

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17880

研究課題名(和文) 太陽ニュートリノの観測時刻情報を用いた太陽g-mode振動の探索

研究課題名(英文) Search for g-mode oscillations in the Sun using the detection timing information of solar neutrinos

研究代表者

中野 佑樹 (Nakano, Yuuki)

神戸大学・理学研究科・特命助教

研究者番号：70781889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：Super-Kamiokande検出器で観測される太陽ニュートリノデータを用いて、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。最初に、Lomb-Scargle法を用いて、数か月程度の周期の信号を探索したが、太陽ニュートリノ観測データに有意な信号は発見できなかった。その後、典型的なg-mode振動の周期である20-30分程度の信号を探索するために、太陽ニュートリノ観測データのバックグラウンド事象に周期的な成分が存在するかを調査した。特に、放射性物質ラドン由来の事象と宇宙線ミュオンの核破砕由来の事象の周期性に関する研究を推進した。

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、未だに観測例の報告がない。これは、太陽内部の情報は、光学的に観測することができないことに由来する。したがって、本研究では、Super-Kamiokande実験で取得された太陽ニュートリノ観測データから、周期的な信号を探索することで、透過性の高いニュートリノを用いて太陽内部の運動(g-mode振動)のを探索することを試みた。いろいろな周期の信号を探索するために、バックグラウンド事象の周期性の評価が必要であることがわかった。今後、太陽内部の運動や宇宙線と太陽活動との相関関係を明らかにする研究に道を開くと期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to search for the periodic variation of solar neutrino flux originated the solar g-mode oscillation, solar neutrino data taken by the Super-Kamiokande detector was analyzed. At first, periodic signals whose phase is typically a few month are searched by using Lomb-Scargle method. However, no periodic signal was found in the solar neutrino data. To search for periodic signals of g-mode oscillations (typically 20-30 minutes), periodicities of background events in the solar neutrino data are investigated. One of background events is radioactive isotope produced by the decay of Radon dissolving into pure water. The other is spallation products caused by the cosmic ray muons.

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 星震学 太陽g-mode振動 ニュートリノ天文学

1. 研究開始当初の背景

世界中のニュートリノ実験により、ニュートリノ振動のフレームワークが明らかになってきた。岐阜県飛騨市に建設された Super-Kamiokande 実験 (以下、SK 実験)は、1996 年のデータ取得開始以降、約 20 年に渡り太陽ニュートリノ観測を実施してきた。特に、カナダの SNO 実験の物理結果とともに、太陽ニュートリノ振動の解明に大きな貢献を行ってきた。ニュートリノは高い透過性を持つため、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知ることができる唯一の手段となっている。

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 (図 1)。このうち、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おり、太陽表面の密度を明らかにしてきた。一方で、太陽では重力による g-mode 振動が生じていると考えられているが、周期が長いために太陽表面まで到達しないため、現在までに太陽 g-mode 振動の発見例は報告されていない。この太陽 g-mode 振動によって、太陽核領域で局所的な密度変化が周期的に生じていると考えられ、 ^8B 太陽ニュートリノの放出強度が周期的に増減することが予想されている。したがって、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できる。

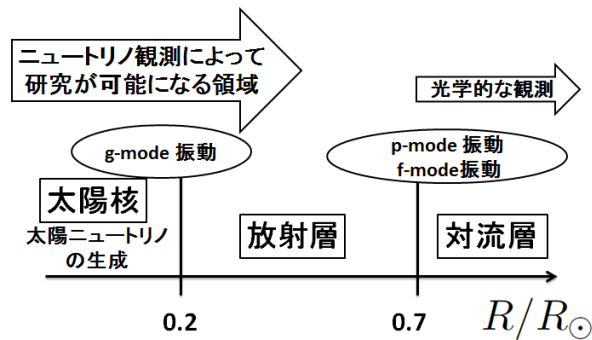


図 1: 太陽に生じる振動現象の概略図

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。特に、20-30 分程度の周期的な信号を見ることで、太陽の g-mode 振動現象を世界で初めて発見することを目指した。

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。

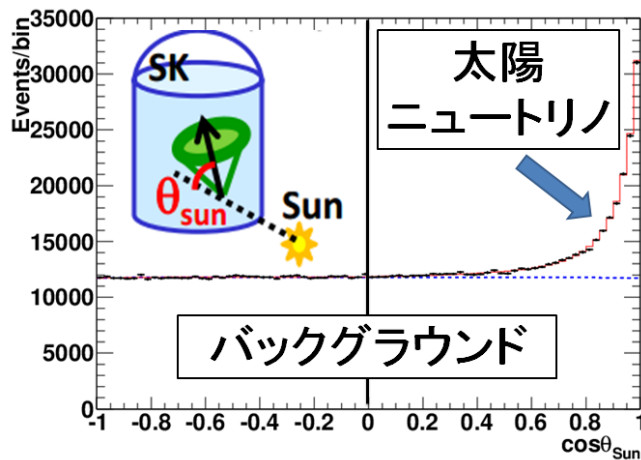


図 2: SK 実験で取得された太陽ニュートリノ信号。横軸は反跳電子の方向と太陽の方向の間の角度に関して cosine を取った数値。縦軸は取得された事象数 (バックグラウンド事象を含む)。

時間的にランダムな情報から、周期的な信号を取り出す手法として、Lomb-Scargle 法や Rayleigh-power 法がある。前者は binning がされたデータに対して利用し、後者は event-by-event (binning の無い) のデータに対して利用される。本研究では、25 日を超えるような長期的な周期に対しては、Lomb-Scargle 法を利用し、2.5 日未満の周期に対しては Rayleigh-power 法を用いることにした。

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、SK-IV 実験で取得された 1664 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。図 3 に Lomb-Scargle 法を用いた power スペクトルを示す。SK-I (黒) のデータセットには約 9.2 year^{-1} のピークが見られ、この周期が太陽内部の回転運動に由来すると、これまでに他の研究者から指摘を受けていた。しかし、SK-IV (赤) の観測データには、同様のピークは見られなかった。また、SK-IV のデータには顕著な周期的な信号が存在しなかった。

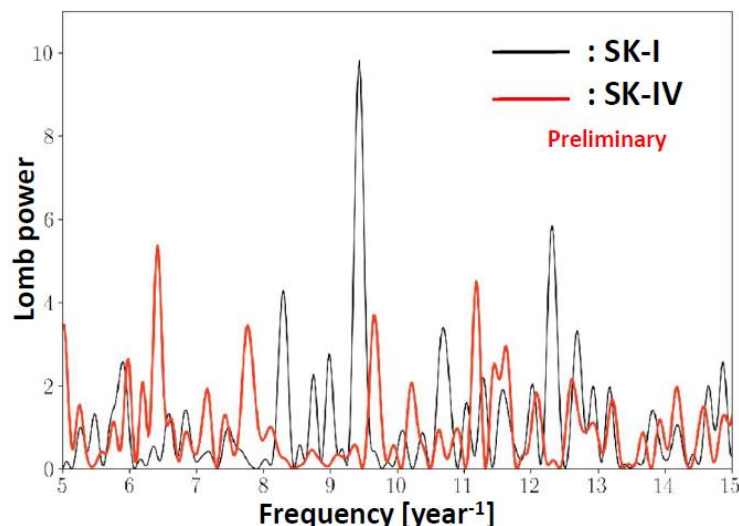


図 3: Lomb-Scargle 法によって得られた power スペクトル。横軸は周期 [year⁻¹]、縦軸はスペクトルの power である。観測データとして 1664 日分のデータセットを利用した。

g-mode 振動に由来する周期的な太陽ニュートリノの強度変化を探索するため、Rayleigh-power 法を用いた物理感度評価を実施した。太陽ニュートリノ信号は event-by-event には、バックグラウンドと区別ができないため、太陽ニュートリノ信号に周期的な信号を探すには、まずバックグラウンド事象に周期的な信号がないかを調査する必要がある。図 2 の観測データから太陽方向とは逆の $\cos \theta_{sun} < 0.0$ のサンプルを作成し、その周期性を評価した。

まず、6 MeV 未満のエネルギー領域では、超純水に溶け込んだラドン由来の放射線 (²¹⁴Bi) が主要なバックグラウンドとなる。バックグラウンドの時間変化が実際のラドン濃度と対応しているかを調べるため、超純水をサンプリングし、ラドン濃度を測定した。その結果、このエネルギー領域では、バックグラウンド事象はラドン由来の放射性物質で説明できることを示した。同時に、g-mode 振動と対応する周期には、バックグラウンドの周期的な変動は見受けられなかった。

6 MeV 以上では、宇宙線ミュオンによる核破砕による放射性物質が、主要なバックグラウンドとなる。この宇宙線ミュオンの到来頻度は、大気成層圏の温度変化と相関があることが分かっている。そのため、宇宙線ミュオンの到来頻度の評価する必要がある。宇宙線ミュオンの到来頻度に年次変動は見受けられたが、さらに短い周期での変動を調査している。今後、この宇宙線ミュオン由来のバックグラウンドの周期性を詳細に評価し、最終的に g-mode 振動の探索結果を公表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 Study for g-mode oscillations in the Sun using solar neutrino with Super-Kamiokande	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 zendo	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5281/zenodo.1300811	査読の有無 無
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 Yuuki Nakano and On behalf of the Super-Kamiokande Collaboration	4. 巻 5
2. 論文標題 Highlight Talk from Super-Kamiokande	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe5010020	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 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Study for g-mode oscillations in the Sun using solar neutrino with Super-Kamiokande
3. 学会等名 Neutrino2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Highlight talk from Super-Kamiokande
3. 学会等名 ICNFP2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 The latest results from the Super-Kamiokande experiment
3. 学会等名 Windows on the universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 佑樹 他Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Super-Kamiokande検出器における 水槽内のラドン濃度に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Status of solar neutrino physics at SK
3. 学会等名 MTEX2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano for the Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 SK/SK-Gd water system
3. 学会等名 MTEX2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 佑樹
2. 発表標題 太陽g-mode振動による 太陽ニュートリノ強度の周期的な変動探索
3. 学会等名 第3回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Recent Solar neutrino Results from Super-Kamiokande
3. 学会等名 XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川 誠 他Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 スーパーカミオカンデ検出器における 太陽ニュートリノ解析の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Study for g-mode oscillations in the Sun using solar neutrino
3. 学会等名 新学術「地下素核研究」 第4回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Nakano
2. 発表標題 Search for g-mode oscillation using solar neutrino
3. 学会等名 Astero-seismology and its impact on other branches of astronomy
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川 誠 他Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 スーパーカミオカンデ実験における 太陽ニュートリノ解析の現状報告
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 佑樹, 長谷川 誠, 中島 康博, Linyan Wan 他Super-Kamiokande collaboration
2. 発表標題 Super-Kamiokande検出器における 低エネルギー事象のエネルギースケール評価
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yuuki NakanoのHP http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ynakano_s/budget/g_mode.html</p> <p>Measurement of the radon concentration in purified water in the Super-Kamiokande IV detector https://arxiv.org/abs/1910.03823</p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----