

# 論文審査の結果の要旨

氏名 北口貴雄

相対的速度の高エネルギー荷電粒子を作り出す粒子加速現象は、宇宙の様々なサイトに様々な規模で存在し、宇宙の重要な活動性の一つである。太陽表面ではフレアに伴って $10^{22-25}$ Jの巨大なエネルギーが粒子加速に使われる。太陽は最も近距離にある恒星であるのでこれは粒子加速の観測的研究の重要な機会である。太陽フレアに伴って放出されるX線の「ようこう」衛星等による観測によって、磁気リコネクションによるエネルギー放出から粒子加速・X線放射に至る過程の理解がすすんできた。X線観測が見ているのは電子であるが、フレアでは陽子も同時に加速されている。これは核ガンマ線の観測から示唆されるが、陽子加速の理解はあまり進んでいない。加速された陽子の一部は惑星間空間に放出され、その一部は地球近傍でも観測されている。しかし、陽子フラックスやエネルギースペクトルは惑星空間磁場に大きく影響され、地球近傍の観測から加速サイトでの陽子スペクトルを推定する事は困難である。これに対して $\beta$  decayせずに到達した中性子は磁場の影響を受けないので加速サイトでの中性子スペクトル、さらにはそれを生成した陽子のスペクトルを保存していると考えられる。このような動機から太陽フレアに伴う中性子を検出する試みが行われてきた。しかし、これまでのところ、SMM衛星による5例、地上の中性子モニター装置による約10例の報告があるのみで、統計的な議論を行うには全く数が不足している。

X線天文衛星「すざく」に搭載された硬X線検出器 (HXD) は、徹底したアクティブシールドにより荷電粒子による非X線バックグラウンド (NXB) を極限まで小さくした検出器である。本論文で論文提出者は、まず、モンテカルロシミュレーションを用いてHXDのNXBとして残っているカウントの大多数が、宇宙線により生成された大気中性子であることを明らかにした。この成果をもとに、HXDを用いて太陽フレアに伴う中性子を検出する可能性を検討した。HXDの視野は太陽方向を向いていないが、太陽フレアに伴って放出される強力なX線は、地球大気や衛星内で散乱してHXDに信号を作り出す。前者の強度は、HXDの視野方向の太陽X線に照らされた地球大気の柱密度に比例し、それは衛星の軌道運動に伴って変化するので、適当な観測時間帯のみを観測データとして用いる事で避ける事ができる。論文提出者は、モンテカルロシミュレーションを用いて、衛星内およびHXD検出器自身で散乱した太陽フレアX線がHXDでどのように観測されるかを詳細に調べた。次に、太陽フレア中性子が大気および衛星内で散乱されながらHXD検出器な信号を作り出すかを、同様にモンテカルロシミュレーションにより調べた。その結果、X線は高いエネルギーでexponential的にdecayするソフトなスペクトルとして観測されるのに対して、中性子は加速サイトでのスペクトルにほとんどよらずに、フラットなハードなスペクトルの信号を作り出すこと

がわかった。従って、高エネルギー側で中性子の放射が卓越し、X線と中性子の信号を明確に分離できる可能性が高い。

論文提出者は、このようなシミュレーションを2006年12月5日におきたX9クラスのフレアのデータに適応した。HXD は、12-20 keVに明確な信号を検出した。12-14keVについては太陽X線スペクトルに不確定性があるが、14-20 keVについては、絶対強度、スペクトルともに衛星内で散乱した太陽X線によりよく説明できた。20 keV以上には、NXBの不確定性に比べて有意な信号は存在しなかったが、これを用いて地球大気上空での中性子量のupper limit として $0.3 \text{ neutrons s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ を得た。これは地上の中性子モニターと同等の感度である。

本論文は8章からなる。第1章ではイントロダクションとして論文全体の流れを記述し、2章でこれまでの太陽フレアの観測と理解、さらに中性子の相互作用をレビューしている。3章では、本論文で用いた観測装置であるすざく衛星について、HXDを中心に記述している。第4章では HXDの軌道上での NXB について モンテカルロシミュレーションを行い、その起源が大気中性子であることを初めて明らかにした。第5章では、太陽フレアの観測データのデータ処理について延べ、第6章は HXD の信号の時間変化、スペクトルを示し、X線散乱と中性子のシミュレーションと比較し、太陽中性子フラックスの上限を求めた。最後の第7章では、得られた結果について地上観測との比較を含めて議論し、将来の観測の可能性を検討した。

これまでは太陽活動が低かったこと、2006年半ばまでHXDのパラメータ設定が太陽フレア観測に適していなかったことから、本解析を適応可能な太陽フレアデータは1つしかなかった。今後は太陽の活動度が増大するので、多くの太陽フレアについて、中性子を検出したり、意味のあるupper limitが得られることが期待される。実際に、あるフレアについて地上モニターから推定された中性子フラックスを仮定しシミュレーションを行うと、5シグマの有意性で中性子が検出されることが示された。

以上、本論文は太陽フレア中性子を高い感度で検出する新しい観測手段を確立した。今後「すざく」衛星が太陽活動期に観測を続けることによって、これまでの全観測数を凌駕する数の観測が期待される。さらに本成果は将来のX線天文衛星にも適応可能である。したがって、本論文は今後のハドロン加速の観測的研究に大きく貢献する、新規かつ意義の大きな研究であり、博士（理学）の学位に相応しいものである。

また、本論文の研究は、牧島教授、中澤講師との共同研究であるが、すざく衛星のデータ処理、X線および中性子のシミュレーション計算、得られた結果の解釈にいたるまで、論文提出者が主体となって行ったことを確認している。このため、論文提出者の主体性と寄与は博士論文として認めるのに十分であると判断する。

したがって、本論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。