

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25105003

研究課題名（和文）原子炉ニュートリノを用いた基礎科学および応用科学

研究課題名（英文）Fundamental and applied sciences with reactor neutrinos

研究代表者

久世 正弘（Kuze, Masahiro）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：00225153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 205,500,000円

研究成果の概要（和文）： Double Chooz実験の前置検出器の建設を完了し、前置後置両検出器を用いたデータを3年以上に渡り収集した。系統誤差を大幅に削減した精密な θ_{13} 測定を達成した。

原子炉モニターの開発を、プラスチックおよび液体シンチレータ技術の両面から行った。前者（PANDA）は最終型の1トン検出器が完成し、大飯発電所で1ヶ月の試験データ収集を行った。発電所との協力体制を構築し、本測定への道が拓けた。波形弁別性能を持つ液体シンチレータの開発に成功した。

ステライルニュートリノをJ-PARCにおいて探索するJSNS2実験の設計・予備測定を行った。本研究での開発の結果、他財源により同実験が措置された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノ振動で最後まで未測定であった θ_{13} 振動角の値が確立し、加速器長基線実験と合わせてCP非対称度を測定する道が開けた。宇宙の物質非対称性の解明に一步近づいた。

第4のニュートリノの存否は素粒子物理学の重要問題である。それを日本の加速器を用いて検証する実験への道筋をつけた。

原子炉ニュートリノを用いた応用科学として、原子炉の遠距離からの査察技術を開発した。プラスチックおよび液体シンチレータを用いた2種の検出器の開発を進め、1トンサイズの検出器PANDA100の完成や波形弁別性能を持つ液体シンチレータの開発を達成した。IAEAが目指している核の平和利用のための新技術開発に貢献した。

研究成果の概要（英文）： We completed the construction of Double Chooz near detector and took data over 3 years with near and far detectors. We accomplished a precise θ_{13} measurement with greatly reduced systematic uncertainties.

We developed reactor neutrino monitors with plastic and liquid scintillator techniques. The former, PANDA, had its final stage with 1-ton detector completed and took test data for 1 month at Oi nuclear power plant. The successful collaboration with the plant will enable future data taking.

We also developed liquid scintillator with pulse-shape discrimination capability.

We made design and test measurements for JSNS2 experiment at J-PARC to search for sterile neutrinos.

Thanks to this work, JSNS2 has been realized with a different funding.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 原子炉 素粒子実験 放射線、X線、粒子線 安全保障 国際研究者交流（フランス）

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)素粒子ニュートリノが微小な質量をフレーバー混合を持つことにより起きる現象「ニュートリノ振動」において、3つの振動角のうち θ_{13} と呼ばれる角度のみが小さい値を持ち、2012年以前は未測定であった。ニュートリノにおける CP 対称性の破れは宇宙の物質反物質の非対称性の謎を解く鍵になると思われているが、加速器の実験でそれを測定するために θ_{13} の測定は不可欠のものであった。我々は、本研究の前身である特別推進研究において、フランス Chooz 原子力発電所で行われている原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz (DC) の後置検出器のみを用いて θ_{13} が 0 でないことを 95%信頼度で確立していた。競合する中国と韓国の実験がより精度の良い測定結果を出し始め、DC 実験も当初の計画通り前置検出器を完成させてより高精度の測定をすることが急務であった。

(2)また、原子炉の核分裂に伴い発生する原子炉ニュートリノは遮蔽することが不可能であり、原子炉建屋外部からでもその測定により原子炉の稼働出力、さらに統計を貯めることで燃料組成を知ることが可能である。これは従来の侵襲的査察に代わりうる新しい核査察の方法として IAEA が技術開発を推進している。各国で様々な検出器の開発が行われており、日本でも我々のグループでプラスチックシンチレータを用いるものと液体シンチレータを用いる 2 種類の原子炉モニターの開発が始まっていた。

(3)素粒子物理の標準模型ではニュートリノは 3 世代しか存在しないが、近年 4 世代目の存在を示唆する実験事実が、確実ではないものの複数報告されていた。この、ステライルニュートリノと呼ばれる新しいニュートリノの存否に決着をつける実験が各国で提案されていた。

2. 研究の目的

(1)DC 実験の前置検出器の建設を行い、系統誤差を大幅に削減した θ_{13} 高精度測定を行う。CP 非対称度の測定に不可欠なパラメータを提供し、素粒子物理学という基礎科学に貢献する。

(2)原子炉モニターの開発を進め、国内の原子力発電所と交渉し原子炉建屋近くでの実測定を行い、原子炉ニュートリノの応用科学を進展させる。

(3)日本におけるステライルニュートリノ探索実験を、我々が DC 実験で培った液体シンチレータ検出器の技術を用いて実現するための研究開発を行う。

3. 研究の方法

(1)DC 実験の前置検出器の建設を行った。2013 年夏より高電子増倍管 (PMT) システムの設置を始め、2014 年夏に検出器が密閉された。読み出し電子回路 (FADC) も 2014 年 5 月に日本から現地へ発送・設置した。キャリアレーション用光ファイバシステムも密閉前に設置した。2015 年 1 月より前置後置両検出器の同時データ収集を開始した。ニュートリノ標的として、当初想定したガドリニウム (Gd) 含有シンチレータ領域のみでなく、その外側の領域での水素による中性子吸収も使用する解析方法を開発した。具体的にはニューラルネットワークを用いて環境バックグラウンドを排除した。データ収集を 2018 年 3 月に終了し、その後検出器解体作業を始めた。PMT を回収して日本での実験に使用するため、ケーブルフランジの撤去までを研究期間内に行った。

(2) 東京大学グループでは、以前よりプラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノモニター PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) の開発を進めてきた。2012 年には小型の検出器 (PANDA36) で関西電力大飯発電所・1 号機付近で測定を行った。その後、2013 年には PANDA64、2017 年には開発は北里大学へ引き継がれ PANDA100 を完成させた。可搬性を維持しつつ大型化して原子炉ニュートリノ検出効率を向上させること、地表での測定のため、宇宙線起因のバックグラウンドを飛躍的に削減することが開発のポイントであった。原子力発電所内の炉から 40m 程度の距離に設置して、炉の稼働/停止を有意に測定することを目標として開発を進めた。また、反電子ニュートリノの検出効率を高めるために、新しい材料を用いた中性子検出法およびバックグラウンド除去法の開発も並行して進めた。

(3)液体シンチレーターの波形弁別能力を向上させるため、文献を調査するなどしてナフタレンを選定し、ガドリニウム液体シンチレーターに導入し、長期安定性のテストや、東北大の CYRIC の中性子ビームを用いた性能評価などを行なった。検出器の安全性を高めるため、シリコンオイルに発光剤を溶かすなどしてシンチレーターとしての性能を調べた。それら液体シンチレーターを利用して 400 リットルの新型原子炉ニュートリノモニターを設計製作した。この検出器を大飯原子力に設置しデータを取得するために、本研究の PANDA と共に関西電力と交渉を行

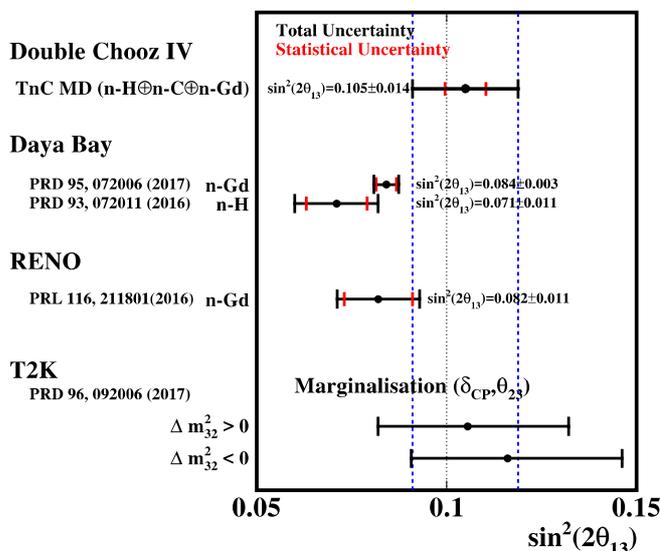
なったが、まず安全性の高い PANDA による測定で実績を作り、液体シンチレーター検出器はその後に交渉することとなった。2018年6月の米朝首脳会談後、世界の原子炉ニュートリノ研究者と議論し、原子炉ニュートリノモニターによる原子炉運転監視に関する論文を準備した。

(4)「原子炉ニュートリノ問題」の解決となるステライルニュートリノの探索実験の準備を行なった。本研究グループはステライルニュートリノの探索のため、まず大強度のセシウムソースを KamLAND 検出器に導入し、ステライルニュートリノの振動パターンを測定する可能性をフランスの CeLAND グループと検討したが、大強度放射線ソースの日本への持ち込みの手続きに困難が伴うため断念した。次に J-PARC の MLF 施設で近距離での $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ のニュートリノ振動を検出することによりステライルニュートリノを検出する実験を KEK と検討した。その一環で、実験現場でのバックグラウンド測定、液体シンチレーターの開発、東北大 CYRIC のビームテストなどを行い、実験計画が現実的であることを証明した。アクリルタンクやステンレスタンク、光電子増倍管支持装置、液体輸送システムの設計・制作などの準備を行なった。またこの実験 (JSNS²) のため DC 実験で使用していたエレクトロニクスや PMT を有効に再利用することとし、そのための作業や準備などを行なった。

4. 研究成果

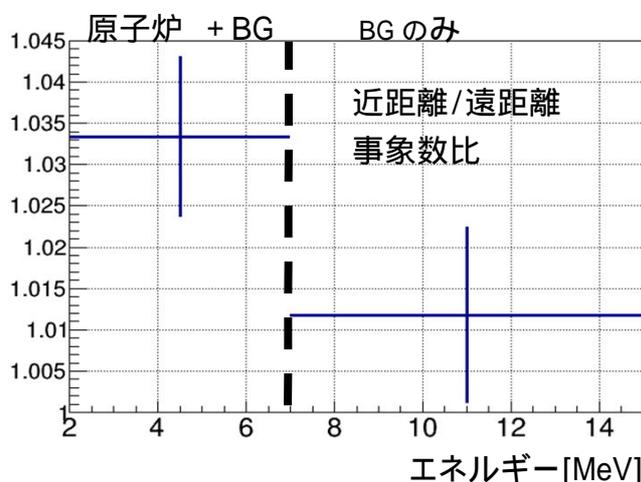
(1)DC では 2 基の原子炉の出力変動 (完全休止も含む) を利用してバックグラウンドの推定も含んだ 13 測定を行った論文が 2014 年夏に出版された。同年秋には後置検出器のみで Gd 吸収事象を用いた測定結果を出版した。13 の値として $\sin^2(2\theta_{13})=0.09 \pm 0.03$ を報告した。この誤差は DC 実験の提案時の最終目標精度にすでに達している。水素吸収事象を用いる新しい解析

方法は、まず後置検出器のデータに適用し 2016 年 1 月に結果を出版した。前置後置両検出器の解析結果は、2016 年 3 月のモリオン国際会議で Gd のみの暫定結果をまず発表し、水素吸収と Gd 吸収の同時解析で統計を 3 倍にした結果を 9 月に CERN セミナーおよび日本物理学会企画講演で発表した。さらに系統誤差について慎重な解析を進め、2019 年 1 月に学術誌に投稿した。結果は $\sin^2(2\theta_{13})=0.105 \pm 0.014$ であり、7 σ を優に越える精密な測定である (左図)。中国の Daya Bay および韓国の RENO 実験との原子炉 3 実験共同解析へ向けて、2016 年 10 月にソウルで、2017 年 6 月にパリで合同ワークショップを行い、共通および各実験特有の系統誤差について理解を深めた。



(2)PANDA36 の測定結果は 2014 年 5 月に発表したが、信号事象の統計が不足していたため、原子炉ニュートリノの測定については 2 シグマ弱程度の有意度となった。そのため、検出器サイズの大型化や検出効率の向上、バックグラウンドの除去方法の研究を進めた。この際、サイズのみでなく、エレクトロニクスとデータ収集も性能向上している。バックグラウンド、特に宇宙線起因の事象の見積もりのため、

2013 年 (PANDA64) と 2017 年 (PANDA100) に、大学内において屋外測定を行った。この際、中性子遮蔽用の水タンクシールドの性能評価も行ったが、環境(熱)中性子に対してはある程度軽減が可能であるが、最も深刻である高速中性子については、厚み(物質質量)が不十分であり、有効ではないことが判った。2018 年 11 - 12 月、再稼働した大飯発電所内で 1 カ月間の原子炉ニュートリノのテスト測定を行った (右図)。稼働中の 4 号機に対して近距離/遠距離の 2 か所で測定を行い、バックグラウンドの場所による違い、温度による変化、差し引く方法に



ついて検討した。測定データを解析した結果、2地点での差は1シグマ強程度となった。この差は、原子炉の出力とシミュレーションにより見積もられた効率による予想数(約80事象)と矛盾しない。本測定により、バックグラウンドの理解と測定器の安定性が、原子炉モニターの性能として重要であることを認識した。また、2016年からは原子核・素粒子および原子力工学の研究を行っている福井大学のグループと協力関係を開始した。

別の観測対象、雷雲ガンマ線について：過去(2012年)の大飯発電所における測定データの解析において、PANDA測定器が雷雲内で発生した線を検出している可能性に気づいた。これは冬の日本海側で高度が低い雷雲が存在する状況のためと推定された。2014年、PANDA64により高地(東大乗鞍宇宙線観測所)において2カ月間の測定を行った。雷雲に伴う12例のガンマ線バースト現象を観測した。その後、PANDA100により2017年8-9月に1カ月間の測定を行った。また、過去のデータ(2012,PANDA36)を解析して論文を投稿し、多くの学会・国際会議で発表した。近年雷雲から発生する線の観測は活発に研究が行われるホットなトピックとなっている。

(3)波形弁別能力を向上させたナフタレン入り液体シンチレーターとシリコンオイルをベースとしたシンチレーターの開発に成功し、400リットルの新型原子炉ニュートリノモニターを作成できた。関西電力との繋がりができ、将来の原子力発電所への設置の交渉を続けることができるようになった。北朝鮮の原子炉運転監視に関する論文を世界の研究者と投稿した。

(4)本研究による準備開発を基にして、JSNS²ステライルニュートリノ実験が他財源で措置され実現することとなり、ステライルニュートリノ問題を解決する道が開けた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計27件)以下5件は全て査読有。著者名に"Double Chooz Collaboration"とあるものは、Y.Abe, T.Hara, M.Ishitsuka, T.Kawasaki, M.Kuze, Y.Nagasaka, Y.Sakamoto, F.Suekane, T.Sumiyoshi et al. (100名以上、アルファベット順で順番に意味はないので省略)

1. "Measurement of ν_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques": Double Chooz Collaboration; JHEP 1601 (2016) 163; [https://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2016\)163](https://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2016)163)
2. "Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds": Y. Kuroda et al.; Phys. Lett. B 758 (2016) 286-291; <https://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2016.05.029>
3. "Improved measurements of the neutrino mixing angle θ_{13} with Double Chooz detector": Double Chooz Collaboration; JHEP 1410 (2014)086, Erratum-ibid. 1502 (2015) 074; [https://dx.doi.org/10.1007/JHEP10\(2014\)086](https://dx.doi.org/10.1007/JHEP10(2014)086)
4. "Background independent measurement of θ_{13} in Double Chooz": Double Chooz Collaboration; Phys. Lett. B 735 (2014) 51-56; <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.04.045>
5. "Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method": S.Oguri, Y.Kuroda, Y.Kato, R.Nakata, Y.Inoue, C.Ito, M.Minowa; Nucl. Instr. & Meth. A 757 (2014) 33-39; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.04.065>

〔学会発表〕(計122件)

1. 「Double Chooz の新しい θ_{13} 角測定結果と実験の今後」末包文彦、日本物理学会 2018 年秋季大会、信州大学
2. "Results from the Double Chooz experiment": M.Kaneda; Heavy Quarks and Leptons 2018, Yamagata, Japan, 27/May/2018-1/June/2018
3. "Development of Plastic Anti-Neutrino Detector Array (PANDA) for reactor monitoring": S.Iwata; International School of Nuclear Physics 39th Course, Erice-Sicily, Italy, 16-24/Sept/2017

4. " Sterile Neutrino Experiments at Accelerator": T. Kawasaki; Rencontres du Vietnam Neutrino, Quy Nhon, 16-22/July/2017
5. " Reactor Theta-13 Measurement and Double Chooz Multi Detector Results": F. Suekane; TYL/F(J/K)PPL workshop, IPHC, Strasbourg, France, 10/May/2017
6. "Latest results from Double Chooz", M.Kuze, Neutrino Telescope, Venice, 13-17/Mar/2017
7. 「Double Chooz 実験による θ_{13} 角測定：前置・後置両検出器からの結果」久世正弘、日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学
8. "First double-detector results from Double Chooz experiment": T.Matsubara; 38th International Conference on High Energy Physics, Chicago, USA, 3-10/Aug/2016
9. "New Results of Double Chooz", M.Ishitsuka, 51st Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy (12/Mar./2016)
10. "Recent Results from Double Chooz": R. Sharankova; Lake Louise Winter Institute, 8/Feb/2016, Lake Louise, Alberta, Canada
11. "Development of Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA)", Y. Kato et al., Applied Antineutrino Physics (AAP), Virginia Tech, USA, 7-8 December 2015
12. "The Double Chooz experiment: June 2015 results and prospects to the near detector era": T.Bezerra on behalf of the DC collaboration; 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 20-26 August, 2015, Moscow State University, Moscow.
13. "Status of Double Chooz experiment": E.Chauveau; EPS HEP 2015, Vienna, 23/Jul/2015
14. "A Search for Sterile Neutrino at J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility": H. Furuta, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC (Tsukuba, Japan), July 12-15, 2014
15. "R&D of water-based liquid scintillator as a reactor anti-neutrino detector" : A. Suzuki and Toshio Hara; The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014(TIPP 2014). June 2-6, 2014. Amsterdam, the Netherlands
16. "Reactors and θ_{13} Flavor Physics and CP Violation": Y.Abe; (FPCP2014), 25-30 May 2014, Marseille, France
17. "Review of the θ_{13} in reactor neutrino experiments": J.Maeda; International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13) @ Kashiwa, Japan, Nov. 11, 2013
18. "Reactor neutrino monitoring with a mobile plastic scintillator array (PANDA)": S. Oguri; Applied Antineutrino Physics Workshop (AAP2013), Seoul, 1-2 Nov. 2013

〔図書〕（計 3 件）

1. “現代素粒子物理” 末包文彦、久世正弘、白井淳平、湯田春雄；森北出版(2016)247 頁
2. “Neutrino Oscillations” F. Suekane, Springer, 2015, 200 pages

〔その他〕

ホームページ等：<https://dchooz.titech.jp.hep.net/A02publications.html>

日本物理学会若手奨励賞：今野智之(2013)；Thiago J.Bezerra(2014)；Ralisa Sharankova(2018)
Blaise Pascal Chairs：末包文彦(2016)

Toshiko Yuasa Laboratory Young Investigator Award: Emmanuel Chauveau(2016)

修士論文：15 件（首都大学東京、東京工業大学、新潟大学、東北大学、北里大学）

博士論文：4 件（東北大学、東京大学、東京工業大学）

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：住吉 孝行
ローマ字氏名：(SUMIYOSHI, Takayuki)
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：理工学研究科
職名：客員教授
研究者番号(8桁)：30154628

研究分担者氏名：川崎 健夫
ローマ字氏名：(KAWASAKI, Takeo)
所属研究機関名：北里大学
部局名：理学部
職名：教授
研究者番号(8桁)：00323999

研究分担者氏名：末包 文彦
ローマ字氏名：(SUEKANE, Fumihiko)
所属研究機関名：東北大学
部局名：ニュートリノ科学研究センター
職名：准教授
研究者番号(8桁)：10196678

研究分担者氏名：原 俊雄
ローマ字氏名：(HARA, Toshio)
所属研究機関名：神戸大学
部局名：理学研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：50156486

研究分担者氏名：蓑輪 眞
ローマ字氏名：(MINOWA, Makoto)
所属研究機関名：東京大学
部局名：理学系研究科
職名：名誉教授
研究者番号(8桁)：90126178

(2)研究協力者

研究協力者氏名(ローマ字氏名)：石塚 正基(ISHITSUKA, Masaki); 長坂 康史(NAGASAKA, Yasushi); 坂本 泰伸(SAKAMOTO, Yasunobu); 白井 淳平(SHIRAI, Junpei)

科研費による研究は、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。