

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02184

研究課題名(和文) 四次元カロリメータで拓く素粒子標準理論を越える新物理

研究課題名(英文) Searching for new physics beyond the standard model with four dimensional calorimeter

研究代表者

南條 創 (Nanjo, Hajime)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40419445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々の物質ばかりの宇宙は、既知の僅かな粒子・反粒子の差(CPの破れ)では作ることができず、初期宇宙での未知のCPの破れが関与したとされる。この起源を探索するのに、我々はCPを破るK中間子の稀な崩壊を、J-PARC加速器を用いたKOTO実験で探索している。KOTO実験では稀な崩壊からの線を捉えるのだが、中性子を起源とする背景事象が多く、この崩壊の探索が困難であった。ヨウ化セシウム結晶を用いた検出器で、XYの面方向位置と時間情報に加え、奥行き方向のZ位置を測定できるカロリメータ、4次元カロリメータを新規に開発し、線と中性子事象を弁別し、背景事象を1/50に削減し、探索感度を向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶カロリメータについて、測定能力の4次元化に世界で初めて成功した。この性能を実証し、中性子事象と線事象の分離に成功し、素粒子や原子核実験の新たな可能性を示した。我々は、宇宙の消えた反物質の謎を解明すべく、KOTO実験で稀なK中間子の崩壊を探索している。4次元カロリメータを開発し、KOTO実験の探索感度を制限していた中性子起源の背景事象を1/50に削減することに成功し、これまでよりも10倍以上稀な崩壊でも探索できるよう、飛躍的に探索感度を向上させた。これにより、消えた反物質の謎を、さらに解明できるようにした。

研究成果の概要(英文)：Our matter-dominated universe can not be created with the known difference between particle and anti-particle (CP violation). New CP violation in the early universe could play an important role. In order to investigate the source, we are searching for a rare neutral kaon decay which violates CP symmetry at the KOTO experiment using J-PARC accelerator. The search is performed by detecting photons from the decay, but a background with neutrons limits our sensitivity. Our CsI crystal calorimeter was upgraded to have depth (Z) information in addition to XY position and timing information. We have developed this "four dimensional calorimeter", which reduces the background by 1/50 discriminating photon and neutron events. Thus we improved our sensitivity to search for the decay.

研究分野：素粒子実験

キーワード：カロリメータ MPPC K中間子稀崩壊 CPの破れ

1. 研究開始当初の背景

宇宙が物質のみで成り立ち反物質が観測されないことは大きな謎である。物質優勢宇宙の実現には、粒子と反粒子を司る物理法則が異なること (CP 対称性の破れ) が必須である。CP 対称性の破れは、小林益川機構として素粒子標準理論に組み込まれているが、物質優勢宇宙を説明するには寄与が小さすぎる。小林氏、益川氏のノーベル賞受賞の際にも、素粒子標準理論を超える未知の機構の存在が強く訴えられている。ビッグバン直後の高いエネルギースケールで、未知の CP の破れを司る重い粒子が介在し、現在の物質優勢宇宙を形作ったのであろう。我々はこの問題を解く鍵は、CP を破る中性 K 中間子の稀な崩壊、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ にあると考えている。この分岐比は標準理論においても 3×10^{-11} と強く抑制されており、新粒子からの僅かな寄与でも 1 桁以上分岐比が大きくなることが予想されている。短時間には高いエネルギースケールの現象が発現可能であり、LHC などの加速器で直接は到底つくり出せない、10TeV を超えるような重い粒子の寄与も捉えることが出来る。この観点で、本崩壊は B 中間子の崩壊に比べてもさらに高いエネルギーに感度があり、最強の新物理探索ツールとして認識されている。本研究は、この $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索により、物質優勢宇宙の鍵ともなる未知粒子の寄与を捉えることを狙っている。我々はこの目的で、茨城県東海村の J-PARC 加速器施設に於いて、KOTO 実験を立ち上げ、データ収集を行っている。現在唯一の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験であり世界を牽引している。

KOTO 実験では中性 K 中間子を KOTO 検出器に導き、崩壊領域で起こる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索する。カロリメータで π^0 崩壊からの 2 つの線を検出する。その他周囲を取り囲む検出器群で余剰粒子がないことを保証し信号同定を行う。さらに検出した 2 つの線の位置 (XY 座標) とエネルギーの情報を利用する。カロリメータは直径 2m で、奥行き 50cm の純 CsI 結晶 2716 本からなる。中央部は 2.5cm 角、外側は 5cm 角の結晶で、シンチレーション光を下流側から光電子増倍管 (PMT) を用いて読み出す。線による電磁シャワーは複数結晶に広がる (クラスタ)。このヒットパターンも、クラスタ形状として信号同定に利用する。

KOTO 実験は、2013 年に 100 時間のデータ取得で当時の世界記録に並ぶ探索感度を達成したが、標準理論感度に比べるとまだ 300 倍足りなかった。一方で、中性子がカロリメータに入射し 2 個のクラスタを形成するという、予期しなかった背景事象を発見した。この背景事象の削減が極めて重要である。解析によりクラスタ形状の差および波形の差を用いて、1/10 の削減を見込むが、標準理論感度に迫り新物理を探索するには、さらに 1 桁以上の削減が必要であった。

2. 研究の目的

本研究により KOTO 実験の背景事象を削減し、高感度での標準理論を超える新物理発見を目指す。具体的な感度目標は、崩壊分岐比 10^{-11} 台であり、この辺りに予測される重いゲージ粒子 Z、超対称性粒子、Littlest Higgs モデルなどで予言される重いクォークなどの寄与があれば、発見が可能である

3. 研究の方法

中性子背景事象は、入射中性子が直接作る 1 つ目のクラスタからさらに中性子が下流側に飛び、離れた位置に 2 つ目のクラスタを形成する。このケースは、XY 平面でのクラスタ形状では信号事象と区別できない。奥行きの特徴を見ると、線では結晶上流部での反応だが、中性子による背景事象の 2 つ目のクラスタでは結晶下流部での反応となる。この差を取り出せるとさらなる背景事象削減が可能と考えた。つまり、奥行き方向、Z 座標情報を引き出す。座標 (X,Y) と時間 (t) に加え、Z 位置の測定をしつつ、エネルギー測定を行う、この新しいコンセプトを「四次元カロリメータ」と呼ぶことにした。これを実現する為に結晶上流部にも新たに光センサーを設置する。下流部の PMT による読み出しとの時間差を測定すると、発光点に応じたシンチレーション光の伝播の時間差を観測することができるはずである。これを新たに開発、KOTO 実験に実装し、背景事象の 1 桁以上削減の際、カロリメータのエネルギー測定精度を保つためには、上流部の光センサーの物質量が少ないことが必要で、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) という、低物質質量の高感度半導体光センサーを用いることを着想した。

本研究では 6mm 角の有感領域を持つ MPPC を用いた。我々のカロリメータは 50cm 長さの純 CsI 結晶である。2.5cm 角断面の結晶には、MPPC を 1 つ、5cm 角断面の結晶には MPPC を 4 つ用いた。MPPC の受光面には 0.5mm 厚のクォーツ板を光学接着し、光透過性を確保しつつ、平坦な面を形成した。このクォーツ板を CsI 結晶の平坦な面に光学接着した。使用した MPPC の総数は 4080 個であるが、16 個 (一部 12 個) ずつ信号を足し上げ、合計 256 チャンネルの読み出しとした。事前に線、中性子、電子ビームによる性能試験を行い、十分な性能があることを確認した。

J-PARC KOTO 実験へのインストールを行なった。2 ヶ月間の接着作業となったが、宇宙線を用いた部分試験を行いながら、途中の作業にも問題がないことを担保しつつ、世界初の結晶 4 次元カロリメータを完成させた。

4. 研究成果

2019年に世界初の結晶4次元カロリメータを完成させ、これを用いた性能の評価を行なった。中性K中間子の $3\pi^0$ 崩壊を用い、 ΔT の応答を確認した。図1(左)に ΔT 事象による時間差分布の分解能を示す。 $3\pi^0$ からの6個の ΔT の主に5個の ΔT により崩壊の時間が決まる。これに対して、残りの1個の ΔT の結晶下流側の時間(T_{PMT})、上流側の時間(T_{MPPC})の時間分解能を示している。さらに、上下流の時間差(ΔT)の分解能も示している。100MeV以上の ΔT に対して ~ 1 ns以下の ΔT の分解能が得られている。

ビーム中にアルミ板を挿入し、ビーム中の中性子を意図的に散乱させて取得した擬似中性子背景事象により、中性子に対する応答を確認した。図1(右)は ΔT と中性子事象に対する結晶上下流の時間差 ΔT の分布である。この結果、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の信号事象の効率を90%に維持して、中性子背景事象を1/50に削減できることがわかった。当初の1/10の削減をはるかに上回る成果となった。これにより、4次元カロリメータの性能を実証し、素粒子物理実験に新たな手法を導入した。

その後、2016-18年に取得したデータの解析から、別の新たな荷電K中間子による背景事象が存在することがわかり、新物理探索はこの新たな背景事象削減にもよることになった。2020年度には検出器上流部のビーム中荷電粒子検出器を入れて、この荷電K中間子を捉えることで、背景事象の機構を確認し、これにより削減できることを実証した。このビーム中の荷電粒子検出器により、ビーム中の中性子が散乱され、中性子背景事象を増やす方向になるが、この4次元カロリメータにより背景事象を十分低く抑制できる。2021年以降、荷電K中間子による背景事象を削減しつつ、データ取得を行い、新物理の探索を進めている。本研究は、これを実現する大きな寄与ともなった。

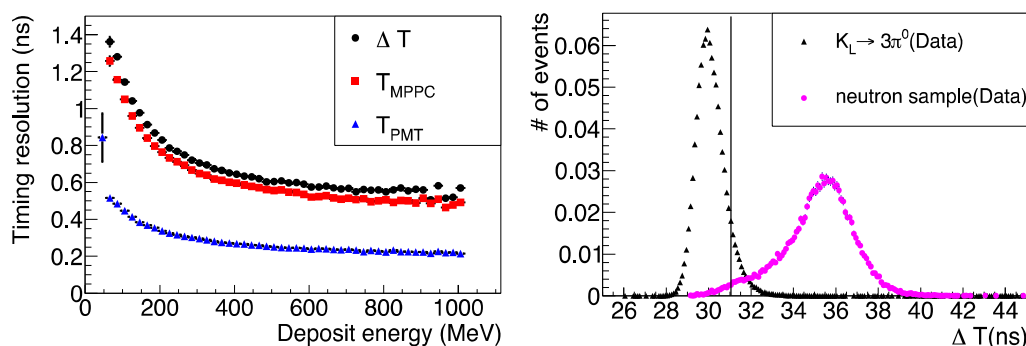


図 1: ΔT を用いた上下流の時間差の分解能(左)、 ΔT サンプルと、中性子背景事象サンプルによる時間差分布(右)

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 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shimizu Nobuhiro, KOTO collaboration	4. 巻 1162
2. 論文標題 Upgrade of the CsI calorimeter for the KOTO experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012030 ~ 012030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1162/1/012030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hara Nobuhiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Front-end Electronics for MPPCs for the KOTO CsI Calorimeter Upgrade	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 012012 ~ 012015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.012012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shimizu Nobuhiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Upgrade of the Cesium Iodide Calorimeter for the KOTO Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 011004 ~ 011009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.011004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nobuhiro Hara	4. 巻 332
2. 論文標題 The both-end readout system of the KOTO CsI calorimeter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.332.0034	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 該当する

1. 著者名 Kota Nakagiri	4. 巻 800
2. 論文標題 Reduction of neutron-induced background in KOTO	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J.Phys.Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/800/1/012025	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 該当する

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 H. Nanjo
2. 発表標題 Rare Kaon Decay Experiments
3. 学会等名 KEK-PH2020 - KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Osugi
2. 発表標題 Four-dimensional calorimeter to discriminate gammas from neutrons for the KOTO experiment
3. 学会等名 CHEF2019 - Calorimetry for the High Energy Frontier 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Shimizu
2. 発表標題 The upgrade of the KOTO Cesium Iodide calorimeter for the separation of gamma and neutron
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nanjo
2. 発表標題 Calorimeter upgrade of the KOTO experiment with both-end readout of CsI crystals using MPPCs
3. 学会等名 KAON2019 - International Conference on Kaon Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Osugi
2. 発表標題 Neutron rejection performance of the upgraded KOTO CsI calorimeter
3. 学会等名 KAON2019 - International Conference on Kaon Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kotera
2. 発表標題 Construction of the double-side readout calorimeter for KL- \rightarrow π^0 search
3. 学会等名 KAON2019 - International Conference on Kaon Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Shimizu
2. 発表標題 Upgrade of the CsI calorimeter for the KOTO experiment
3. 学会等名 PD18 - 5th International Workshop on New Photon-Detectors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Shimizu
2. 発表標題 Upgrade of a Cesium Iodide calorimeter for the KOTO experiment
3. 学会等名 CALOR 2018 - 18th International Conference on Calorimetry in Particle Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushige Kotera
2. 発表標題 Four dimensional calorimetry with both-side readout of the CsI calorimeter in the KL->pi0 nu nu search
3. 学会等名 ICHEP2018 - XXXIX International Conference on High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Hara
2. 発表標題 The both-end readout system of the KOTO CsI calorimeter
3. 学会等名 HQL2018 - XIV International Conference on Heavy Quarks and Leptons (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Nanjo
2. 発表標題 Recent news from KL->pi0nu nu & perspectives KOTO
3. 学会等名 Rencontres de Moriond 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Hara
2. 発表標題 Front-end circuits for MPPCs for the KOTO CsI calorimeter upgrade
3. 学会等名 HQL2018 - XIV International Conference on Heavy Quarks and Leptons (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原直広
2. 発表標題 改良型KOTO実験CsI電磁カロリメータのためのフロントエンド回路の開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺克茂
2. 発表標題 KOTO CsI カロリメータへのSiPM読み出し追加の進捗状況
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真利共生
2. 発表標題 KOTO実験におけるCsI電磁カロリメータアップグレードのための宇宙線トリガーシステムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真利共生
2. 発表標題 KOTO実験CsI電磁カロリメータ両側読み出しシステムの宇宙線を用いた性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大杉真優
2. 発表標題 KOTO実験改良型CsI電磁カロリメータのビームを用いたn/識別能力評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原宜広
2. 発表標題 改良型KOTO実験CsI電磁カロリメータのためのフロントエンド回路の開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原宜広
2. 発表標題 改良型KOTO実験CsI電磁カロリメータのためのMPPCのモニター及び制御システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺克茂
2. 発表標題 KOTO カロリメータの CsI 結晶に MPPC を接着する方法
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西宮隼人
2. 発表標題 CsI結晶両読み機構の400MeV中性子による性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤友太
2. 発表標題 KOTO実験における背景事象削減のためのMPPC読み出し用アンプ回路の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小寺克茂
2. 発表標題 KOTO CsI カロリメータに用いる MPPC の放射性耐性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原宜広
2. 発表標題 KOTO実験CsI電磁カロリメータのMPPCのモニター及び制御システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水信宏
2. 発表標題 KOTO実験における、CsI電磁カロリメータ アップグレードのためのMPPC検査システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤友太
2. 発表標題 KOTO実験での中性子背景事象削減に向けたCsI両読み用のMPPC読み出しシステムの開発
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西宮隼人
2. 発表標題 KOTO実験における中性子及び線事象の弁別のためのCsI結晶の両読み機構の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Etienne Auge, Jacques Dumarchez, and Jean ran Thanh Van	4. 発行年 2019年
2. 出版社 ARISF	5. 総ページ数 451
3. 書名 2019 Elecroweak Interactions and Unified Theories	

〔産業財産権〕

〔その他〕

both-end readout of undoped CsI http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~nanjo/bothend/bothend.html
--

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
研究分担者	塩見 公志 (Shiomi Koji) (40648036)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教 (82118)	
研究分担者	中家 剛 (Nakaya Tsuyoshi) (50314175)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	

	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
連携研究者	山中 卓 (Yamanaka Taku) (20243157)	大阪大学・理学研究科・教授 (14401)	

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			
米国	Chicago University	Michigan University		
韓国	Jeonbuk National University	Korea University		
その他の国・地域(台湾)	National Taiwan University			