

【2】研究計画 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。

(1) 研究の概要及び研究の位置づけ 本項目は1頁に収めてください。

- ・まず、研究課題名及び研究の概要を500字程度で記入してください。
- ・続けて、特別研究員として取り組む研究の位置づけについて、当該分野の状況や課題等の背景、並びに本研究計画の着想に至った経緯も含めて記入してください。

研究課題名：COMET Phase-Iに向けたエンジニアリングランおよびその物理解析

概要

素粒子物理学における標準模型は、物質の最小構成要素である素粒子における基本的な相互作用を記述する理論である。標準模型は未だ不完全で、新理論の発見が待ち望まれている。本研究で探索する荷電レプトンフレーバー非保存過程 (以下、charged Lepton Flavor Violation:cLFV) は標準模型では崩壊分岐比が 10^{-54} 以下と非常に強く抑制されている。一方、多くの新理論内ではこの過程が 10^{-15} 程度の確率で観測可能と示唆されている。従って、cLFVの発見は標準模型の寄与がなく、**新物理の直接的な証拠**となる。COMET実験ではミューオン電子転換過程 ($\mu^- + N \rightarrow e^- + N$) と呼ばれる cLFV の一種を探索する。COMET実験は現状のミューオン電子転換過程に対する 世界最高感度を二桁ほど更新するものとなる。現在COMETでは**2026年末に初のビーム供給を控えており、それに向けた検出器のインストールおよび物理解析に向けた較正などが最優先の課題**として挙げられる。

研究の位置付け

・当該分野の状況

ミューオン電子転換探索の世界最高感度は、先行実験のSINDRUM-IIでの 7×10^{-13} であり、発見には至らなかった^[1]。この測定では連続的なビームを使用したため、ビーム由来の背景事象が常に存在し、ビーム強度に対する探索感度に制限があった。そこでCOMET実験では、パルス状のビームを使用することと標的にアルミニウムを使用することで背景事象の問題を克服する。ビームのパルス間隔 $1.17 \mu\text{s}$ に対し、原子中のミューオン寿命が $0.86 \mu\text{s}$ と長いアルミニウムをミューオン静止標的に採用し、陽子ビームのバンチタイミングから遅れてトリガーをかける。これにより、ビーム由来のバックグラウンドが大幅に低減する。同様の実験として米国Fermi研究所にて建設中のMu2e実験^[2]があるが、COMET実験が先行して、世界最高感度に到達する計画である。

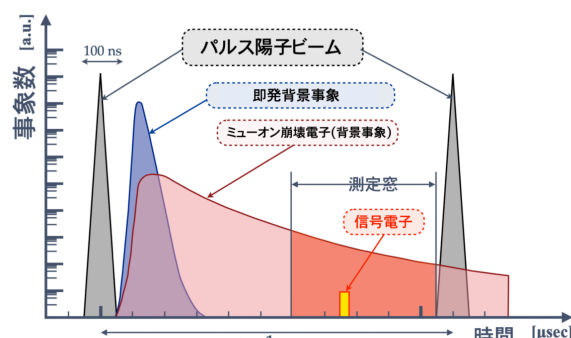


図 1: ビームの時間構造

・本研究の着想に至った経緯

COMET実験における背景事象にはビーム由来のもの以外に、原子軌道上におけるミューオンの三体崩壊 (Decay In Orbit:DIO) による電子があげられる。そこで検出された電子の運動量を用いて、DIOによる電子とミューオン電子転換による電子を見分ける。ミューオンビームのアルミニウム標的への照射は1 Tのソレノイド磁場内で行う。そのため、荷電粒子が磁場中で螺旋運動する性質を用いて、運動量を測定することができる。具体的にはガス飛跡検出器 (Cylindrical Drift Chamber:CDC) による電子の飛跡の曲率と磁場の値よりその運動量を測定することができる。そこで、CDCで検出された背景事象を含むヒットのうち信号電子の飛跡を見つけるアルゴリズムの開発が必要不可欠であり、DIOによる信号と分離するためには**105 MeV/cの運動量分解能**が要求されている。

COMET実験は2026年に全ての装置のインストールが完了し、同年末には低強度ビームでの物理測定を開始し、2028年にはいよいよCOMET Phase-Iが開始する予定である。従って2026年以降にはCDCの運動量較正や上述の物理解析手法の確立を行うことが優先順位の極めて高い項目である。そこで、申請者の修士課程における**磁場分布に関する経験**やトラッキングアルゴリズムに対する理解を活かし、**世界最高感度でのミューオン電子転換過程探索**を実現する。

[1] SINDRUM-II Collaboration, Eur. Phys. J.C47 337-346 (2006)

[2] Mu2e Collaboration, Universe, 9, 54. (2023)

【2】研究計画（続き） 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。

(2) 研究目的・内容等 本項目は2頁に収めてください。

- ① 特別研究員として取り組む研究計画における研究目的、研究方法、研究内容について記入してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、特別研究員奨励費の応募区分（下記（※）参照）に応じて、年次計画を示し、具体的に記入してください。研究計画が想定通り進まなかった場合の対応方法があれば、あわせて記入してください。
- ③ 研究の特色・独創的な点（先行研究等との比較、本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し等）にも触れて記入してください。
- ④ 研究計画が所属研究室としての研究活動の一部と位置づけられる場合は申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ⑤ 研究計画の期間中に受入研究機関と異なる研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することも計画している場合は、具体的に記入してください。

（※）特別研究員奨励費の研究期間が3年の場合の応募総額は（A区分）が240万円以下、（B区分）が240万円超450万円以下（DC1のみ）。2年の場合は（A区分）が160万円以下、（B区分）が160万円超300万円以下。1年の場合は（A区分）が80万円以下、（B区分）が80万円超150万円以下。（B区分については研究計画に必要の場合のみ記入）

1. 研究目的、研究方法、研究内容

本研究の目的はミュオン電子転換過程を世界最高感度で探索し、標準模型を破る新物理を実験的に観測することである。そのため、茨城県の大強度陽子ビーム施設 J-PARC で計画している **COMET 実験** で測定および物理解析を主導する。

アルミニウム原子核に捕獲されたミュオンのミュオン電子転換によって生成される信号電子の運動量はミュオンの質量から原子核の束縛エネルギーと反跳エネルギーを引いた **105 MeV/c** である。一方、背景事象である原始軌道上でのミュオンの崩壊 (DIO) は三体崩壊であるため、ミュオン電子転換過程よりも小さい運動量になる。そこで検出器全体をソレノイド磁場内に設置し、粒子の飛跡より求められる**電子の螺旋運動の曲率**を用いて信号電子の運動量を測定する。飛跡検出にはガス検出器 (Cylindrical Drift Chamber: CDC) を用いる。CDC の仕組みはガス中を通過した荷電粒子がガスをイオン化し、それによりできた電子イオン対が電場によりワイヤーに引き寄せられることで電気信号を得るというものである。従って電場や磁場の情報から最適化した電子イオン対のドリフト時間をもとに反応したワイヤーの位置から荷電粒子の真のヒット位置を再構成する。CDC のデータ取得のトリガーにはシンチレータ検出器 CTH を用いる。期待する螺旋運動にあわせて層状にシンチレータを配置し、複数のシンチレータを通過した時に CDC でデータ取得を行うようにトリガーをかける。図2のように DIO 電子と信号電子のスペクトルを分離するには **200 keV/c の運動量分解能**が CDC には要求されている。

DIO や宇宙線由来の背景事象を効率よくカットし、SINDRUM-II^[1] の感度を 100 倍更新する **3.0×10^{-15} のミュオン電子転換過程探索**を実現する。

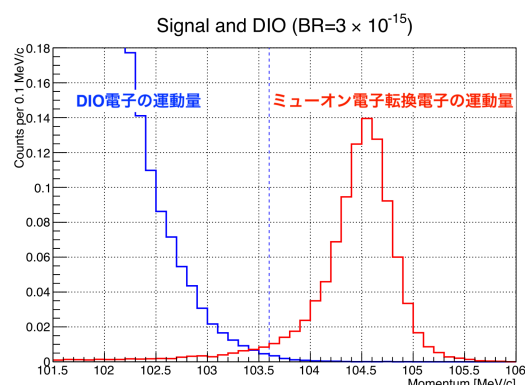


図 2: 信号電子の運動量分布

2. 研究計画

・本番環境での磁場測定 (採用まで)

信号電子の運動量 P は磁場 B と曲率半径 ρ より、 $0.3B\rho$ で計算される。従って、運動量によって信号電子と背景事象を判別する COMET では、磁場の情報はトラッキングアルゴリズムをはじめとする物理解析に使用するため、**非常に重要である**。申請者は CDC に必要な運動量分解能を実現する上で許容される磁場の誤差や要求される精度を、ICEDUST^[2] というフレームワーク (COMET 実験グループ内で独自に開発された) を用いて決定している。この結果に従って要求精度を十分満たす磁場測定システムを開発し、インストール後の 2025 年末に予定されている本番環境での磁場測定を行う。ここでは、物理測定時の設定磁場である 1 T での測定に加え、運動量較正 (後述) 用の低い磁場 (約 0.5 T) での測定も加えて行う。この測定システムの開発には申請者が修士課程 1 年時に行った DS 納品後の健全性確認のための磁場測定試験で得られた経験が活きると考えている。この経験から得られたフィードバックを活かし、系統的な誤差や揺らぎを最小限に抑え、**200 keV/c の運動量分解能**達成に向けた測定システムを開発する。

・CDC の運動量較正および宇宙線 Run (1 年目)

2026 年度はじめには全ての磁石および検出器の実験室へのインストールが完了している予定である。そこで、ビーム供給の前に宇宙線を用いた検出器のテスト Run を行う。この測定では、2 GeV 程度の信号電子や DIO 電子と比べて大きなエネルギーを持つ宇宙線の直線的な飛跡が設計通りの位置分解能 (200 μm) で再構成できることを確認する。申請者はデータ取得系のエラーハンドリングを行い、CTH をはじめとするトリガーシステムや CDC の読み出しなど測定系の動作試験に尽力する。宇宙線試験では、測定系の動作試験に加えて、宇宙線背景事象の見積もりも行う。偶発的にトリガー条件を満たした宇宙線による背景事象の実験的な観測を行う。以上の宇宙線試験により検出器やデータ測定システムの準備を完了し、2026 年末に予定される低強度でのビーム供給 (エンジニアリングラン) に臨む。

・エンジニアリングランでの運動量較正および物理測定 (2 年目)

2026 年末に COMET Phase-I の 1/10 の強度でビームでエンジニアリングランを行い、物理測定を行う。信号電子の運動量測定の前に検出器の運動量較正が必要である。運動量較正には運動量 52.5 MeV/c のミッシェル崩壊 ($\mu \rightarrow e\bar{\nu}\nu$)

(【2】研究計画(2)研究目的・内容等の続き)

を用いる。信号電子の運動量と比べてミッシュェル崩壊電子は運動量が約半分であるため、信号電子の場合と同程度の螺旋運動の半径にするために磁場強度を半分の 0.5 T にして運動量較正データ取得を行う。磁場を変えるため、飛跡の再構成手法も併せて変える必要がある。磁場強度を変えることで変化する項目としては、磁場の分布(強度に対して線形ではない)、CDC 内で電子によりイオン化された負電荷の飛跡などである。これらの項目に関して採用までの期間で測定した 0.5 T の磁場マップを用いて、トラッキングアルゴリズムを調整を行い、正確な運動量較正に貢献する。

・エンジニアリングランの物理解析およびトラッキングアルゴリズム開発(3年目)

2年目の運動量較正の後、定格磁場でのエンジニアリングランおよびその物理解析を行う。採用前から2年目までに培ったトラッキングに関する理解を元に低強度ビームでの信号電子のアクセプタンスを評価する。その後、アクセプタンス向上に向けて新たなトラッキングアルゴリズムを開発する。

現在、検出器内で複数周螺旋運動をする **multiple turn tracks** によるアクセプタンスの低下が問題視されている。実際に電子の螺旋運動を用いて運動量測定を行う MEG 実験^[3]でもこの事象は問題視されており、各周回を判別できるようになったことで約 4 % 検出効率がアップしたことが報告されている。しかし、用いるソレノイド磁場の形状が異なるため、COMET 実験でも同じ方法を踏襲することはできず、COMET 実験独自のアルゴリズムの開発が要求されている。実際の DS のソレノイド磁場は鉄ヨークに格納されていても完全に一様ではなく、円筒中心軸においてシミュレーション上で磁石中心に対し検出器両端(磁石中心から 1 m)で約 15 % 磁場が低下する。即ち、105 MeV/c の運動量を持った電子では、磁石中心と比較して検出器両端で螺旋運動の半径が約 7 cm 大きい飛跡を描く。multiple turn tracks を残すような電子の平均的な円筒軸方向の運動量は約 1 MeV/c と予想されており、この運動量では螺旋運動一周の間隔は約 2 m となる。従って、周回ごとに数 cm 単位で曲率半径が変化することが予想され、これを利用した multiple turn tracks の各周回を分離するアルゴリズムの開発を目指す。エンジニアリングランでのアクセプタンスの評価、新たなトラッキング手法の開発を Phase-I における世界最高感度でのミューオン電子転換過程探索へと繋げる。

3. 研究の特色、独創的な点

先行実験の SINDRUM-II^[1]は連続的な DC ビームを使用していたことでビームの強度に対して探索可能な感度に制限があった。一方、COMET では世界最高の extinction(時間的純度)のパルスミューオンビームを用い、かつ効率の良い背景事象除去が可能なトリガーシステムを用いることで 100 倍感度を改善できる。本研究では、未だ同グループでは着手していないソレノイド磁場の非一様性を利用したトラッキングアルゴリズム開発を行う。また、関連実験として同じミューオン cLFV である $\mu \rightarrow e + \gamma$ を探索する MEG 実験^[3]がある。ガンマを放出するか否かの分岐比は理論依存が大きいので、本研究の結果と組み合わせることで、より詳細な新物理の検証が可能となる。

4. 申請者が担当する部分 5. 異なる研究機関での研究従事

申請者は修士課程で DS の磁場測定とその解析を担っており、現在進行中の実験室環境での磁場測定システム開発にも参画している。物理解析に用いる磁場測定データの取得を主導し、その経験を活かして、運動量較正をはじめ、物理解析や新たなトラッキング手法開発に貢献する。また、宇宙線試験から測定終了まで現地に常駐し、J-PARC 技術者やコラボレーターらと COMET 実験を支える。

[1] SINDRUM-II Collaboration, Eur. Phys. J.C47 337-346 (2006)

[2] R. Derveni, Comparative analyses of sub-GeV physics in simulations and data for the COMET experiment, Ph.D. thesis, Imperial College London, April 2024. doi:10.25560/116399

[3] A. M. Baldini *et al.*, “Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment,” *European Physical Journal C*, vol. 76, no. 8, p. 434, 2016.

【3】 人権の保護及び法令等の遵守への対応 本項目は1頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

- ・本欄には、「【2】研究計画」を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究や安全保障貿易管理を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を記入してください。
- ・例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、インフォームド・コンセントが必要な研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験、機微技術に関わる研究など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記入してください。
- ・なお、該当しない場合には、その旨記入してください。

該当なし

【4】研究遂行力の自己分析 本項目は2頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

・日本学術振興会特別研究員制度は、我が国の学術研究の将来を担う創造性に富んだ研究者の養成・確保に資することを目的としています。この目的に鑑み、これまで携わった研究活動における経験などを踏まえ、研究遂行力について分析してください。

(1) 研究に関する自身の強み

3D プリンターで作成したシンチレーター性能評価

学部4年生時に行った上記題目の研究を通じて、「**手数を惜しまず仮説検証を繰り返す根気強さ**」と「**得られた結果から新たな仮説を立てる創造性**」を養うことができた。当研究は先行研究に乏しく、印刷時の印刷パラメーターや作成したシンチレーターの特性などわかっていないことが多かった。そこで最初に印刷に成功した時のパラメーターをもとに問題点に対して、仮説検証を繰り返した。具体的に問題点というのは印刷完了後数分放置すると、シンチレーターが白濁し発光量が低下することであった。この現象に対し、環境紫外線(実験室の蛍光灯)や空气中不純物との表面樹脂の結合が原因ではないかと仮定し調査した。結論、表面樹脂の空气中不純物との結合が原因であることがわかり、空気との接触を絶った条件では環境紫外線に晒した方が発光量が増加することがわかった。この結果より、紫外線により不完全な光重合が促進され、凝縮率が上がったため発光量が増したのではないかと考え、印刷後に二次的に紫外線を照射し、照射時間で発光量の違いを調査した。その結果、照射時間5時間以降発光量が横ばいになり、紫外線照射時間の最適化に成功した。

COMET 実験に用いる検出器ソレノイドの健全性確認

修士1年次から、COMET Phase-Iに用いる検出器ソレノイド(DS)が納品され、申請者はその磁場測定および健全性確認を行っている。その磁場測定試験の結果、ソレノイドの円筒軸に沿った磁場分布にシミュレーションと比較して大きな違いが見られた。測定環境に存在していた鉄柱の影響など様々な測定条件を考慮し、補正する解析を行った。結果的に個人的にはあまり影響がないと思い込んでいた磁場測定に用いたセンサーのコンマ数度の傾きが最も現象を説明できる要因であることがわかった。その際に**現象を体系的に捉える力とその力を元に大小問わず全ての要因を正確に評価する力が身についた**。また、COMET 実験のコンセプトではトラッキングと磁場は非常に密接に関わり合っているが、ソフトウェア面からトラッキングに関わる中国のグループと実際にDSのセットアップを行い、磁場測定を行うグループの間に認識の乖離やコミュニケーションが過疎化していたという事実があった。その事実に問題を感じた申請者は磁場測定グループの一員として積極的にトラッキンググループとコミュニケーションを取り、互いの理解の深化に努めている。このような日々の活動に加えてCOMET全体の定期的な会議なども通じて**日英を問わず、自分の理解を相手に伝える力が養われたと感じている**。

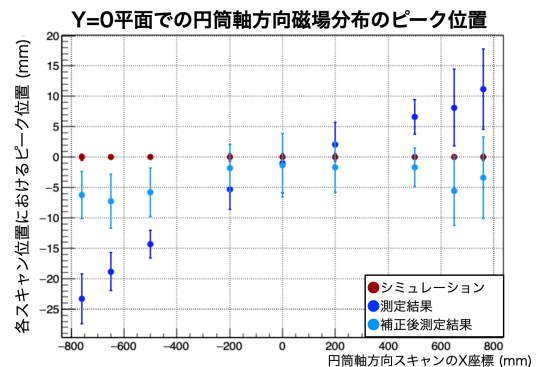


図 3: 円筒軸方向の磁場分布の結果

研究成果

国際学会(査読あり、審査中):

Shohta Takami, Masaharu Aoki, Ryo Nagai, Kenichi Sasaki, Naoyuki Sumi, Makoto Yoshida, Masami Iio, Hirokatsu Ohhata, "Magnetic field measurement and analysis of the detector soleonid for the COMET experiment", International Conference on Magnet Techonology (MT29), Boston, USA, 2025.Jul

研究発表(査読なし):

高見 翔太「3D プリンターで作成したシンチレーターの性能評価」第12回高エネルギー物理春の学校、滋賀県、2024年5月(ポスター発表)

高見 翔太、青木正治、永井遼、佐々木憲一、角直幸、吉田誠、飯尾雅美、大島洋克「COMET 実験に用いる検出器ソレノイドの磁場測定および健全性確認」、日本物理学会 2025 年春季大会、18aT1-8、オンライン、2025 年 3 月(口頭発表)

15 年間の競技活動

申請者は幼少期からサッカーを競技者として行っており、学部生時は学業の傍ら大阪大学体育会サッカー部にて競技活動に勤しんでいた。当部は関西2部リーグに所属し、入部当時で80人規模のチームであった。全くの無名の高校出身の申請者にとっては挑戦的であったが、誰よりも身を呈して守備をすることと正確なロングキックという自分の武器を磨き続け、Aチームまで上り詰めた。当部での4年間では競技者としての成長もさることながら人間として大きく成長できたと自負している。そのように感じる点は大きく二つある。一つ目は**粘り強い胆力**である。入部から二年間はチーム内最下層のCチームから昇格することができなかった。同様の状況の同期にはすでに退部している者もあり、諦めるには十分な状況だったと当時を振り返って思う。しかし、決して事切れることなく、研鑽を続け、三年目でAチームに昇格することができた。辛酸を嘗め続けたことにより、**目標に向けて絶えず努力を続ける胆力**が身についた。

二つ目は人間力である。申請者は3年目ではAチームに昇格したものの4年目の最後の半年ではBチームに降格してしまった。それでも、必ず本来屈辱であるAチームの試合の応援に毎週駆けつけ、Bチームの試合ではキャプテン

(【4】研究遂行力の自己分析の続き)

としてチームを鼓舞し続けた。日々の練習では、消灯時間までの自主練習を欠かさなかった。このような行動を心がけたのは、自分のことだけでなく、組織全体のことまで考えていたからである。結果が出ないからと事切れるのは簡単であるが、全体の士気に大きな影響が出る。最後の年である4年目に望む結果が出なかったのは非常に屈辱的だったが、最終的に大きく人間的に成長できたと実感している。特に高エネルギー領域では、色々な機関とのコラボレーションで実験を行うことが多い。従って個人で完結する研究活動は少なく、実験グループ全体の目的は何であるかということを強く意識して活動することは非常に重要であり、そのような観点から申請者は実験成功において**非常にポジティブな人材**であると考え。(%%しょうもないことなんですけど自分にはこれくらいしかないんでかきました)

(2) 今後研究者として更なる発展のため必要と考えている要素

ソフトウェア能力

2026年以降に計画されている物理測定データの解析には高度なプログラミングスキルが必要となる。高エネルギー物理学の領域には Geant 4 (素粒子の相互作用シミュレーション)をはじめとする解析フレームワークが多くあり、ソフトウェアに対する深い理解が要求される。実際に COMET 実験グループでは、ICEDUST という Geant4 ベースの荷電粒子のトラッキングフレームワークが独自に開発されている。加えて、最近では機械学習を用いた解析も盛んに行われおり、ソフトウェアに関する幅広い知識と経験を持つことは解析の技術という観点で非常に重要である。申請者は今後 ICEDUST をはじめとするソフトウェアの学習と実践に励み、電子のトラッキングに貢献する。

国際的なコミュニケーション能力

本研究は国際共同実験であるため、国外の共同研究者との英語でのコミュニケーションが求められる。申請者は高校時代までの国際経験を活かし、COMET グループの会議等を通じて、積極的に国外の研究者とコミュニケーションをとるよう努めている。特にトラッキングを主導する中国 IHEP の研究者らとは密にコミュニケーションをとっており、ソフトウェアの知識を学習することに加えて磁場測定に係る現場の情報を共有するなどコラボレーションがより活発になるよう心掛けている。また、日本で行われた Mu2e グループとの会議に出席し、磁場測定システムの課題や実情に関して深く議論することで本番環境の磁場測定システムに対する解像度を高めることができた。今後もより活発に様々な研究者とより密に議論できるようになっていきたいと考えている。

理論に対する深い理解

申請者は学部四年生から素粒子物理実験の研究室に所属しており、素粒子物理学における理論のゼミを授業の枠以外にも自主的に同輩らと行っている。しかし、素粒子物理の世界は奥が深く、到底十分な理解できているとは考えていない。今後物理解析などを通じてより新物理の本質に迫っていかうとする上で、創造性あふれるアイデアは根底の理論に対する深い理解から生まれると考える。従って、申請者は今後も理論の理解を深めていき、クリティカルなアイデアを生み出せるようになりたい。

創造性ゆたかな発想

研究者として実験を行う上で、固定概念にとらわれない解析法の発想や素朴な好奇心は非常に重要であると考えている。実際、日々研究をともに行う教授陣やポストドクらはおしなべてこの二つの要素を持っていると感じる。それは、研究の中で生じる大小様々な疑問を突き詰めてきた結果であり、申請者自身もそのような研究者へと成長していきたいと強く思う。