

## 2. 現在までの研究状況 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。様式の変更・追加は不可(以下同様))

- ① これまでの研究の背景、問題点、解決策、研究目的、研究方法、特色と独創的な点について当該分野の重要文献を挙げて記述してください。
- ② 申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果について、問題点を含め①で記載したことと関連づけて説明してください。
- なお、これまでの研究結果を論文あるいは学会等で発表している場合には、申請者が担当した部分を明らかにして、それらの内容を記述してください。

### 1. これまでの研究の背景、問題点、解決策、研究目的、方法、特色と独創的な点

#### ○研究の背景：暗黒物質と XMASS 実験

申請者はこれまで2年間、XMASS 実験に参加し暗黒物質探索を行ってきた。暗黒物質は全宇宙のエネルギーの約 27%を占めていると考えられており、原子からできている通常の物質の5倍も多く存在しているにも関わらず、重力相互作用をするという以外にその性質が分かっておらず、これを明らかにすることは宇宙物理学において非常に重要な課題である。暗黒物質の正体については様々な候補があるが、Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれる素粒子であるという考えが有力である。XMASS 実験はこの WIMPs を直接検出し世界で初めて暗黒物質を発見することを目的としている。XMASS 検出器は 835 kg の液体キセノンを使用した世界最大の暗黒物質検出器である (図 1)。

暗黒物質の信号は、暗黒物質と地球の相対速度の変化によって季節変動する。これを観測することは暗黒物質の強力な証拠となる。既に、DAMA/NaI 実験とそれをアップグレードした DAMA/LIBRA 実験では、暗黒物質の季節変動を発見したと主張している [1]。しかしその結果から導かれる暗黒物質の質量と散乱断面積の存在領域は、LUX 実験 [2] などの結果と矛盾している。ただし LUX などは探索手法に季節変動を用いておらず、DAMA 実験の結果を完全に反証するには至っていない。DAMA では NaI 検出器を 14 年間運転した 1.33 トン・年分のデータがあり、これと同等の統計量を得るには同等かそれ以上の質量の検出器を用いるしかない。835 kg の液体キセノンを用いた XMASS 検出器は 1 年で DAMA と同等の統計量を得られるため、この問題に決着をつけるのに最適な検出器である。申請者はこの特長を活かし、申請者の考案した外部校正装置によって系統誤差を最大限に小さく抑えて暗黒物質の季節変動探索を行う。

#### ○外部校正装置

検出器を運転するには、その検出器の特性を知るための校正が必ず必要になる。XMASS では従来、液体キセノン中に線源を導入しデータ取得をすることによって検出器校正を行ってきた (内部校正)。しかしこの場合、検出器を開ける作業に伴うため、検出器の安定性を乱す。例えば、液体キセノンの入っている真空容器内の温度は約 -100°C に保たれているが、内部校正を行うと 0.01°C 上昇し、元の温度に戻るのに 2 日間を要する。また、校正時に光電子増倍管を 1 本外す必要があるため、暗黒物質測定時と完全に同じ状態で校正を行うことができない。これらの理由のため、申請者は検出器外側に線源を設置する外部校正装置の改良を行うことで内部校正の回数を極力減らすための研究を行った。

### 2. 申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果

#### ○経過 1. 外部校正装置の改良

上述のように XMASS 実験では液体キセノン中に線源を導入する内部校正を定期的に行っていたが、内部校正では検出器の安定性を損なうことが分かっていた。一方で、液体キセノンがどの程度  $\gamma$  線を遮蔽できるか (自己遮蔽能力) を調べるために外部校正も従来より行われていた。申請者は外部校正が検出器の内部校正の主な目的である液体キセノンの発光量の測定に用いることが可能であると着想し、外部校正装置の刷新を行ってこの目的に用いることができるよう改良した。改良前と改良後の外部校正装置を図 2 に示す。外部校正によって頻繁に発光量の測定を行うためには、手軽に操作が行えることと、測定の再現性を確保することが必要である。そのため、申請者は図中の細く描かれたチューブを導入した。線源はこの細いチューブの中をフィッシュテープと呼ばれる道具を用いて突き当たるまで送り出す。この仕組みは Borexino 実験 [3] で採用されている校正装置を参考にした。この方式によって毎回同じ場所で線源が固定され、従来の装置では 3 cm 程度であった線源の位置精度が 5 mm 程度にまで改善された。線源の導入についても、従来は必ず 2 人いなければできず複雑なため一部の共同研究者にしか扱えなかつ

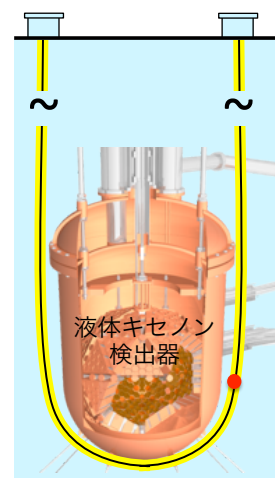


図 1: XMASS 検出器と外部校正装置。中央の球形のものが液体キセノンの XMASS 検出器本体で、銅製の真空容器の中に入り、水色で示したように水タンク中に設置してある。改良前の外部校正装置は黄色で示したガイドチューブにワイヤーを通し線源を移動させていた。

(現在までの研究状況の続き)

たが、手順を簡略化したことで、今後は毎週異なるシフト作業者が1人で較正作業を行うことができるようになり、これによって毎週欠かさず発光量を測定することができるようになった。この成果は日本物理学会にて発表した(国内学会・シンポジウムにおける発表1, 2)。また、季節変動による暗黒物質の探索では数十 keV 以下の低エネルギーの検出効率が重要であるため、この時間変化もモニターできるように今後改良を加える。

#### ○経過 2. XMASS 検出器の改造

2012 年 5 月までの XMASS の測定において予期せぬバックグラウンド事象 (BG) が観測されたため、2012 年の夏から 2013 年の秋にかけ、BG 低減のため検出器の改造を行った。申請者も他の共同研究者と協力して検出器の改造作業を行った。改造の結果、観測データの 5 keV 以上の領域では予定通り BG が 10 分の 1 に削減された。5 keV 以下の領域についても現在 BG の理解が進んでいる。

#### ○経過 3. 外部較正データを用いたモンテカルロシミュレーションの改良と検出器由来 $\gamma$ 線バックグラウンドの評価

外部較正のデータを用いてモンテカルロシミュレーション (MC) の改良を行った。また、改良した MC を用いて検出器材料由来のバックグラウンド (BG) 事象の影響を評価を行った。

#### 参考文献

- [1] Bernabei, R. *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2648.
- [2] Akerib, D.S. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 091303.
- [3] Back, H., *et al.*, arXiv:1207.2816 [physics.ins-det] (2012).

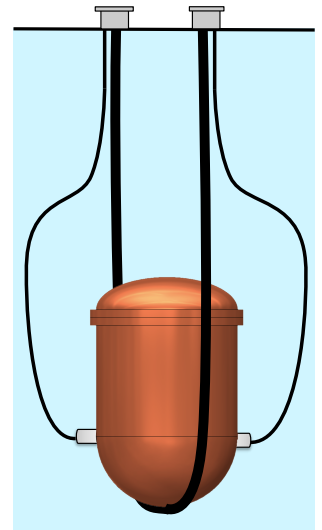


図 2: 改良した外部較正装置。新たに 2 本のチューブを導入し、従来のガイドチューブを遮光した。

### 3. これからの研究計画

#### (1) 研究の背景

2. で述べた研究状況を踏まえ、これからの研究計画の背景、問題点、解決すべき点、着想に至った経緯等について参考文献を挙げて記入してください。

暗黒物質は銀河系を覆うハロー状に存在していると考えられる。暗黒物質の平均速度は銀河に対して静止していると考えられるので、太陽系は暗黒物質の「風」を受けながら銀河系を約 230 km/s で移動している。地球が太陽の周りを約 30 km/s で公転していることにより、地球の銀河系に対する相対速度が最大になる 6 月は、地球と暗黒物質の衝突が最も多くなり、逆に 12 月は最も少なくなる。このため、検出器で検出される暗黒物質の信号レートも 6 月が最大、12 月が最小となるはずである。もし信号がこのような周期を持てば、それが暗黒物質由来であることの強力な証拠となる。しかしこの季節変動を観測するためには、信号レートの変化を精度よく測定することが必要であり、そのためには事象の検出効率が時期ごとに正確に分かっていなければならない。申請者は検出効率をモニターするのに外部較正のデータを用いることを着想した。

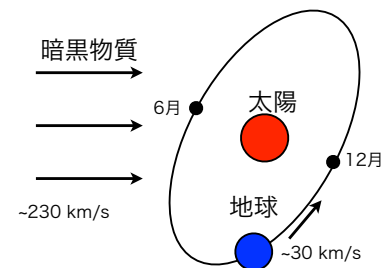


図 3: 暗黒物質信号の季節変動

## (2) 研究目的・内容 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。)

- ① 研究目的、研究方法、研究内容について記述してください。
- 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、具体的に記入してください。
- ③ 共同研究の場合には、申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ④ 研究計画の期間中に異なった研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することを予定している場合はその旨を記載してください。

### ○研究目的

本研究では XMASS 検出器を用いて世界最高感度で季節変動による暗黒物質探索を行う。右の図 4 に改造後の XMASS 検出器で期待される季節変動による暗黒物質探索の感度を示す。横軸は暗黒物質の質量、縦軸は暗黒物質と核子の散乱断面積を示す。濃い赤が DAMA/LIBRA、薄いピンクが CDMS(Si)、緑が CoGeNT によってそれぞれ存在が主張されている領域で、このうち DAMA/LIBRA のみが季節変動を用いた結果である。曲線はそれより上の領域での暗黒物質の存在を排除したことを示し、オレンジが改造前の XMASS、水色の点線が CDMS、赤い点線が XENON100、緑の点線が LUX 実験によるもの。これらは季節変動を用いていない。改造後の XMASS において閾値 0.3 keV で季節変動による測定を行った場合に期待される感度を青い実線（1 年間の観測）、点線（3 年間の観測）で示す。測定の結果、暗黒物質の存在が確認できなかった場合これらの線より上の領域が排除されることになる。これを実現するために、以下のようなトピックごとに研究を進める。

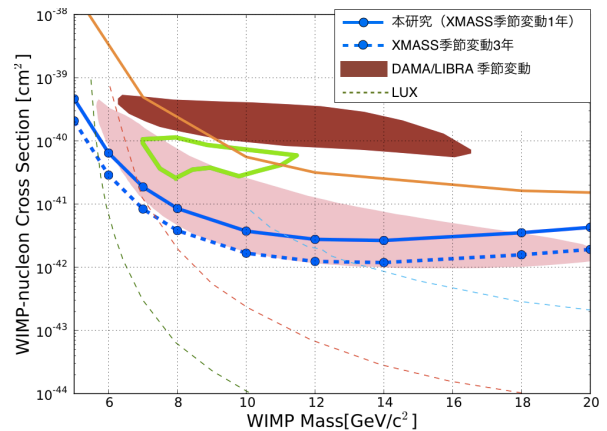


図 4: 改造後の XMASS 検出器で期待される季節変動による暗黒物質探索の感度。

### ○外部較正による検出器のモニタリング

共同研究者と協力し、申請者が導入した外部較正装置を用いて毎週データを取得する。申請者はそのデータを利用して液体キセノンの発光量と低エネルギー事象の検出効率をそれぞれ 0.5% と 1% の精度でモニターする。

#### ☆ データ取得システム (DAQ) の改良

現在の XMASS 検出器では、データ取得は最大約 100 Hz で行うことができる。これに適した強度の  $^{60}\text{Co}$  線源を用いて外部較正を行っている。100 Hz はフラッシュ ADC (FADC) のデータ転送が律速している。申請者は FADC データ保存ディスクを分散化したシステムの構築しデータ転送の効率化を行うことで、データ取得を最大 1 kHz で行えるよう改良する。これによって現在の 10 倍の強度の線源を用いることができるようになる。

#### ☆ 外部較正線源の位置再現性の改良

申請者が導入した現在の外部較正装置では、ガイドチューブの終端での詳細の線源の位置を知ることができないため、線源の位置再現性は最大 5 mm としている。DAQ の改良によって 1 kHz でデータ取得を行うことができれば、現在よりも大強度の線源を用いて較正を行うことができる。1 時間の測定で 360 万事象が得られ、0.05% で位置の不定性を調べることができる。これは 0.2 mm の不定性に対応する。

#### ☆ 外部較正による低エネルギーの事象検出効率のモニタリング

上述の DAQ と位置再現性の改良によって、毎週の外部較正によって光電子収量のモニタリングとともに、低エネルギー事象検出効率のモニタリングも行えるようになる。季節変動を用いて暗黒物質探索を行うには、夏と冬の事象数の変化を ??? % で見る必要がある。そのため、検出器の低エネルギー事象 (0.3 keV から数 keV) に対しての検出効率を各時期ごとに把握しておく必要がある。

### ○低エネルギー BG の理解と変動の評価

申請者のこれまでの MC の経験を活かし、外部較正データの 1 MeV 程度の高エネルギー事象をコントロールサンプルとして用いて MC の改良を行う。これを低エネルギー BG の理解に用いる。

### ○季節変動を用いた暗黒物質探索

申請者は 2015 年度の最初の半年で準備を完了し、その後の 1 年半の間に暗黒物質観測データとともに外部較正データを毎週取得し、季節変動の解析を行う。

### (3) 研究の特色・独創的な点

次の項目について記載してください。

- ① これまでの先行研究等があれば、それらと比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点
- ② 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義
- ③ 本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

#### 先行研究と比した本研究の特色、着眼点、独創的な点

既に述べたように XMASS 検出器は現時点で世界最大の暗黒物質検出器である。したがって期待される暗黒物質事象も最も多い。この特長は暗黒物質の季節変動の探索において重要である。

XMASS 検出器はシンチレーション光のみを用いているため高いレートでデータ取得を行うことができる。そのため、LUX 実験などの電子のドリフトが必要な検出器ではできない高いレートでの較正が行える。

XMASS 検出器は液体キセノンの高い発光量のために、0.3 keV という極めて低い閾値を実現している (DAMA 実験は 2 keV)。暗黒物質による事象数はエネルギーが低くなるほど指数関数的に増大するので閾値を低くすることは極めて重要である。

#### e/ $\gamma$ 事象

#### 本研究の位置付け、意義と完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

本研究では、DAMA/NaI 実験によって 1997 年に最初に報告され、20 年近く決着がついていない現象について、DAMA と同等の統計量によって決着をつける。本研究の完成後は大型化した次世代検出器 (XMASS-1.5) での測定を開始し、さらに詳細な研究を行う。

### (4) 年次計画

DC1 申請者は 1～3 年目、DC2 申請者は 1～2 年目について、年次毎に記載してください。元の枠に収まっていれば、年次毎の配分は変更して構いません。

#### (1 年目)

最初の半年間で外部較正によって液体キセノンの発光量と低エネルギーの検出効率をモニターする方法を確立する。まず、データ書き込みディスクの分散化によって FADC の DAQ の高速化を行う。DAQ の高速化が実現すれば、強い線源を用いることにより位置再現性の高い外部較正ができるようになり、低エネルギーの検出効率をモニターできるようになる。

#### (2 年目)

引き続き暗黒物質探索の観測データ、外部較正データの取得を継続する。これによって得られた 1.5 年分のデータを用いて季節変動による暗黒物質探索の解析を行い、結果を論文にまとめて投稿する。

#### (3 年目) (DC 2 は記入しないこと)

申請者登録名 岡直哉

#### (5) 人権の保護及び法令等の遵守への対応

本欄には、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など法令等に基づく手続きが必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。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、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、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きが必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続きの状況も具体的に記述してください。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

該当しない。

4. 研究業績（下記の項目について申請者が中心的な役割を果たしたもののみ項目に区分して記載してください。その際、通し番号を付すこととし、該当がない項目は「なし」と記載してください。申請者にアンダーラインを付してください。業績が多くて記載しきれない場合には、主要なものを抜粋し、各項目の最後に「他〇報」等と記載してください。査読中・投稿中のものは除く）

(1) 学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書（査読の有無を区分して記載してください。査読のある場合、印刷済及び採録決定済のものに限ります。）

著者（申請者を含む全員の氏名（最大 20 名程度）を、論文と同一の順番で記載してください。）、題名、掲載誌名、発行所、巻号、pp 開始頁－最終頁、発行年をこの順で記入してください。

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

(3) 国際会議における発表（口頭・ポスターの別、査読の有無を区分して記載してください。）

著者（申請者を含む全員の氏名（最大 20 名程度）を、論文等と同一の順番で記載してください。）、題名、発表した学会名、論文等の番号、場所、月・年を記載してください。発表者に〇印を付してください。（発表予定のものは除く。ただし、発表申し込みが受理されたものは記載しても構いません。）

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

(3)と同様に記載してください。

(5) 特許等（申請中、公開中、取得を明記してください。ただし、申請中のもので詳細を記述できない場合は概要のみの記述で構いません。）

(6) その他（受賞歴等）

(1) 学術雑誌（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書

（査読有り）

1. K. Abe, K. Hieda, K. Hiraide, S. Hirano, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, K. Nakagawa, M. Nakahata, H. Ogawa, N.Oka (11 番目), H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, A. Takeda, O. Takachio, K. Ueshima, D. Umemoto, ..., K. Miuchi, ..., S. Nakamura, (28 名省略), "Light WIMP Search in XMASS", *Physics Letters B*, Elsevier, **719**, pp 78-82, (2013).
2. K. Abe, K. Hieda, K. Hiraide, S. Hirano, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, K. Nakagawa, M. Nakahata, H. Ogawa, N.Oka (11 番目), H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, A. Takeda, O. Takachio, K. Ueshima, D. Umemoto, ..., K. Miuchi, ..., S. Nakamura, (28 名省略), "XMASS Detector", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Elsevier, **716**, pp 78-85, (2013).
3. K. Abe, K. Hieda, K. Hiraide, S. Hirano, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, K. Nakagawa, M. Nakahata, H. Ogawa, N.Oka (11 番目), H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, A. Takeda, O. Takachio, K. Ueshima, D. Umemoto, ..., K. Miuchi, ..., S. Nakamura, (28 名省略), "Search for solar axions in XMASS, a large liquid-xenon detector", *Physics Letters B*, Elsevier, **724**, pp 46-50, (2013).

（査読なし）

4. N.Oka, S. Takakura, H. Kakubata, S. Umehara, K. Matsuoka, T. Kishimoto, A. Sakaguchi, M. Nomachi, and Y. Sugaya, "Tomographic Measurement with Cosmic-ray Muons by using Large Plastic Scintillators", OULNS Annual Report 2010, Laboratory of Nuclear Studies, Osaka University, pp16-17, (2011).

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説・総説

なし

(3) 国際会議における発表

なし

(4) 国内学会・シンポジウムにおける発表

（日本語口頭発表・査読なし）

1. 〇岡直哉 他 XMASS Collaboration, 「XMASS 実験：外部校正装置の改良」日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学、2013 年 9 月 20 日
2. 〇岡直哉 他 XMASS Collaboration, 「XMASS 実験：外部ガンマ線源による XMASS 検出器の校正」日本物理学会 第 69 回年次大会、東海大学、2014 年 3 月 30 日

他 2 件

（英語口頭発表・査読なし）

1. 〇N.Oka, "Study of BG Contribution from Outer Components", XMASS Collaboration Meeting, Kamioka Observatory, 2012 年 9 月 30 日

他 9 件

(5) 特許等 なし

(6) その他 なし

申請者登録名 岡直哉



## 5. 自己評価

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、申請者本人による自己評価を次の項目毎に記入してください。

- ① 研究職を志望する動機、目指す研究者像、自己の長所等
- ② 自己評価する上で、特に重要と思われる事項（特に優れた学業成績、受賞歴、飛び級入学、留学経験、特色ある学外活動など）

### 1. 研究職を志望する動機

申請者は中学生の頃より、この宇宙がどのようにでき、存在しているかを知りたいことを熱望していた。高校に入り、この問題に物理学によってアプローチできることを知り、大学では物理学を学ぶことを決めた。大学に入って物理学を学び、物理や自然科学がどのようなものであるか理解していくうちに、科学の特徴である実証的側面を強く持つ実験物理学に魅力を感じた。またそれ以前から、世界で誰も見たことのない現象、事実を発見したいという思いを強く持っていた。この2つの動機から研究職を志望している。

#### 目指す研究者像

研究に没頭するとどうしても社会とのつながりが弱くなりがちである。しかし研究の喜びは自分で何かを発見することだけでなく、自分の知り得たことを他の人にも知ってもらうことにもあると思う。申請者は自分の研究内容を積極的に社会へ発信していく研究者でありたい。また最近、科学論文の改ざんが話題になったおり、科学とはどういうものであるか市民にほとんど理解されていないということを感じた。科学者には自分の研究成果を世の中に伝えるだけではなく、科学とはなにかを伝える義務があると思う。このため、科学の内容だけではなく、科学的なものの見方など、科学自体を知ってもらい取り組みをしたい。

#### 自己の長所等

申請者の長所は研究を楽しむことができるということである。目標とする成果を出すまでは失敗の連続であるが、それすらも楽しめなければ研究を続けていくことはできない。また時として予想外の現象に悩まされることもあるが、なぜそのようなことが起こるのかを考えること、また考えた結果現象を理解できるという体験は研究や実験をしていく中で最も楽しいことである。

### 2. 自己評価をする上で、特に重要と思われる事項

#### ○留学経験など

申請者は博士前期課程の2年間のほとんどを岐阜県飛騨市神岡町の茂住集落で過ごした。商店もなく最寄りのコンビニエンスストアまでは自動車ですら30分近くかかるというその環境に留学していたと言ってもよいと思う。スーパーカミオカンデ検出器をはじめ数々の実験施設のある神岡鉱山近くのこの集落には世界中から第一線の研究者や若い学生が集まり、彼らと交流しながら充実した研究生活を送ることが出来た。神岡で築いた交友関係以外にも、申請者はこれまで通った大阪大学、東京大学、神戸大学の各所においてよい友人、指導者に恵まれた。さらに2013年夏に行われた原子核三者若手夏の学校では、高エネルギーパートの幹事を務めた。夏の学校に参加したことで、多くの同じ道を志す仲間と知り合うことができた。これらの人脈は、これから研究者として生活していく上で大切なものになると考えている。

#### ○研究能力

その神岡で申請者はXMASS実験に従事して、数々の貢献をした。年に数回、海外の共同研究者も集まって議論するコラボレーションミーティングでは2年間を通じて10度発表したことはその証拠と言える。この経験から、これからも実験を続けていくことに自信を持つことができ博士後期課程への進学を決意した。日々の研究活動においては、課された仕事をこなすだけではなく、自分で考えて工夫することを常に意識した。2013年に行われたXMASS検出器の再建時に外部校正装置の再構築を担当することになった当初は、装置の小規模な改善を依頼されただけであったが、他の実験での構成装置を調査し、新方式の装置を同時に導入することによって外部校正に新たな役割を担わせることを着想した(2. 現在までの研究状況を参照)。2日間に渡って新装置の設置作業においては、責任者として現場の指揮にあたり、作業を無事に終了させた。この作業を通じて実験には段取りが非常に重要であることを学ぶことが出来た。また、XMASSグループでは毎週英語でミーティングを行っている。申請者はほぼ毎回発表し、発表能力、英語能力を日常的に磨いている。これらの能力は国際学会での発表や外国の研究者との議論するのに必須である。このように、研究を進めていく上で重要な能力を修士の間に身につけることができ、さらに高める努力を日々行っている。

