

論文内容の要旨

論文題目

X-ray Intensity Fluctuation of Solar Corona and Its Implications for Coronal Heating

(太陽コロナの X 線強度変動の研究とそのコロナ加熱への示唆について)

氏名

阪本康史

1 研究の背景と目的

太陽の外層大気であるコロナは、太陽表面温度が 6000 度であるにも関わらず、100 万度を越える高温に加熱されている。太陽には磁場が普遍的に存在していること、観測される明るいコロナは磁力線をなぞるように分布している (コロナループ) ことなどの観測事実から、磁気エネルギーがコロナ加熱のエネルギー源であると考えられているが、磁気エネルギーを熱化する過程は依然として明らかになっていない。コロナ中において、フレアと呼ばれる磁気エネルギーの爆発的な開放現象がしばしば観測されている。フレアはそのエネルギーにおいて多様であり、小規模なフレアほど頻繁に発生することが報告されている。これにヒントを得、パーカー (1988) は観測できないほど小さな無数のフレア (ナノフレア) がコロナを加熱していると提案した。観測衛星ようこうの軟 X 線望遠鏡 (SXT) の観測は、定常に見えるコロナループであってもその X 線光度に揺らぎを持つことを示した。これは突発的なエネルギー開放であるナノフレアがコロナを加熱していることを示唆する。本研究では、比較的高温 (> 200 万度) なコロナガスを観測している SXT のデータと、比較的低温 (~ 100 万度) なコロナガスを観測している TRACE 衛星の極紫外線望遠鏡のデータを用いる。それらのデータを用い、活動領域コロナに見られる光度揺らぎを観測的あるいは理論的に調査し、ナノフレア加熱説は正しいのか、どのような物理量が高温コロナループ (SXT ループ) と低温コロナループ (TRACE ループ) の違いを生んでいるのか、を明らかにすることが本研究の目的である。

2 SXT ループと TRACE ループの空間的時間的な関係

まず我々は、SXT ループと TRACE ループの活動領域中における空間分布を調べた。観測された画像に対してコロナループを強調するように画像処理を行い、ループを一本ずつ抽出し、その位置関係を比較した。その結果、活動領域の中心部は短く (~ 50 秒角) 明るい SXT ループで占められており、TRACE ループはその上を囲むように、あるいはその下を這うように分布しているという描像が得られた。同じ位置にある SXT ループと TRACE ループであってもその方向や曲率は多くの場合で異なり、偶然重なって見えているだけであると考えられる。

一見お互いに無関係に分布しているように見える SXT ループと TRACE ループであるが、今回我々は、TRACE で観測したときの光度は、その場所を SXT で観測したときの光度に相関した最小値を持つことを発見した(図4の点線)。この SXT 光度に依存した TRACE 光度の最小値の存在は、ナノフレア加熱説で説明可能である:「SXT で明るい場所では、コロナガスを 200 万度以上に加熱できるナノフレアがたくさん起きている。加熱されたコロナガスは、温度が 100 万度まで下ったときに TRACE で明るく見える。その結果、その場所は TRACE でもある程度明るく見える(図1)。」他方、SXT 光度にはそのような最小値は見あたらぬ。これはナノフレアのエネルギー開放が磁気リコネクションのような短時間の現象なため、コロナガスは TRACE で十分明るくなる前に 100 万度以上まで加熱されているのだと考えられる。

上述のナノフレア加熱説による説明は、SXT で見えたコロナガスは、ある冷却時間をおいてから TRACE でも見えることを示唆している。そこで我々は、30本の SXT ループにおける SXT の光度曲線と TRACE(140 万度に感度がある 195Å で観測)の光度曲線の相互相関係数を、様々な時間差で計算した。その結果、ふたつの光度曲線は 5,600 秒の時間差(TRACE の光度曲線が遅れる状況)をおいたときに一番大きな相関係数(〜0.3)を持つことがわかった(図2(a))。TRACE の光度曲線に 100 万度のコロナガスに感度を持つ 171Å で得られたものを用いると、時間差は 8,800 秒と長くなった(図2(b))。これらの時間差は、予測される冷却時間と大まかに一致する(図1の τ_r)。TRACE は冷却過程にあるコロナガスを観測していると考えられる。負の時間差(SXT の光度曲線が遅れる状況)では相関はほとんど現れていない。やはりナノフレアのエネルギー開放は短時間の現象であると考えられる。

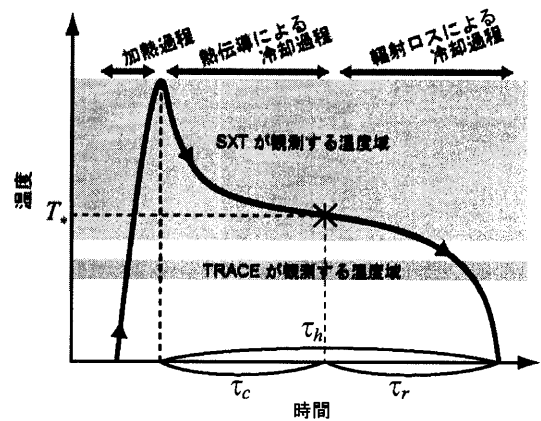


図1: ナノフレアによって加熱されたコロナガスの温度の時間変化。冷却過程ではまず熱伝導(冷却時間 τ_c)で、次に輻射で冷める(冷却時間 τ_r)。SXT は TRACE より高温のコロナガスを観測しているので、このコロナガスはまず SXT で、次に TRACE で観測される。

3 X線・極紫外線光度揺らぎの定量解析

次に我々は、SXT と TRACE で観測された光度曲線に見られる揺らぎを定量的に評価した。TRACE の観測で顕著な、ループの位置ずれによるにせの光度揺らぎを除去するための新しい方法を考案し、解析を行った。その結果、SXT の光度曲線の揺らぎは光子雑音と同程度なのに対して、TRACE の光度曲線の揺らぎは光子雑音より遥かに大きいことを発見した(図3)。SXT においても TRACE においても、観測された光度

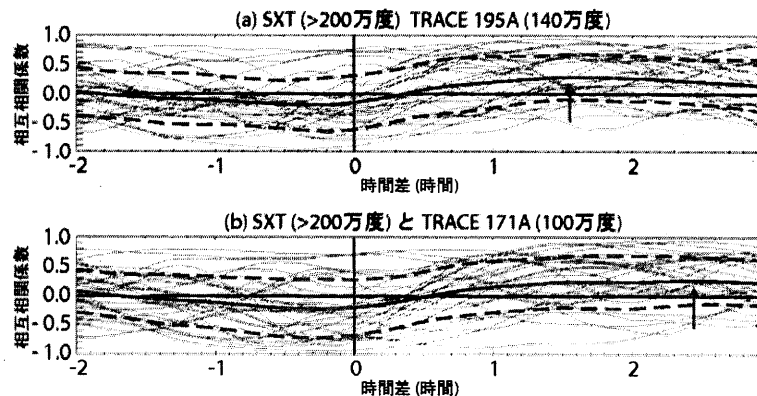


図2: SXT の光度曲線と TRACE の光度曲線の相互相関。正の時間差は TRACE の光度曲線が SXT の光度曲線に遅れている状況に対応する。30本の SXT ループを抽出し、その中に含まれるピクセルを総和して光度曲線を作った。灰色の線が個々の SXT ループに対応しており、紫の実線がその平均である。紫の破線は標準偏差を、紫の矢印は相関がもっとも良くなる時間差を示している。

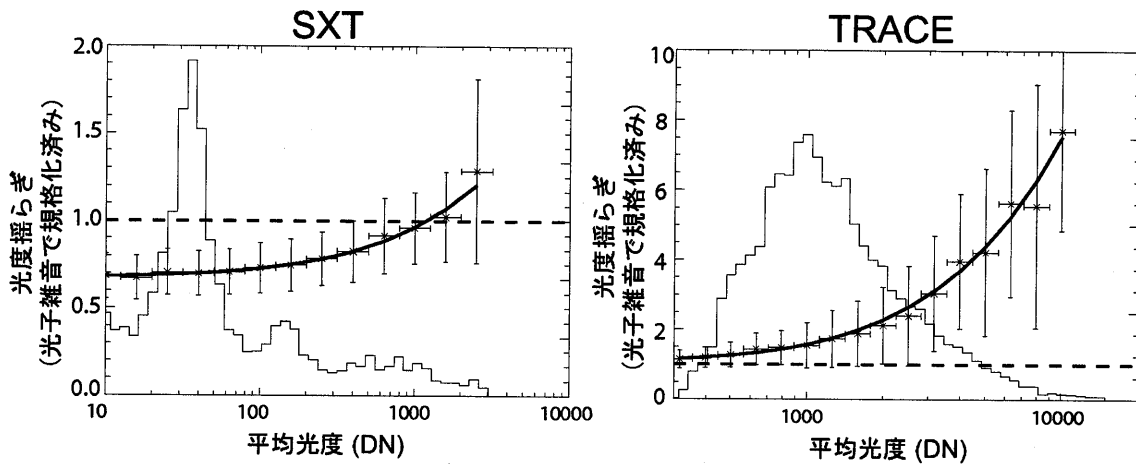


図 3: SXT と TRACE で観測された光度揺らぎ。光度のヒストグラムもプロットされている。SXT ではサブピクセル補間 (勝川と常田 2001) の影響で光子雑音より小さくなっている。TRACE では光子雑音よりはるかに大きい揺らぎが観測されている。

揺らぎ (光子雑音の寄与は減算済み) の標準偏差 σ_n は、平均光度 \bar{I} に対して $\sigma_n \propto \bar{I}$ の比例関係を示した。この揺らぎがナノフレア起源であるとする、ナノフレアのエネルギーは SXT の場合は 10^{25} エルグ程度、TRACE の場合は 10^{23} エルグ程度であるという結果が得られた。ナノフレアの発生頻度はほとんど同じであった (コロナループ本当り一秒間に 20 から 30 回)。

また我々は、光度曲線の自己相関係数を解析することで、揺らぎの典型的な継続時間を求めた。この継続時間はナノフレアの寿命に相当している。その結果、SXT で見える揺らぎの継続時間はかなり短い ($\lesssim 100$ 秒) ことがわかった。また、明るい場所ほど揺らぎの継続時間が長いことがわかった。明るいということはナノフレアのエネルギーあるいは発生頻度が大きいことを意味しているが、どちらの場合もナノフレアの寿命が長くなるとは考えにくい。このことから我々は、コロナループが砂山モデルに代表される自己組織化臨界の状態にある可能性を指摘した。もしそうならば、ナノフレアの正体は、さらに小さなフレア (ピコフレア) が雪崩のようにまとまって起きているものであり、大きなナノフレアは伝搬時間の分だけ長い寿命を持つことになる。

4 ナノフレア加熱モデルと観測との比較

最後に我々は、バクシュタインと勝川 (2000) のモデルを元に、磁気圧とガス圧の平衡を考えたナノフレア加熱モデルを開発した。解析的な計算の結果、 $\sigma_n \propto \bar{I}$ の比例関係は、(第 3 章で行ったように) ループ長や磁場強度などの物理量で多様性に富んだコロナループ群をまとめて解析すると生じうることを示した。このときの $\sigma_n \propto \bar{I}$ の比例係数はナノフレアのエネルギーに大きく依存する。次に我々はこのモデルを元にモンテカルロシミュレーションを行い、観測との比較の結果、SXT ループと TRACE ループの大きな違いは磁場の強さであることを発見した (図 4)。典型的には SXT ループは 40 ガウスの磁場を仮定することで、TRACE ループは 8 ガウスの磁場を仮定することで、その光度がうまく説明できる。SXT ループは磁場が強いので、圧力平衡を考えるとナノフレアで加熱されたコロナガスは小さな範囲に留まる。したがってフィリングファクター (コロナループ中を高温コロナガスが占める割合) は小さくなる。TRACE ループはその逆で、フィリングファクターは大きくなる傾向にある。次に光度揺らぎの比較から、SXT ループでは $10^{24} \sim 10^{25}$ エルグ程度のナノフレアが、TRACE ループでは 10^{23} エルグ程度のナノフレアがそれぞれ起きているとすると、観測された揺らぎを説明できることがわかった (図 5)。

我々のシミュレーションは他の観測結果も説明できる。第 2 章で発見した TRACE 光度の最小値 (図 4 の点線) は、磁場強度 $B = 40$ ガウスの計算結果におおまかに一致しているように見える。同じく第 2 章で SXT と TRACE の光度曲線が数千秒の時間差を持って弱い相関を示すことを発見したが、この相関はシミュレ

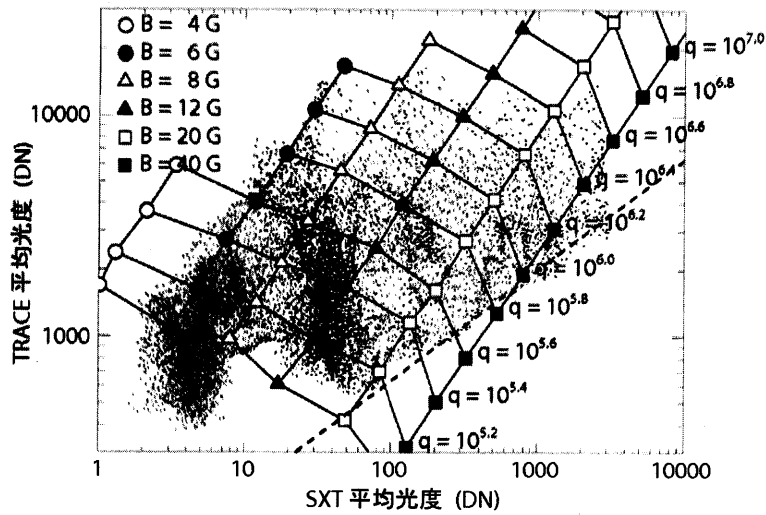


図 4: SXT で観測された平均光度と TRACE で観測された平均光度の関係。それぞれの点は観測データのピクセルに対応する。赤い点は SXT ループの中のピクセル、青い点は TRACE ループの中のピクセルであり、緑の点は両者が重なって見えているピクセルである。黒い点は明確なループ構造が見えないピクセルである。実線で結ばれた記号はシミュレーションの結果であり、磁場強度 B とエネルギー入射率 q を変化させたものである。TRACE ループに対応する青い点は、弱い磁場強度を用いた計算結果の周囲に分布し、SXT ループに対応する赤い点は強い磁場強度を用いた計算結果の周囲に分布している。

シミュレーションでも再現できた。やはり相関は低く、これは揺らぎの波形が SXT と TRACE で大きく違うためだと考えられる。第 3 章では SXT で見える揺らぎの継続時間がかなり短く見積られた。これは SXT の光度曲線が光子雑音の影響を大きく受けているからだとすることを明らかにした。我々のナノフレア加熱モデルは観測結果を良く説明できる。ナノフレアはコロナ加熱機構の有効な候補であると言える。

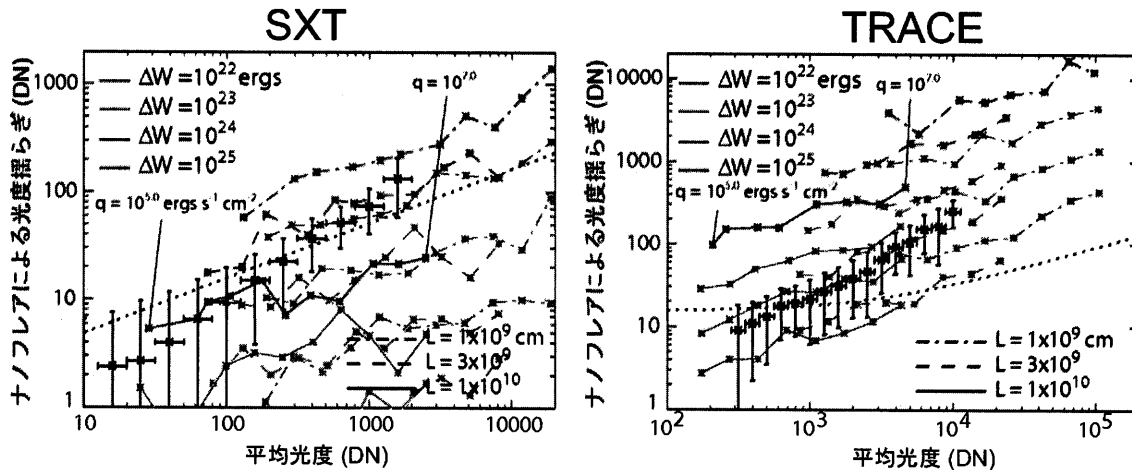


図 5: 観測された光度揺らぎ (エラーバー付の黒いアスタリスク) と、シミュレーションで得られた光度揺らぎ (色付きの線) の比較。点線は光子雑音に対応している。SXT のシミュレーションでは磁場強度 $B = 40$ ガウスを、TRACE のシミュレーションでは磁場強度 $B = 8$ ガウスを仮定している。ナノフレアのエネルギー ΔW が $10^{24} \sim 10^{25}$ エルグのとき SXT で観測された光度揺らぎを、 10^{23} エルグのとき TRACE で観測された光度揺らぎを説明できる。 L はループ長である。