

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13942

研究課題名（和文）太陽g-mode振動を起源とする太陽ニュートリノの周期的な強度変化の探索

研究課題名（英文）Search for periodic variation of solar neutrino flux caused by g-mode oscillations in the Sun

研究代表者

中野 佑樹（Nakano, Yuuki）

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：70781889

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：Super-Kamiokande検出器における太陽ニュートリノの観測データを用いて、太陽g-mode振動に由来する太陽ニュートリノ到来強度の周期的な変動を探索する研究を実施した。このような研究を達成するためには、純水（Gd溶解水）中に含まれる放射性物質ラドンの分析、および宇宙線ミュオンに由来する放射性物質（同位体）の評価が必要である。本研究では、中空系膜モジュールを新規に開発し、ラドン分析システムを構築した。また、宇宙線ミュオンの電荷比や、宇宙線ミュオンの到来頻度の周期的な変動を評価した。今後、今回の研究で得られた知見から物理感度を評価し、実際のg-mode振動探索を実施する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽内部で生じているとされている太陽g-mode振動は存在が予言されているものの、光学的には未だに観測例の報告が無い。太陽ニュートリノを用いることで、光学的には観測することができない太陽内部を伝搬する太陽g-mode振動を探索できる可能性がある。本研究課題では、その探索に向けた基礎研究を実施した。今回の研究では、太陽ニュートリノ信号の周期的な変化を部分的に評価し、太陽g-mode振動探索にはさらなる放射性物質の評価が必要であることを示した。今後、太陽ニュートリノ観測を通して、太陽内部の運動や核融合反応の反応率など、太陽内部の情報を明らかにする研究につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Using the data of solar neutrino observations at the Super-Kamiokande detector, we have conducted a study to search for periodic variations in the intensity of solar neutrino originating from solar g-mode oscillations. In order to accomplish such a study, it is necessary to analyze the radioactive radon in pure water (Gd-dissolved water) and to evaluate radioactive materials (isotopes) induced by cosmic ray muons. In this study, a new fiber membrane module was developed and the measurement system was constructed. In addition, we measured the charge ratio of cosmic ray muons and evaluated the periodic fluctuation of cosmic ray muons. In the future, the physical sensitivity will be evaluated based on the findings of this study, and an actual g-mode oscillation search will be conducted.

研究分野：ニュートリノ天文学

キーワード：太陽ニュートリノ Super-Kamiokande 太陽g-mode振動

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動実験により、3世代ニュートリノ振動のフレームワークが確固たるものになり、次のステップとして宇宙創成の謎や宇宙でのニュートリノの役割に関する議論がなされている。岐阜県飛騨市に建設された Super-Kamioknade 検出器 (SK 検出器) は 1996 年のデータ取得開始以降、25 年を超える期間でニュートリノ観測を実施してきた。特に、カナダの SNO 実験の物理結果と組み合わせることで、太陽ニュートリノ問題がニュートリノ振動によって説明できることを示すなど、太陽ニュートリノ観測では大きな貢献を行ってきた。

太陽に代表される恒星は、天体中心で生成される核融合起源の熱エネルギーが運動エネルギーに変換されることにより、天体自身の振動現象を起こすことが知られている。これらは、p-mode 振動や g-mode 振動と呼ばれ、その振幅や周波数が、太陽内部の密度情報に依存し、太陽という天体内部を伝搬している。図 1 にその概念図を示す。この内、太陽表面の圧力変化によって生じる p-mode 振動は太陽 5 分振動として知られている。光学的な観測から、p-mode 振動の周波数から、太陽表面付近の密度が理解された。一方、太陽では重力を起源とする g-mode 振動が生じていると考えられているが、その振幅が対流層で指数的に減少してしまうことから、太陽表面で十分な振幅を持つことができず、光学的な観測では発見に至っていない。

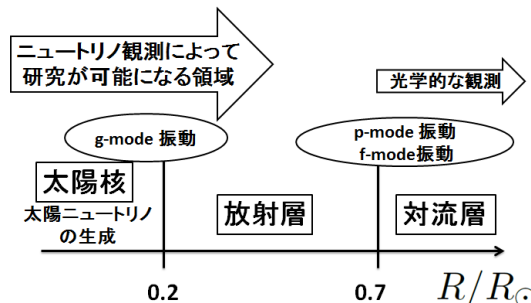


図 1: 太陽を伝搬する振動現象の概略図。

ニュートリノは高い透過性を持つために、光学的には観測できない天体内部の情報をリアルタイムで理解できる唯一の手段となっている。太陽の場合、先述の太陽 g-mode 振動により太陽核領域での局所的な密度 (温度) 変化が期待され、この結果核融合反応が促進、抑制されると考えられている。特に SK 実験で観測可能な 8B 太陽ニュートリノは放出強度が周期的に 20 倍程度に増減する、という予想もある。従って、SK 実験で観測された太陽ニュートリノの観測時刻情報から、何かしらの周期的な信号を抽出することができれば、天体内部の運動に関する新たな知見を得ることが考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、SK 実験で観測された太陽ニュートリノ事象の観測時刻情報から周期的な信号を探索する。そして、太陽ニュートリノの生成率が周期的に変動しているかを明らかにする。一方で、太陽ニュートリノの観測データに含まれるバックグラウンド事象の精査を行うため、水中のラドン濃度分析に関する検出器開発、及び宇宙線ミュオンに関する研究を行った。

### 3. 研究の方法

SK 実験では、太陽ニュートリノと超純水中の電子の弾性散乱によって、反跳された電子が放出するチェレンコフ光を壁面に設置した光電子増倍管で検出することで、太陽ニュートリノを観測している。このとき、弾性散乱の特徴により、反跳された電子は太陽方向の情報を持っているため、図 2 のような太陽ニュートリノの信号を取得することができる。

本研究では、まず Super-Kamioknade 検出器の 5805 日分の観測データに対する物理解析を実施した。この研究により、Super-Kamioknade 実験のエネルギースケールの不定性や、検出器内部での background rate の一様性、時間変化などを評価し、世界最高精度での太陽ニュートリノ振動パラメーター測定を実施した。次に、この 5805 日の観測データを用いて、観測データの中に 5 日より長い周期を持つ信号が存在するかを調査した。

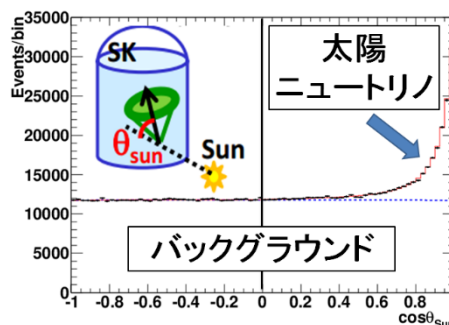


図 2: 太陽ニュートリノ信号とバックグラウンド事象

### 4. 研究成果

g-mode 振動よりも長い周期をもつ信号を探索するため、1996 年から 2018 年までに取得され

た 5805 日分のデータ太陽ニュートリノを 5 日毎に binning したサンプルを作成した。その後、このサンプルに Lomb-Scargle 法を適用し、周期性を調査した。周期に関する Power-spectrum によると、太陽公転周期によって期待される太陽ニュートリノ信号の増減を除くと、周期的な信号を発見することはできなかった。この結果を用いて、太陽ニュートリノ信号の周期的な振動の振幅に対して上限値を設定した。図 3 に振幅に対する 90% confidence level の上限値の結果を示す。今回の物理解析では、1 週間を超える周期的な太陽ニュートリノ信号は 5%未満の振幅しか持てないことを示した。今後、Hyper-Kamiokande などの将来の検出器でさらに精度の高い観測が期待される。

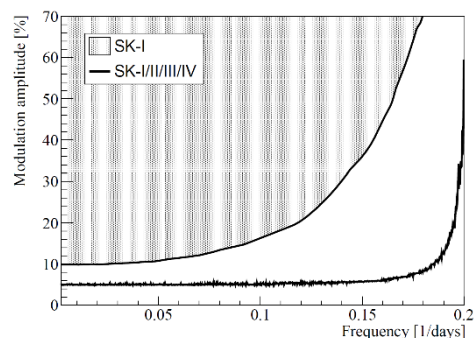


図 3: 太陽ニュートリノ信号の観測頻度の振幅に対する上限値(90% C.L.)の結果。

一方で、本来の目的である g-mode 振動探索では、数時間程度の振動周期を探索する必要がある。この時に、太陽ニュートリノは事象毎にバックグラウンド事象と区別がつかず、図 2 のように統計的に太陽ニュートリノ観測が実施されている状況である。特に、主要なバックグラウンドとして、純水 (Gd 溶解水) 中に含まれる放射性物質 (radon) によるバックグラウンド事象、宇宙線ミュオン原子核の原子核破砕に由来する放射性物質のバックグラウンドの評価が不十分であることがわかってきた。

ラドンに由来するバックグラウンド事象では、Super-Kamiokande の水タンク中で水流や水温を起源とするラドン濃度の不均一性が分かった。これまでのラドン濃度測定では、ラドンを濃縮する手法を用いていたため、20 日から 30 日程度の間隔でしかラドン濃度を評価できていなかった。そのため、位置による不均一性を継続的に評価することが困難であった。このような状況を改善するために、本研究では連続的に水中のラドン濃度をモニターできる中空糸膜モジュールを用いたラドン検出器を新しく開発した。既存の濃縮手法と比較することで、中空糸膜モジュールによる測定に向けた性能評価も実施した。この結果、濃縮する手法とほぼ同等の測定感度を持った分析システムを構築することができた。以前の研究費で準備した 3 台のラドン検出器に対して、中空糸膜モジュールを準備し、大規模な測定システムを構築した。このシステムに関する学術論文を準備中である。また、将来的には、ラドン濃度の分析結果を太陽ニュートリノ解析のモンテカルロシミュレーションに導入し、太陽 g-mode 振動の探索にどの程度の影響があるかを評価する予定である。

宇宙線ミュオン由来の放射性物質のバックグラウンドの評価のため、まずは宇宙線ミュオンの電荷比を評価した。負ミュオンは酸素原子核に捕獲されて原子核反応を起こし、窒素 (16N) や炭素 (15C) などの放射性原子核 (同位体) を生成する。一方で、SK 検出器は到来する宇宙線ミュオンの電荷を知ることが出ないため、放射性物質の生成量を見積もることが難しかった。今回、宇宙線ミュオンのうち、SK 検出器の内部で止まり、崩壊電子を放出する事象を選び、その時定数から正ミュオンと負ミュオンの相対比を測定した。副次的に、崩壊電子の放出方向から宇宙線ミュオンの偏極を世界最高精度で決定した。また、次のステップとして、宇宙線ミュオン由来の放射性物質の総量を調べるため、宇宙線ミュオンの到来頻度の時間変化を評価した。その結果、宇宙線ミュオンの親粒子の内、パイオンとケイオンの相対割合を評価した。これらの宇宙線ミュオンの研究成果は国際会議で報告され、特に電荷比と偏極の測定結果に関しては pre-print (査読中) として公表されている。今後、宇宙線ミュオンによる放射性物質の総量を様々な simulation を用いて評価し、太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドの総量を評価する。

以上のように、太陽ニュートリノを用いて太陽 g-mode 振動探索を実施するにあたり、バックグラウンドの理解が必要である。その主要な 2 つのバックグラウンドの分析手法、評価方法の準備が整い、いよいよ太陽ニュートリノのバックグラウンドの総量を評価できる時点まで達成できたと考える。今後、この研究課題で得られた知見をもとに、さらにモンテカルロシミュレーションを開発、改善し、太陽 g-mode 振動探索を実施する予定である。

また、この研究課題を通じて、太陽模型構築を専門にする研究者、及び恒星振動を専門にする研究者との協力関係を築くことができた。この研究課題の終了後、基盤研究(B)として太陽 g-mode 振動探索を継続、実施する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Okamoto Kohei, Nakano Yuuki, Ito Shintaro	4. 巻 395
2. 論文標題 Search for neutrinos associated with solar flare	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pos (ICRC2021)	6. 最初と最後の頁 1299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.1299	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kitagawa Hussain, Nakano Yuuki, Koshio Yusuke, Super-Kamiokande Collaboration	4. 巻 395
2. 論文標題 Measurements of the charge ratio and polarization of cosmic ray muons with the Super-Kamiokande detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pos (ICRC2021)	6. 最初と最後の頁 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.0360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takeda Atsushi, Nakano Yuuki, Okamoto Kohei, Takeuchi Yasuo	4. 巻 2156
2. 論文標題 Development of high-sensitivity radon detector in water for neutrino physics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012243 ~ 012243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mizukoshi K., Maeda T., Nakano Y., Higashino S., Miuchi K.	4. 巻 16
2. 論文標題 Scintillation light increase of carbontetrafluoride gas at low temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P12033 ~ P12033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/12/P12033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kotsar Y, Nakano Y, Takeuchi Y, Miuchi K	4. 巻 2022
2. 論文標題 Evaluation of the radon adsorption efficiency of activated carbon fiber using tetrafluoromethane	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Current status of the Super-Kamiokande and SK-Gd
3. 学会等名 The 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Recent progresses of the radon detector with an electrostatic collection
3. 学会等名 Low Radioactivity Techniques workshop (LRT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Search for neutrinos associated with solar flares in the Super-Kamiokande detector
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Measurements of the charge ratio of cosmic-ray muons with the Super-Kamiokande detector
3. 学会等名 Unreaveling the history of the universe and matter evolution with underground physics (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Study of neutrinos from the Sun in the Super-Kamiokande detector
3. 学会等名 The XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 中野佑樹
2. 発表標題 Super-Kamiokande検出器を用いた太陽からのニュートリノ観測
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 中野佑樹, 関谷洋之, 竹内康雄, Guillaume Pronost
2. 発表標題 ラドン検出器における湿度依存性の系統的な評価 (3)
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 中野佑樹, 関谷洋之, 竹内康雄, Guillaume Pronost
2. 発表標題 ラドン検出器における湿度依存性の系統的な評価 (2)
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Search for neutrinos associated with solar flares in the Super-Kamiokande detector
3. 学会等名 Particle Acceleration in Solar Flares and the Plasma Universe -- Deciphering its features under magnetic reconnection (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Search for neutrinos associated with solar flares in the Super-Kamiokande detector
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」2021年領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Recent status of SK/SK-Gd
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrino
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野 佑樹 for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来のニュートリノ探索
3. 学会等名 2021年度 ISEE 研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野 佑樹, 兼村 侑希, G. Pronost, 関谷 洋之, 竹内 康雄
2. 発表標題 ラドン検出器における湿度依存性の系統的な評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Yuuki NakanoのHP <a href="https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ynakano_s/index.html">https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ynakano_s/index.html</a> <a href="http://www3.u-toyama.ac.jp/astropp/ynakano/budget/periodic_change.html">http://www3.u-toyama.ac.jp/astropp/ynakano/budget/periodic_change.html</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------