

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02887

研究課題名（和文）SHiP実験計画におけるタウニュートリノ物理の詳細研究

研究課題名（英文）Detailed study on tau neutrino physics at the SHiP experiment

研究代表者

小松 雅宏（Komatsu, Masahiro）

名古屋大学・教養教育院・准教授

研究者番号：80345842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：物質を構成する基本粒子であるクォーク・レプトン全12種類の内で、最もその性質が不明である素粒子はレプトンの一つであるタウニュートリノである。そのタウニュートリノを大統計で検証するためのSHiP実験計画を立案して、2015年に実験計画の提案を行ってきたが、実験計画のより詳細なデザインと性能を見極めるために、テスト実験および最適化の作業を行い、2019年にレポートとしてまとめ上げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タウニュートリノはその発見以来最もその性質が調べられていない基本粒子で、特にノーベル賞も与えられたニュートリノ質量の発見が示唆する標準理論を超える物理への糸口として注目が集まっている。宇宙論からも存在が示唆されるも未だ発見に至らないダークマターの解明につながる有力な糸口が第3世代レプトンのタウニュートリノである。

近年B中間子のタウニュートリノを崩壊にあおて、理論予想からのズレが複数の実験から報告され、ますますタウニュートリノの重要性は高まっている。ダークマターの解明や標準理論を超える物理への糸口としてタウニュートリノの詳細研究実験を実施することは重要で、その計画立案に大きな役割を果たした。

研究成果の概要（英文）：Tau neutrino is the least known elementary particle among 6 quarks and 6 lepton family. We proposed the SHiP experiment aiming to study tau neutrino properties with three order of magnitude larger statistics than previous discovery experiment. In 2015, we proposed experiment, since then, we carry out test experiments and detector optimization for the comprehensive design study report. In 2019, we finalize the report.

研究分野：素粒子実験

キーワード：タウニュートリノ ニュートリノ 原子核乾板

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ノーベル賞を受賞した「ニュートリノ振動現象の発見」はレプトンが関わるスタンダードモデルを超える物理(BSM: Beyond the Standard Model)への重要な第一歩であり、ニュートリノにおけるCP非対称性やその質量階層性、絶対質量の決定、マヨラナ性の検証や、muonのg-2異常などの重要な研究テーマは多数存在する。特にニュートリノ振動に限って言えば、クォークにおける小林・益川理論と並び、その理論的予測の段階から牧・中川・坂田と日本人が中心的な役割を果たしている。その実験的検証においても、スーパーカミオカンデ、K2K、T2K、KamLAND、OPERAと多くの重要な実験を日本が主導してきた。ニュートリノ研究は日本が世界をリードする研究分野であり、今後もそのリードを維持していく事が重要である。

ニュートリノ振動研究は、「発見」の段階は既に完了し、今後は精密測定によるCP非対称性や質量階層性の決定、あるいは未発見のSterile Neutrino探索というテーマが重要になる。精密測定にとって重要な要素は、やはり基本的な物理量を一つ一つ精度を高め、系統誤差を小さくしていく地道な研究が極めて重要である。

私はこの20年の間、上記のDONUT実験、OPERA実験とタウニュートリノの検出を通してニュートリノ研究に携わってきた。タウニュートリノの検出は反応断面積の小ささと、生成されるタウ粒子の短寿命から極めて困難で、検出器には大質量かつ高位置分解能という矛盾する要求が課せられる。この相反する要求を満たすことが可能な検出器は、今のところ我々が長年培ってきた原子核乾板技術のみであり、DONUT、OPERA実験にて実証されている。

現在までに14例のみのタウニュートリノ反応検出という現状では、DONUT実験におけるタウニュートリノの反応断面積の測定(Phys. Rev. D78 (2008) 052002)においても、統計・系統誤差を合わせて50%という精度しか得られていない。このタウニュートリノの反応断面積はSuper/Hyper-Kamiokandeにおける大気ニュートリノでの質量階層性決定において最大の系統誤差要因(NuInt15, Systematics for atmospheric neutrinos in SK/HK, R. Wendell)となっており、タウニュートリノの基本的性質の知識はニュートリノ振動研究にも重要である。

2. 研究の目的

物質を構成するクォーク・レプトン12種の中で、最もその性質を知られていないのは第3世代のタウニュートリノである。この20年間でタウニュートリノ反応を直接検出したのは、原子核乾板技術を駆使した我々のグループのみであるが、その検出の難しさゆえにDONUT実験で9例、OPERA実験で5例の合計で14例のみである。これらの実験を通してタウニュートリノの存在とニュートリノ振動の確証を得る事に成功したが、その性質を調べるには統計数が決定的に不足している。

本研究では、SHiP実験計画においてタウニュートリノを高統計で検証するための検出器デザイン(TDR: Technical Design Report)と基礎技術の開発を目的とする。

我々はこの20年間に唯一タウニュートリノ反応を直接検出し、DONUT実験においてその存在の実験的検証(Phys. Lett. B504 (2001) 218-224, 被引用数726)を行い、OPERA実験においては梶田氏のノーベル賞を後押しするタウニュートリノの出現を通じたニュートリノ振動の直接的な証拠(Phys. Lett. B691 (2010) 138-145, 被引用数240; Phys. Rev. Lett. 115 (2015) no.12, 121802)を示すことに成功してきた。しかしながら前述の通り、これまでにたった14例のタウニュートリノ反応しか検出出来ていない。タウニュートリノはクォーク・レプトンの中で最も良く知られていない基本粒子であり、その基本性質の実験的な検証は極めて重要である。

加速器で新物理を探る方向性としては「Energy Frontier」のLHC、もう一方はダークマターの様な弱いカップリングを探す「Intensity Frontier」の2つがある。SHiP(Search for Hidden Particle)実験はBeyond the Standard Modelの物理を「Intensity Frontier」で探索する事を目的とした実験計画である。主にチャーム粒子質量以下の「隠された」粒子(ダークマター候補)の発見を目指すものである。CERN SPSの400GeV/c protonを 2×10^{20} 用いて、チャーム粒子を1017、タウ粒子を1015以上生成し、希な崩壊事象からのダークマター候補の検出を目指す。実験プロポーザル(arxiv.org/abs/1504.04956)には15ヶ国45組織235人がサインし、日本からは名古屋・愛教・神戸・日本・東邦大学が参加している。また、Physics Proposal(arxiv.org/abs/1504.0855)には85人の理論屋がサインしている。このビームラインは最も強力な「ビームダンプ」であり、タウ粒子・チャーム粒子の崩壊からの強力な(タウ)ニュートリノビームラインでもある。DONUT実験の約770倍の規模の実験が可能である。

本実験計画で、タウニュートリノの研究を行う上での独創的な点は、タウニュートリノと反タウニュートリノを識別して、その反応断面積や基本性質を調べる事にある。過去の実験では、反タウニュートリノ反応を識別出来た例は無い。過去に例をみない試みは、タウ粒子の娘粒子の電荷を1Tのわずか3cmのギャップを用いたemulsion spectrometerで決定し、正・反ニュートリノの識別を行う点である。ミュオンの電荷決定は比較的容易に実現可能だが、タウ粒子のミュオンへの崩壊比は約18%であり、崩壊比で64%のハドロンの電荷決定は極めて重要な要素である。このemulsion spectrometerを実装した検出器で約3倍の正・反タウニュートリノ識別能力を付与することが可能である。結果的にタウニュートリノ(1770反応)

反タウニュートリノ（900 反応）を期待しており、10%以下の誤差での測定を実現する。この emulsion spectrometer はテスト実験(NIM A592 (2008) 56)で技術的な実効性は検証されているが、大規模に実験に適用した例は無く、非常に挑戦的でもある。この emulsion spectrometer 技術の応用範囲は極めて広く、ニュートリノビームの元となる中間子多重発生の詳細研究にも用いようとしている。本研究の為だけでなく、技術開発の価値は高い。

タウニュートリノを実験的に詳細に調べる意義は、レプトンユニバーサルティを実験的に検証することである。タウニュートリノの反応断面積は大気ニュートリノの振動にて質量階層性を決定する上においても、その不定性を下げるうえで重要な要素である。また、タウニュートリノ反応を通してのみ実験的測定が可能な structure function (F4,F5)の初測定といった物理も含まれる。アメリカ Fermilab の Tevatron 加速器 (DONUT 実験で使用)がシャットダウンされた現在、タウニュートリノ反応研究が可能な実験計画はこの SHiP 実験において他には無い。極めてユニークな実験計画であると共に、それを実現可能なのは我々の原子核乾板技術のみである。原子核乾板の解析能力はDONUT 実験を行っていた 20 年前の既に 5000 倍に達しており量的な問題は全く無い。

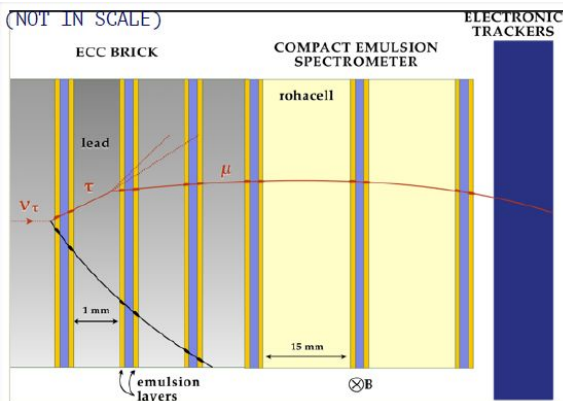
実験の承認に向けた検出器の最適化を踏まえたデザイン、TDR(Technical Design Report)を 2019 年までに準備するに当り、優秀なポストクの養成と予備実験の実施及び解析の継続は重要である。また、emulsion spectrometer は応用範囲の広さから、技術開発の意義は大きい。加えて、これまでに観測されたタウニュートリノ反応が 14 例のみという現状は放置出来ない。

3. 研究の方法

SHiP 実験計画のCERNでの承認に向けたTDR(Technical Design Report)をまとめ上げる上で、大きく分けて 2 つの課題に取り組む。一つは正・反ニュートリノ識別の為の emulsion spectrometer を大規模に実験に適用するための実証試験と検出器デザイン最適化。この実証試験及び開発要素はSHiP 実験計画のみならず広く応用可能な技術の確立にもなる。もう一つは全体の検出効率評価と解析技術の開発である。

上記二つの課題を主にテストビームでの小規模な実験を通して確立していく。SHiP 実験計画はCERNにおいて推進すべき実験計画として認知されており、確実にテストビームが割り当てられている。

過去の emulsion spectrometer テスト実験の結果(NIM A592 (2008) 56)を再度検証すると共に、検証する運動量範囲を 10GeV/c まで拡大することである。先の実験的検証は 0.5GeV/c から 2GeV/c の範囲であり、さらに高いエネルギーまでの実効性の検証が必要である。



左図は SHiP 実験にて想定される原子核乾板ターゲットの模式図である。図の左からタウニュートリノビームが入射している状態。左側にニュートリノ反応ターゲット部 (ECC : Emulsion Cloud Chamber) と右に電荷・運動量を決定するスペクトロメータ部 (CES : Compact Emulsion Spectrometer) の大きく分けて 2 つの機能部分に分かれる。ECC は基本的に過去の DONUT, OPERA 実験にてタウニュートリノ反応の検出に成功している実績のあるものである。今回の SHiP 実験で挑戦的な試みが右側の CES (Compact Emulsion Spectrometer) である。電荷識別の必要性はニュートリノビームの

性質にある。OPERA, T2K 等の pion をニュートリノ源とするビームラインでは、horn magnet にて pion の電荷を選択してフォーカスすることにより、正ニュートリノビームと反ニュートリノビームを選択的に作ることが可能である。しかしながら、DONUT, SHiP 実験の様なチャーム・タウ粒子をニュートリノ源とするビームダンプからのニュートリノは、チャーム・タウ粒子が短寿命であることから、正・反ニュートリノを選択したビームの生成が不可能である。それ故に、反応したニュートリノが正ニュートリノか反ニュートリノかを識別するには、ニュートリノ反応で生成された荷電レプトンの電荷を検出する必要がある。

CES はその名の通り spectrometer であるので、電荷を決定すると共にその運動量を決定することもCESに課された機能である。この検証においては運動量決定精度に関する知見も合わせて検証していく。運動量の決定精度は検出器の分解能と spectrometer 内の多重散乱によって決まってくる。如何に spectrometer 内の物質量を減らせるかも検出器デザインを決定する上での重要な要素である。

先に述べた通り、SHiP はCERNの実験計画として認められており、TDR 作成に必要なテストビームは 2019 年の Long Shutdown までは確実に確保される。これらのテストにはマグネットが不可欠であり、East Area T9 で MNP17 magnet を用いて実施する。

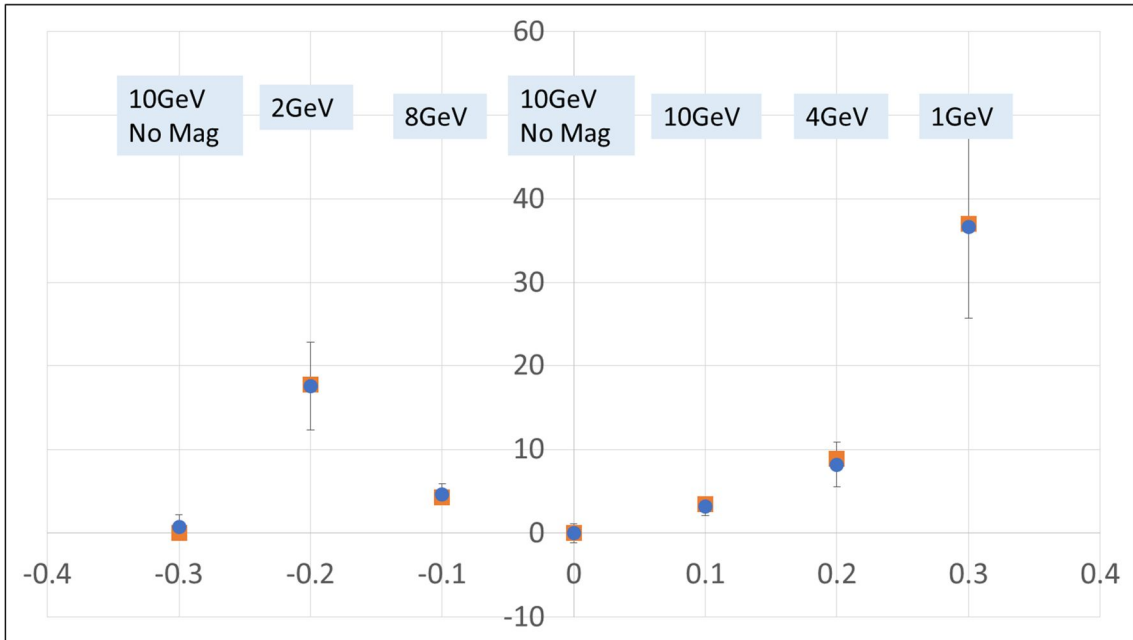
CES(Compact Emulsion Spectrometer)は上図のように 3 枚の原子核乾板フィルムと各 15mm のギャップとで構成される。両端のフィルム上の位置を結んだ直線と中点での変位を測定することで運動量と電荷を決定する。右上の図では 2GeV/c のデータと 10GeV/c でのシミュレーション

ヨン結果を示す。2GeV/c では変位量は 20 μm あり、原子核乾板の高位置分解能から十分実効性が確認できる。しかしながら、さすがに 10GeV/c ともなると期待される変位は 4 μm 程で、原子核乾板と言えども 30mm のギャップと角度を持った飛跡に対する応答などを含めて挑戦的な領域となる。特にアライメント作業は最も重要なポイントで、これらを大規模に実施するための技術開発も本研究課題の中核をなす。

4. 研究成果

CES を SHiP 実験で用いる為には 10GeV/c までの電荷決定性能を実証する必要があり、実際に CERN のテストビームを用いてテスト実験を実施した。過去の先行研究では 2GeV/c までの実績があったが、10GeV/c というより高い運動量での実証はこの研究が初めてである。

下図は CERN のテストビームにて、CES に 1GeV/c から 10GeV/c の pion ビームを照射して実際に磁場による曲りで得られた直線からの変位(Sagitta)の計測を行った結果である。青いプロットがデータで、エラーバーはその分布幅の標準偏差である。重なっていて見にくい、オレンジ



の点が理論予測値である。磁場の無い環境(No Mag)では当然の事ながら変位は 0 と予想されている。エラーバーであらわされた分布の広がり、原子核乾板の測定誤差によるものではなく、CES と言えども 3 枚の原子核乾板という物質を含むため、その物質による多重電磁散乱に

ID	Mean (μm)	Sigma (μm)	Expected Sagitta (μm)	Measured Momentum (GeV/c)	$\delta(1/p)/(1/p)$
1GeV/c	36.69 ± 0.23	10.98 ± 0.30	37.06	1.00	29.9%
2GeV/c	17.53 ± 0.09	5.21 ± 0.11	17.68	2.00	29.7%
4GeV/c	8.20 ± 0.05	2.64 ± 0.06	8.84	4.28	32.2%
8GeV/c	4.65 ± 0.02	1.28 ± 0.02	4.29	7.33	27.5%
10GeV/c	3.23 ± 0.03	1.15 ± 0.04	3.43	10.55	35.6%
No Mag @ 0.0	0.00 ± 0.02	1.14 ± 0.04	0		
No Mag @ -0.3	0.72 ± 0.04	1.51 ± 0.05	0		

よる効果である。しかしながら、エラーバーは十分に y 軸(変位 0)からは分離しているので、十分な電荷識別能力を持つ。上の表は図中の値及び誤差をまとめたもので、運動量精度においても 1 から 10GeV/c 領域において約 30%で決定出来る事を実証した。

この結果を得るまでの前提として、原子核乾板の支持体として複数の物質を試したが、比重は高くなるものの、その小さな熱膨張係数と硬さからガラスベースが最適であることを突き止め、SHiP 実験の更新デザインに反映させた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 OPERA Collaboration	4. 巻 100, 5
2. 論文標題 Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 51301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.100.051301	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 DsTau Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 DsTau: Study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP01(2020)033	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 SHiP Collaboration	4. 巻 14
2. 論文標題 Fast simulation of muons produced at the SHiP experiment using Generative Adversarial Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P11028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/11/P11028	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 H. Rokujo, M. Komiyama, S. Aoki, K. Hamada, T. Hara et al.	4. 巻 14, 09
2. 論文標題 Development of a balloon-style pressure vessel gondola for balloon-borne emulsion gamma-ray telescopes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P09009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/09/P09009	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al.).	4. 巻 1806
2. 論文標題 Final results of the search for μ \rightarrow e oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2018)151	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 OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al.).	4. 巻 120
2. 論文標題 Final Results of the OPERA Experiment on μ \rightarrow e Appearance in the CNGS Neutrino Beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett.	6. 最初と最後の頁 211801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.139901	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 SHiP Collaboration (C. Ahdida (CERN) et al.).	4. 巻 1904
2. 論文標題 Sensitivity of the SHiP experiment to Heavy Neutral Leptons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2019)077	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 SHiP Collaboration (A. Akmete (Middle East Tech. U., Ankara) et al.).	4. 巻 12
2. 論文標題 The active muon shield in the SHiP experiment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P05011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/12/05/P05011	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 SHiP Collaboration (M. Komatsu (Nagoya U.) for the collaboration).	4. 巻 287-288
2. 論文標題 SHiP: a new facility with a dedicated detector for studying tau neutrino properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nucl.Part.Phys.Proc.	6. 最初と最後の頁 151-153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysbps.2017.03.065	査読の有無 無
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 A. Alexandrov (INFN, Naples) et al..	4. 巻 12
2. 論文標題 High-resolution tracking in a GEM-Emulsion detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P09001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/12/09/P09001	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 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 小松 雅宏
2. 発表標題 SHiP実験におけるタウニュートリノ研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松雅宏
2. 発表標題 OPERA実験の最終結果とSHiP実験計画におけるタウニュートリノ物理
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松雅宏
2. 発表標題 SHiP実験計画におけるタウニュートリノのレプトンユニバーサルティ検証
3. 学会等名 日本物理学科2019年年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松雅宏
2. 発表標題 SHiP実験計画におけるニュートリノ物理
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 宇都宮大学峰キャンパス
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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