

## 令和2年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型) 中間評価資料(進捗状況報告書)

### 1. 概要

研究交流課題名 (和文)	ミュー粒子を使ったレプトンフレーバー物理研究のグローバル展開		
日本側拠点機関名	東京大学・素粒子物理国際研究センター		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	素粒子物理国際研究センター・教授 森 俊則		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	スイス	ポールシェラー研究所	Laboratory for Particle Physics, Muon Group Leader, Stefan RITT
	イタリア	国立核物理研究所 ピサ支部	Pisa Section, Research Director, Alessandro BALDINI

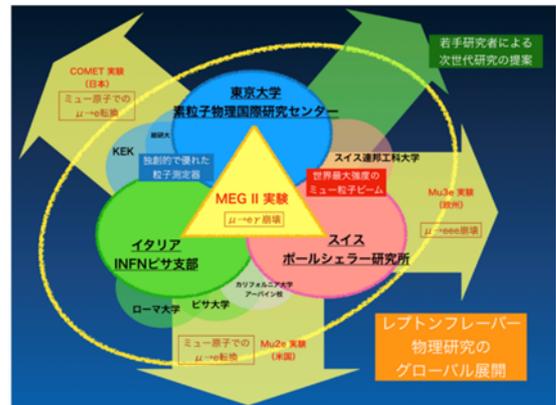
### 2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、当初目的の達成に向け代替的に行った取組があれば、その成果も含めて記入してください。

#### ○申請時の研究交流目標

スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動現象の発見により、ニュートリノの間である電子やミュー粒子にも同様の現象が起こることが予想されている。そのような現象は素粒子の「大統一理論」とも密接に関係し、その研究は「レプトンフレーバー物理」と呼ばれて現在世界的に注目されている。そのレプトンフレーバー物理研究の口火を切ったのが、本事業の拠点機関となる東京大学・素粒子物理国際研究センターの研究グループである。本研究グループはスイス・PSI が持つ世界最強度のミュー粒子ビームラインにおいて、イタリアグループと共



本事業の実施体制概念図

同開発した独創的な粒子測定器を使って、国際共同研究「MEG実験」を実施してレプトンフレーバー物理研究を開拓してきた。今後測定器アップグレードにより実験感度を向上させた「MEG II実験」を開始する。それを追って欧州・日本・米国でMEG II実験とは異なる角度からレプトンフレーバー物理に迫るMu3e実験、COMET実験、Mu2e実験の準備がそれぞれ進められている。

本事業では、(1) 国際共同研究MEG II実験を実施してレプトンフレーバー物理をさらに究め、(2) 追随する3実験のグループと研究交流を行って日本・スイス・イタリアの枠を超えたよりグローバルなレプトンフレーバー物理研究のネットワークを構築し、相乗効果により研究の飛躍的な発展を図る。特に、異なる実験手法により得られる相補的な知見を総合して、より厳しく大統一理論などの超高エネ

ルギーの物理に迫っていく。さらに、(3)これら最先端の研究現場において、次世代のレプトンフレーバー物理研究のアイデアを検討・提案できる若手研究者の育成を行っていく。

#### ○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

- 十分に達成された
- 概ね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

#### 【理由】

本事業開始後2年間の目標は、共同研究によってMEG実験を一桁上回る探索感度のアップグレード実験MEG IIの準備を着実に進め、またそれと並行して、研究者交流とセミナーによって日本・スイス・イタリア間のレプトンフレーバー物理研究の堅固なネットワークを構築していくことである。

そのため、本事業の相手国拠点機関コーディネーターと平成30年4月開催のセミナーで協議し、東京大学・PSI・INFNからメンバーを選抜してコーディネーターチームを結成し、共同研究の計画と調整にあたる研究協力体制を構築した。各チーム責任者には参加研究者の中堅クラスが就き、研究の進捗状況に応じて研究実施場所であるPSIに長期滞在し、国際共同研究全体の運営と方針を主導した。また、共同研究実施途中での重要課題について



平成30年4月 東京大学で開催したキックオフセミナーでの全体集合写真

では、各国の参加研究者が協力してその解決に取り組むために、各種ワーキンググループが形成された。ワーキンググループには、相手国拠点機関から第一線の研究者・ポスドク・博士課程学生といった若手が参加し、積極的に研究交流を行うとともに、課題克服に向けた研究が主体的かつ機動的に行われた。これらのチーム及びワーキンググループの活動内容は、毎週の定期的なリモート会議で共有され、年3回のセミナーで集まって日夜時間をかけて発表・議論を行った。令和2年3月に東京大学で開催する予定だったセミナーは、新型コロナウイルス感染拡大の影響により、3週に分けて時間を拡大してリモート会議の形で開催した。そのため、額を突き合わせた議論を行うことはできなかったが、学生や若手研究者を含むより大勢の研究者が議論に参加することができた。



PSI ビームエリアに設置された MEG II 実験装置

平成30年度にMEG II実験用測定器は全て完成し、令和元年度は各測定器の運転条件の最適化や性能評価試験を行い、エンジニアリングランに万全の体制で臨むための各種準備作業が進められた。残念ながら新型コロナウイルスの影響により、年度最後はPSIでの研究活動ができなくなり、共同研究と研究交流を中断せざるを得なかった。本事業による成果は、既に学術雑誌等に3編発表済みであり、内1編は相手国参加研究者との国際共著論文となっている(“The laser-based time calibration system for the MEG II pixelated Timing Counter” Nucl. Instr. Meth. A. 947, 162672, (2019))。

これらの結果を総合すると、年度最後に新型コロナウイルスの影響で共同研究・研究交流が中断となったが、本事業の目標は予定通りほぼ十分達成できたと考えられる。

### 3. これまでの研究交流活動の進捗状況

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、代替的に行った取組があれば、その内容及び成果も含めて記入してください。

(1)これまで(令和2年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。

※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

#### ○共同研究

##### 【概要】

初年度(平成30年度)に、これまで建設・開発してきたMEG II 実験用測定器は全て完成し、PSI に設置された。各国の研究グループが協力して測定器の立ち上げ作業にあたり、目標とする測定器性能を達成するためのコミッションングが開始された。特に、MEG II 実験の要である液体キセノンガンマ線検出器については、使用する光センサーの較正、専用の低エネルギー陽子加速器により生成した



イタリアの研究グループが開発したドリフトチェンバーの立ち上げ作業

単色ガンマ線を用いた性能試験を行うとともに、本実験で想定するPSIの大強度のミュオン粒子ビームを用いて、背景ガンマ線に関する詳細研究も行った。また、一連の試験を通してノイズの問題など残された課題を洗い出し、原因調査と対処方法を検討した。MEG II 実験を始めとするレプトンフレーバー物理実験で不可欠な測定器の高精度較正、モニター技術の開発も進めた。

令和元年度は、前年に続いて高精度な較正手法と安定運用技術の確立及び試験的に製作された最終型の読み出しエレクトロニクスのビーム下での試験を行った。ビームタイムにおける詳細調査により、測定器の安定運用に必要な改良点が挙がってきており、加速器のシャットダウン期間を生かして対処方法の検討を行った。また、年末に予定されていた較正試験が、ビーム輸送用超伝導電磁石の故障により取得不可能となったため、この原因究明のための作業を実施した。これらすべての共同研究には日本と相手国の学生・若手研究者が主体となって関わっており、今後のレプトンフレーバー物理を担う次世代リーダーの人材育成にも貢献したと考えられる。

年度終わりには新型コロナウイルスの影響により、PSI内での作業がすべて中断された。既に各測定器が現場に揃っており、その較正作業が本格化しているため、コーディネーターチームがコロナ後の共同研究計画とその調整にあっている。また、若手研究者や博士課程学生が中心となって、較正手法の検討から取得データの解析まで、現地から迅速なフィードバックを可能にする協力体制を整えた。これにより、PSI現地での作業が再開され次第、エレクトロニクスの量産、各測定器の設計性能の評価を行い、実験開始へと向かう準備が整っている。

#### ○セミナー

	平成30年度	令和元年度
国内開催	2回	0回
海外開催	2回	2回
オンライン開催	—	1回
合計	4回	3回

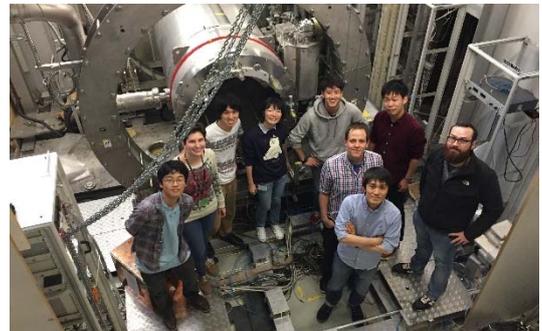
※新型コロナウイルスの影響により、令和元年度の最終回はオンライン開催とした。

## 【概要】

初年度（平成 30 年度）4 月に、MEG II 実験を始めとするレプトンフレーバー物理研究の現状と今後について議論するために、東京大学でキックオフセミナー「Global Developments of Researches in Lepton Flavor Physics with Muons」を開催した。セミナーでは、前身の MEG 実験が開拓したレプトンフレーバー物理研究の変遷や他の国際実験グループへの波及を振り返るとともに、世界的に注目されている MEG II 実験で最大の成果を得るための研究戦略、研究協力体制、セミナー計画について集中的な議論が行われた。その後、6 月・10 月に PSI、翌年 3 月に東京大学を会場として計 4 回のセミナーを開催した。MEG II 実験の準備状況と今後の研究計画ではコーディネーターチーム責任者やワーキンググループリーダーによる 25 の発表が行われ、同時に、本事業における成果や次年度以降の進め方について具体的な議論が行われた。セミナーの参加者人数は、平均して 28 名であった。

令和元年度は、6 月・10 月に PSI、翌年 3 月に東京大学（新型コロナウイルスの影響によりオンライン開催）を会場として、3 回のセミナーを開催した。前年度に完成された全ての測定器を PSI に設置し、コミッシュ開始のフェーズ段階になったことに伴い、各測定器の運転条件の最適化やビームタイムを最大限に活用した性能評価試験が中心的テーマになり、現象の理解と対処方法の検討が重ねられた。各セミナーでは、前年度同様にコーディネーターチーム責任者やワーキンググループリーダーによる 30 近い発表が行われ、データ解析や事象再構成に関するアルゴリズム改良を論点とするものもあった。今後の新物理の多方面からの探索に向けた準備も進められている。

なお、上記セミナーとは別に、**修士及び学部生向けのサマープログラム**を PSI で毎年実施している。ここでは、日本・スイス・イタリア他の学生を対象に、MEG II 実験の最先端実験装置を使った実践的な研修が行われ、若手人材育成のための研究スタートアップの場を提供している。



PSI で開催した修士・学部生向けのサマープログラム

## ○研究者交流

### 【概要】

研究者交流は、**加速器・実験装置が稼働中の 5 月～12 月は共同研究の現地であるスイス・PSI に各国の研究者が集まって実施**しており、日本・イタリアにおいては主にそれ以外の時期に行っている。特に **3 月には日本で 1 年間の共同研究を総括するセミナーを定例開催**することにしており、その機会に活発な研究者交流を実施している。

初年度（平成 30 年度）は、東京大学の参加研究者 11 人（教授 1 人、准教授 1 人、助教 1 人、博士課程学生 3 人、修士課程学生 5 人）がスイス・PSI に延べ 24 人・1,297 日間、参加研究者 1 人（博士課程学生）がイタリア・INFN に 14 日間にわたり、本事業による派遣を行った。また、INFN から PSI には延べ 65 人・732 日間、PSI から INFN には 2 人・6 日間の派遣を行った（いずれも自機関が経費負担）。また、令和元年度は、東京大学の参加研究者 11 人（教授 1 人、准教授 1 人、助教 1 人、博士課程学生 3 人、修士課程学生 5 人）がスイス・PSI に延べ 20 人・1,320 日間にわたり、本事業による派遣を行った。また、INFN から PSI には延べ 91 人・610 日間の派遣を行った（自機関が経費負担）。なお、各相手国から日本への派遣は、PSI は延べ 10 人・60 日間、INFN は延べ 16 人・98 日間



CERN Courier 2019 年 5-6 月号

であった（平成 30 年度実績）。

本事業の共同研究・セミナー・研究者交流の基盤拠点となる PSI に、長期間にわたり継続的な活動を実施できたことは実験プロジェクト全体を大きく加速させるメリットがあり、最前線の研究現場で直接顔を合わせて議論し、研究に専念することができた。学生・若手研究者にとっては、あらゆる面で国際経験を積み、世界と伍して研究開発を進めることを体感できる良い機会になっている。

相手国との共同研究の成果として、**国際共著論文 1 編**（“The laser-based time calibration system for the MEG II pixelated Timing Counter” Nucl. Instr. Meth. A. 947, 162672, (2019)）を発表した。その他、**欧州合同原子核研究機構（CERN）発行の CERN Courier（2019 年 5-6 月号）に本事業 3 カ国の参加研究者の共著により特集記事 “Hunting the Muon’s Forbidden Decay” が掲載された。国際会議における招待講演などの発表数、国内学会・シンポジウム等における発表数も年々増加傾向にあり、共同研究と研究者交流の成果を示しているものと考えられる。**

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、以下の観点から記入してください。

**○日本側拠点機関及び相手国拠点機関の交流によってえられた、世界的水準の国際研究交流拠点となりうるような学術的価値の高い成果**

ヨーロッパでは約 7 年に一度、今後の素粒子物理の方針を議論し、欧州素粒子物理戦略（Update of the European Strategy for Particle Physics）を策定している。今年 6 月に欧州素粒子物理戦略が更新され、エネルギーフロンティアと相補的に多様な実験に取り組む重要性が指摘されており、**その中でスイス・アメリカ・日本でのミュオンを使ったレプトンフレーバー物理研究が明記された。**アメリカでも今後 10~20 年間の素粒子物理研究の方針を議論する Snowmass Process が開始されており、そこでもレプトンフレーバー物理をどう進展させていくかという議論が始まっている。

このように**最近国際的にレプトンフレーバー物理が重要な研究課題として強く認識されているのは、本事業での研究交流活動が世界的に認められてきたことが大きい**と考えられる。これまでミュオンを使ったレプトンフレーバー研究を開拓、牽引してきた東京大学をはじめとする研究グループ



2020 年 6 月 19 日に CERN 理事会が承認した「欧州素粒子物理戦略」の冊子

が提案した MEG II 実験は、他の国際実験に先駆けて物理データ取得を開始する準備が整いつつあり、新しく開発した実験装置により**これまでの実験を大きく超える精度を達成したことが、大きな学術的成果であると高い評価を受けている。**高性能測定器の先進的な研究グループであるイタリア INFN ピサ支部の担当する陽電子スペクトロメーター用飛跡測定器、東京大学が中心となって開発する液体キセノンガンマ線測定器、さらに東京大学とイタリアグループで共同開発を行っている時間計測カウンターの実機が完成し、世界最強度のミュオン粒子ビームを供給する PSI に全ての測定器を結集させた。現在、各グループから成るコーディネーターチームを中心に、各測定器の性能評価試験が進められている。今年エレクトロニクスの量産を経て、いよいよ来年から物理データ収集を開始し、これまでの実験を超える探索感度で  $\mu \rightarrow e \gamma$  事象の発見を目指す準備が整った。今後のデータ取得によって超対称大統一理論を検証できる世界最高精度の研究成果が得られる見込みとなっている。PSI では、MEG II 実験に追随するべくレプトンフレーバー研究を行う Mu3e 実験の準備も進み、来年度以降の実験開始を目指して今年から実際の実験場所でビームを使った試験を予定している。

さらに、**研究交流活動を通して新しい測定技術が開発され、学術雑誌及び国際会議などで発表して**

大きな反響を得ている。その一つが、時間計測カウンターの時間較正を精度良く行うシステムであり、その結果は論文“The laser-based time calibration system for the MEG II pixelated Timing Counter” Nucl. Instr. Meth. A. 947, 162672, (2019)) にまとめられている。この較正方法は SiPM とシンチレーターを組み合わせた高精細測定器に適用された汎用性の高いものとなっており、今後ますます大強度化するビームでは測定器の細分化は必須であることと 50 ps を切る高精度の較正を可能にすることより、多くの実験に適用可能である。また、液体キセノンガンマ線測定器用に浜松ホトニクスと新しく共同開発した SiPM (商品名 MPPC) の真空紫外光に関する感度について、共同研究による成果を論文“Large-area MPPC with enhanced VUV sensitivity for liquid xenon scintillation detector” (Nucl. Instr. Meth. A, 925, pp148-155, (2019)) にまとめたが、この成果は宇宙物理研究などに波及効果を及ぼしている (次項目参照)。

### ○研究交流活動の成果から発生した波及効果

液体キセノンガンマ線測定器用に浜松ホトニクスと共同開発したシリコン光センサー (MPPC) は、面積が大きく、真空紫外光にも感度があって低温でも動作する画期的な光センサーであり、暗黒物質探索などの最先端の宇宙物理実験や医療診断装置などの応用で使用が検討されている。

国際セミナーを積極的に開催したことにより、当初予定していなかったロシアグループとの国際協力がより進展する効果が得られた。オンライン・オフラインでの測定器の可視化プログラムに関して、他の実験 (Muon g-2) にも使用されたロシアグループが作成した枠組みの MEG II 実験への適用可能性が紹介され、活発な議論のきっかけとなった。ここからロシアの研究者とのソフトウェア開発研究ネットワークが形成された。また、ロシアグループが研究所に持つ計算機クラスターを、MEG II 実験の研究開発にも使用可能にする共同利用環境が整い、コラボレーターが自由に活用できるようになった。

### ○若手研究者育成への貢献

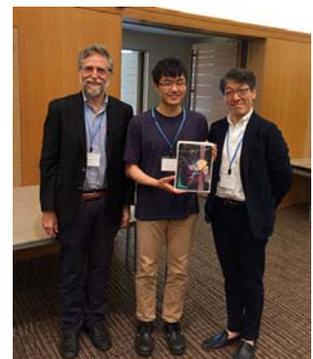
#### ・若手研究者が身につけるべき能力・資質等の向上に資する育成プログラムの実施及びその効果

本事業により、博士課程の学生を中心とする若手研究者を PSI に長期派遣し、新型測定器を使ったエンジニアリング運転に参加させて、各国の研究者との共同研究を実施した。ここで得られる性能が今後の MEG II 実験での学術的成果を大きく左右するため、非常に重要な研究となるだけでなく、英語での研究者交流を含めた共同研究・大型実験施設での実戦経験を積んだ。同じく共同研究に参加するスイス・イタリアの若手研究者とともに、第一線の研究者の指導を受けながら研究が進められ、若手研究者が第一線の研究者へと成長する重要な機会となった。

また、修士及び学部生向けのサマープログラムを PSI で実施し、日本・スイス・イタリア他の学生も含めて MEG II 実験の最先端実験装置を使った実践的な研修を行った。MEG II 実験の最先端測定器の動作試験や較正作業に触れる絶好の機会となるだけでなく、ここで培った国際的な研究交流が今後の活動に生かされている。

レプトンフレーバー物理研究における新しい成果について議論を行う場として、国際セミナーを定期的に行った。特に学生も含めた若手研究者の発表機会をできるだけ設け、プレゼン能力の向上、活発な議論の促進を図った。

国際会議での口頭発表やポスター発表を研究成果が著しい若手研究者には積極的に薦めて、発表の機会を与えた。その結果、日本側参加研究者の修士課程学生の大矢淳史君は、3<sup>rd</sup> International Conference on Charged Lepton



オーガナイザーとともに、受賞時の写真 (中央が本人)

Flavor Violation (cLFV2019) (2019年6月17～19日・福岡)において Best Poster Prize を受賞した。

・ 日本と交流相手国における次世代の中核を担う若手研究者の研究ネットワーク構築状況

MEG II 実験を進める上で特に重要な課題について、各国の研究者が協力して解決に向けて取り組むために各種ワーキンググループが形成された。ここでは、各国参加研究機関からの第一線の研究者及び博士課程学生やポスドクといった若手研究者を積極的に登用した。現在若手研究者の主導により盛んな議論が行われている。これにより、課題の克服に向けた研究を推進するとともに、国際的な研究ネットワークの構築につながると期待されている。