

令和元年6月19日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05372

研究課題名（和文）中性子信号を用いたレプトンCPおよびニュートリノ質量階層性研究への応用

研究課題名（英文）Application of neutron signal for leptonic CP violation and mass hierarchy studies

研究代表者

奥村 公宏 (Okumura, Kimihiro)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：70361657

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）：国内最大のニュートリノ検出器であるスーパーカミオカンデ（SK）装置に、ガドリニウム（Gd）を添加して反ニュートリノ識別能力を向上させるSK-Gd計画が進行しつつあるが、本研究では加速器および大気ニュートリノでのニュートリノ振動測定への応用を検証した。詳細なシミュレーションを行った結果、Gd添加による水チェレンコフ検出器の事象解析能力に悪影響がないこと、Gdによる反ニュートリノ信号は高効率で検出可能であることを示し、加速器ニュートリノ測定での反ニュートリノ識別に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノにおけるCP対称性の破れは物質・反物質非対称性をもたらす源として、この宇宙がなぜ物質優勢なのかという謎を解く原因としてレプトジェネシス理論を中心に注目されている。加速器および大気ニュートリノ測定において反ニュートリノ識別が可能になると、ニュートリノおよび反ニュートリノそれぞれでニュートリノ振動確率を独立に測定可能となり、CP対称性の破れの測定の向上し、ひいては、宇宙の謎の解明に貢献できると思われる。

研究成果の概要（英文）：The feasibility of the separation performance between neutrino and anti-neutrino interactions in accelerator and atmospheric neutrino experiments was studied in this research project. SK-Gd, where anti-neutrino signal is improved by adding Gadolinium into pure water inside Super-Kamiokande detector, is planning. Based on the detailed simulation study, we found that the performance of water Cherenkov detector is not significantly affected by the addition of Gadolinium and the signal of anti-neutrino from Gadolinium reaction is possible to detect with high efficiency. We conclude that anti-neutrino separation performance will be improved in SK-Gd for accelerator and atmospheric neutrino measurements.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線 ニュートリノ物理学

キーワード：加速器ニュートリノ 大気ニュートリノ ニュートリノ振動 ガドリニウム 中性子検出 反ニュートリノ識別

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 様々なニュートリノ実験により3世代ニュートリノ振動理論はほぼ確立されたが、荷電パリティ(CP)対称性の破れという重要課題が依然残されている。この対称性の破れは宇宙での物質優勢の謎を解く一つの重要な手がかりである。スーパーカミオカンデ(SK)実験およびT2K実験では、大気および加速器ニュートリノでのCP非対称性の測定が試みているが、さらなる感度向上が求められている。

(2) CP対称性の破れは、ニュートリノ( $\nu$ )および反ニュートリノ( $\bar{\nu}$ )との間でニュートリノ振動確率に差異を生じる。しかしながら、SKでの水チェレンコフ検出器で $\nu$ / $\bar{\nu}$ 事象分別を行い、振動確率の違いを事象毎に測定するのは難しい。そこで、反ニュートリノ相互作用で生じる中性子をガドリニウム(Gd)で吸収し、その核励起から放出される約8MeVのガンマ線(Gdガンマ線)を検出して反ニュートリノ事象を同定する方法が注目されている。SK実験グループは0.1%の濃度でGdを添加する計画(SK-Gd計画)を進めている。

(3) 一方で、純水にGdを添加し溶解させることにより、検出器中の水の透明度悪化や散乱光増加など、チェレンコフ光のイメージングによる事象再構成性能における悪化の懸念もある。特に散乱光の増加は、検出器の粒子識別能力の低下、及び、バックグラウンド事象増大を招き、CP対称性の破れの測定感度を低下させる危険性がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、大気、および、加速器ニュートリノでのGeV付近のニュートリノエネルギー事象を対象に、Gdガンマ線信号を用いた反ニュートリノ事象分別を研究し、CP対称性の破れの研究に対する有用性を調べる。研究では、実測に基づくGd溶解水の特性をシミュレーションに考慮して、ニュートリノ反応事象の解析、および、反跳中性子とGdによる吸収反応および核励起による遅延ガンマ線検出を詳細にシミュレーションを行い、反ニュートリノ事象の識別効率を評価する。また、Gd溶解水における光の透過率低下によるリング数計測や粒子識別などのイメージング性能への影響も評価する。

### 3. 研究の方法

(1) SK-Gdシミュレータの開発: 現在のSK検出器シミュレータを元に、水中での中性子の伝播、Gdによる捕獲反応、および、励起ガンマ線放出過程をシミュレーションに導入し、SK-Gd検出器シミュレータを完成させた。開発には、中性子散乱の断面積、Gd吸収によるガンマ線放出スペクトル、Gd溶解水での光の透過率等の不定性を評価するために、それぞれ異なるモデルを比較・検討できる様に考慮した。特に、Gd吸収によるガンマ線放出スペクトルはJ-PARCで測定された最新のデータを取り入れ、ガドリニウム水での光の散乱・吸収は神岡でGd試験用タンクで実測されたデータを用いた。また、光センサーのダークノイズやアフターパルス、環境ガンマ線等起源のノイズヒットなどの影響もシミュレーションに入れられる様にした。

(2) Gd吸収反応によるガンマ線信号の検出アルゴリズムの開発: 中性子捕獲による8MeVガンマ線の検出方法を行うための検出アルゴリズムを開発した。まず、ニュートリノ反応点からのチェレンコフ光の飛行時間を差引いた分布を用いてガンマ線信号の発生時間を特定し、ノイズヒットからの分離を行った。さらに、ガンマ線信号検出効率、および、バックグラウンド除去の最適化を行うために機械学習アル

ゴリズムを用いた手法を取り入れた。その際には、Gd 吸収によって複数のガンマ線が放出されることにより光センサーのヒット分布がより等方的になる特性を考慮し、検出効率を向上させた。

(3) 反ニュートリノ識別能力、および、チェレンコフイメージング性能への影響の評価：前項目で開発した SK-Gd シミュレータ、および、ガンマ線事象検出アルゴリズムを用いて、SK-Gd での反ニュートリノ識別能力、および、チェレンコフイメージング性能への影響を調査した。シミュレーション事象には T2K ビームニュートリノ事象サンプルを用い、SK-Gd での反ニュートリノ事象分離性能を評価した。また、T2K での実際解析に基づいた事象選別効率を評価し、イメージング性能への影響を調査した。

#### 4. 研究成果

##### (1) SK-Gd シミュレータの開発

SK-Gd でのニュートリノ検出器の性能をシミュレーションするため、SK-Gd シミュレータを開発した。このシミュレータには、実測によるガドリニウム水の透過率の導入し(図 1 参照)、また、4 種類のガドリニウム核励起ガンマ線スペクトルのモデル(図 2)を選択できる様にし、改良を行った。核励起ガンマ線スペクトルのモデルには Geant4.9 photon evaporation、GLG4sim、Hagiwara et al. (2014B014)、Geant4.10 photon evaporation を導入した。それぞれのモデルでのガンマ線スペクトルを図 2 に示す。また、実際のスーパーカミオカンデ検出器で観測されている、光センサーのアフターパルスなど、ガンマ線検出のバックグラウンドとなり得る要素などもシミュレーションできる様に検討を行った。開発後、T2K ビームを用いたシミュレーション事象を生成した。

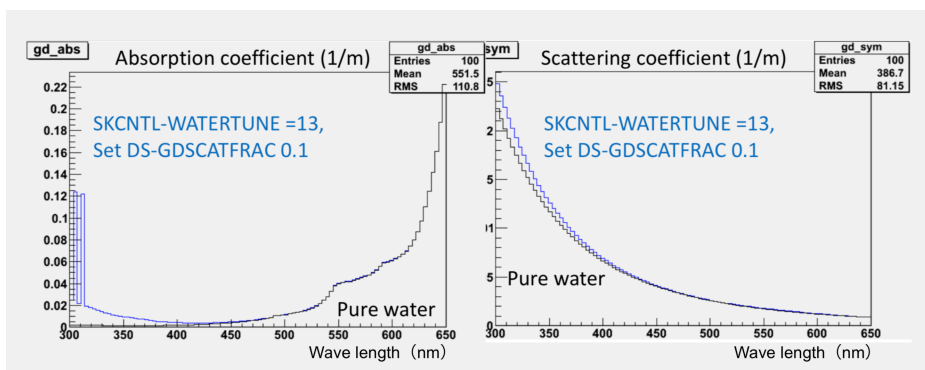


図 1：SK-Gd シミュレーションに導入した純水（黒線）およびガドリニウム水（青線）の透過率。左図は水中での光の吸収係数、右図は光の散乱係数を示す。

##### (2) 反ニュートリノ事象識別アルゴリズムの開発

SK-Gd での Gd ガンマ線信号を検出するためのアルゴリズムを開発した。ガンマ線信号、および、バックグラウンドとの分離効率を最適化するために機械学習を用いた手法を取り入れた。様々なアルゴリズムを試した結果、本研究では最も検出効率が高かった Boost Decision Tree (BDT) を採用した。図 3 の左図はガンマ線信号事象とバックグラウンド事象に対する BDT の出力値(Classifier Output)を示す。信号選択閾値として、バックグラウンド誤認識率が 1.8%になるように閾値を決定し、放出された中性子数に対し 78%の効率でガンマ線信号を検出した。また、ガンマ線スペクトルモデルやガドリニウム水による光の透過率の変化の影響なども調査し、ガンマ線の検出効率が 72%から 78%の間で変化し、これらの条件により大きく変わらないことを示した(表 1 参照)。

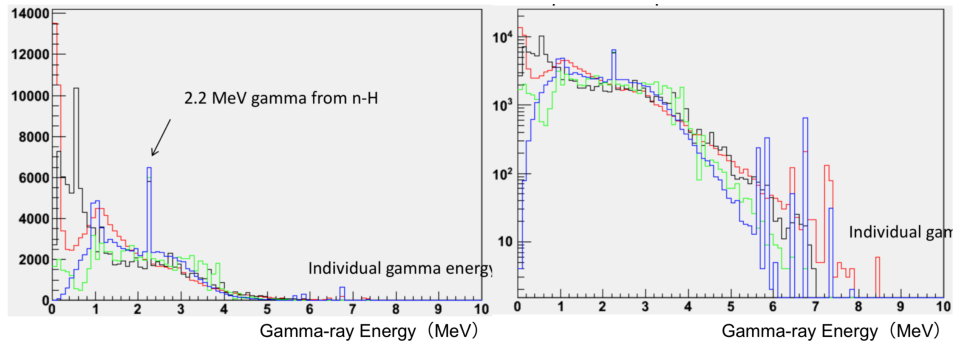


図 2 : SK-Gd シミュレーションに導入した 4 種類のカドリニウム-中性子吸収反応によるガンマ線放出スペクトル。それぞれ、Geant4.9 photon evaporation (緑線)、GLG4sim (青線)、Hagiwara et al. (2014B014) (赤線)、Geant4.10 photon evaporation (黒線) を示す。左右の図は異なる y 軸スケールを示す。

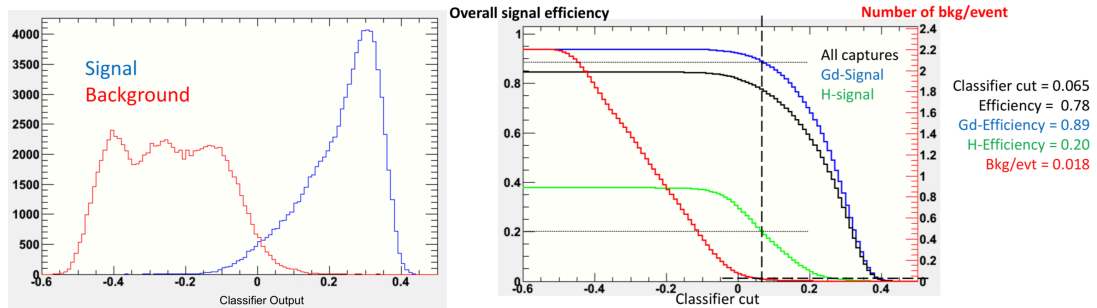


図 3 : ガンマ線およびバックグラウンド事象のニューラルネット出力分布 (左図) と各閾値毎の検出効率 (右図)。

	Geant4.9 evaporation	GLG4sim	Hagiwara et al.	Geant4.10 evaporation	Gd-water
Total	<b>0.78</b>	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>	<b>0.72</b>	<b>0.76</b>
(Gd only)	0.89	0.87	0.85	0.82	0.87
(Hydrogen only)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16

表 1 : 中性子吸収によるガンマ線の検出効率。各コラム毎にシミュレーション条件を変えた検出効率を示し、最初 4 項目 (Geant4.9 evaporation、GLG4sim、Hagiwara et al.、Geant4.10 evaporation) が 4 種類のガンマ線放出モデル、5 項目目 (Gd-water) がカドリニウム水の光透過率を考慮した場合を示す。検出効率は中性子吸収全体 (Total)、カドリニウム吸収のみ (Gd only)、水素吸収のみ (Hydrogen only) に分けて示している。

### (3) 反ニュートリノ識別能力、および、チェレンコフイメージング性能への影響の評価

T2K 実験でのミューニュートリノおよび電子ニュートリノ事象サンプルの選別効率を評価した結果、Gd 溶解前の純水の場合と比較して大きな変化がなく、Gd 溶解水による水質変化でチェレンコフイメージング性能に劣化が見られないことを示した (図 4 参照)。また、T2K 事象でガンマ線信号を用いたニュートリノ・反ニュートリノ事象の識別を行った (図 5 参照)。Gd ガンマ線信号の有無で事象識別を行った結果、T2K 反ニュートリノビームモードでは反電子ニュートリノ事象の割合が 69% から 82% に、反ミューニュートリノ事象の割合が 61% から 73% に増加し、CP 対称性の破れの測定でバックグラウンドとなるニュートリノ事象を効率的に分別することがで

きることが分かった。今後は、レプトンの運動量や方向などの情報と合わせて解析することで、さらなる反ニュートリノ事象識別の最適化を向上させることが可能と思われる。

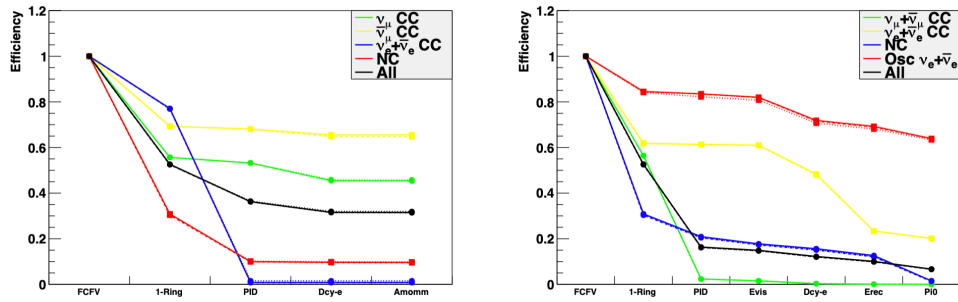


図4：スーパーカミオカンデ検出器で純水とガドリニウム水を用いた場合のニュートリノ事象選別効率の比較。それぞれ T2K CCνμ (左図)、および、CCνe (右図) 事象選別効率であり、実線が純水の場合、点線がガドリニウム水の場合を示す。

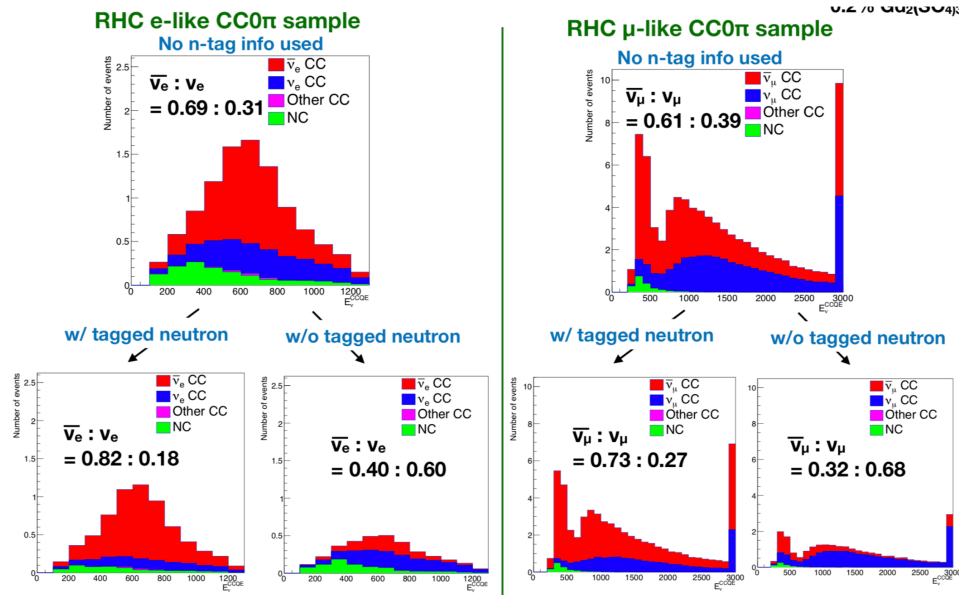


図5：T2K ビームニュートリノ事象での Gd ガンマ線信号を用いた反ニュートリノ事象分別。反ニュートリノビームモードの事象サンプルを用い、Gd ガンマ線信号を用いた事象識別により反ニュートリノ事象(赤で示された領域)の割合が増加、ニュートリノ事象(青で示された領域)のバックグラウンドが除去されていることが分かる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 8 件)

① “Implementation of Gadolinium neutron capture into the simulation package of Super-Kamiokande Experiment”

Ka Ming Tsui, Kameda Jun, Kimihiro Okumura, Motoyasu Ikeda, Yusuke Koshio, for Super-Kamiokande Collaboration

2016年9月 日本物理学会秋季大会 宮崎大学木花キャンパス(宮崎県宮崎市)

② “Validation of Gadolinium upgrade of Super-Kamiokande Detector Simulator for SK-Gd”

Ka Ming Tsui, Kameda Jun, Kimihiro Okumura, Motoyasu Ikeda, Yasuhiro Okajima, Yusuke Koshio for the Super-Kamiokande collaboration

日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年)  
2017 年 3 月 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

③ 「T2K 後置検出器におけるデータ取得状況及びニュートリノ振動測定の精度向上に関する研究」

阿久津良介, 奥村公宏, 中島康博 他 T2K-コラボレーション

日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年)

2017 年 3 月 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

④ “Super-K Gd project: Neutron-tagging algorithm”

Ka Ming Tsui

2017 年物理学会秋季大会

⑤ 「Super-K Gd プロジェクト:Gd を用いた中性子検出による T2K 実験の物理感度向上の研究」

中島康博

2017 年物理学会秋季大会

⑥ 「T2K 後置検出器におけるニュートリノおよび反ニュートリノビームでの反跳中性子信号を伴う事象の研究」

阿久津良介

2017 年物理学会秋季大会

⑦ 「T2K におけるニュートリノ反応および反ニュートリノ反応に伴う中性子数測定」

阿久津良介

2018 年 物理学会 73 回年次大会

⑧ 「Super-K Gd プロジェクト:Gd を用いた中性子検出による T2K 実験の高精度化の研究」

中島康博

2018 年 物理学会 73 回年次大会

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。