

# 論文内容の要旨

論文題目

*Suzaku* Studies of Energetic Neutrons

from a Solar Flare and the Atmosphere

(「すざく」による太陽フレアおよび大気からの  
高エネルギー中性子の観測)

氏名 北口 貴雄

宇宙線加速に代表される非熱的なエネルギー解放メカニズムの解明は、宇宙物理学のメインテーマである。実際に非熱的なスペクトルを持つ宇宙線や、加速電子から放射される電波からガンマ線領域までおよぶ光子が、詳細に観測されてきた。特に光子は荷電粒子と違い、電氣的に中性なため銀河間磁場と相互作用せずに、地球まで直接に飛来する。そして加速された場所での情報を直接に得ることができるので、それら光子を生成した電子の加速メカニズムを知る重要なプローブを担ってきた。一方で陽子は電子に比べて微々たる光子しか放射しないので、陽子加速メカニズムの観測的理解はまだ不十分である。陽子加速を探る別の切り口として、加速陽子と原子核との衝突で生成される2次中性子を用いる方法が考えられるが、中性子は約15分の寿命で崩壊してしまい、さらに物質とあまり相互作用しないので、その検出は光子と比べるときわめて難しい。数ある加速現象の中で、太陽フレアは中性子を検出できうる唯一の加速サイトであり、これまで地上での中性子モニタを用いて、約10例の検出が報告されている。しかしこの観測結果はそれぞれの個性が強く、共通した特徴はまだ得られていない。

「すざく」は日本の第5番目の宇宙X線観測衛星で、2005年7月に鹿児島県から打ち上げられた。「すざく」には宇宙での非熱的現象を解明するべく、X線 CCD カメラ (XIS) と硬X線検出器 (HXD) が搭載されていて、0.2—600 keV という広帯域かつ、検出器のバックグラウンドを可能な限り下げることによって高感度を実現している。特に HXD は、井戸型のアクティブシールドの奥底に主検出器であるシリコン PIN 型半導体を置くことで、従来の硬X線装置の1桁下のバックグラウンドを、軌道上で達成した。それでもなお、バックグラウンドには Cut-Off Rigidity に連動して、2倍程度の変動が残った。この変動は、HXD のバックグラウンドには一次宇宙線の影響が及んで

いることを示している。

論文前半では、この原因不明のバックグラウンド変動を理解するために、モンテカルロ法を駆使し、さまざまな宇宙放射線を「すざく」衛星マスモデルに照射して、その応答をシミュレートした。その結果、極限まで切り詰めた HXD のバックグラウンドの正体は、宇宙線と地球大気との相互作用で生成された 2 次中性子であることを発見した。このシミュレーション結果により、中性子は主検出器内部のシリコン原子核に弾性散乱し、そして散乱したシリコン核の電離損失により、X線と区別のできない信号になることがわかった。「すざく」は太陽を観測することができないが、物質と相互作用をあまりしない中性子は、周囲のシールドを貫いて、主検出器まで到達することができる。そこで論文後半では、HXD の中性子感度を逆手にとり、太陽フレアに伴って生成された中性子を検出するという、半導体を用いた新しい観測方法に挑戦した。

「すざく」の観測データの中から、Xクラスのフレア（太陽X線フラックスが  $10^4 \text{ W/m}^2$  を超える巨大なフレア）の起きた時間帯をすべて抜き出し、フレアに同期した有意な増光があるか調べあげた。その結果、図 1 に示したように、2006 年 12 月 5 日に発生した X9 クラスのフレアに伴って、「すざく」の搭載機器はすべて増光を示し、HXD では最大で 20 cps の信号を検出していることがわかった。この時、「すざく」の視野は昼側の地球を向いていて、その視野の中に夜側の地球が入ってくると、カウントレートは下がっていった [図 1 の時間帯 (c)]。このことから、時間帯 (b) および (c) の増光は、太陽X線が地球大気で散乱されたものであると推測される。より詳しいスペクトルおよびイメージ解析でも、この推測を示唆する結果が得られた。一方で、「すざく」の視野すべてが夜側の地球になった時間帯 (d) でも、HXD には 3 cps のカウントレートが残っていて、それらは、衛星が日陰に入る時間帯 (e) と同時に不連続に落ち、普段のバックグラウンドレートに戻った。このことから、時間帯 (d) の信号は確実に太陽起因のものであることがわかった。図 2 は、時間帯 (d) の XIS および HXD のスペクトルを描いたものである。XIS のスペクトルに太陽由来の高階電離した鉄輝線および衛星物質由来の中性アルミニウム輝線は見られるが、大気元素からの輝線がないことから、確かに大気散乱は効いていないことがわかった。さらに、3 keV 以下が強く吸収されていることから、太陽X線が衛星表面を通過し、その際に低エネルギー光子は吸収され、高エネルギー光子は衛星物質で散乱して XIS にまで届いたものと推測できる。つまり、太陽X線の衛星による散乱が無視できないことを意味する。同様に HXD にも衛星散乱X線の寄与は無視できないと考えられる。そのため、モンテカルロ法を使用し、*RHESSI* 衛星の観測データから得たスペクトルモデルを「すざく」マスモデルに照射し、HXD の応答を調べた。その結果、14 keV 以上のスペクトルは再現できたが、それ以下ではまだ説明できない信号が残った。この残差は、入力スペクトルおよび衛星マスモデルの不定性を考慮すれば、説明できる可能性もあるが、太陽フレアで生成された中性子も、有力な候補となる。

この 14 keV 以下で説明できない信号が、中性子によって生じるか調べるために、再びモンテカルロ法を用いて、高速中性子と「すざく」および地球大気の相互作用をシミュレートした。その結果、直接に衛星構体に入ってきた太陽フレア中性子は、HXD の信号に十分に寄与し、一方で大

気と相互作用して生成された 2 次中性子は、無視できるほど小さいことがわかった。しかし、どちらのスペクトルも、観測したものに比べてかなりハードとなり、検出信号を説明することはできなかった。

以上により、構築したシミュレータを用いて、X線および中性子を衛星マスモデルに照射し、その応答を詳しく見てきたが、HXD の検出信号を完全には説明することができなかった。それでも得られた中性子スペクトルがハードになることを利用して、ソフトな散乱X線およびHXDバックグラウンドの両方が弱くなる高エネルギー側で、太陽フレア中性子の上限フラックスを求めると、地球大気上空で  $0.3 \text{ neutrons/s/cm}^2$  となり、地上中性子モニタから求めた上限値の半分になった。したがって、「すざく」は地上モニタに劣らない中性子検出感度を持っていることが証明された。また  $100 \text{ MeV}$  以下の中性子は、地球大気によりひじょうに強く減衰されることが知られている。「すざく」は太陽からの中性子を直接に測ることができるので、特に  $100 \text{ MeV}$  以下の中性子に対して検出効率が高く、地上モニタと違ったユニークな観測ができることがわかった。実際に過去の検出例を基に「すざく」の模擬観測を行うと、図3のように  $5\sigma$  を越える有意性で中性子を検出できることを示した。これから太陽活動が活発になるにつれて、巨大フレアも起きやすくなるので、「すざく」HXD は近い将来に確実に太陽中性子を検出し、陽子加速に対して新たな知見をもたらすことが期待される。

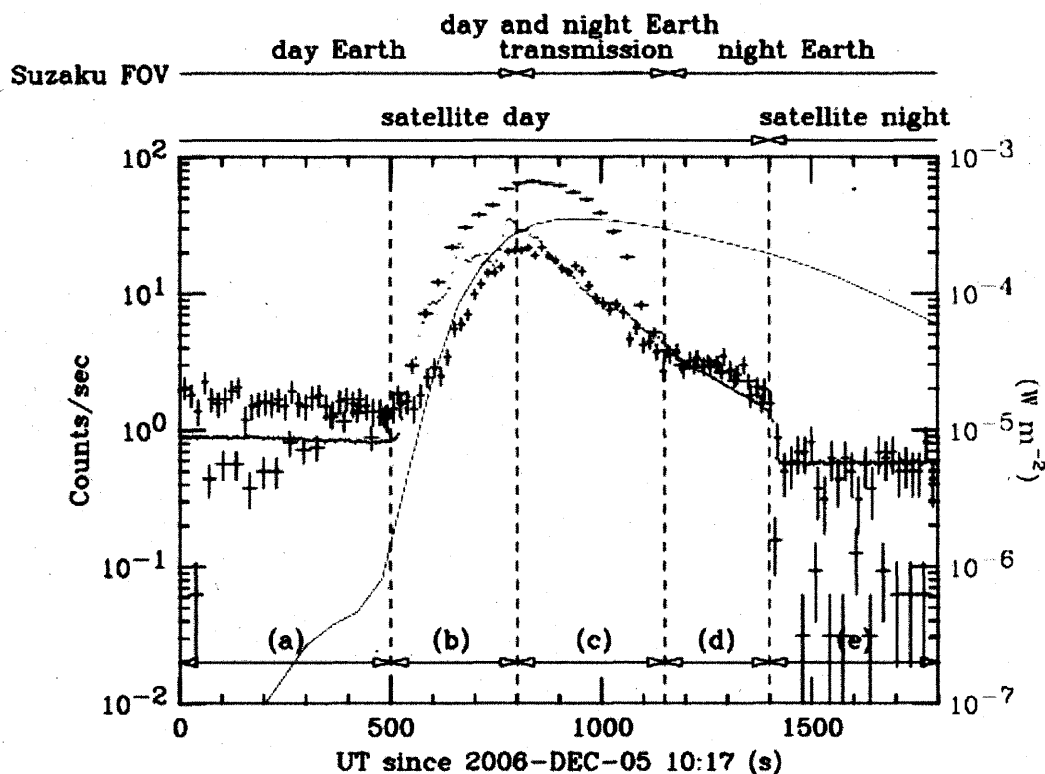


図1. 「すざく」およびGOES衛星によるX線ライトカーブ。青がHXD、赤がXIS、水色がWAM、緑色がGOES-12のカウントレートを表す。

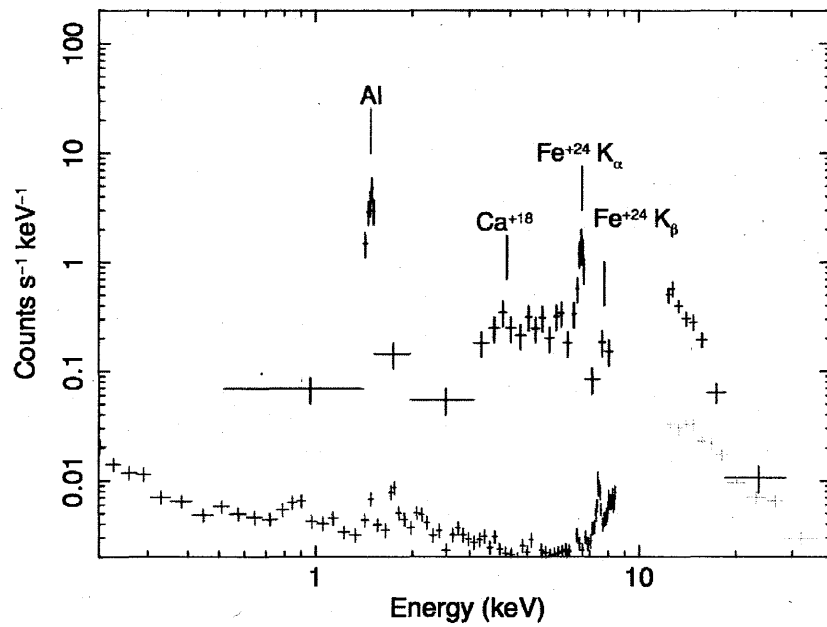


図2. 図1の時間帯 (d) から作成した XIS (赤) および HXD (青) のスペクトル。それぞれのバックグラウンドを灰色で示している。

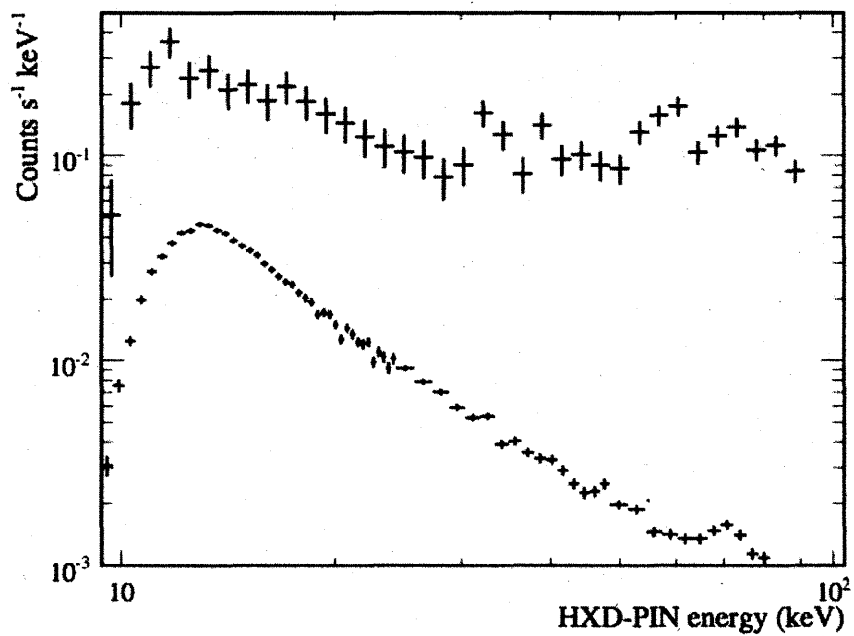


図3. 2005/09/07に起きた X17 太陽フレアからの中性子を、HXD で観測した時の予想スペクトル (赤)。比較のため、HXD の典型的なバックグラウンド (黒) も示してある。仮定した中性子パラメータは、地上での観測値 (Watanabe+06) を参照した。