

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05231

研究課題名（和文）大強度ミュオン源で解き明かす荷電レプトンのフレーバー転換探索の新展開

研究課題名（英文）New Initiative on Search for Charged Lepton Flavor Violation with Highly Intense Muon Source

研究代表者

久野 良孝 (Kuno, Yoshitaka)

大阪大学・核物理研究センター・特任教授

研究者番号：30170020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 148,500,000円

研究成果の概要（和文）：この研究の主な目的は、負電荷ミュオンによるミュオン電子転換過程を、これまでの実験上限値を大幅に上回るレベルで探索することである。これは、J-PARC施設で、COMET Phase-I実験として実施される。本研究ではこの実験をより確実なものにし、その感度を数倍向上させることを目指している。具体的には、以下の主要な課題に焦点を当てた。これらは、高い放射線環境下でも正常に機能するために、円筒型のガスドリフトチェンバー（CDC）とそのトリガーホドスコープの放射線耐性を向上させるための設計と製作、そして検出器の準備などである。さらに、CDCの性能評価を行い、物理解析に必要な手法も確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然の謎を探求することは、人類の好奇心を満たし、私たちの生活を豊かにする。特に、宇宙の起源や進化に関する理解は、我々の世界観を深める。このため、素粒子物理学の研究は重要である。私たちは、素粒子の標準理論をより洗練させることで、宇宙の謎を解き明かす手がかりを得ることが期待している。この研究では、ミュオン電子転換実験が重要な役割を果たす。財政的な制約から、実験の開始は遅れたが、数年後には始まる予定である。その際には、自然界の不思議をさらに理解するための重要な一歩となるであろう。

研究成果の概要（英文）：The primary aim of this research is to explore the muon to electron conversion process using negative muons at an experimental sensitivity level significantly surpassing previous experimental limits. This will be conducted as the COMET Phase-I experiment at the J-PARC facility. The goal is to make this experiment more reliable and to enhance its sensitivity by several folds. Specifically, the focus is on the following key tasks: improving the radiation resistance of a cylindrical gas drift chamber (CDC) and its trigger hodoscope to ensure they function normally even in high radiation environments, designing and manufacturing these components, and preparing the detectors. Additionally, performance evaluations of the CDC have been conducted, and the methods necessary for physical analysis have been established.

研究分野：素粒子実験物理学

キーワード：ミュオン 稀崩壊 荷電レプトン フレーバー COMET実験

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の標準理論 (Standard Model) は、これまで多くの物理現象を説明してきた。しかし、宇宙の創成や暗黒物質、暗黒エネルギーなどの自然界の大きな謎に対する解答を与えられず、理論自体にも決定できないパラメータが多くあり、不完全な部分があると考えられている。このため、標準理論を超えるより完全な理論フレームワークの探求が、素粒子物理学の主要な目標となっている。平成24年度、欧州 CERN 研究所の高エネルギーフロンティアである LHC 加速器において、ヒッグス粒子の発見があり、素粒子物理学は大いに盛り上がっている。しかし、これまでに標準理論以外の新しい粒子は LHC で発見されていない。そのため、新しい物理への道筋はまだ見つかっていない。



図 1: 素粒子のフレーバー転換の物理

一方、加速器では到達できないほど高いエネルギースケールの新粒子を探るために、稀崩壊探索という高精度な手法が注目されている。特に、フレーバー転換現象が注目されている。クォークのフレーバー転換 (ある種の素粒子が別の種類の素粒子に変換すること) に関する研究は、2008 年に小林誠・益川敏英両教授がノーベル物理学賞を受賞した。また、日本のスーパーカミオカンデやカナダの SNO 実験などでのニュートリノ振動現象の発見から、ニュートリノには質量があることが確認され、ニュートリノのフレーバー転換も実験的に確立された。これにより 2015 年に梶田隆章教授と A. McDonald 教授がノーベル物理学賞を受賞した。しかし、まだ荷電レプトン間の転換現象は発見されていない。そのため、荷電レプトン間の相互転換現象の発見が待ち望まれている (図 1)。

この研究計画では、ミュオンが電子に転換する過程を探索する。この過程は、荷電レプトン間のフレーバー転換現象であり、荷電レプトンフレーバー非保存 (CLFV=Charged Lepton Flavor Violation) とも呼ばれる。標準理論の枠組みでは起こらないこの現象は、多くの新物理の理論モデルで観測可能と予測されている。例えば、超対称性大統一理論、超対称性シーソー理論、低エネルギーニュートリノシーソー機構理論、Little Higgs 理論、余剰次元理論、Leptoquark 理論などが挙げられる。これらの理論は TeV 以上のエネルギー領域で新しい物理現象が現れることを予測している。そのため、この現象が実際に観測されれば、素粒子物理学にとって画期的な発見となる。

2. 研究の目的

この研究の主要な目的は、負電荷ミュオンを用いたミュオン電子転換 ($\mu \rightarrow e$ 転換) 過程を、現在の上限値を大幅に超える実験精度で探索することである。この実験は、大強度陽子加速器施設 J-PARC において、COMET (COherent Muon to Electron Transition) 実験 (J-PARC E21 実験) として遂行される。COMET 実験は二段階で計画され、それぞれ COMET Phase-I と COMET Phase-II 実験と呼ばれる。特に、本研究では、COMET Phase-I 実験をより確実なものとし、その感度をさらに数倍向上するように実験方法を再構築することを目指している。具体的には、COMET Phase-I 実験をより確実にし、その感度をさらに数倍向上させるための実験の向上を目指す。

3. 研究の方法

ミュオン電子転換過程の測定原理は以下のようである。低エネルギーの負電荷ミュオンを標的物質に静止させると、ミュオン原子が生成される。ミュオン原子の基底状態にあるミュオンがミュオン電子転換反応を起こすと、 $E_{\mu e} = m_{\mu} - B_{\mu} - E_{recoil}$ で与えられる単一の運動エネルギーを持つ電子が放出される。この単一のエネルギーの電子を測定することで、ミュオン電子転換事象を同定する。ここで m_{μ} 、 B_{μ} 、 E_{recoil} はそれぞれミュオンの質量、ミュオン原子の束縛エネルギー、原子核の反跳エネルギーを表す。COMET

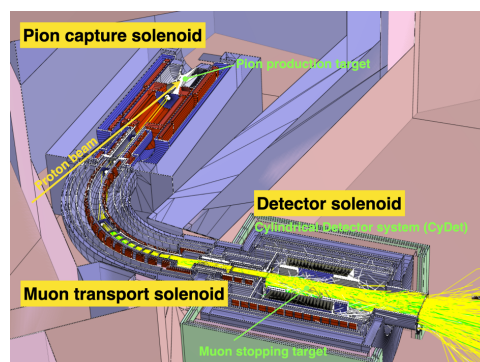


図 2: COMET Phase-I レイアウト

Phase-I 実験で使用するアルミニウム標的では、放出される電子のエネルギーは約 105 MeV である。現在の実験の上限値は、 $B(\mu^- + Au \rightarrow e^- + Au) < 7.0 \times 10^{-13}$ (90% 信頼度) である。COMET Phase-I 実験では、この実験精度を目指し、 $B(\mu^- + Al \rightarrow e^- + Al) < 7.0 \times 10^{-15}$ (90% C.L.) を達することを旨とする。

背景事象には、(1) ミューオン起源のバックグラウンドと (2) ビーム起源のバックグラウンドがある。前者の場合、束縛された状態のミューオンが崩壊し、放出された電子が原子核の反跳によって加速される可能性がある。後者の場合、ビーム中のパイオンが標的に衝突して生成された光子が電子を放出することが考えられる。前者のバックグラウンドを抑制するためには、信号とバックグラウンドを識別するために非常に高い精度で電子の運動量を測定する必要がある。このため、高い運動量分解能を持つ電子飛跡検出器が必要である。COMET Phase-I 実験では、円筒型ドリフトチャンバーがこの目的で使用される。後者のバックグラウンドにおいては、パイオンが最も問題となる。このためにパルス状時間構造を持つ陽子ビームを採用する。

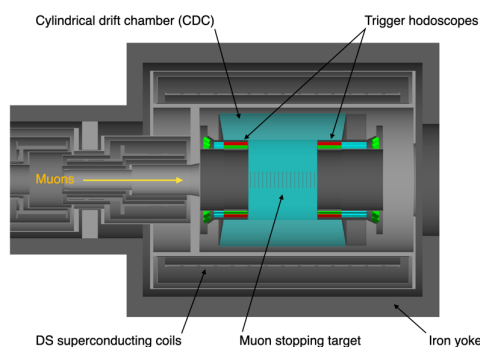


図3：円筒型ガスドリフトチャンバー (CDC) レイアウト

COMET Phase-I 実験の装置は、茨城県東海村の J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) に設置される。Phase-I 実験のレイアウトは、図2に示されていて、パイオン捕獲部、ミューオン輸送部、および検出器部から構成される。J-PARC メインリングからの陽子ビームは、パイオン捕獲部内に設置された陽子標的に照射され、そこで多数のパイオンが生成される。これらのパイオンは高磁場超伝導ソレノイド磁石によって捕獲され、次にミューオンに崩壊する。その後、これらのミューオンは湾曲ソレノイドからなるミューオン輸送部を通じて検出器部に輸送される。COMET Phase-I の検出器は、大きな立体角と高い運動量分解能を実現するために円筒型ガスドリフトチャンバー (CDC) を使用する。これは全てステレオワイヤのドリフトチェンバーである。CDC の中心にはミューオン静止標的があり、これにはアルミニウム (Al) が使用されており、17 枚の 200 μ m の薄いディスクが並べられている。電子事象をトリガーするために CTH (Cylindrical Trigger Hodoscope) 検出器が、CDC の内側に置かれている。これらは、CCDC の上流と下流側にあり、CDC 検出器のドリフト時間の基準と示す信号を生成する。CDC は、約 1 T の磁場を発生する超伝導検出器ソレノイド磁石 (DS) の中心に配置されている。CDC の横運動量の閾値は約 70 MeV/c であり、バックグラウンドとなるミューオン崩壊からの電子 (<52MeV/c) は CDC に到達しない。そのため、CDC を使用して μ -e 転換からのシグナル電子をクリーンな環境で測定することができる。検出器の拡大図を図3に示す。

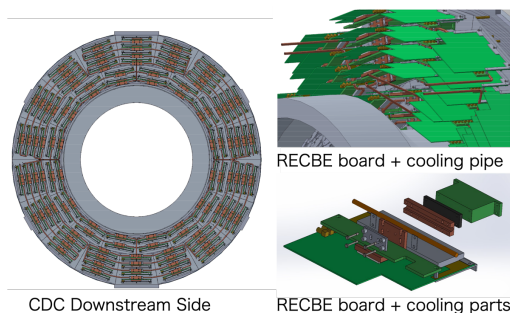


図4：RECBE 冷却装置レイアウト

4. 研究成果

CDC 検出器の耐放射線化：COMET 実験の検出器は、陽子ビーム標的と陽子ビームダンプに近い場所に設置されるため、高い放射線環境にさらされる。そのため、実験機器の放射線耐性が非常に重要になる。まず、CDC 検出器からのシグナルを処理するフロントエンド読み出し電子回路 (RECBE) は、CDC 検出器に直接接続され、高放射線の影響を受ける。放射線劣化が少ない電子部品を選択するために、2018 年度からガンマ線と中性子の放射線照射試験を行った。ガンマ線照射試験は、大阪大学の量子ビーム科学研究所や東京工業大学の放射線研究センター、JAEA 高崎研究所などで、 ^{60}Co 装置を用いて行われた。また、中性子照射試験には神戸大学や九州大学の静電タンデム加速器を使用した。COMET Phase-I 実験の期間中、予想される積算ガンマ線量は 0.2kGy であり、中性子量は約 10^{11} 中性子/cm 2 である。これに、十分なマージンを含めて、ガンマ線は 2kGy、中性子は 10^{12} 中性子/cm 2 の放射線量を目標とした。電子部品選択の作業は試行錯誤であり、数年に渡り、複数回行った。その結果、最終的に放射線耐性のある電子部品を選択することができた。これにより、RECBE の放射線損傷が許容レベルに抑えられ、安定した動作を確認することができた。

また、RECBE に実装されている FPGA についても、中性子照射試験を行い、そのソフトウェアエラーについて評価した。FPGA の SEU (Single Event Upset) や MEU (Multiple Event Upset) が問題となる。特に、後者は URE (Un-Recoverable Error) になり、FPGA にプログラムをダウンロード

しなければならない状態になる。この頻度を下げるために、自動復帰プログラムとして、3 つ同じプログラムを FPGA に入力してエラー後の回復を試す TMR (Triple Module Redundancy) を実装した。その結果、104 台の RECBE のうち 1 台が URE となる確率は、約 30 分に 1 回となった。また、主たる DAQ マスタ (FC7) から RECBE へのダウンロードするシステムを新たに構築した。

これらの結果を受けて、放射線に強い RECBE を CDC 検出器に取り付けることができると判断した。そして、2019 年の夏から全ての RECBE を CDC 本体に取り付ける作業を開始した。まず、CDC のセンスワイヤーを固定しているフィールドスルーに外部から短いケーブルを取り付ける。その後、RECBE のサポート板をセットし、前述のケーブルと接続する。そして、RECBE サポート板の上に合計 104 台の RECBE を取り付けた。2019 年秋から、全ての RECBE を搭載した CDC 検出器の性能評価試験を開始した。この試験は高エネルギー加速器研究機構の富士実験室で行われた。この結果は以下の宇宙線テストでの性能評価の項目で詳細に説明する。

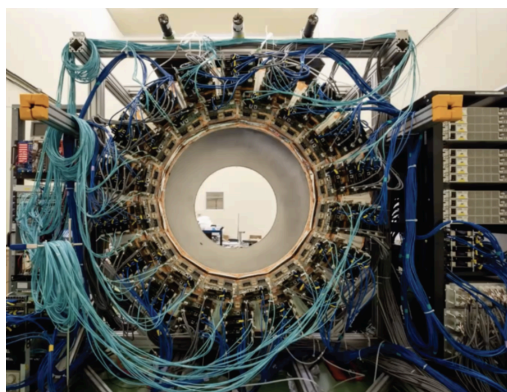


図 5: CDC の宇宙線テスト。RECBE が取り付けられているのが見られる。

CDC トリガーカウンターの耐放射線化 : CDC トリガーカウンターである CTH 検出器は、CDC 検出器のドリフト時間の基準を決める信号を生成する。これは上流と下流の端に配置される。下流側に置かれた RECBE などの装置を考慮して、下流側のライトガイドが上流よりも長くなっている。高速プラスチックシンチレーター (BC408) や UV 透過のアクリルを使用する。当初は、光センサーとして、1 テスラの磁場下でも動作するファインメッシュ光電子増倍管 (PMT) を使用することを検討していた。しかし、このファインメッシュ PMT は高価なので、第 1 段階として、より安価なシリコン PMT (MPPC) を使用することになった。MPPC は光量が少ない。この MPPC の光量を増幅するためには、増幅アンプをオーストラリアの Monash 大学が製作した。更に、MPPC は放射線耐性に問題があるため、その対処が必要となる。MPPC を低温に冷却し放射線による暗電流の増加を抑える研究を進めた。-40 度のエタノールを冷媒として MPPC を冷却する試作品を九州大学で作成し、MPPC 自身は -30 度に冷やすことに成功している。これにより、放射線下においても MPPC の暗電流が十分に抑制されることを確認した。

検出器ソレノイド磁石のクライオスタット容器の製作 : 前述のように、COMET 実験グループ内部の調整により、ブリッジ・ソレノイド磁石の替わりとして、検出器ソレノイド磁石のクライオスタット容器の製作を本研究で行うことになった。検出器ソレノイド磁石のクライオスタット容器が予算内で成功裏に東芝により製作された。

このように、応募時の研究計画調書に記載した三項目について全て完了した。以下に研究を遂行する上で、本研究で進めた関連する事項について記述する。

CDC 読み出し電子回路 RECBE の冷却 : ガス検出器にとって、ガス増幅の安定性は重要であり、そのために安定な温度を保つことが不可欠である。RECBE のような電子基板が検出器の下流端板に近接していると、熱が発生し、これがガス増幅の安定性に影響を与える可能性がある。さらに、過剰な熱は電子機器の性能にも影響を与える可能性がある。したがって、検出器内の温度を制御することは必要な性能を実現するために不可欠である。

RECBE は CDC 検出器における主要な熱源である。合計 104 枚の RECBE 基板が下流端板に取り付けられ、環境ノイズから保護するために電子カバーで覆われた閉空間に置かれている。CDC 内での総潜在的な熱発生量は 2kW と推定されている。この 2kW という大きな熱発生量のため、アクティブな冷却が必要である。CDC では水冷システムを使用することにした。CDC の温度を安定させるために、冷却パイプは RECBE 基板に設置され、RECBE 上の FPGA に取り付けられた銅ブロックを冷却する。端板には 10 本の循環ラインがある。この設計により、CDC の効果的な冷却と RECBE 基板の安定した温度維持が保証された。2kW の冷却能力を達成するために、入力と出力の間の 10° C の温度差で、約 3 リットル/分の水流が必要である。ウ

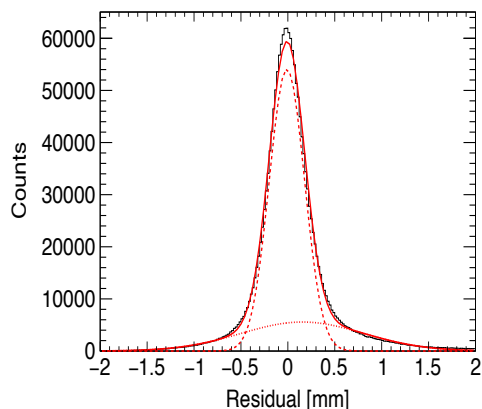


図 6 : CDC の残差分布。2つのガウス関数。

オーターハンマー現象を防ぐために、流速を2メートル/秒以下に保った。このため、パイプのサイズは1/8インチとした。冷却システムは実験エリアに設置され、水管は放射制御エリアに置かれる。出力水は、測定用の底部にサンプリングポートが付いた100リットルのバッファータンクに保存される。水冷装置は高いポンピング速度を持ち、十分な冷却能力を有する。このシステムはリモートで制御可能である。これらのシステムにより、実機試験において RECBE の温度を適温に維持することができた。

CDC の宇宙線テストの性能評価の結果: CDC の性能試験は、磁場を使用せずに、宇宙線を利用して行われた。図5に宇宙線試験セットアップでの CDC を示す。He:i-C4H10 (90:10) の混合ガスを用いて、+1850 V までの高電圧をかけた。104 枚の RECBE は全て動作することも確認した。

CDC の直線トラック再構成プログラムを開発し、再構成されたトラックを用いて CDC の性能評価を行った。図6に、ヒットワイヤと再構成されたトラックの最短距離とドリフト距離の差から導かれる分布を示す。残差分布を2つのガウス関数で解析した。そのコア部分は $180 \mu\text{m}$ の標準偏差を得た。コア以外の部分については、以下の2つの原因に起因する。1つは、ヘリウムのガス中の比較的少数の混合物による電子イオン対の寄与である。もう1つは、セルの端近くでの電場の歪みである。位置分解能は、中間範囲では $150 \mu\text{m}$ 未満であるが、センスワイヤとフィールドワイヤ近くでは大きくなる。短距離では、主要イオンの数が少ないため位置分解能が悪化するが、長距離では電子の縦方向の拡散が分解能に影響を与え、さらにセルの端近くでは電場の歪みが支配的である。位置分解能は、上記のように得られたコアのガウス関数の標準偏差の幾何平均から推定した。全体の位置分解能は $170\text{-}190 \mu\text{m}$ となった。これは COMET 実験の要求性能を満たしている。単一セル内のヒット効率は、対象セルを使用せずに再構成されたトラックにつき、対象セルでヒットの数を、それを通過するトラック数で割った比率で定義した。ハードウェアレベルの解析では、セル端を除くと、ほぼ100%という結果が得られている。

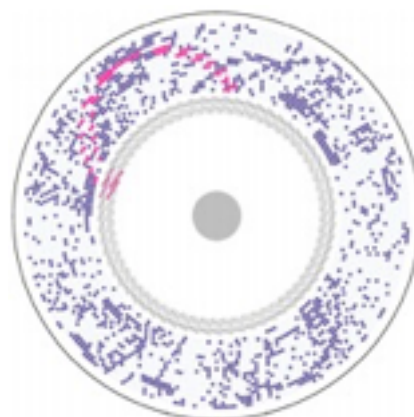


図7: 事象ディスプレイ

CDC トラック解析の開発: COMET Phase-I のトラック解析は、track finding と track fitting から構成される。Track finding では、トラックに関連付けられた候補ヒットを識別し、バックグラウンドヒットを排除する。特に、高い放射線環境下では、多くのバックグラウンドヒットが存在し、それらから信号ヒットを抽出することが重要となる。現在、CDC でのバックグラウンドヒットの占有率が約50%であることが期待される。図7にシミュレーションから得られた典型的な事象ディスプレイを示す。これから、できるだけ多くの信号ヒットを保持しながら、いくつのバックグラウンドヒットが削除しなければならない。この目標を達成するために、2つの異なるニューラルネットワークアルゴリズムが考慮された。それらは、De-noising Convolutional Neural Network (DnCNN) と Feature Neural Network (FPN) である。両者を比較した時、FPN がより良い性能を示し、信号ヒットの保持率は90%で、バックグラウンドヒットの拒否率は95%であった。

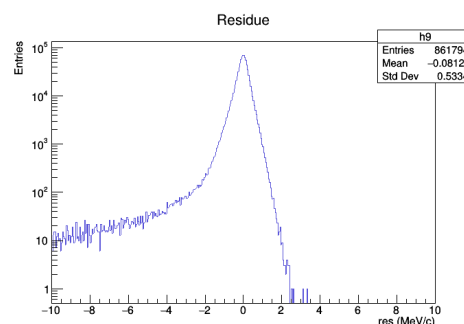


図8: track fitting によって再構成された電子の運動量分布。低い運動量側のテールは電子の静止標的中のエネルギー損失による。GBDT を使って高い運動量側のテールは減少されている。

次に、このように選択されたヒットを用いた track fitting が行われる。Track fitting には多重散乱を補正する Kerman filtering を取り入れた Genfit を採用している。COMET 実験では、高運動量側のテールにあるイベントを除去することが重要である。この問題を克服するために、我々は、Gradient Boosted Decision Tree (GBDT) などの多変量解析を用いて、高運動量テールイベントを排除する新しい手法を提案した。予備結果では、GBDT を用いることで、 3 MeV/c より大きな高運動量テールイベントを除去することができ、かつ信号事象の90%を保持できるという結果が得られた(図8)。このように機械学習手法を用いて CDC のトラック性能を改善するための研究も推進することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yeo Beomki, Lee MyeongJae, Kuno Yoshitaka	4. 巻 258
2. 論文標題 GPU-accelerated event reconstruction for the COMET Phase-I experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107606 ~ 107606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107606	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 Volkov A., Evtoukhovich P., Kravchenko M., Kuno Y., Mihara S., Nishiguchi H., Pavlov A., Tsamalaidze Z.	4. 巻 1004
2. 論文標題 Properties of straw tubes for the tracking detector of the COMET experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165242 ~ 165242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165242	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 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Ikeno Masahiro, Kuno Yoshitaka, Lee MyeongJae, Mihara Satoshi, Shoji Masayoshi, Uchida Tomohisa, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka	4. 巻 68
2. 論文標題 An FPGA-Based Trigger System With Online Track Recognition in COMET Phase-I	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 2028 ~ 2034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2021.3084624	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 Wu C., Wong T.S., Kuno Y., Moritsu M., Nakazawa Y., Sato A., Sakamoto H., Tran N.H., Wong M.L., Yoshida H., Yamane T., Zhang J.	4. 巻 1015
2. 論文標題 Test of a small prototype of the COMET cylindrical drift chamber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165756 ~ 165756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165756	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 MICE collaboration	4. 巻 578
2. 論文標題 Demonstration of cooling by the Muon Ionization Cooling Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 53 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-1958-9	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 Davidson S., Kuno Y., Uesaka Y., Yamanaka M.	4. 巻 102
2. 論文標題 Probing μe contact interactions with μe conversion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 115043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.115043	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 Kuno Yoshitaka, Pignol Guillaume	4. 巻 21
2. 論文標題 Precision experiments with muons and neutrons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Comptes Rendus. Physique	6. 最初と最後の頁 121 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5802/crphys.13	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 Kalinnikov V., Velicheva E., Grabtchikov A., Khodasevich I., Orlovich V., Kuno Y., Sato A.	4. 巻 23
2. 論文標題 Investigation of the Light Yield Distribution in LYSO Crystals by the Optical Spectroscopy Method for the Electromagnetic Calorimeters of the COMET Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nonlinear Phenomena in Complex Systems	6. 最初と最後の頁 374 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.33581/1561-4085-2020-23-4-374-385	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 Moritsu Manabu, KUNO YOSHITAKA, Matsuda Yugo, Nakazawa Yu, Ohta Saki, Sakamoto Hideyuki, Sato Akira, Wong Ming Liang, Wong TingSam, Wu Chen, Yoshida Hisataka, Jiang Xiaoshan, Li Hai-bo, Nakatsugawa Yohei, Zhang Jie	4. 巻 1
2. 論文標題 Commissioning of the Cylindrical Drift Chamber for the COMET experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS EPS-HEP2019	6. 最初と最後の頁 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.364.0128	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 Yeo Beomki, Lee MyeongJae, Kuno Yoshitaka	4. 巻 258
2. 論文標題 GPU-accelerated event reconstruction for the COMET Phase-I experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107606 ~ 107606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107606	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 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Gillies Ewen, Hamada Eitaro, Igarashi Youichi, Lee MyeongJae, Moritsu Manabu, Matsuda Yugo, Miyazaki Yuta, Nakai Yuki, Natori Hiroaki, Oishi Kou, Sato Akira, Uchida Yoshi, Ueno Kazuki, Yamaguchi Hiroshi, Yeo BeomKi, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 955
2. 論文標題 Radiation hardness study for the COMET Phase-I electronics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 163247 ~ 163247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163247	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 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Hamada Eitaro, Lee MyeongJae, Miyazaki Yuta, Sato Akira, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 936
2. 論文標題 Radiation study of FPGAs with neutron beam for COMET Phase-I	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 351 ~ 352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.10.130	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 Davidson Sacha, Kuno Yoshitaka, Yamanaka Masato	4. 巻 790
2. 論文標題 Selecting $\mu N \rightarrow e N$ conversion targets to distinguish lepton flavour-changing operators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 380 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.01.042	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 Kuno Yoshitaka, Sato Joe, Sato Toru, Uesaka Yuichi, Yamanaka Masato	4. 巻 100
2. 論文標題 Momentum distribution of the electron pair from the charged lepton flavor violating process $\mu e \rightarrow ee$ in muonic atoms with a polarized muon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.075012	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 Davidson Sacha, Kuno Yoshitaka, Saporta Albert	4. 巻 78
2. 論文標題 Spin-dependent $\mu \rightarrow e$ conversion on light nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-5584-8	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 Hashim I. H., Ejiri H., Shima T., Takahisa K., Sato A., Kuno Y., Ninomiya K., Kawamura N., Miyake Y.	4. 巻 97
2. 論文標題 Muon capture reaction on Mo100 to study the nuclear response for double- β decay and neutrinos of astrophysics origin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.014617	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 Uesaka Yuichi, Kuno Yoshitaka, Sato Joe, Sato Toru, Yamanaka Masato	4. 巻 97
2. 論文標題 Improved analysis for μe $e e$ in muonic atoms by photonic interaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.015017	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 -

1. 著者名 Sato Joe, UESAKA Yuichi, KUNO YOSHITAKA, Sato Toru, Yamanaka Masato	4. 巻 1
2. 論文標題 A proposal of a New Charged Lepton Flavor Violation Experiment: μ - e - e - e in muonic atom	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PoS Nufact2017	6. 最初と最後の頁 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.295.0125	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 -

1. 著者名 G. Adamov et al. (COMET collaboration)	4. 巻 1
2. 論文標題 COMET Phase-I Technical Design Report	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 arXiv:1812.09018	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Hamada Eitaro, Lee MyeongJae, Miyazaki Yuta, Sato Akira, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 1
2. 論文標題 Radiation study of FPGAs with neutron beam for COMET Phase-I	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.10.130	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 Davidson Sacha, Kuno Yoshitaka, Yamanaka Masato	4. 巻 790
2. 論文標題 Selecting μ e conversion targets to distinguish lepton flavour-changing operators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 380 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.01.042	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 -

〔学会発表〕 計45件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 野口恭平, 藤井祐樹, 深尾祥紀, 橋本義徳, 樋口雄也, 本田良太郎, 五十嵐洋一, 池田史, 三原智, 武藤亮太郎, 中沢遊, 西口 創, 大石航, 庄子正剛, 田村文彦, 東城順治, 富澤正人, 上野一樹, 吉田学立,
2. 発表標題 COMET実験に向けたJ-PARC加速器を用いたエクステンション試験の結果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Sun Siyuan, Masaharu Aoki, Yuya Higuchi, Yoshitaka Kuno, Manabu Moritsu, Yohei Nakatsugawa, Yu Nakazawa, Akira Sato, Wu Chen, Hisataka Yoshida
2. 発表標題 Study of Gas Gain Saturation in COMET-CDC Cosmic Ray Test
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 森津学, Hai-Bo Li, Tianyu Xing, Ye Yuan, Yao Zhang
2. 発表標題 COMET実験におけるCDCの飛跡再構成手法の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 樋口雄也、中津川洋平、森津学、久野良孝、吉田学立、青木正治、佐藤朗、中沢遊、Wu Chen、Sun Siyuan、他COMET-CDCグループ
2. 発表標題 COMET-CDCの宇宙線試験による性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Sun Siyuan, Yohei Nakatsugawa, Yuya Higuchi, Masaharu Aoki, Yoshitaka Kuno, Manabu Moritsu, Yu Nakazawa, Akira Sato, Wu Chen, Hisataka Yoshida, and the COMET-CDC group
2. 発表標題 Study of Gas Gain Saturation in COMET CDC
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 佐藤良紀、松本岳、上野一樹、青木正治、東城順治、三原智、吉田学立、藤井祐樹
2. 発表標題 COMET実験のトリガー検出器に用いる新型SiPMの中性子耐性評価試験
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 un Siyuan, Masaharu Aoki, Yuya Higuchi, Yoshitaka Kuno, Manabu Moritsu, Yohei Nakatsugawa, Yu Nakazawa, Akira Sato, Wu Chen, Hisataka Yoshida, and the COMET-CDC group
2. 発表標題 Study of Gas Gain Saturation for Cylindrical Drift Chamber in COMET Phase-I with cosmic-ray test
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 樋口雄也、三原智、五十嵐洋一、西口創、上野一樹、深尾祥紀、藤井祐樹、庄子正剛、東城順治、本多良太郎、吉田学立、野口恭平、中沢遊、Wu Chen、池田史
2. 発表標題 HULを用いた8GeV extinction 試験におけるDAQシステムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Muon to Electron Conversion in Muonic Atom
3. 学会等名 CTS Dark Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Overview of Muon Physics
3. 学会等名 2nd International Workshop on EMUs Multidisciplinary Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Searching for Muon to Electron Conversion in a Muonic Atom
3. 学会等名 2nd IBS Conference on Dark World (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 4. Muon to Electron Conversion with COMET at J-PARC
3. 学会等名 The 2019 International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation (BLV2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Pulsed Muon Beam Experiments
3. 学会等名 The 21st International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFACT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Overview of Charged Lepton Flavour Violation
3. 学会等名 The 19th Lomonosov Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Search for Charged Lepton Flavour Violation with Muons
3. 学会等名 International Workshop on Anomalies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chen Wu
2. 発表標題 8. Search for Muon to electron conversion J-PARC; The Current Status of COMET Experiment
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (CLFV2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Physics Prospects with Muons
3. 学会等名 The Open Symposium on 2020 Update of European Strategy for Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisataka Yoshida
2. 発表標題 COMET experiment
3. 学会等名 KPS-JPS joints symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kuno
2. 発表標題 Experimental Prospects of Charged Lepton Flavour Violation
3. 学会等名 International Workshop on Prospects of Neutrino Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 学立
2. 発表標題 COMET-CDC検出器のフル稼働と今後の計画
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田 早紀
2. 発表標題 COMET-CDC検出器における宇宙線試験の解析(2)
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 良紀
2. 発表標題 COMET実験のための新型SiPMの中性子耐性評価試験
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 学立
2. 発表標題 COMET-CDC検出器の現状と今後の計画
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田 早紀
2. 発表標題 COMET-CDC検出器における宇宙線試験の解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yoshida
2. 発表標題 COMET Experiment
3. 学会等名 Symposium for Muon and Neutrino Physics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wu Chen
2. 発表標題 Search for Muon to Electron Conversion at J-PARC
3. 学会等名 Future Programme of Intensity Frontier of Particle Physics at China's High Power Hadron Accelerators 1st Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kuno
2. 発表標題 General features of LFV experiments with muons
3. 学会等名 The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics (at Amsterdam, Netherlands, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yoshida
2. 発表標題 COMET experiment ; search for muon to electron conversion
3. 学会等名 New Trends in High-Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kuno
2. 発表標題 Search for Muon to Electron Conversion in a Muonic Atom
3. 学会等名 Physics of muonium and related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kuno
2. 発表標題 Search for Charged Lepton Flavor Violation with Muons
3. 学会等名 5th International Workshop on “ Dark Matter Dark Energy, and Matter Antimatter Asymmetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wu Chen
2. 発表標題 The Design of Muon Production Target and The Application of FFAG
3. 学会等名 Future Programme of Intensity Frontier of Particle Physics at China's High Power Hadron Accelerators 2nd Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wu Chen
2. 発表標題 Background Study of the COMET Experiment
3. 学会等名 Future Programme of Intensity Frontier of Particle Physics at China's High Power Hadron Accelerators 2nd Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nakazawa
2. 発表標題 Radiation study of FPGAs with neutron beam for the COMET Phase-I
3. 学会等名 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田学立
2. 発表標題 COMET-CDC の宇宙線を用いた性能評価試験(5)
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 松田悠吾
2. 発表標題 COMET-CDC における宇宙線試験のアライメント解析(2)
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 中沢遊
2. 発表標題 COMET-CDC のためのトリガーシステム開発状況
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 TingSam Wong
2. 発表標題 Tracking Finding for COMET experiment with Convolution Neural Network
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 Wu Chen
2. 発表標題 Track Fitting of COMET CDC
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 太田早紀
2. 発表標題 COMET-CDC の宇宙線を用いた位置分解能の評価試験
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田悠吾
2. 発表標題 COMET-CDC における宇宙線試験の解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yao Weichao
2. 発表標題 The New Study for Phase-II of COMET Experiment
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中沢遊
2. 発表標題 COMET Phase-I のための飛跡検出器情報を用いたオンライントリガーシステムの開発 状況
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tai Thanh Chau
2. 発表標題 Result for communication test of online trigger system of Cylindrical Drift Chamber for COMET Phase-I experiment
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田学立
2. 発表標題 COMET Phase-I CDC のためのSlow Control System の開発状況(2)
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久野良孝
2. 発表標題 素粒子と原子物理の融合が拓く新たなミュー粒子物理のフロンティアまとめ
3. 学会等名 日本物理学会第74回2019年次大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

COMET Web page http://comet.kek.jp/Introduction.html 久野研究室 http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp COMET Web page http://comet.kek.jp/Introduction.html 久野研究室 http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp 久野研究室 http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp COMET MU-E CONVERSION http://comet.kek.jp/Introduction.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	佐藤 朗 (Sato Akira) (40362610)	大阪大学・理学研究科・助教 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	東城 順治 (Tojo Junji) (70360592)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	

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			
英国	Imperial College London			
フランス	University of Clermont-Ferrany	LPC CARN	Sorbonne University	
ドイツ	Technical University of Dresden			
中国	Institute of High Energy Physics	Sun Yat-Sen University	Nanjing University	他2機関
韓国	Sungkyunkwan University			
ロシア連邦	Joint Institute for Nuclear Research	Budker Institute of Nuclear Physics		
ジョージア	Georgian Technical University	Tbilisi State University		
マレーシア	University of Malaya	Technical University of Malaysia		
ベトナム	University of Ho Chi Minh			
インド	Indian Institute of Technology Bombay			