

## 論文審査の結果の要旨

氏名 岡本幸平

太陽は磁気リコネクションにより、太陽フレアと呼ぶ爆発現象（典型的には  $10^{26} - 10^{32}$  erg/flare 程度のエネルギーが解放され、その持続時間は 100 - 1000 秒程度）を起こすと考えられている。太陽フレアに伴い、軟 X 線、硬 X 線、ガンマ線、電子、原子核宇宙線（主として陽子）が衛星等で観測されている。その際に、陽子の加速機構として統計加速、衝撃波加速、コヒーレント加速等が提案されているが、その加速機構については解明されていない点も多い。太陽フレア起源の陽子が太陽近傍の物質（主として陽子）と衝突し、 $\pi^{\pm}$  が生成され、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu}$  ( $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_{\mu} \text{bar}$ ) あるいは  $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_{\mu} \text{bar}$  ( $\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \text{bar} \nu_{\mu}$ ) 崩壊過程により、10 - 1000 MeV 領域のニュートリノ ( $\nu$ ) が太陽方向から飛来することになる。太陽フレア  $\nu$  の検出に成功すれば、太陽フレアに伴う陽子加速機構に関する新しい知見が得られるが、これまで太陽フレア  $\nu$  で統計的に有意な検出結果は報告されていない。

本論文は、5 万トンの水チェレンコフ型観測装置スーパーカミオカンデ検出器で 1996 年から 2018 年に観測された  $\nu$  データを用いて大きな太陽フレアと同期する  $\nu$  事例を探索した研究である。

本論文は 8 章からなり、第 1 章は導入部で、太陽フレア現象と  $\nu$  に関する説明、本論文の動機と意義、第 2 章はスーパーカミオカンデ検出器のハードウェア構成詳細、第 3 章は太陽フレアと同期する  $\nu$  事例を探索する際の時間窓の決定方法、第 4 章はスーパーカミオカンデ検出器の様々な装置較正、第 5 章は太陽フレア  $\nu$  のモンテカルロシミュレーション、第 6 章は低エネルギー  $\nu$  データと高エネルギー  $\nu$  データのデータ選別過程についての詳細、第 7 章は太陽フレア  $\nu$  の探索の結果、第 8 章は結論について述べている。

スーパーカミオカンデ検出器は、高速荷電粒子が水中で発するチェレンコフ光を約 11000 本の直径 20 インチ光電子増倍管で検出し、その電荷及び時間情報からチェレンコフリングを引き起こした粒子を識別し、そのエネルギー、方向、発生場所を算出するリアルタイム計測実験である。観測データは、太陽  $\nu$  解析用の低エネルギー  $\nu$  データ (16 MeV から 100 MeV) と大気  $\nu$  fully-contained 事例解析用の高エネルギー  $\nu$  データ (100 MeV 以上) に分かれている。観測期間中に

23 事例の太陽フレア (X5.0 以上) が太陽の表側 (地球から見える側) で起こり、10 事例の太陽フレア (CME の速さが 2000 km/s 以上) が太陽の裏側 (地球から見えない側) が起こった。それらの中で、スーパーカミオカンデ検出器が稼働中に起こったのは表側で 20 事例、裏側では 8 事例であった。表側の太陽フレアに関しては太陽フレアを含む可変時間窓 (典型的に 100 から 2000 秒程度)、表側に関しては固定時間窓 (約 7000 秒) を設定してその時間窓に同期する $\nu$ 事例を探索した。

高エネルギー $\nu$ データ中、表側の太陽フレア 2 事例 (2003 年 11 月 4 日及び 2017 年 9 月 6 日) にそれぞれ 1 事例の $\nu$ 事例が同期したが、それぞれの太陽フレアについて 0.2 事例、0.12 事例の大気 $\nu$ 背景雑音が予想される。2003 年 11 月 4 日に観測された X28 の太陽フレアは約  $10^{34}$ erg のエネルギーを放出した最大の太陽フレアで、その時の $\nu$ フルエンスの上限値として 90%信頼度で  $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ flare}^{-1}$  が得られ、Fargion らの理論モデル予想値 (約  $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ flare}^{-1}$ ) を否定した。また、裏側で起きた太陽フレアでは、2 事例の太陽フレアに 2 事例の $\nu$ 事例が、2 事例の太陽フレアに 1 事例の $\nu$ 事例が同期した。しかし、裏側の太陽フレアには 0.62 事例/flare の大気 $\nu$ 雑音が予想される。従って、表側・裏側ともに、雑音以上に統計的に有意な信号は観測されなかった。また、低エネルギー $\nu$ データ中、太陽フレア (表側及び裏側) に同期する事例はなかった。その結果、16 MeV - 100 MeV で太陽フレア $\nu$ フルエンスの 90%信頼度の上限値として  $1.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ flare}^{-1}$  を得た。さらに、他の観測結果との比較のために、モデルに依存しない $\nu$ フルエンスの上限値を求めた。この上限値は過去の結果を数倍から 10 倍程度上回る、世界で一番厳しい制限である。

以上のように、本論文はスーパーカミオカンデ検出器を用いて太陽の表側で発生する太陽フレア $\nu$ に関して世界最高のフルエンス上限値を与える研究であるとともに、太陽の裏側で生ずる太陽フレア $\nu$ を世界で初めて探索した研究であり、宇宙線物理学に大きく貢献するものである。

なお、本論文の実験はスーパーカミオカンデ実験という大きなグループ実験であるが、論文提出者が主体となって太陽の裏側で生ずる太陽フレア $\nu$ 探索を世界で初めて行った。解析時間窓を工夫するとともに、最も太陽フレア $\nu$ 検出可能性の高い、大きな太陽フレアに着目して、 $\nu$ 事例との相関を探索した独創的な研究結果であり、論文提出者の論文に関する寄与が十分であると判断した。また、共同実験代表者及び関連共同研究者から論文内容の結果を学位論文として提出することについて了承を得ているものであることを確認した。

従って、審査員一同は博士 (理学) の学位を授与できると認める。