

FOUNDATION FOR HIGH ENERGY ACCELERATOR SCIENCE

2017.11 第 15 号







公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会

■ 広報誌「FAS だより」第15号の発行に当たって

- 広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第 15 号を発行することになりました。
- 加速器セミナーおよび特別講演会のテーマ等でご希望・ご要望等がありましたら奨励会事務局までお寄せください。
- 賛助会員の皆様で、広報誌「FAS だより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する記事等が有 りましたら是非お知らせ下さい。投稿をお待ちしております。
- 当公益財団法人の「ホームベージ」・広報誌「FAS だより」等をご覧いただき、より良いものに するために皆様のご意見をお寄せください。お待ちしております。
- 賛助会員のバナー広告掲載について
 当公益財団法人のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。
 バナー広告掲載を希望される賛助会員様は、ぜひご利用ください。(無料)

<連絡先: info@heas.jp 又は TEL / FAX 029-879-0471>

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 事務局

FAS だより 第15号 目次

平成 29 年 11 月

- 2. 国際交流助成報告

1. 研究助成報告

- 3. その他の助成報告

 - - 講 演.1 「IFMIF 原型加速器の現状と核融合中性子源(A-FNS)計画」
 講演者 池田 佳隆 氏
 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
 核融合エネルギー研究開発部門 六ヶ所核融合研究所副所長
 - 講 演.2 「加速器駆動核変換システム (ADS) に関する研究開発の現状と将来計画」

講演者 辻本 和文 氏
 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
 分離変換技術開発ディビジョン(兼) J-PARC センター 核変換セクション

4. その他

1) 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 賛助会員一覧

(平成 29 年 11 月 1 日現在)..... 30

2) 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 評議員・役員・

選考委員会委員一覧(平成 29 年 11 月 1 日現在)..... 31

学部生のための、加速器を用いた 初めての素粒子観測

大阪大学 大学院 理学研究科 山中 卓

1. 目的

本プロジェクトの目的は、学部学生の段階で簡 単な加速器を用いた実験を体験させ、粒子を実際 に「見てもらう」ことである。

学部学生の場合、4年になって素粒子物理学の 授業や研究室のゼミで、粒子と物質の間の反応な どを学ぶ。しかし、大学で行う実験で通常使える のは、宇宙線や密封放射線源などであり、私の研 究室でも学部4年生は7月までに宇宙線のミュー オンの寿命を測定する。これでは粒子の種類やエ ネルギーが限られており、授業やゼミで学んだ反 応を確かめにくい。また今年はベトナムから4ヶ 月間の短期留学生を引き受けており、彼女がせっ かく日本に来たのだからベトナムではできない実 験をしたいと希望した。そこで、今年は加速器を 用いた実験をしてみることにした。

2. 方針

学部4年生3人と学部3年生の留学生1人に 与えた課題は、「J-PARC ハドロンホールで中性K 中間子ビームの中の粒子を見よう」というもので ある。このビームラインは中性の粒子が多いのが 難点であるが、私が行っている KOTO 実験のビー ムラインであり、融通が効きやすい。

様々な粒子を見るためにはどのような現象を用 い、どのような測定器を用意すれば良いかを、 学生たちで考えて話し合って決めさせ、自分たち で実験の計画や準備させた。これにより、学生た ちは授業やゼミなどで学んだばかりのことを改め て思い出し、調べ直し、能動的に使わねばならな いため、真に学ぶことができる。

3. 実験の準備と計画

実験の準備のために、こちらから与えた情報や 制約は次の3つである。一つ目は、ビームライン のシミュレーションで得た、予測される粒子の種 類とエネルギースペクトルとレートである。全く 何の目安もないと方針も立てづらいので、これは 与えた。二つ目は、測定器全体の厚みを16 cm 以 下にすること。これは、加速器を止めずに測定 器をビームに出し入れする装置からくる制限であ る。三つ目は、約1ヶ月で準備して確実に動かせ る測定器を作ることである。

学生たちが計画しているときの議論を時々聞い たが、なるほど、初めて学ぶ人はそのような思い 違いをするのかとか、そのように考えるのかなど、 我々スタッフには新鮮であった。間違いに気づき そうにない場合はそのことがわかるように質問を してみたり、考えが大きく外れそうだったり装置 が複雑になりそうになった時には、こういう手も あるよ、と時々軌道修正をした。



C1 Pb C2 C3 図 1: 粒子を見るための測定器

そうした議論を経て彼らが荷電粒子とガンマ線 を見るために計画した測定器を図1に示す。上流 から、5 mm 厚のシンチレータ (C1)、6 mm 厚の鉛 板、5 mm 厚のシンチレータ (C2)、10 mm 厚のア クリル板 (C3) が並び、鉛板以外には光電子増倍 管がつけられている。大きさは約10 cm × 10 cm である。まず、荷電粒子は C1、C2、C3 全てを光 らせる。また、C3 からはチェレンコフ光しか出 ないので、C1 やC2 からのシンチレーション光と の違いを見ることができる。ガンマ線が C1 を通 過した場合、C1 は光らないが、鉛板の中で電子・ 陽電子対を生成すると、C2 と C3 に荷電粒子 2 個 分のエネルギーを落とすはずである。

これらのカウンターの制作も、一から学生たち が行った。バンドソーでシンチレータを切り、初 めて使うフライス盤で辺をまっすぐに加工した (図 2)。アクリル板は、阪大の工作センターに新 しく入ったレーザーカッターで切った。ライトガ イドは、直径 60 mm のアクリルの円柱にフライ ス盤で溝を掘って作った。この溝にシンチレータ やアクリル板を差し込んで接着し、円柱の反対側 の面に透明で柔らかいシリコーンの板を介して光 電子増倍管をつけ、ブラックシートやテープで固 定した。



図 2: シンチレータやライトガイドの加工

4. J-PARC での実験

2017 年 6 月 20 日に 東海に 移動し、翌日は J-PARC で実験の準備をした。まずカウンターを 取り付け(図 3)、ビームが出ている間でもハド ロンホール内で信号を見たり光電子増倍管にかけ る電圧を変えられるように、信号と高電圧の長い ケーブルをコンクリートのシールドの外まで引き 出した。



図 3: 測定器の取り付け

信号は、オシロスコープで観測することを基本とした。また、C1、C2、C3のカウンターからの信号を使ってオシロスコープ用のトリガーを作り、波形をネットワークを通して 10 Hz で Mac に読み出せるようにした。CAMAC の ADC などを使えばはるかに高いレートでデータを収集できるのだが、実験準備で忙しく 6 月の段階ではまだその段階には至っていなかった。

ビーム初日の6月22日はカウンターの高電圧 やタイミングの調整から始めたが、意外と手間 取った。低エネルギーのガンマ線が多いためか、 荷電粒子の信号がなかなかきれいに見えなかった のが一つの要因である。その後、NIM のモジュー ルを用いてカウンターのヒットの組み合わせでト リガー信号を作り、たとえば C1 と C2 に同時に ヒットがあった時にオシロスコープで波形を見る ようにした (図4)。また、異なるヒットの組み 合わせでオシロスコープをトリガーし、波形を記 録した。さらに、読み取った波形情報から電荷に 直すプログラムを各人が書き、留学生の子は、ヒ ストグラムを作るプログラムも書いた。学生たち は、まだプログラミングの初心者だったので、高 度なソフトウェアの道具を学ぶよりは、自分たち で一からプログラムを書く方が彼らのためにな る。

ビームタイムは2日間であったが、それでも 時間は足りず、その制限の中で実験方針を議論し (図 5)、かろうじて必要最小限のデータを収集し て終わった。



図 4: オシロスコープを使って波形を観察



図 5: 実験の方針について議論

5. 実験結果

本格的なデータ解析は、大学に戻ってから行った。この時には、ROOTという解析用のソフトを 用い、それを用いて様々な条件のもとにヒストグ ラムを作った。

図6に、C2とC3が同時に鳴った時のトリガー (C2・C3)で見たC2の信号の電荷を示す。高いピー クは、荷電粒子1個が落としたエネルギーに対応 する。C1にヒットがないことを要求すると、荷 電粒子1個の落とすエネルギーの1.7倍のところ に、小さなピークが見える。これは、ガンマ線が 鉛板の中で対生成を起こし、電子と陽電子が C2 を通過したことを示す。また、C1 にヒットがな い場合でも、荷電粒子 1 個相当のエネルギー損失 が C2 にあるのは、コンプトン散乱による可能性 が高い。



図 6: C2・C3 のトリガーで取得した、C2 の光電子増 倍管の電荷量。"Pedestal"と示されたところが、 電荷 0 に対応する。十字マークは C1 にヒットが あった時、ヒストグラムは C1 にヒットがなかっ たとき。(一人の学生の解析より)

6. 全体を振り返って

実験は、予想よりも時間がかかった。これは、 学生たちがまだ十分にカウンターの扱いやトリ ガーロジックの作り方などに慣れていなかったた めである。宇宙線を用いた実験で一通り基本的な 技術に慣れていれば、もっとスムーズに物事は運 んだと思う。しかし今回は、留学生がいられるの が8月までと限られており、J-PARC ハドロンホー ルのビームタイムも6月までという制限があった ため、時間的に厳しかった。いつでも気軽に使え るテストビームラインが KEK や J-PARC にあれ ばと思う。

しかし、学生たちは自分たちで実験を計画して 準備し、次々と出てくる問題や疑問に取り組んだ。 これは、学生たちに取って非常に貴重な体験だっ た。

この実験の準備が始まるまで、日本人の学生た ちは英語が苦手だといって、あまり留学生の子と コミュニケーションを取っていなかった。しか し、実験の準備を始めるにあたり、そういうこと も言っていられなくなり、とにかく英語や手ぶり や図を駆使して話し合うようになった。共通の目 標を達成するために、言葉の壁を乗り越え、仲良 くなって力を合わせて実験を準備し遂行したこと も、彼らにとって非常に貴重な経験であり、これ は将来も役立つはずである。

7. 謝辞

今回の実験のために学生の旅費と宿泊費をサ ポートしてくださった高エネルギー加速器科学研 究奨励会に、深くお礼を申し上げます。また、学 部生たちの実験のために必要な準備をしてくだ さったハドロンホールの皆様、身内ではあるが便 宜を図ってくれた KOTO 実験のメンバーにも感 謝いたします。

なお、ベトナムからの留学生は、大阪大学の短 期留学プログラム FrontierLab@OsakaU の成果発 表会でこの実験について発表し、約 20 人の中で Best Presentation Award の賞をとりました(図 7)。 これも、彼女が今回の実験で貴重な経験を得られ たおかげです。



図 7: Best Presentation Award をとったベトナムからの 短期留学生

■研究助成報告 2)



宇宙の成り立ちの謎に迫る国際共同プロジェクト「Belle II(ベル・ツー)」は、次世代への科学普及に も長年力を入れてきました。その取り組みの一つが、約 20 名の高校生を 4 日間 KEK に招待する研究体 験型サイエンスキャンプ「Belle Plus(ベル・プリュス)」です。このプログラムで TA として重要な役割 を担う大学院生の旅費に対し、今回、加速器奨励会より助成を受けました。

Belle Plus では、「実験から結論までの科学的な考察技法」を体得してもらうことを目的に「研究者と同 ーの研究環境における研究体験」を基軸としたプログラムを 2006 年からほぼ毎年開催してきました。高 校生の旅費を全額サポート・大学院レベルの内容を高校生向けにわかりやすく再構成した実験内容・最 終日の高校生自身による研究発表・研究者と大学院生が多数参加する手厚いサポート体制など、過去 10 回の開催のたびに改良を重ね、他に類を見ない良プログラムに成長してきました。

本プログラムは、高校生が最先端科学を学ぶだけではなく、ティーチングアシスタントとして参加す る大学院生が、最先端科学をわかりやすく伝える教育手法を模索する場という面があり、従来から奈良 教育大と連携して運営しています。高校生の旅費を全額サポートすることで、関東圏に限らない多様な 地域の高校生が参加し、科学教育手法に関するより一般的で深い知見が得られると期待されます。 今年度の Belle Plus (ベル・プリュス) は、8月7日から4日間、つくば市大穂の KEK つくばキャンパ スで開かれ、全国から集まった高校生24人が、素粒子研究の現場で課題研究に取り組みました。このキャ ンプは、素粒子実験の研究現場を実際に体験することで、KEKのBファクトリー加速器とBelle 測定器 を使った研究の意義を理解してもらうとともに、研究の奥深さや広がりや、一つの結論に到達するまで の難しさを体得してもらうことを目的としています。次世代を担う研究者の育成につながることを願い、 2006年から行われています。11回目の今回も、KEK と奈良教育大の共催で開かれました。

今回は KEK による助成に、加速器科学奨励会からの助成・クラウドファンディングによる一般の方か らの支援を合わせることで、北海道から沖縄県まで全国から幅広く、男女合わせて 24 人の生徒を招待す ることができました。



集まった24人の高校生たちは、片岡佐知子・実行委員長(奈良教育大学)の「充実した4日間にして いきましょう」という呼びかけに呼応するようにキャンプをスタート。「B-Lab 班」、「宇宙線速度測定班」、 「ワイヤーチェンバー班」、「理論班」の計4班に分かれ、講師役の研究者と大学院生のTAの指導の下、 それぞれ与えられた課題に挑戦しました。



「B-Lab 班」は、1999 年から 2010 年まで稼働した Belle 測定器を使った実験で実際に収集されたデータ の一部を、自作の解析プログラムにかけ、新粒子を探すというデータ 解析プロセスを体験。東京都から 参加した高校1年の男子生徒(15)は「研究と同じことが体験できるとは驚きです。知らなかった公式 を学ぶこともできて、素粒子の世界に興味を持ちました。」と感想を語りました。



「宇宙線速度測定班」は、机の上下に設置した二本の測定装置「シンチレータ」で、宇宙から降ってく る宇宙線を捉え、測定データから速度を計算する取り組みに挑戦。福岡市から参加した高校2年生の男 子生徒(16)は「目的は簡単だけど、データの読み方がややこしく、正しい値を出すのは大変でした。」 と苦労した様子で話しました。 「ワイヤーチェンバー班」は、ガスを満たした容器内にさまざまな太さのワイヤーを張り、荷電粒子の 飛跡を捉えるワイヤーチェンバーを自作し、X線源やベータ線源などを使ってその性質を調べる試みに 挑戦。札幌市から参加した高校1年の男子生徒(15)は「小学校時代に作ろうとしたガイガーカウンター の原理と同じ。そのとき失敗した理由がよくわかり、すごく面白かったです。」と満足そうにコメントし ました。



「理論班」は、標準模型によって記述される素粒子の振る舞いを、ファインマン図に書き起こす演習を こなし、「B-Lab 班」の解析データからどんな粒子が誕生したのかを推測する課題に挑戦。沖縄県から参 加した高校1年生の男子生徒(15)は「実験の結果を理論で説明することに興味があり、理論班を選び ました。難しい問題も、先生たちがやさしく教えてくれて、うまく答えを導き出すことができました。」 と笑顔で話しました。



最終日には、自分たちの結果を自分たちでスライドにまとめ、班ごとに研究発表会を行いました。他 班の発表内容に対しても積極的に質問する生徒たちの姿が見られました。壇上の高校生は、研究者から の突っ込んだ質問にも精一杯答えていました。





班ごとの課題実習に加え、KEK内の施設見学やサイエンスカフェなど盛りだくさんの3泊4日。高校 生たちからは「グループで夜遅くまで宿題に取り組み、議論したのが楽しかった」「素粒子の世界に興味 を持った」「実験施設を間近で見てその大きさを体感できた」などの声が聞かれました。

TA としてこのキャンプに参加した大学院生からは、「前提知識がない高校生に最先端の科学を教える ことが本当にできるか不安だったが、演習課題のプログラムがうまく工夫されていた」「高校生たちがグ ループの仲間同士で助け合って課題を解決していく姿が頼もしかった」と話していました。(了)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2017)

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 岡部 博孝

2017 年 7 月 17 日から 21 日の日程でチェコ共和 国のプラハにて開催された International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) に参加いたしました。本国際会議への参加に際し て、高エネルギー加速器科学研究奨励会から助成 を頂けましたことを深く感謝いたします。また申 請に当たり、様々なご助言とご支援を頂きました 高エネルギー加速器研究機構ミュオン科学研究系 主幹の三宅康博教授と構造物性研究センター長の 門野良典教授に厚くお礼申し上げます。以下、会 議の概要および口頭発表の内容についてご紹介い たします。

1. 会議の概要

本会議は強相関電子系物質(f電子系およびd電 子系、有機物等の物質群)に関する国際会議であ り、1992年に仙台で開催されて以来、3年に1度 の International Conference on Magnetisim (ICM)との 共同開催を含めると、今回は26回目の開催に当 たります。会議国となったチェコは、かつてチェ コスロバキア社会主義共和国と呼ばれていた国で すが、1993年のスロヴァキアの分離後はチェコ共 和国として独立し、現在はEUに加盟しています。 その首都プラハは、絵本の世界のような中世ヨー ロッパの美しい街並みが現在も残されており、芸 術・音楽・文学の街として世界中の人々をひきつ けています。

今回、SCES2017の会場になった Clarion Congress Hotel Prague は、プラハの中心部から地下 鉄 B線で約15分、Vysočanská 駅の目の前という 好立地であり、周囲には様々な商店やレストラン、 ショッピングモールやスポーツジムなどが立ち並 んでいます。参加者は 20 ヶ国以上総勢 906 名で あり、日本からの参加者も多く、プレナリーセッ ションの他に 4 部屋に分かれてのパラレルセッ ションと、1 日当たり 200 件前後のポスターセッ ションが行われました。各発表は、以下の 18 のト ピックスに分類され、連日 8 時半から夕方 18 時過 ぎまで積極的な議論が交わされました。

- 1. Heavy fermion systems
- 2. Kondo effect and valence fluctuations
- 3. Quantum phase transitions and related phenomena
- 4. Unconventional superconductivity
- 5. Metal insulator transitions
- 6. Strong spin-orbit interaction in correlated systems
- 7. CEF effects and multipolar ordering in SCES
- 8. Theoretical methods for strong correlations Correlated topological phases
- 9. Kondo physics at nanoscale
- 10. Quantum magnetism and frustration
- 11. New materials; bulk, thin films and artificial structures
- 12. Strong correlations in actinides
- 13. Non-equilibrium phenomena in strongly correlated systems
- 14. Ferroics and multiferroics
- 15. Strong correlations in optical lattices
- 16. Strongly correlated materials in applications
- 17. Large research infrastructures for SCES investigations
- 18. Novel techniques

前回(SCES2016)よりトピックスが7つ増加し、 新たにスピン軌道相互作用や多極子秩序、トポロ ジカル相に関する理論やアクチノイド、光格子に 関する項目が追加されています。

開会式では現地組織委員会長の Vladimir Sechovský氏 (Charles Univ.) から歓迎の挨拶があっ た後、Bernard Coqblin 賞 (強相関電子系の物理の 先進国でない国において、その分野の発展に貢献 した人が対象)を受賞されたアルゼンチン、サン・ カルロス・デ・バリローチェの Julian G. Sereni 氏 による「セリウムの体積崩壊現象発見 80 周年記念」 講演、ジョンズ・ホプキンス大の N. Peter Armitage 氏による「量子スピンアイス物質 Yb₂Ti₂O₇ におけ る低エネルギー励起」に関する講演がありました。

本国際会議での研究対象は多岐に渡っているた め、全てのホットトピックスをフォローするこ とは難しいですが、筆者の専門分野である磁性分 野ではフラストレート系化合物、カゴメ格子にお ける量子液体研究に加え、スピンアイス物質にお ける磁化の断片化(フラグメンテーション)に 関する発表が目を引きました。f 電子系について は、URu₂Si₂ が示す"隠れた秩序(Hidden Order)" の問題が重要なトピックとして取り扱われていま した。また、昨年のノーベル物理学賞がトポロジ カル相転移に関するものであったことから、今年 もトポロジカル絶縁体のセッションは満員御礼で あり、注目度の高さでは銅酸化物や鉄系化合物超 伝導に匹敵する人気を集めているのが印象的でし た。さらにスピントロニクス分野では、マルチフェ ロイクスが比較的堅調な盛り上がり示す一方、ス カーミオンに関する発表が大幅に数を増してお り、応用研究に関して、研究者の興味が著しく増 大していることを強く感じました。

ポスターセッションにも連日、多くの参加者が 詰めかけ、熱い議論が交わされておりました。チェ コは、国民一人当たりのビール消費量が世界一の ビール大国であり、黄金に輝くピルスナー・ウル ケルを片手にチェコ伝統の菓子を摘みながら、他 国の研究者と活発に交流するという貴重な機会を 得ることができました。

2. 発表内容

今回は、光栄にも口頭発表を行う機会を頂きま した。申し込みをしたフラストレーションのセッ ションではありませんでしたが、「物質のエキゾ チック相」セッションにおいて、15 分ほどの発表 を行いました。発表内容は Li₂Cr₃SbO₈ という新し いカゴメ格子物質について、ミュオンをプローブ とした磁性研究 (μSR 実験)を行ない、それによっ て判明したエキゾチックな基底状態と励起状態の 可能性について議論したものです。簡単なもので すが、以下に発表の概要を示します。

(発表タイトル)

Exotic spin-liquid-like magnetic ground state in the novel kagomé antiferromagnet Li₂Cr₃SbO₈

Frustrated magnets have been one of the major topics in the field of condensed matter physics due to their exotic low temperature spin states. We launched a novel kagomé antiferromagnet Li₂Cr₃SbO₈ which has a possible Z₃ spin liquid plateau state at 1/9 magnetization. In this study, we performed muonspin rotation/relaxation (μ SR) experiments on this compound, cooling down to cryogenic temperatures as ~20 mK using a ³He-⁴He dilution refrigerator, to reveal its magnetic ground state.

Temperature dependence of μ SR time spectra in zero field indicates a presence of magnetic transition at T^* = 4.5 K without any trace of long-range order. The spectra below T^* show Gaussian-like line shape with anomalously broad width (~10 µs⁻¹) for randomly-oriented static dipole moments as some sort of short-range order. Similar line shapes have been found in other Cr kagomé compounds, e.g., SrCr_{9-x}Ga_{3+x}O₁₉ and KCr₃(OH)₆(SO₄)₂, however these compounds show a spin-glass transition due to certain amounts of lattice disorder. Li₂Cr₃SbO₈ has a perfect kagomé lattice structure, and it is expected to be free from such a problem.

By applying magnetic field parallel to the muon-spinpolarization direction (LF- μ SR), we found that the magnetic state below T^* is not a "uniform" short-range order but a complicated state consisting of both static (or quasi-static) and dynamical components. In LF- μ SR, these components are easily distinguished from one another by how the longitudinal depolarization is quenched. The static component is approximately 70% of the total-spin population and the remainder is dynamical (~30%). Remarkably, this feature does not change even down to 22 mK. This suggests that finite spin fluctuation might survive at absolute zero temperature. Such a mixing state (static : dynamical ~ 2 : 1) is unprecedented as it is the first time that observed in kagomé compounds.

We presume a magnetic ground state of $\text{Li}_2\text{Cr}_3\text{SbO}_8$. This model is empirically constructed on the basis of μ SR results considering with theoretically-calculated muon sites which are located within the plane of kagomé hexagons. The main feature of the model is hexagonal plaquettes formed by Cr^{3+} electronic spins where the surrounding spins are isolated. Adopting a periodical displacement of the two-third of static spins by dynamical spins in this manner, magnetic frustration seems to be somewhat eased in the model. Implanted muons stopped inside the hexagons would sense almost dynamical fields from plaquettes, whereas outside muons sense almost static fields from adjacent spins.

Such a magnetic state could be considered as an exotic spin-liquid state coexisting with a short-range magnetic order. Based on this picture, we provide a plausible mechanism of the field-induced 1/9 magnetization plateau which would be closely linked to ordered patterns of the surrounding spins.

なお、本研究は北海道大学理学部の吉田紘行氏 との共同研究として行われました。セッション最 後の発表であったこともあり、発表終了後にも多 くの方から様々な質問や共同研究の申し込みが寄 せられ、非常に有意義な一時を過ごすことができ ました。

今回の会議では、残念ながら私の専門分野であ る μSR 関係の発表は少なく、私の知る限りでは口 頭発表 2 件、ポスター発表が数件ある程度と、ま だまだ磁気プローブとしてのミュオンの存在感が 薄いことを実感いたしました。閉会式では、来年 の SCES がサンフランシスコで ICM と共催になる ことが伝えられた後、再来年の SCES2019 の開催 地が、日本の岡山に決定したことがアナウンスさ れました。それまでの強相関電子系研究の進展を 楽しみにすると同時に、加速器施設の一員として、 ミュオンを用いた研究発表が1件でも増えるよう 尽力したいと存じます。



眼下に広がるプラハの街並



SCES2017 会場の様子(開会式)



ポスターセッション風景



閉会式の様子、一番手前の人物が現地組織委員会長の Vladimir Sechovský氏(Charles Univ.)



SCES2017 ポスター

ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象の探索

宮城教育大学 教育学部 理科教育講座 福田 善之

1. はじめに

1.1. ニュートリノ質量

2015年のノーベル物理学賞を受賞した梶田隆 章氏とArthur Bruce McDonald 氏は、それぞれ大 気ニュートリノ振動および太陽ニュートリノ振動 を発見したことが評価された。つまり、従来の素 粒子の標準理論がニュートリノの質量を0と想定 していたが、実は質量が存在する直接的な証拠と なったのである。ところが、その質量が一体いく らなのかという疑問に、ニュートリノ振動は答え を与えてはいない。

素粒子の標準理論ではニュートリノに質量がな いものとして記述しており、これまでいくつもの 実験データや観測結果を精密に説明していること からもわかるように、ニュートリノに質量が存在 したとしても、非常に小さいことが予想される。 このニュートリノ質量を探索する方法は、いくつ か存在する。

まず、ニュートリノを放出するベータ崩壊の ベータ線のエネルギーを極限まで精密に測定する 方法である。ベータ崩壊は、放出するニュートリ ノがエネルギーを持ち去るため、観測される電子 のエネルギー分布は広がっている。このとき、電 子の最大(終端)エネルギーは、ニュートリノに 質量がある場合、標準理論の計算値と微妙に異な る。

1980年代、世界各地でベータ崩壊から放出する 電子の最大エネルギーを精密に計測する実験が行 われた。東京大学原子核研究所では、2重収束磁 石によるスペクトロメーターを用いて、トリチウムの ベータ崩壊(${}^{3}H \rightarrow {}^{3}He + e^{-} + \bar{\nu}_{e}$)の終端エネルギー を測定し、 $m_v c^2 < 13$ eVの上限値を得た[1]。

一方、静電型スペクトロメーターを使った実験がドイツのマインツ [2] やロシアのトロイツク [3] で行われ、 $m_v c^2 < 2.5 \text{ eV}$ の結果を得た。現在、 ドイツ・カールスルーエにおいて、KATRIN 実験 が巨大なスペクトロメーターを用いることにより $m_v c^2 < 0.2 \text{ eV}$ を目指しているが、現在考えられ ている 0.01 eV のニュートリノ質量の領域に到達 することはかなり困難だと思われる。

1.2. 二重ベータ崩壊

一方、もっと小さいニュートリノ質量の測定に 非常に有効だと考えられる方法が、ニュートリノ を放出しない二重ベータ崩壊事象の観測である。 二重ベータ崩壊とは、通常のベータ崩壊とは異な り、ベータ崩壊が2回同時に同じ核内で起きる現 象である。但し、親核の質量より娘核の質量が大 きいため、個別のベータ崩壊は抑制される。この 二重ベータ崩壊には2種類が存在する。

一つは、2 個の電子と2 個のニュートリノを放 出する二重ベータ崩壊(2νββ)である。これは、 量子力学的なトンネル効果によってベータ崩壊が 2 回同時に同じ核内で発生する現象である。この 崩壊の半減期は 10²¹ 年程度と非常に長いが、実際 に観測されている現象である [4]。

それとは別に、2個の電子だけを放出してニュー トリノを放出しない二重ベータ崩壊(0νββ)が存 在すると考えられている。0vββの場合、核内の 中性子が陽子に崩壊した際に放出するニュート リノは反ニュートリノでもあるので、同じ核内の 別の中性子に吸収されて陽子に崩壊してしまうた め、2個の電子しか放出しない。このようにニュー トリノと反ニュートリノが同じである場合はマヨ ラナ粒子という。素粒子の標準理論ではニュート リノはディラック粒子であるため、ニュートリノ と反ニュートリノは別の粒子と考えている。また、 ニュートリノはレプトン族に属しているためレプ トン数という量子数を持ち、ニュートリノは+1、 反ニュートリノは -1 と言う値を持つ。標準理論 では、このレプトン数が常に保存し、実際 2vββ は崩壊前後でレプトン数を保存しているが、0vββ は保存しないのである。つまり、0vββは、素粒 子の標準理論を超える新たな現象なのである。

2. 二重ベータ崩壊事象の探索実験

2.1. 二重ベータ崩壊の核種と半減期

0vββ が観測された場合、式 (1) のように、その 半減期 *T*⁰/₁₂ の逆数は核行列要素の理論値とニュー トリノ絶対質量の積の2 乗に比例することが予言 されている。

$$\left[T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \to 0^+)\right]^{-1} = G_{0\nu} M_{0\nu} \frac{\langle m_{\nu} \rangle^2}{m_{e}^2}$$
(1)

ここで、 $G_{0\nu}$ は位相空間因子であり、 $M_{0\nu}$ は標的 原子核の核行列要素、 $\langle m_{\nu} \rangle$ はマヨラナ型のニュー トリノ質量、 m_e は電子の質量である。これから、 例えば 0.01 eV 以下の質量領域を観測するために は、概ね 10^{27} 年以上の半減期の現象を観測する必 要がある。

一方、観測する半減期の2乗は、式(2)のように、 標的原子核の質量と観測時間の積に比例し、エネ ルギー分解能と背景事象率の積に反比例する。

$$T_{1/2}^{0\nu} \approx a \sqrt{\frac{MT}{\Delta EB}}$$
 (2)

ここで*a*は、標的原子核の自然存在比、*M*は 標的原子核の質量、*T*は観測時間、Δ*E*はエネル ギー分解能、B は背景事象率である。従って、 次世代の二重ベータ崩壊実験に求められる条件 は、1) 0.01 事象 kg⁻¹ y⁻¹の低背景事象の環境下で、 2) 高エネルギー分解能を有する観測装置により、 3) トンスケールの標的原子核を用いて観測する必 要があり、これらの条件が揃うと 0.01 eV 領域の ニュートリノ質量の探索が可能となる。このよう に、0vββの観測は非常に小さいニュートリノ質 量を測定できる唯一の方法であると考えられてお り、現在世界中で観測や計画がなされている。

表1は、二重ベータ崩壊する原子核の一覧を示 している。また、崩壊過程のQ値と自然存在率 も記載されている。

表1 二重ベータ崩壊する原子核とQ値および自然存在比

原子核	Q值(keV)	自然存在比(%)
${}^{48}\text{Ca} \rightarrow {}^{48}\text{Ti}$	4271	0.187
150 Nd $\rightarrow {}^{150}$ Sm	3667	5.6
$^{96}\mathrm{Zr} ightarrow ^{96}\mathrm{Mo}$	3350	2.8
$^{100}\mathrm{Mo} ightarrow ^{100}\mathrm{Ru}$	3034	9.63
${}^{82}\mathrm{Se} \rightarrow {}^{82}\mathrm{Kr}$	2995	8.73
$^{116}Cd \rightarrow {}^{116}Sn$	2802	7.49
$^{130}\mathrm{Te} ightarrow ^{130}\mathrm{Xe}$	2533	34.08
136 Xe \rightarrow 136 Ba	2479	8.86
124 Sn $\rightarrow {}^{124}$ Te	2288	5.79
$^{76}\mathrm{Ge} ightarrow ^{76}\mathrm{Se}$	2040	7.44
$^{110}\mathrm{Pd} \rightarrow ^{110}\mathrm{Cd}$	2013	11.72

2.2. ZICOS 実験

二重ベータ崩壊を探索する実験の歴史は古く、 阪大の江尻氏が始めた ELEGANT やフランスの NEMO が有名である。近年では、⁷⁶Ge を濃縮した ゲルマニウム半導体を用いた GERDA や、低温化 させた TeO₂ 結晶の温度変化を捉える CUORE な どが観測を開始しているが、いずれも標的原子核 の質量が数 10 ~数 100kg 程度である。現在、最 も小さいニュートリノ質量の上限値(最も長い半 減期の下限値)を得ているのは、液体シンチレー タに ¹³⁶Xe を 320 kg 溶解させた KamLAND-Zen が 観測 した $\langle m_v c^2 \rangle \leq 61 - 165 \text{ meV}, T_{1/2}^{0v} > 1.07 \times$ 10²⁶ 年(90% の信頼度)である [5]。

一方、トンスケールの標的原子核を使用する 次世代の二重ベータ崩壊実験は、今年度中に KamLAND-Zen が¹³⁶Xe を 800kg 使用する計画で あり、また液体シンチレータに¹³⁰Te を 790kg 溶 解させる SNO+ も始まろうとしている。

本研究では、二重ベータ崩壊のQ値が標的原 子核の中では3番目に高い[%]Zrを用いるZICOS 実験を計画している。図1は、ZICOS実験の外略 図である。



Conceptual design of ZICOS detector



図1 ZICOS 実験装置の概略図

これまでに、テトラキス(アセト酢酸イソプロ ピル)ジルコニウム(Zr(iprac)₄)をアニソールに 10wt.% 溶解させ、更に PPO を 5wt.%、POPOP を 0.5wt.% 溶解させた液体シンチレータの開発に成功 し、汎用の液体シンチレータである BC505 に対し て 48.7 ± 7.1% の発光量と、64% の集光率の光電 子増倍管による観測を仮定すると、2.8 ± 0.4% @ 3.35 MeV のエネルギー分解能を達成している [6]。

但し、液体シンチレータを用いた二重ベータ 崩壊実験では、ウラン系列の²¹⁴Bi やトリウム系 列の²⁰⁸Tl が放出するベータ線とガンマ線がQ値 付近のエネルギーを持つため、深刻な背景事象に なる。従って、それらの放射性物質を極限まで除 去しなければいけない。実際、U/Th の含有量が 10^{-15~-16}g/g という極低背景事象環境を達成してい る KamLAND-Zen でさえ、3 MeV 付近に観測され ている事象は、主に内部バルーンに付着した²⁰⁸Tl のベータ崩壊の電子と²⁰⁸Pbの基底状態へ遷移す る際に放出する複数のガンマ線から構成されてい る。特に、後者には 2.6146 MeV のガンマ線が必 ず含まれている。

2.3.²⁰⁸TI 崩壊事象の除去

0vββ 事象は一つの原子核から 2 個の電子を放 出する一方、²⁰⁸Tl 等の放射性核種の崩壊事象では、 ベータ線の発生点とは離れた場所でガンマ線が反 応すると考えられる。従って、シンチレーション 光を用いてバーテックスの位置を求めると、概ね 光量中心となるため、検出器の内部に再構成され てしまうことがあり、バルーンから離れた事象を 選択しても、²⁰⁸Tl の崩壊事象が残存するのである。 (但し、KamLAND-Zen ではバルーンの外に逃げ たベータ線やガンマ線も掴まえるので、¹³⁶Xe の Q 値である 2.5 MeV 付近には、これらの事象は入り 込まない。)すなわち、シンチレーション光だけ ではエネルギー観測しかできないため、0vββ 事 象と放射性核種の崩壊事象を明確に区別する有効 な手段がないのである。

一方、²⁰⁸TI崩壊事象によるベータ線とガンマ線 を各々個別に観測することができれば、0vββ事 象とは異なった特徴を示すはずである。そこで、 シンチレーション光とは別に、チェレンコフ光を 用いて放射性核種の崩壊事象を除去する手法を考 案しようと考えた。

電子やガンマ線のシミュレータとして定評の ある EGS 5 を用いたシミュレーションにより求 められた、²⁰⁸Tl の崩壊事象のエネルギースペク トルを図 2 に示す。バルーンから 50 cm 以上より 内側(中心から 3 m 以内)に光量中心を持つ事象 を選びプロットすると、図 2 の点線のようになっ た。これから、ほぼ全ての事象に 2.6146 MeV の ガンマ線が含まれることがわかる。この時点で、 KamLAND-Zen の fiducial volume カットとほぼ同等 と見なしてよい。残った事象に対して、 2 事象以 上ならば 10 cm 以内しか離れていない事象(1 事 象ならば 0 cm としている)をプロットしたものが、 図 2 の斜線である。



図2 シミュレーションから求められた²⁰⁸TIの除去段階毎 のエネルギースペクトル |

全部で 100,000 事象発生させた内、2.8 MeV か ら 4.0 MeV の領域で見ると、全体で 26,403 事象 が観測され、fiducial volume 内に 759 事象、事象 間距離が 10 cm 以内の事象は 13 事象となった。 すなわち、ベータ崩壊の電子と 2.6146 MeV のガ ンマ線が反応した電子との間が 10 cm 以上離れて いると、fiducial volume 内に観測される²⁰⁸TI 事象 の約 98% を除去できることがわかった。従って、 チェレンコフ光を用いて個別に事象の離れ具合を パラメーター化できれば、さらに高度な背景事情 除去が可能になると考えられる。

ZICOS 実 験 で は、fiducial volume 内 の ⁹⁶Zr は 45 kg であり、KamLAND-Zen 同様の洗浄度で2年 間の測定をしたとしても $T_{1/2}^{0\nu} > 4 \times 10^{25}$ 年の半減 期しか探索できない。そこで、²⁰⁸Tl による背景事 象を 95% 除去すると、 $T_{1/2}^{0\nu} > 2 \times 10^{26}$ 年の半減期 が達成できる。更に、⁹⁶Zr の濃縮度を 50% まで高 められると、 $T_{1/2}^{0\nu} > 1 \times 10^{27}$ 年の半減期まで探索 が可能となるのである。

2.4. チェレンコフ光を用いた背景事象の除去

シミュレーションを用いて、²⁰⁸Tlの崩壊事象と 0vββ 事象から放射されるチェレンコフ光を受光 した光電子増倍管の典型的なヒットパターンを 図 3 に示す。但し、0vββ の 2 本の電子は 1.675 MeV の電子が正反対の方向に発生している。ここで、 丸点はチェレンコフ光の光子を1pe以上観測した光電子増倍管、四角点は電子の発生点である。 0vββ事象では、各電子のチェレンコフ光のヒットを色分けしている。



図3²⁰⁸TIの崩壊事象と2重ベータ崩壊事象から放射され るチェレンコフ光を受光した光電子増倍管の典型的 なヒットパターン。紫の四角点は、電子の発生点を 示している。

ヒットパターンを見ると、0vββ 事象はチェレ ンコフ光によるリングが2つ観測されているよ うに見えるが、実際には電子が多重散乱している ことから、クリアなリングとは言えない。また、 ²⁰⁸TIの事象のヒットパターンと比べても、0vββ と区別することは非常に難しい。そこで、これら のヒットパターンを数値化する手法を考えた。

まず、0vββ 事象の場合、シンチレーション光 から求められる事象のバーテックスの位置は、事 象の発生点とほぼ一致すると考えられる。一方、 ²⁰⁸Tlの崩壊事象では、ベータ線とガンマ線により 放出した電子の発生点が異なっているため、シン チレーションから求められるバーテックスは、光 量中心となる。

そこで、シンチレーション光から求められる バーテックスを中心に、チェレンコフ光を検出し た各光電子増倍管への方向単位ベクトル *d_i*を求 め、全ての光電子増倍管についてベクトル和 *d*を 求める。

$$\hat{d} = \sum_{i=1}^{nhit} \vec{d}_i \tag{3}$$

ここで、nhit はチェレンコフ光を受光した光電 子増倍管の本数である。このベクトル *â*の方向に 対して、各光電子増倍管への方向と成す角度を θ_i として、その平均角 〈θ〉を以下のように定義する。

$$\langle \theta \rangle = \frac{1}{nhit} \sum_{i=1}^{nhit} \theta_i$$
 (4)

1.675 MeV の単一電子のバーテックスが fiducial volume 内にある事象に対して、この平均角の分 布を取ると図4のようになる。これから、平均角 はアニソール中のチェレンコフ角の48 度と良く 一致していることがわかる。





図4 単一電子による平均角分布

次に、一つの電子のエネルギーが 1.675 MeV の 0vββ 事象のバーテックスが fiducial volume 内に存 在する場合の平均角分布を図5に示す。図3のヒッ トパターンからわかるように、2つの電子による 光電子増倍管のヒットは検出器の表面に広がって いるため、1つの電子事象に比べると平均角は大 きい値が得られている。

最後に、²⁰⁸Tlの崩壊事象のバーテックスが fiducial volume内に存在する場合の平均角分布を 図 6 に示す。²⁰⁸Tlの崩壊事象は、ベータ崩壊の電 子や 2.6146 MeV のガンマ線によるコンプトン散 乱電子等の複数の事象から構成されているため、 前述にようにシンチレーション光によるバーテッ クスは光量中心になっている。



図5 単一電子と2重ベータ崩壊事象による平均角分布



図6 2重ベータ崩壊事象と²⁰⁸TI崩壊事象による平均角 分布

従って、真の事象の発生点から離れた位置に なっているため、平均角が小さくなることが予想 される。実際、図 6 から 0vββ 事象の平均角と比 べると明かに²⁰⁸Tl 崩壊事象の平均角は小さい値 になっている。そこで、平均角を 48 度でカット すると、0vββ 事象の 77.7% はカットされずに残 るが、²⁰⁸Tl 崩壊事象の 92.8% が除去される。すな わち、チェレンコフ光のヒットパターン用いるこ とにより、KamLAND-Zen が除去できない fiducial volume 内に残存する ²⁰⁸Tl 崩壊事象の 95% 近くが 除去できることがわかった。

3. チェレンコフ光の観測

このように、チェレンコフ光を用いれば、これ まで除去できなかった放射性核種崩壊事象の内、 ガンマ線の放出を伴うようなベータ崩壊核種であ る²⁰⁸Tlや²¹⁴Biに対して、95%近くを除去できる と考えられる。但し、ZICOS実験ではエネルギー の観測にはシンチレーション光を用いるため、 チェレンコフ光による光電子増倍管の情報をシン チレーション光から分離しなければいけない。

3.1. チェレンコフ光の分離

チェレンコフ光とシンチレーション光との分離 は、発光機構の違いを利用する。シンチレーショ ン光は、分子の軌道電子の励起と遷移の過程を経 て放出するため、一般的にナノ秒程度の時間的な 広がりを生ずる。それに対し、チェレンコフ光は、 荷電粒子による電場と分子の電磁相互作用により 生ずる双極子の振動から発生するため、荷電粒子 が通過すると同時に発生し、数 100 ピコ秒の広が りを持つことが予想される。従って、信号の波形 を観測すると、立ち上がりに差ができることが実 験的に確かめられている [7]。

3.2. チェレンコフ光の観測

チェレンコフ光の波形を観測するため、アニ ソールと ZICOS 用の液体シンチレータに対し、 CAEN V1721 FADC を用いて発光波形の計測を 行った。チェレンコフ光は方向性を有していると 考えられる。そこで、図7のように⁶⁰Coのガン マ線が液体シンチレータ内の電子とコンプトン散 乱し、150度の後方散乱したガンマ線を NaI 検出 器で観測したとき(後方散乱)のデータを収集す る。この時、液体シンチレータ内で観測される電 子は、ガンマ線の入射に対して 4.5 度の角度方向 に平均 1.02 MeV のエネルギーを有して放出され ているはずである。従って、電子の方向は一定に 保たれるため、チェレンコフ光の方向生を議論で きるのである。

そこで、図7中の angle (ガンマ線の入射方向 と光電子増倍管の面とのなす角度)を変更すると、 電子の方向に対して光電子増倍管の方向を自由に 変えることができることになる。これから、angle によって観測する事象数が異なれば、観測してい る事象がチェレンコフ光に起因していることを示 すことができるのである。



図7 チェレンコフ光観測のセットアップ。光電子増倍管 の方向は自由に変更することができる。

まず、アニソールと液体シンチレータのシンチ レーション光による波形のテンプレートを作製し た。アニソールや液体シンチレータが入っている バイアル(直径 2 cm 高さ 6 cm)に対して、⁶⁰Co のガンマ線が直接光電子増倍管に入らないよう に、上面から見て中心より 5 mm 後方へ光電子増 倍管から遠ざけた位置に鉛ブロックでスリットを 作り、光電子増倍管に対して垂直に入射させた。 この位置では、チェレンコフ光の受光も少ないと 考えられる。観測した事象のコンプトン端に相当 するエネルギー周辺の事象だけを集めて、FADC のパルス波形を作製した。アニソールの場合、発 光波長が 300 nm であるため、使用している光電 子増倍管の量子効率が約 7% なので、事象数が少 なくなっている。観測結果を図 8 に示す。



図 8 アニソールと液体シンチレータによるシンチレー ション光の FADC 波形

どちらも、シンチレーション光の崩壊時間が 7 ns で一致していることがわかる。

次に、図7のセットアップで、angle が90度の ときのアニソールと液体シンチレータの FADC に よる波形を観測した。まず、アニソールによる波 形は図9のようになった。



図 9 アニソールで観測された入射角 10 度での FADC の時間分布

アニソールではシンチレーション光の波形(左) は数が少なく、ほとんどの事象は右の図のような 波形であり、明らかにシンチレーション光とは 違った崩壊時間を持つ波形であった。従来のエネ ルギースペクトル観測では、400 nm 以上の光し か透過しない紫外線カットフィルター(富士フィ ルム製 SC-37)を通して事象が観測されたことか ら、それらがチェレンコフ光による事情だと考え ていた [8]。従って、この波形はチェレンコフ光 によるものである可能性が高い。

一方、液体シンチレータによる観測では、図 10のような波形が観測された。



図 10 液体シンチレータで観測された FADC の時間分布

液体シンチレータでは、シンチレーション光の テンプレートを統計的に合致する事象(左)が観 測されたが、統計的以上に立ち上がり部分の波形 が異なった事象(右)も観測された。この立ち上 がり部分の波形のずれがチェレンコフ光であると 考えた場合、シンチレーション光のテンプレート との差を取ると図 11 のような波形となった。



図 11 立ち上がりの早い事象とテンプレートの差をアニ ソールの分布と比較した

データからテンプレートの差を取った波形と、 アニソールで観測された波形を面積で合わせて重 ねてみると、非常に良く一致していることがわか る(図11の右図)。したがって、液体シンチレー タの波形の立ち上がり部分の超過波形は、チェレ ンコフ光である可能性が高いと言える。

しかし、これだけではチェレンコフ光を観測し たと結論づけることは危険である。チェレンコフ 光であるならば、角度相関が存在するはずであり、 図 7 のセットアップで angle を 90 度にした場合と 10 度にした場合で観測数に違いが観測されるは ずである。

そこで、統計的な議論を行うために、FADC 波 形の立ち上がり 3 ビン分のテンプレート波形との 違いを標準偏差の積算(accumulated sigma)を定 義し、その分布を図 12 に示す。



図 12 angle が 90 度と 10 度での accumulated sigma の分布

ここで、仮に accumulated sigma が 3.0 以上を チェレンコフ光が含まれる事象であると考える と、チェレンコフ光が入射しやすい 90 度の場合 で、チェレンコフ光を含む事象の割合は 25.3 ± 3.3%、入射しにくいと考えられる 10 度の場合で 17.2 ± 4.5% となり、その差は 1.5 σとなった。従っ て、差があると結論づけるには統計量が少ないも のの、おそらくチェレンコフ光は観測できている と考えている。

4. 結論

今回の測定では、アニソールの観測において、 紫外線カットフィルターによる波形の違いを確認 していないため、図9の右図の波形がチェレンコ フ光によるものと結論づけられていない。また、 液体シンチレータの角度の違いによる差が統計的 に有意であると言えず、そもそもチェレンコフ光 を含む事象の割合が、アニソールだけで測定した 際に観測された角度依存性から予想される割合の 差よりも少ないという問題が残っている。

今後、これらの問題を解決できれば、1 MeV の電子から放射されるチェレンコフ光をシンチ レーション光と分離が可能となるため、²⁰⁸TI 崩壊 事象を 95% 以上除去できることを実験的に実証 する計画である。

なお、本研究成果は、平成 29 年 7 月 24 日~ 28 日にカナダ・オンタリオ州サドベリーで開催 された TAUP 2017 - XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics に おいて口頭発表を行った。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型)24104501、26105502、基盤研究 (C)24540295、及び平成 28 年度宮城教育大学学長 裁量経費、平成 29 年度高エネルギー加速器科学研 究奨励会研究助成の援助を受けて実施しました。

参考文献

- H. Kawakami *et al.*, Physics Letters B **187** (1987) 198-204.
- [2] Ch. Weinheimer *et al.*, Physics Letters B **460** (1999) 219-226.
- [3] V.M Lobashev *et al.*, Physics Letters B 460 (1999) 227-235.
- [4] N. Ackeman *et al.* (EXO Collaboration), Physical Review Letters **107** (2011) 212501, GERDA Collaboration, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics **42** (2015) 115201, J.Argyades *et al.*, Nuclear Physics A **847** (2010) 168-179.
- [5] A.Gando *et al.*, Physical Review Letters **117** (2016) 082503.
- [6] Y. Fukuda, S. Moriyama and I. Ogawa, Nuclear Instruments and Methods A 732 (2013) 397.
- [7] J. Caravaca, et al., Physical Review C 95 (2017) 055801.
- [8] Y. Fukuda, Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 062019.

第34回高エネルギー加速器セミナー(OHO'17)報告

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 小林 幸則

高エネルギー加速器セミナー、OHO は 1984 年以来、将来の高エネルギー加速器を になう若手研究者の育成と、一般企業の研究者の加速器科学への理解を深めることを 目的として、毎年開催されてきました。日本の加速器科学分野の第一線で活躍中の各 分野の専門家が、その年のテーマ毎に最先端の加速器科学を基礎から講義しています。

2017年9月5日~8日までの4日間にわたり「マイクロ波の基礎」と題して、KEK に於いて開催され、企業、研究所、技術者、大学などの研究者、大学院生、大学生な ど103名が全国から参加しました。

「マイクロ波」に関するテーマは、過去のセミナーでも何度か取り上げてはおります が、高エネルギー加速器にとって必須の技術であると考え、再度基礎から学ぼうとい うことで選びました。

今年の OHO の特筆すべき点は、最終講義まで参加者が熱心に拝聴していたこと、多 くの参加者から積極的に次回のセミナーで取り上げて欲しいテーマや、セミナーへの 希望などをアンケートに記載いただきました。

プログラムには施設見学もあり、電子陽電子入射器棟(LINAC)、放射光施設(PF リング)、そしてコンパクト ERL を見学しました。

また OHO の呼びものの一つである「夜話」(講義ではなく先輩研究者の方の経験談 などを伺う)では、高エネルギー加速器研究機構・名誉教授より大変興味深いお話を していただき大好評でした。

TIA 連携大学院サマー・オープン・フェスティバルの一環となり、他機関と連携し ながら、若手研究者育成のさらなる可能性を広げていくことが期待されています。











第7回 特別講演会開催報告

- 1. 開催日時 平成 29 年 10 月 12 日 (木) 14:00 ~ 17:00 …… 34 名の参加
- 2.開催場所 アルカディア市ヶ谷(私学会館) 6階 阿蘇東
 住所 東京都千代田区九段北4-2-25
 TEL 03-3261-9921(代表)



高崎代表理事の挨拶

3. 演題等

- 講 演.1 「IFMIF 原型加速器の現状と核融合中性子源(A-FNS)計画」
- 講演者 池田 佳隆 氏国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門六ヶ所核融合研究所副所長
- 講師略歴 核融合エネルギーの実用化を目指した研究開発に長年従事。 1982年に当時の日本原子力研究所に入所し、大型プラズマ実験装置 JT-60 において、周 波数、100 MHz 帯、2 GHz 帯、110GHz 帯の3 種類の高周波加熱装置の開発とそれらを 用いたプラズマ加熱実験に従事。その後、中性粒子ビーム加熱開発のグループリーダを務 め 500 keV、32 A 負イオン源を中心とした開発に従事。さらに日欧との共同事業である JT-60 の超伝導化計画 JT-60SA の建設担当を経て、2016年4月より六ヶ所研に着任し、

日欧で進める IFMIF 原型加速器開発(LIPAc)を含む六ヶ所研の研究管理を担当。これまで携わった高周波加熱技術や粒子ビーム技術等を活かし、大電流加速器である LIPAc 及び その技術を基にした先進核融合中性子源(A-FNS)計画を進めていきたいと思っている。

講演要旨 日欧共同で進めている 9 MeV,125 mA 重水素ビームの R&D を行う IFMIF 原型加速器 (LIPAc)の現状とともに、その技術を用いた先進核融合中性子源(A-FNS)計画について 報告する。



池田 佳隆 氏 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 六ヶ所核融合研究所副所長

- 講 演. 2 「加速器駆動核変換システム (ADS) に関する研究開発の現状と将来計画」
- 講演者 辻本 和文 氏 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 分離変換技 術開発ディビジョン(兼)J-PARC センター 核変換セクション
- 講師略歴 専門分野は、原子炉物理。1996年に当時の日本原子力研究所に入所以来、加速器駆動シ ステム (ADS) の研究開発に携わっている。 核変換システムだけでなく、分離変換技術全体の研究開発を進めていくことが目標。

講演要旨 分離変換技術は、原子力発電で使用した使用済み核燃料の処分に関する管理負担の低減に 有効であると考えられている。

日本原子力研究開発機構で、核変換システムの一つとして研究開発を行っている加速器駆動システム (ADS) について、現在の研究開発の状況や将来計画について報告する。



辻本 和文 氏 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン(兼) J-PARC センター 核変換セクション

・講演の詳細につきましては、奨励会ホームページ(ホームページ:http://www.heas.jp)をご覧ください。

(公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

平成 29 年 11 月 1 日現在

	会員名		会員名
1	(株) I D X	31	日本アドバンストテクノロジー(株)
2	味の素(株)	32	日本高周波(株)
3	S.P. エンジニアリング(株)	33	日本電磁工業(株)
4	エーザイ (株)	34	(株)野村鍍金
5	(株)大阪真空機器製作所	35	VAT (株)
6	川崎設備工業(株)	36	浜松ホトニクス(株)
7	(株)関電工	37	日新パルス電子(株)
8	金属技研(株)	38	日立金属(株)
9	工藤電機(株)	39	(株)日立製作所
10	(株)ケーバック	40	富士通(株)
11	小池酸素工業(株)	41	武州ガス(株)
12	神津精機(株)	42	(有)双葉工業
13	新日鐵住金(株)	43	(株) マイテック
14	秀和電気(株)	44	(株)前川製作所
15	セイコー・イージーアンドジー (株)	45	三菱重工メカトロシステムズ(株)
16	太陽計測(株)	46	三菱電機(株)
17	大陽日酸(株)	47	三菱電機システムサービス(株)
18	(株)多摩川電子	48	(株)ジェック東理社
19	ツジ電子(株)		
20	(株)電研精機研究所		
21	東京ニュークリアサービス(株)		
22	(株)東芝 電力システム社		
23	東芝電子管デバイス(株)		
24	コカ・コーライーストジャパン (株)		
25	(株) トヤマ		
26	豊田通商(株)		
27	長瀬ランダウア(株)		
28	ニチコン (株)		
29	ニチコン草津(株)]	
30	(株)日本アクシス]	

評議員・役員等一覧

評議員

平成 29 年 11 月 1 日現在

氏 名	所属
^{ながしま よりきよ} 長島 順清	大阪大学 名誉教授
* の **」しげ 矢野 安重	仁科記念財団 常務理事
よこみぞ ひであき 横溝 英明	一般財団法人総合科学研究機構理事長 兼 中性子科学センター長
^{おおの} ひでお 大野 英雄	(財)高輝度光科学研究センター研究顧問
はかまだ としかず 袴田 敏一	浜松ホトニクス株式会社 顧問
さとう きょかず 佐藤 潔和	株式会社 東芝 京浜事業所 技監

任期 平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時(平成 27 年 5 月 19 日)から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時(平成 31 年 5 月下旬)までとする。

役員 (理事)

役職	氏 名	所属
代表理事	^{たかさき ふみひこ} 髙崎 史彦	高エネルギー加速器研究機構 先端加速器推進部 研究員
業務執行理事	かみや ゆきひで 神谷 幸秀	高エネルギー加速器研究機構 理事
理事	^{あさの かつひこ} 浅野 克彦	株式会社日立製作所 日立事業所 主管技師長
理 事	<まがや のりたか 熊谷教孝	東北大学多元物質科学研究所 客員教授
理 事	^{うえさか} みつる 上坂 充	東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻原子炉工学 講座教授

任期 平成 28 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時(平成 29 年 5 月 12 日)から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時(平成 31 年 5 月下旬)までとする。 役員 (監事)

役 職	氏名	所 属
監事	* ^{**5} よしたか 木村 嘉孝	高エネルギー加速器研究機構 顧問

任期 平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時(平成 27 年 5 月 19 日)から平成 30 年度 の最終のものに関する定時評議員会の終結の時(平成 31 年 5 月下旬)までとする。

選考委員会委員

氏名	所属
	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 施設長
かみがいと おさむ 上垣外 修一	理化学研究所(仁科加速器研究センター)加速器基盤研究部(部長)
^{はせがわ かずお} 長谷川 和男	国立研究機関法人 日本原子力研究開発機構 J - PARC センター加速器デビジョン デビジョン長
幅 淳二	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授
^{やまなか たく} 山中 卓	大阪大学 大学院理学研究科 教授
	京都大学 大学院理学研究科 教授
永江 知文	京都大学 大学院理学研究科 教授
きのした とよひこ 木下 豊彦	公益財団法人 高輝度光科学研究センター利用推進部 部長

任期 平成 29年4月1日から平成 31年3月31までとする。



高エネルギー加速器科学研究奨励会 〒305-0801 っくば市大穂1-1高エネルギー加速器研究機構内(職員会館2F) TEL・FAX:029-879-0471 E-mail:info@heas.jp URL:http://www.heas.jp/