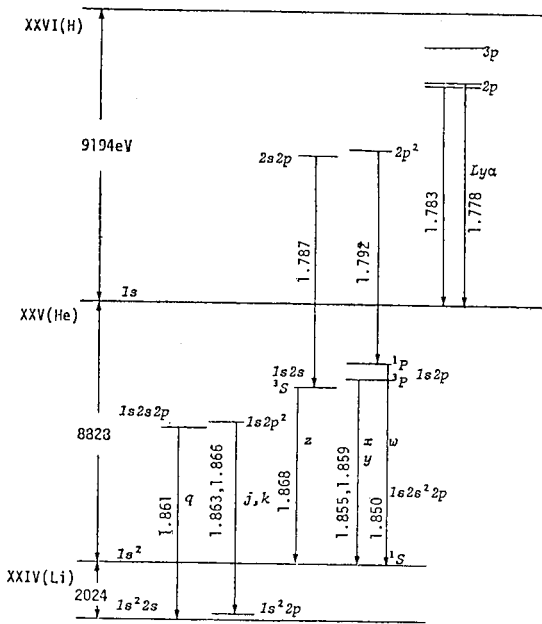


図1 鉄イオンのエネルギー準位(グロトリアン図)、輝線波長の単位はÅ。

を行うことができる。即ち、電子密度が非常に低いと、 $w/x, y/z$ の線強度比は、基本的にその上の準位の縮退度に比例する。一方、電子密度が十分に大きければ、上の準位間での、電子衝突による遷移が十分頻繁に起こり、線強度比は、電子衝突の頻度を反映することになる。しかし、例えば、SXVのイオンの場合、その線強度比の変化が電子密度に敏感になる電子密度の範囲は、 $n_e = 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 程度の領域であり、太陽コロナやフレアで期待される密度と隔たりがあるため、あまり面白い結果を得るには至っていない。図2に最も新しく、最も精度のよい、SXV共鳴線付近のスペクトルの電子温度・電子密度依存性についての理論計算を示しておく。観測と比較してみたい。簡単に温度が求まるはずだ。

光学的に薄い高温プラズマの輻射強度は、最終的にエミッション・メジャーといわれる物理量に比例する。1イオン当たりの輻射強度は、電子衝突の頻度に比例するので、電子密度に比例する。従って全強度は、これに更にイオン全数に比例するので、結果としてエミッション・メジャーは $n_e^2 \cdot V$ (プラズマの体積) になる。密度そのものでなく、密度の二乗に係るところが、面白くもあり、不便なところでもある。

3. 何がフレアの温度を決めているのか?

さていよいよ本題に入って、このようなテクニックを用いて、フレアの温度を実際調べて見ることにする。図3には典型的なインパルスフレアで生じた熱的なプラズマの熱変遷の様子を示している。

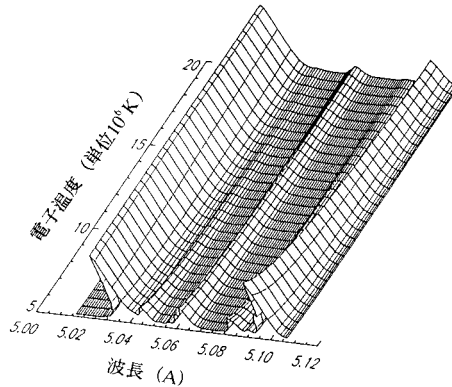
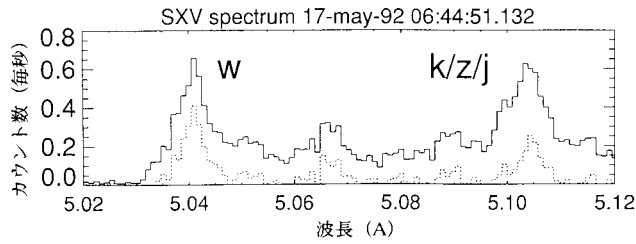
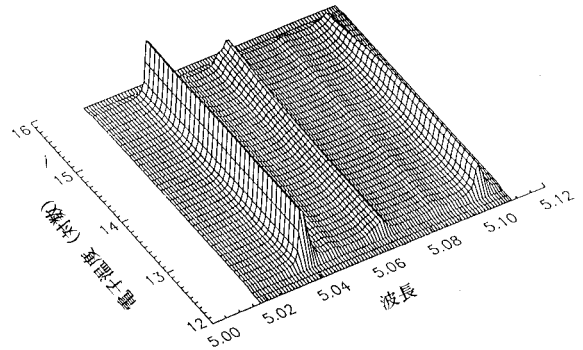


図2 硫黄ヘリウム様イオン共鳴線付近のスペクトルの温度 (T_e)・密度 (N_e) 依存性と1992年5月17日に観測された太陽全面 (実線) とマイクロ・フレア (破線) からのスペクトル



いままで多くのフレアのこのような温度及びエミッション・メジャーの観測から、次のような性質が知られている。「それぞれの方法での温度が最大になる時刻は、そのエミッション・メジャーが最大になる時刻より早い。また、それらの時刻は、より高温の輝線や連続光ほど早い。」このことは幾つか重要な意味を含んでいる。

まず、第一に重要なことは、フレアは多温度のプラズマを作り出していることである。観測する輝線や連続光によってフレアの温度が違う。あるいは、「それぞれの温度のプラズマのエミッション・メジャーがどのような分布になっているか」

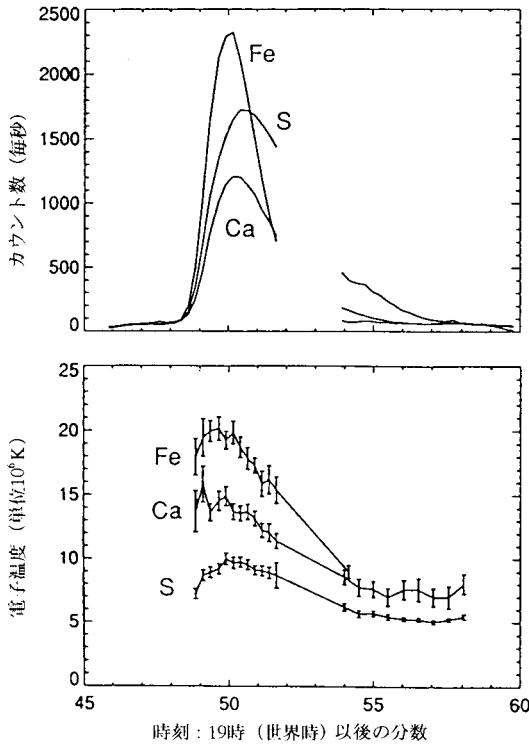


図3 1991年10月30日に発生したC7.1フレアの各輝線から求めた温度の変遷

という微分エミッション・メジャーという概念を導入すると、それぞれの輝線や連続光の観測で得られる温度は、この微分エミッション・メジャーと輝線や連続光の寄与関数との畳み込み（コンボリューション）によって求まる、ある種の重みを付けた平均温度とっていい。もちろん、理想的には形成温度が巾広く分布しているような十分多くの輝線を用いて同時に観測するようなことができればいいのだが、なかなか、この微分エミッション・メジャーの形状を正確に知ることはなされていない。

そこで、次のようなことを考える。

図4は、フレアの強度に対して、それぞれの輝線を用いて、個々のフレアで得られる最大の温度をプロットしてある。横軸のフレアの強度は、ここでは、アメリカのNOAAが静止軌道にもっている（通称GOES衛星）軟X線の強度モニターの強度で、フレアの軟X線の指針としては標準となっている。1-8Åのバンドの強度が、 10^{-8} , 10^{-7} , ……、 10^{-4}W/m^2 となることを、それぞれA, B, C, M, Xというラベルを付けて表わす。例えば、「C5のフレア」といえば、その最大強度が $5 \times 10^{-6} \text{W/m}^2$ に達したフレアということになる。

さて、図4に戻って、図4には、そのGOESの軟X線強度5桁以上のスパンに対して、SXV, CaXIX, FeXXV, FeXXVIから求めたフレアの温度をプロットしてある。もちろん、ひとつのフレアに対して、いくつかの輝線で温度が求まっている場合もある。「ひとり」のデータも加えてある。

また、この解析を行う際重要であるのは、特に微小なフレアに関して、フレア・プラズマとは直接関係のない太陽全面の活動領域からの寄与を予め差し引いてあることである。

この図からわかることは、太陽フレアはその軟

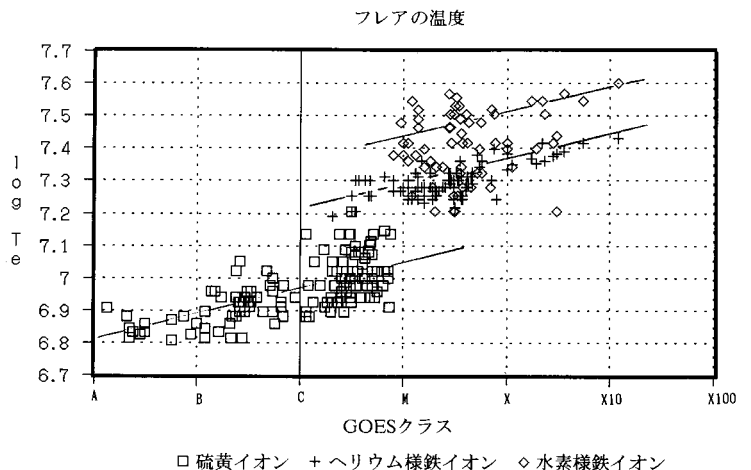


図4 GOES衛星の軟X線強度に対する、各輝線から求めたフレアの最大温度

X線強度の5桁以上に亘って、一様な性質を示していることである。即ち、ある観測輝線を決めたとすると、その輝線から得られるフレアの電子温度は、ほとんどフレアの強度によらず一定であるということである。温度の強度に対する巾は、0.07-0.08程度(4桁いって倍)しかない、ということは、フレアはその強度によらず、ほぼ一定の微分エミッション・メジャーを作り出すことである。逆に、フレアの強度は、関与しているプラズマの量、エミッション・メジャーだけで決定されることを示している。

更に、もう少しこの図に関してコメントをしておく。まず、「ようこう」のブラッグ分光器では、Cクラスのフレアで、SXVもFeXXVの輝線も観測が可能であり、そして、明らかにSXVから求めた温度とFeXXVから求めた温度にはギャップがあることがわかる。従って、フレアの多温度性が顕著に見て取れる。

大きなフレアではFeXXVと共に、FeXXVIの輝線からも温度を求めることができる。「ひのとり」のころ、「超高温成分(3000万度成分)」として発見されたものである。まだ、残念ながらこのFeXXVI輝線形成については不明なところが多々あり、他の熱的なプラズマと同様に彩層の低温・高密度であった物質が、急激な加熱によりコロナ中に蒸発するという、「彩層蒸発」の解釈では説明ができない部分が残っている可能性がある。しかし、温度-強度図の上では、この輝線だけが特殊なことはないようだ。かつて「ひのとり」のデータを用いて、故田中捷雄氏が提唱したような、「熱いフレア」と「冷たいフレア」というようなはっきりした2種類に区別するようなことはできない。「ひのとり」の検出感度の限界がなせるわざだったというべきであろう。ただ、「FeXXVIより求めた温度が本当に、FeXXVのそれよりも早く、最高温度に達しているのか」というと、観測的には検証できておらず、またHXTの最もエネルギーの低い領域の硬X線像からの様子では、「超高温成

分」は、フレア初期に彩層蒸発のプラズマとも共存する場合もあり、フレアの後半に、フレア・ループの頂上付近に、忽然と現れるようにも見受けられるので、今後の更なる高感度FeXXVI輝線観測により、その生成過程を詳細に観測する必要があるだろう。

「ようこう」の軟X線望遠鏡やSXV輝線は、活動領域内に高温(数100万度)成分を発見した。この成分は、より低温(100-200万度)の成分に比較して、早い時間尺度で変化をし、いわゆる「マイクロフレア」の寄与が大きいものと考えられている。もし、フレアがその強度によらず、いつも同じ様な微分エミッション・メジャーの変遷を辿るとすれば、数多くのマイクロ・フレアがその減衰期に重畳して、数100万度の一見定常的な成分を形成することは十分に考えられる。

そこで、図5のようなポンチ絵を描いて見ることにする。ブラッグ分光器は太陽全面に対して視野があることを思い出して欲しい。太陽の南北方向には勿論、スペクトル上で位置に対する感度としてあるというものの、その輪郭について細かい議論をするのではなく、全線強度比を問題にする時は、ブラッグ分光器は、基本的に「sun as a star」の観測をしていることに対応するだろう。

図5で、縦軸は微分エミッション・メジャー(cm^{-3}/K) (対数)だが、あえてスケールはいれないことにする。横軸は、温度(対数)で、今もつばら、 $5.5 < \log T < 8$ くらいの範囲を考えている。静穏太陽の微分エミッション・メジャーは、スカイラブ以来調べられている。微分エミッション・メジャーのピークは100-200万度にあり、それより高温では急速に小さくなる。100万度以下でも急激に減っているが、これは遷移層がコロナからの熱伝導で光っている証拠である。この微分エミッション・メジャーの形が、「コロナの温度は100-200万度」と言わしめる根拠となっている。

フレアの微分エミッション・メジャーの移り変わりは以下のように考えられる；まず、温度がエ

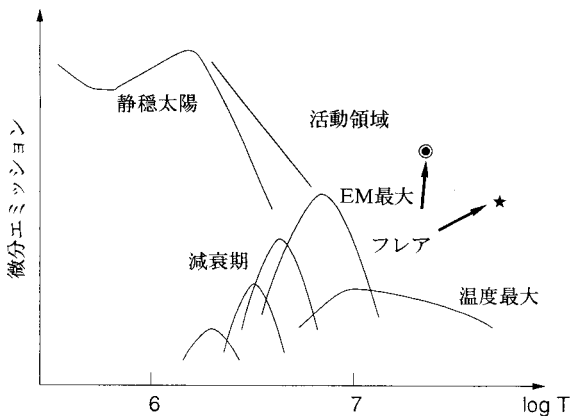


図5 フレアプラズマの熱変遷と微分エミッション・メジャーの変化。

ミッション・メジャーより早く最大に達するので、絶対値としては小さいが高温まで伸びたような微分エミッション・メジャーが形成される。それから、高温側への裾引きの具合が狭まりつつ、全体として、1000 万度程度のプラズマのエミッション・メジャーが盛り上がり、フレアのピークに達する。その後、もちろんフレアは減衰していくわけだが、インパルス相に比べてその変化の時間尺度が長くなる。最終的にエネルギーの流れを支配しているのは、輻射による散逸であるからである。

数 100 万度のプラズマはこのようにして、数多くのマイクロ・フレアが重畳して形成され、活動領域の加熱に寄与していると考えられる。

ここでもう一度強調する重要なことは、図 4 の結果から、温度が変化するのではなく、エミッション・メジャーが大きいことを意味するということである。即ち、フレアの微分エミッション・メジャーの変化の様子は、この図 4 の上で、縦軸に沿ってしか動かさないことを示している。変遷の時間尺度も、インパルス・フレアと LDE (柴田氏記事参照) とではもちろん違うが、微分エミッション・メジャーの形状についていえば共通性があり、「フレアではいつも 1000-2000 万度にピーク

があるような微分エミッション・メジャーをもつプラズマが作られ、その大きさはエミッション・メジャーだけで決まる」と言い換えてもいい。

4. 恒星フレアへ

それでは、なぜ太陽フレアでは、「いつも 1000-2000 万度のプラズマが作られる」のだろうか。「彩層蒸発が調整をしているからだ」という人がある。しかし、コロナ・ループのシミュレーションをやって、任意のエネルギーを任意の大きさのループに任意の方法で注入して、彩層蒸発を起こしてみても、いつも観測されるような微分エミッション・メジャーには決してならない。従って、5桁以上に亘り全注入エネルギーの大きさを替えているにも係らず、太陽フレアには、「普遍的な(全解放エネルギーによらない) 温度調節機構」が存在するのである。そのキー・パラメーター何だろうか？

それには、恒星フレアを眺めてみるのも手である。近年恒星フレアの X 線観測は、アインシュタイン衛星以来大きな進展を見せ、サンプル数も増大の一步である。いわゆるフレア星やりょうけん座 RS 星型連星で発生する大フレアは、太陽フレアの最大級のもの遙かに凌駕している。太陽フレアでは、全エミッション・メジャーはせいぜい 10^{51}cm^{-3} にしか到達しないが、恒星フレアでは $10^{55-56} \text{cm}^{-3}$ などというものも観測されている。同様に注目すべきことは、太陽フレアに比べて遙かに高温の熱的プラズマが大量に作られることである。8000 万度とか 1 億度といった熱的プラズマ優先的に存在することである。もし、図 4 に示した結果を信じたとして、「太陽コロナ中のプラズマを大量に巻き込んで、エミッション・メジャーが $10^{55-56} \text{cm}^{-3}$ に達するような大フレアを太陽面上に作り出すことができたとしても、その温度はせいぜい 4000 万度どまり」である。

一方、これらの恒星にはフレア時以外にも、太

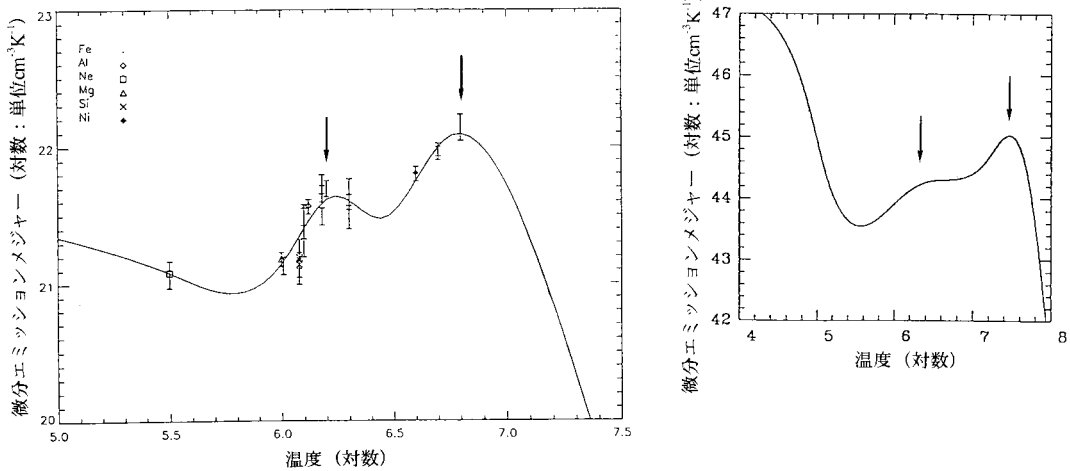


図6 太陽の活動領域 (91年) (左) とけんびきょう座 AU 星のコロナ (右) の微分エミッション・メジャー

陽コロナに比べて高温のコロナが存在することがわかっている。このコロナの温度については、しばしば2成分モデルなどで解析され、その高温成分は1000万度程度、もしくはそれ以上を示す。図6に、その一例としてAU MicのEUVによる微分エミッション・メジャー分布を掲載する。これに参考のため、太陽の活動領域を同じ極紫外域で観測したSERTSによる微分エミッションメジャーを較べて見よう。偏見に満ちた見方になるかも知れないが、「太陽活動領域の高温成分(数100万度)が、AU Micでは1000万度以上に移動して、200万度近傍のハンプは両星ともに普遍的に存在する」と思うのは、言い過ぎだろうか？高温成分がフレア活動起源だとすれば、その温度の違いも納得できるし、一方、静穏太陽のコロナ加熱が、マイクロ・フレア起源とは別物だと考えると、両星で、フレアとは違う依存性を示すのもうなづける。

フレアの温度を決めているものは何だろう。なぜ、太陽では1000-2000万度のプラズマが作られ、活動的な恒星ではもっと高温の熱的プラズマが生成されるのだろうか。一つの可能性としてはループの大きさがあるかも知れないと思っている。

太陽フレアと恒星フレアの違いを捜すことは、その一歩である。

単純なフレアも多温度プラズマであり、エネルギー解放機構とまわりの磁場環境のどの要素が、その微分エミッション・メジャーを決定しているかを見極めることは興味深い。

Cool Flare and Hot Corona —Temperatures of Flares—

Tetsuo WATANABE

NAOJ : 2-21-1 OSAWA, Mitaka Tokyo

Abstract: Basic diagnostic tools in high resolution X-ray spectroscopy to measure electron temperatures and emission measures of hot thermal plasmas are introduced and applied to solar flares. Differential nature of flare thermal plasmas has been clarified; the maximum temperatures of flares reached in soft X-ray emission lines show very weak dependence on flare intensity and the universal distributions and evolutions of differential emission measures is predominant. Implications to the high temperature component in active regions and temperatures in stellar flares are also discussed.