

コロナはなぜ熱い？

－ マイクロ・ナノフレアと太陽コロナ －

清水 敏文

〈国立天文台太陽物理学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: shimizu@sxt2.mtk.nao.ac.jp

太陽コロナは希薄な数 100 万度の高温なプラズマからなる上層大気です。なぜコロナが熱いのか？という天体物理の基本的な問題に対して、近年エネルギーの散逸（加熱）機構として、フレア爆発に比べて何桁も小さな爆発－マイクロフレア、ナノフレア－が注目を集めています。「ようこう」衛星に搭載された軟 X 線望遠鏡（SXT）は初めて、マイクロフレア、そしてナノフレア、の観測的な研究を可能にしました。本解説ではマイクロ・ナノフレアとコロナ加熱との関係について最新の観測成果を中心にまとめます。

1. コロナの不思議

太陽の表層（光球）を月がすっぽりと隠す現象である皆既日食は、淡い幻想的なコロナの姿を見る一瞬のチャンスです。一生のうち一度は自らの目で見てみたいと誰もが思う天文現象です。コロナは光球、彩層の上層にある非常に希薄な大気層です。コロナの研究は、太陽物理学において非常に重要な位置を占めています。特に、日本では宇宙科学研究所が 1991 年 8 月に打ち上げた科学衛星「ようこう」のおかげで、コロナに関わる研究が極めて活発です。

では、なぜコロナは研究者の興味を引き付ける研究対象なのでしょう。この理由は様々ありますが、そのひとつに本解説の話題である高温コロナの成因のなぞがあります。さらには、フレア（太陽面爆発）に代表される太陽活動現象は低層コロナにて発生しています。コロナは太陽のみならず、近年の X 線天文学の発展によって、多くの恒星に普遍的に存在することが分かっています。また、銀河、銀河団にも高温プラズマ（コロナ）があることが分かってきました。コロナの成因を解決することは、今や天文学の重大な課題と言えるでしょう。

約 6,000 度の太陽表面（光球）からわずか約 2,000 km 上空にあるコロナ領域では、温度が数 100 万度に達します。光球のすぐ下では激しい対流運動が起こっており、コロナを加熱するおおもとのエネルギー源がこの対流の運動エネルギーであることは確かです。対流運動は空間的な偏りはなく太陽面ではほぼ一様に起きていますが、高温なコロナは太陽面にわたりのっぺりと一様には分布しておらず、空間的に局在化しています。図 1 は、軟 X 線でみた太陽コロナと、同日に得られた光球面の磁場分布マップ（マグネトグラム）です。軟 X 線は数 100 万度のプラズマからの熱放射であり、密度と温度に関係して、軟 X 線で明るいところは、コロナの加熱率が大きいことを示しています。軟 X 線で明るいコロナ領域は、活動領域と呼ばれる光球の強い双極の磁場領域に密接に結びついています。磁場がコロナの成因に重要な役割をしていることは明らかです。

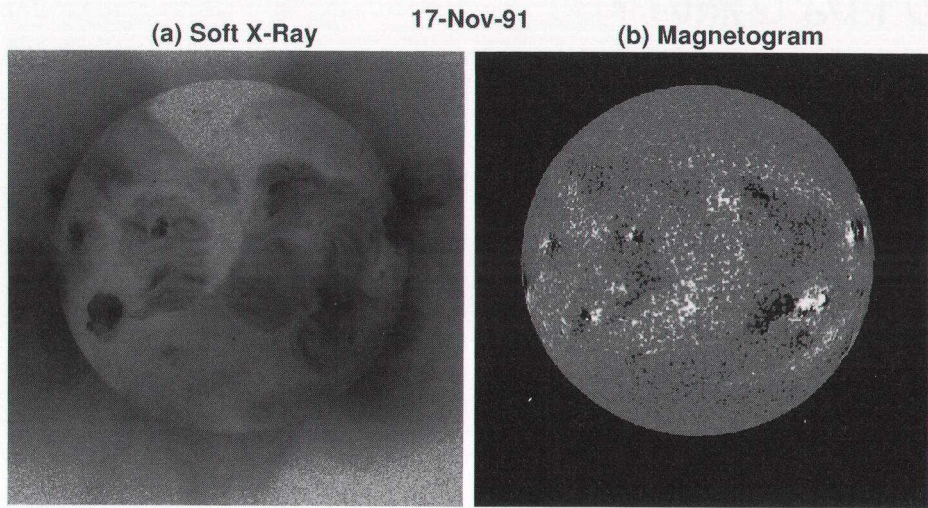


図1：(a)「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡(SXT)で撮影された太陽コロナと(b)光球面磁場分布マップ(米国キットピーク天文台)。白が+極，黒が-極の視線方向の磁場成分である。

2. マイクロフレア，ナノフレアとは

コロナを加熱する機構として従来から有力と考えられてきたアイデアは，アルベン波(電磁流体波)による加熱です。光球面下の対流運動によって磁力線(管)に沿ってアルベン波が励起され，エネルギーが磁力線に沿って波としてコロナに伝播され，コロナが加熱されるというものです。しかしながら，アルベン波の励起・伝播の証拠が未だに観測によって見つかっていません。このような状況において，マイクロフレア，ナノフレアがコロナの加熱機構として次第に注目を集めるようになりました。

マイクロフレアとは，巨大フレア(10^{33} エルグ)に対して6桁もエネルギー規模が小さい 10^{27} エルグ程度のフレア状のエネルギー解放現象のことを指します。またナノフレアは， 10^{24} エルグ程度のエネルギー解放のことを指します。マイクロフレア・ナノフレア加熱説では，光球面下の対流運動によって磁力線が入り交じったり，ねじられたりひねられたりして，その結果磁力線(管)にそって電流としてエネルギーが蓄えられるというものです¹⁾。この

蓄えられたエネルギーを突発的に熱・運動エネルギーに変換する過程が，マイクロフレアやナノフレアのような非常に小さなエネルギー解放です。突発的なエネルギー解放の方法としては，反平行の磁力線どうしのつなぎかえ(磁気リコネクション)が考えられています。

3. 「ようこう」による コロナの新しい描像

「ようこう」衛星に搭載された軟X線望遠鏡(SXT)は，約3秒角という高い空間分解能で，1分以下(大フレア発生時には数秒)のかつてない高い時間分解能で，コロナの撮像を1991年8月の打ち上げ以降継続的に行なっています(7周年を迎える現在でも健在です)。「ようこう」の見たコロナは，きわめて活動的(ダイナミック)です。フレアの他にも，フィラメント噴出に伴うX線増光，X線コロナジェット，そして本解説の話題であるマイクロフレアなど，ダイナミックな現象が常に太陽面のどこかで起きています。また，活動領域コ

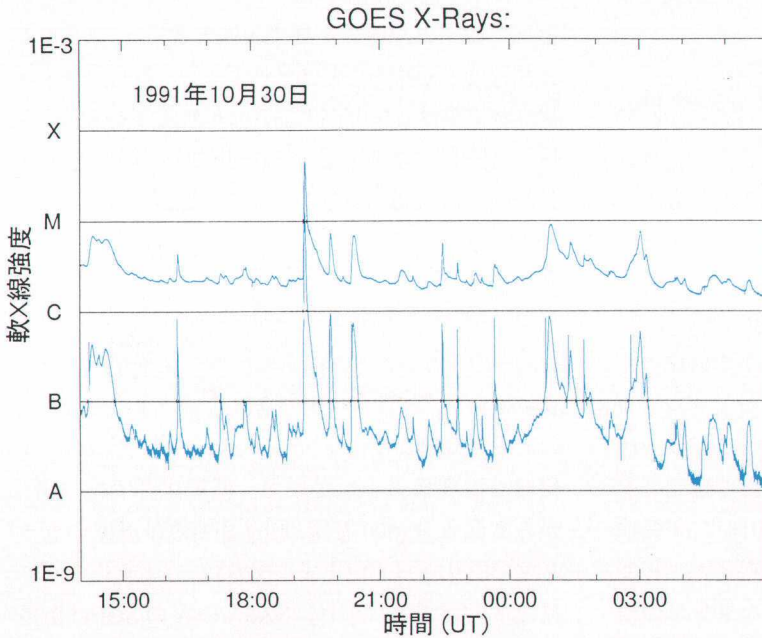


図3：太陽全面からの軟X線フラックス (GOES衛星による)。上：1～8 Å，下：0.5～4 Å。フレアや大きなマイクロフレアによる突発的増加は捉えられているが、多数の小さなマイクロフレアがこの中に埋もれている。

コロナは常に構造的に変化していて、活動領域ループがゆっくりと膨張することも観測されています。また、フレアの観測においては、フレアのエネルギー解放に「磁気リコネクション」が重要な役割をしていることを示す観測的な証拠が見つかり、コロナ中での磁気リコネクションの役割の重要性が増してきています²⁾。このような「ようこう」の観測は、多くの研究者にコロナは非常にダイナミックであり、コロナ加熱についてもマイクロフレア、ナノフレアによってダイナミックに加熱が行われているだろうという印象を与えています。

4. マイクロフレアの観測

SXTは、加熱率の高い活動領域において、小さなコロナループ(磁力管)が突発的に増光することを初めて捉えました³⁾。図2(表紙)は、ある活動領域の数時間にわたる時間変化を示す連続画像です。矢印で示されるように、活動領域の至る所で小さなコロナループが突発的に増光するのが観測されています。形態から、これらの現象は、「トランジェ

ント・ブライティング」とも呼ばれていますが、後述するように解放されるエネルギーの量が 10^{26} ～ 10^{29} エルグであり、これらはエネルギー的にまさしくマイクロフレアであることが明らかになっています。このような小さなエネルギー解放は、太陽全面からの軟X線フラックスに埋もれてしまいます(図3)。

マイクロフレアとコロナ加熱の関係を論じるには、数頻度分布が重要となります。エネルギーの大きさが 10^{29} ～ 10^{33} エルグの太陽フレアの数頻度分布は、べき分布

$$\frac{dN}{dE} = A E^{-\alpha}$$

で非常に良く表されることが知られています。ここで、Eがフレアの放出エネルギー、Nが発生数、 α およびAが定数です。フレアの場合、べき数 α は、1.6程度であることが分かっています⁴⁾。仮に、マイクロフレア、ナノフレア領域にて、このべき数が2よりも大きくなるとしたら、小さなエネルギーのイベントほど総量としてはより大きなエネルギー



を放出することができるようになります。上式を積分してエネルギー総量を求めると、

$$P = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \left(\frac{dN}{dE} \right) E dE = \frac{A}{2-\alpha} E^{-\alpha+2} \Big|_{E_{\min}}^{E_{\max}}$$

となります。この式は、べき数 α が2よりも大きく、 E_{\min} が十分に小さければ、小さなイベントほど総量としてより大きなエネルギーを供給し、コロナの加熱の源となることができることを示しています。

マイクロフレア領域でのべき数がフレアに比べて大きい可能性は、Lin らによる硬X線マイクロフレアの発見⁵⁾までさかのぼります。彼らは高感度の硬X線検出器を気球に搭載して、それまで観測できなかったマイクロフレアを2時間強の間に14個検出しました。これらのエネルギーは 10^{28} エルグ程度と推定され、当時としては最も小さなフレアの検出でした。統計的には不十分なイベント数ですが、観測から得られた硬X線マイクロフレアの数頻度分布はべき分布で表され、べき数はおおよそ2と、フレアに比べてべき数が大きい傾向を示していました。この結果から、マイクロフレアがコロナ加熱へ寄与しうることが期待され始めました。

「ようこう」で観測されたマイクロフレア(トランジェント・ブライティング)は、Lin らの硬X線マイクロフレアに比べて、より小さなエネルギーの現象を多数含んでいます。図4は、ようこうで観測されたマイクロフレアの数頻度分布です⁶⁾。 10^{27} エルグまではマイクロフレアの数頻度分布は、べき数1.5~1.6のべき分布でよく表すことができることが分かります。この結果は、すくなくとも 10^{27} エルグまでは、フレアのべき分布と同じ分布をしていることを示しており、マイクロフレアは単に小さなフレアで、コロナ加熱には大きな寄与はできないことが分かります。マイクロフレアによる

エネルギー量を評価すると、マイクロフレアは活動領域コロナの加熱に必要なエネルギーの高々1~2割程度しか賄うことはできません。なお、マイクロフレアがフレアと同じ特徴(非熱電子の存在)を持つことは、電波と軟X線の比較⁷⁾、硬X線と軟X線の比較研究⁸⁾から得られています。

5. コロナの高温成分の形成

マイクロフレアのみではコロナ加熱をすべて賄うことができないことが明らかになりましたが、マイクロフレアは特にコロナの高温成分(500万度以上)の形成に重要な役割をしているようです。コロナは複雑な温度構造をしていて、低温成分(100万度)から高温成分(500万度以上)までの多温度のプラズマで成り立っています。図5は、「ようこう」で見た活動領域コロナと、NASA/ESAのSOHO衛星に搭載された極紫外線望遠鏡による活動領域コロナです。両者のコロナは良く見ると、違いがあることが分かります。「ようこう」画像ではコロナルー

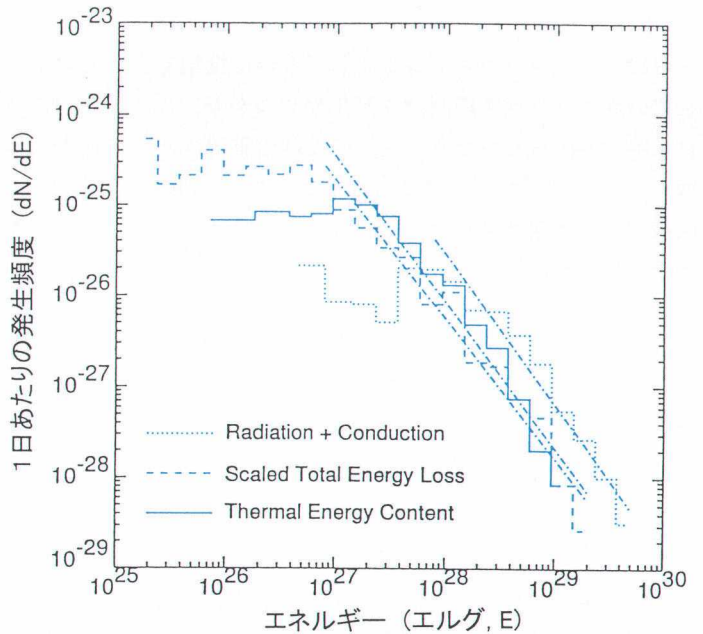


図4：マイクロフレアの数頻度分布。エネルギーの導出には不確定要素が大きいので、複数の方法でエネルギーを求めた。 10^{27} エルグ以下はイベントの数え落としによってべき分布から外れる。

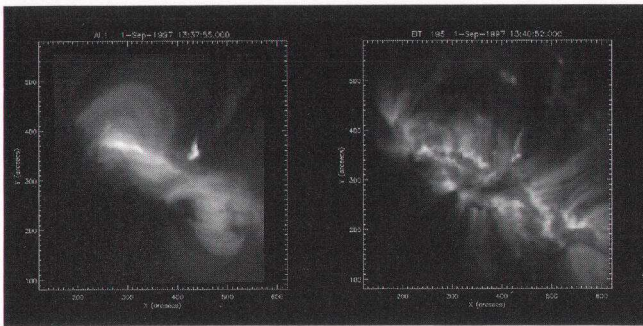


図5：異なった温度で見た活動領域コロナ。ようこう(左写真)とSOHO(右写真)による観測。

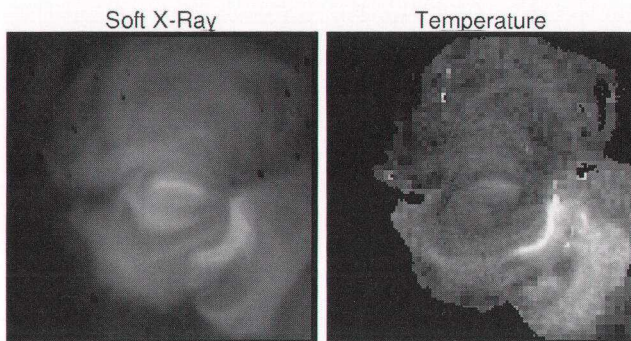


図6：活動領域の温度分布。左：軟X線強度，右：温度(スケールレンジ: 3-7.5MK)。右下に位置する領域は500万度以上に過加熱されている。

プ(磁力管)の頂点を中心にループの全体が輝いてみえます。一方、SOHO衛星の画像は、コロナループの足元付近が明るく輝き、ループの足元同士のコロナ中での結びつきは明瞭には見えません。またSOHOは「ようこう」の観測しているループとは違うループの足元を観測しているようにも見受けられます。この見えかたの違いは、望遠鏡の温度感度の違いによるもので、「ようこう」は300万度以上のプラズマに強い感度があるのに対して、SOHOは150万度付近のプラズマに感度があるからです。同様に、コロナの多温度構造は、国立天文台乗鞍コロナ観測所のコロナグラフによる可視光領域のコロナ輝線観測データと「ようこう」画像との比較研究⁹⁾からも明らかになっています。

さらに、「ようこう」の観測は約500万度以下の

コロナと500万度以上のコロナの振る舞いの違いを明らかにしています¹⁰⁾。図6は、ある活動領域の軟X線画像とSXTから求めた温度構造マップです。温度構造は軟X線強度とはあまり強い相関がなく、軟X線強度が小さい領域でも温度が高いことがよくあります。約500万度以下のコロナ成分は長い時間(冷却時間スケールに比べ長い)にわたって準定常的に存在します。一方、500万度以上のコロナ成分は突発的に存在します。この高温成分の存在する場所は、マイクロフレアが頻繁に発生する領域付近に位置しています。また、「ようこう」搭載のブラッグ分光器の観測によると、マイクロフレアを起こすような短い(高さの低い)ループが太陽縁に隠されると、高温成分が無くなるということも観測されています¹¹⁾。フレアの微分エミッション・メジャー(エミッション・メジャーの温度分布)の解析からも、高温成分プラズマは多数のマイクロフレアが重畳して形成されているのが推論されています¹²⁾。このような観測結果から、マイクロフレアが突発的に発生する

500万度以上の高温成分の形成に重要であろうと考えられています。

6. さらに小さな爆発現象

— ナノフレアを求めて

上述のように 10^{27} エルグ以上のマイクロフレアとコロナ加熱の関わりが観測的に明らかになり、観測的な興味はさらに小さな爆発現象に移っています。「ようこう」の画像からは、マイクロフレア現象を除けば、活動領域のコロナループは長い時間にわたって定常的に軟X線で輝いているように一見して思われます。すなわち、定常的に(もしくは定常的に見えるように)エネルギーの散逸が起きているようです。しかし、活動領域コロナ(ルー

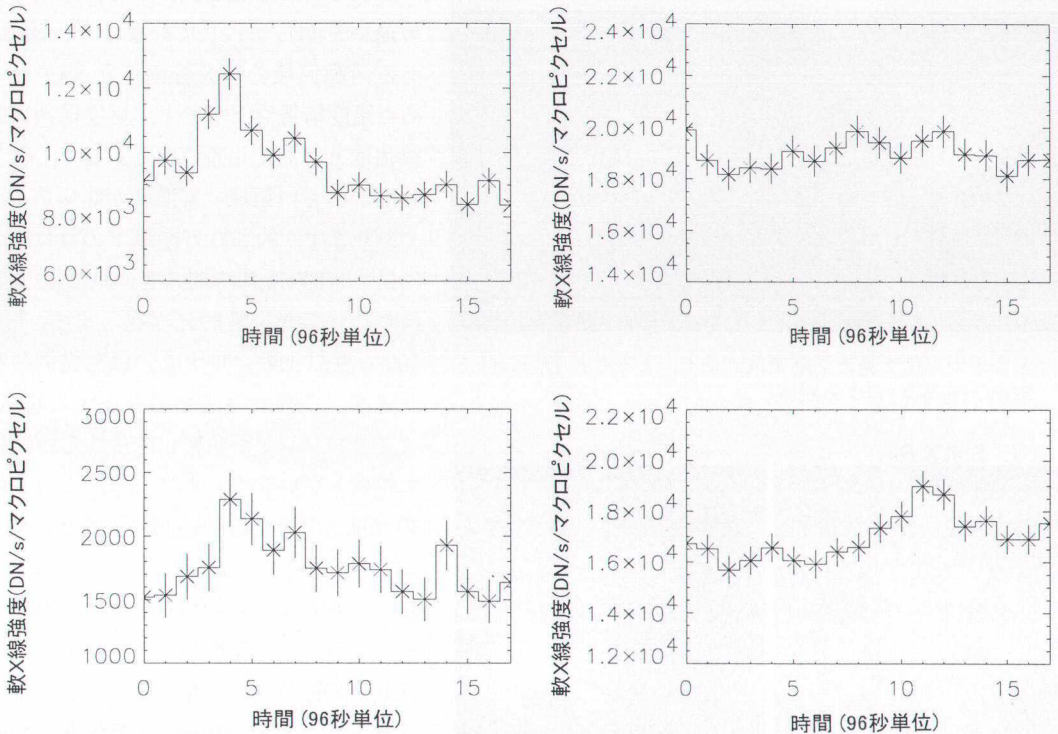


図7：活動領域コロナの場所毎の軟X線時間変化。10秒角サイズの領域ごとの28分間にわたる時間変化を示した。縦棒は入射光子数ゆらぎ(1 σ レベル)を示す。

プ)の場所毎の軟X線強度の時間変化を詳しく見てみると、小さいながら常に時間変化をしているのが分かります。図7は、ある活動領域の中心付近に位置する10秒角サイズの領域の軟X線強度の時間変化の一例です。右上の例を除いて、入射光子のゆらぎに比べて十分に有意な大きさの短時間変化を見ることができます。これらの時間変動(増光)のエネルギーを概算すると、 $10^{25} \sim 10^{27}$ エルグであり、マイクロフレア(トランジェント・ブライティング)に比べてナノフレア(10^{24} エルグ)により近いエネルギー解放です。興味深いことには、増光の軟X線強度が、増光の起きた場所の背景軟X線強度と4桁以上の強度変化にわたって相関を持つことです¹³⁾。背景強度はその場所におけるコロナの定常的な加熱率を示す指標と見ることができますので、この増光がコロナ加熱を解く鍵を握っているの

ではないかと考えられます。

また最近、静穏領域を主に観測しているSOHO衛星によって、静穏領域におけるナノフレアの探索が行われています。静穏領域は加熱率が活動領域に比べて2桁も小さいのですが、背景X線強度が弱いためにマイクロフレアよりも小さな爆発現象を容易に捉えることができると期待できます。SOHOは、 10^{25} エルグ規模の小爆発現象(EUVトランジェント・ブライティング、プリンカーと呼ばれています)が多数発生していることを発見しました。現在までに、これら小爆発現象の数頻度分布のべき数が2以上という結果と2以下という結果が発表されており¹⁴⁾、コロナ加熱との関わりがはっきりするには今しばらく時間がかかりそうです。

7. おわりに

「ようこう」衛星の飛翔によって、コロナ加熱について観測的な理解が進みました。とりわけ、マイクロフレアがどのようにコロナの加熱に関与しているかについて明らかになりました。また、コロナループ内の物理状態や加熱分布などについても新たな知見が得られつつあります。

マイクロ・ナノフレア加熱について、観測的な興味がより小さな爆発に移りつつあり、さらなる高空間分解能の観測が必要となりつつあります。また、コロナ加熱を総合的に理解するために、対流によるエネルギーの生成、コロナへのエネルギーの伝播、そしてコロナでのエネルギーの散逸の過程を統合的に研究することが重要です。エネルギーの生成・伝播は可視光による高分解能(0.2秒角程度)の磁場・速度場の観測が重要です。エネルギーの散逸はコロナでのダイナミクスを調べるために軟X線、極端紫外線域の高分解能(1秒角以下)の速度場の観測が重要となります。2004年初めに打ち上げが計画されているSolar-B衛星には、光球の磁場・速度場を0.2秒角で精密観測するための可視光・磁場望遠鏡、そしてコロナのダイナミクスを観測するためのX線望遠鏡とEUV撮像分光装置が搭載され、エネルギー生成・伝播・散逸を総合的に研究することが初めて可能となると期待されています。

参考文献

- 1) Parker, E., 1988, ApJ, 330, 474.
- 2) 柴田一成, 1996, 天文月報 vol.89, 2月号, p.60.
- 3) Shimizu, T. et al., 1992, PASJ, 44, L147; 1994 ApJ, 422, 906.
- 4) Crosby, N. et al., 1993, Solar Phys. 143, 275.
- 5) Lin, R. et al., 1984, ApJ, 283, 421.
- 6) Shimizu, T., 1995, PASJ, 47, 251.
- 7) Gary, D. et al., 1997, ApJ, 477, 958.
- 8) Nitta, N., 1997, ApJ, 491, 402.
- 9) Ichimoto et al., 1995, ApJ, 445, 978.
- 10) Yoshida, T. and Tsuneta, S., 1996, ApJ, 459, 342.
- 11) Sterling, A. et al., 1997, ApJ, 479, L149.
- 12) 渡辺鉄哉, 1996, 天文月報 vol.89, 7月号, p.283.
- 13) Shimizu, T. and Tsuneta, S., 1997, ApJ, 486, 1045.
- 14) Krucker, S. et al. 1998, ApJ, in press; Berghmans, D. et al. 1998, A&A, submitted.

Why is the Corona Hot?

— Micro - and Nano - flares and the Solar Corona —

Toshifumi SHIMIZU

National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo
181-8588

Abstract: The solar corona is the upper atmosphere which consists of faint, hot (>2 million K degree) plasma. Why is the corona so hot? This is one of fundamental questions in astrophysics.

Micro- and nano-flares have been recently considered as a mechanism for energy dissipation in the corona. The soft X-ray telescope on board the Yohkoh satellite enables us for the first time to investigate micro- and nano-flares. This article introduces some observational results of micro- and nano-flares, and discusses their implications for heating of the corona.