

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21105005

研究課題名(和文)高輝度実験に向けた先端的測定器の開発

研究課題名(英文)Development of frontier detectors for intensity frontier experiments

研究代表者

飯嶋 徹(Iijima, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

研究者番号：80270396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 219,000,000円、(間接経費) 65,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では将来の高輝度実験施設における測定器開発研究を推進した。特に、高輝度Bファクトリー実験で用いる粒子識別装置「TOPカウンター」および「エアロジェルRICH」の実用化研究を進めた。TOPカウンター用光電子増倍管について、増倍部材料の変更により光電面の長寿命化を果たした。さらに、試作機のビームテストを行い、期待される性能が得られていることを確認した。エアロジェルRICH用光検出器についても、半導体部の改良により、放射線耐性を向上させた。また、エアロジェル輻射体の大型化、高透明化に成功した。測定器の前段回路と後段回路の間の標準データリンクの開発も進め、読み出し速度の高速化を達成した。

研究成果の概要(英文)：This project researched and developed the detector for future high intensity experiments. Especially, we have developed new particle identification devices, named "TOP counter" and "Aerogel RICH", for high intensity B-factory. For photon detector of the TOP counter, the photo-cathode lifetime has been successfully improved by changing the material. We have also developed a TOP counter prototype and test with beam, then confirmed the performance. For the aerogel RICH, we have improved the radiation hardness by changing photo-diode part. We have also improved the size and transmittance of aerogel radiator. We produced the standard data link system between the frontend and backend, and confirmed the high speed data transfer.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学(素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理)

キーワード：素粒子実験 実験核物理学 放射線検出器 半導体検出器

1. 研究開始当初の背景

本新学術領域研究の申請者達は、(1) B ファクトリー (KEKB/Belle) 実験における X(3872) などのエキゾチックメソン (4 クォーク状態) の発見、(2) SPring-8/LEPS 実験において報告し、最近再確認したエキゾチックバリオン (5 クォーク状態) の発見、そして、(3) KEK-E325 実験における原子核中のベクター中間子の質量減少効果の発見、といったハドロンの存在形態と質量生成機構に関わる根源的かつ重要な研究成果を報告してきた。それを、より包括的で高統計のデータにより、エキゾチック粒子の探索と属性 (崩壊モード、スピンやパリティなどの内部量子数) を決定し、ベクター中間子の質量変化がカイラル対称性の破れの回復によることの確定を目指す必要性が挙げられていた。

そのために行われる、高輝度 B ファクトリー、SPring-8/LEPS2 ビームライン、J-PARC といった将来の高輝度実験施設における実験研究の展開には、加速器ビームの増強とともに、測定器の性能改善や高輝度化対応のための開発研究が必須であった。特に、本新学術領域に関わる実験研究では、反応終状態に生成される荷電粒子を同定するための高性能粒子識別装置や、半導体検出器、飛跡検出器の開発が必要であるため、共通する技術開発課題を連携して進めるメリットは高いと考えられていた。

2. 研究の目的

本計画研究では、3 実験プロジェクト (B ファクトリー実験、LEPS 実験、KEK-E325/J-PARC-E16 実験) に参画する研究者が協力し、将来の高輝度施設における実験に向けた測定器開発研究を強力に進めることを目的とした。

(1) 特に、高輝度 B ファクトリー実験で用いる次世代粒子識別装置「TOP Counter」および「エアロジェル RICH」の実用化を目指した研究を進めた。

(2) また、「TOP Counter」の LEPS 実験への応用の検討、高速読み出し回路の共通基盤技術の開発も目指した。

3. 研究の方法

(1) TOP Counter の実用化に対して、光検出器の量産と、TOP Counter 試作機の開発とその性能評価が大きな課題として挙げられた。

光検出器の量産は、浜松ホトニクス社と共同開発しつつ生産を行い、生産した光検出器を名古屋大学において測定・検査することとした。検査システムの構築などを行った。

TOP Counter 試作機の性能評価については、試作機の開発は名古屋大学で行い、性能評価を Belle II 実験グループと LEPS 実験グループが協同して、LEPS 実験ビームラインで行な

った。LEPS 実験グループが試験に参加することによって、測定器の理解と運用に関するノウハウが得られ、将来の LEPS 実験への応用の検討が進められた。

(2) エアロジェル RICH 検出器の開発に対しては、光検出器の開発とエアロジェル放射体の大型化、高性能化が課題として挙げられていた。

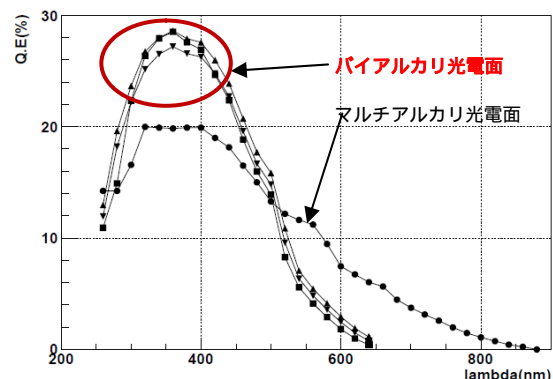
そのため、新しい光検出器の開発を浜松ホトニクスと共同で行い、高エネルギー加速器研究機構が性能評価を担った。また、エアロジェルについても、高エネルギー加速器研究機構、日本ファインセラミックセンターなどが共同で開発を行った。

(3) 次世代の高輝度加速器実験での高いヒットレートに対応するために、検出単位を細密化し読み出し回路で信号をデジタル変換し多重化して送出する必要がある。この実現のために読み出し回路から COPPER に光ファイバーで高速にデータを転送するシステムの開発・性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 光検出器 MCP-PMT の光電面の量子効率改良、および寿命評価

TOP Counter に使用する光検出器として、微弱なチェレンコフ光を高い時間分解能で検出できる、角型 MCP-PMT を浜松ホトニクスと共同開発した。微弱な光を効率よく検出するため、光電面の量子効率の改良を進めてきた。角型 MCP-PMT は、実績のあったマルチアルカリ光電面をベースに開発を進めてきたが、通常の光電子増倍管で実用化に成功したスーパーバイアルカリ光電面技術を適用した開発・性能評価を行った。MCP-PMT への技術導入は始めてであったが、真空製造装置の改良などにより、下図のように 400nm の波長で 28% 程度の量子効率を得られる MCP-PMT が製造可能となった。また、量子効率の面一様性も均一なものができた。この光電面を採用することによって、マルチアルカリ光電面の場合と比較して、チェレンコフ光の検出数を 20% 向上させることが可能となっている。

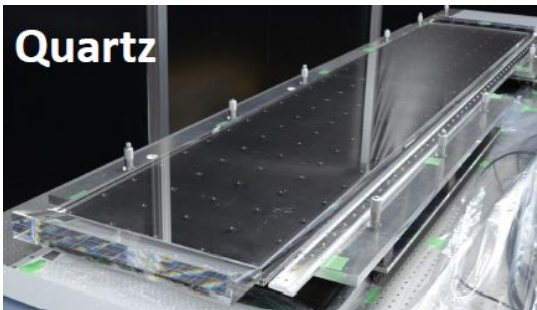


また、光電面の寿命改善を行った。Belle-II 実験環境下では、ビームバックグラウンドガンマ線と石英放射体が相互作用す

ることで電子・陽電子を生成、チェレンコフ光を発生するために、MCP-PMT に多くのバックグラウンド信号を生み出す。MCP-PMT の内部構造の改良（アウトガスが光電面へ戻らない構造）、アウトガスが出にくい MCP プレートの開発などを行い、寿命測定を繰り返し、試行錯誤を行った。その結果、 $7\text{C}/\text{cm}^2$ 以上の出力電荷までの寿命がある MCP-PMT の開発に成功した。

(2) TOP Counter 試作機の開発・性能評価

TOP Counter の基本動作原理検証のため、プロトタイプ検出器(下図)を製作し、ビームテストなどを繰り返し、性能評価を行った。本研究では、まず、40cm 幅の石英輻射体と角型 MCP-PMT を用いたプロトタイプを製作し、波長分散効果の抑制について動作を検証するためのビームテストをヨーロッパ CERN 研究所において行った。その後、実機サイズの試作機を製作し、LEPS 実験で使用しているビームを用いた実験を行い、粒子識別性能の評価を行った。

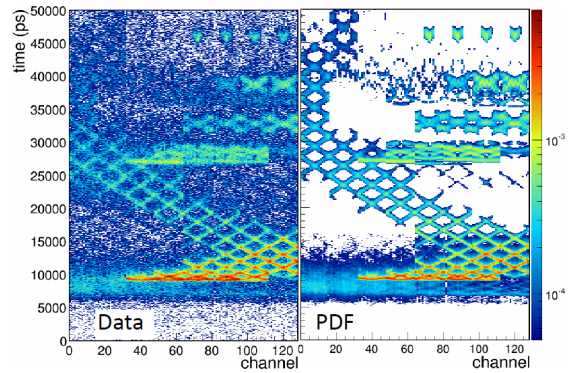


CERN でのビームテストでは、予想通りの光子数が得られていることが分かり、また、チェレンコフ光の代表的な検出時間分解能は 95ps と得られ、シミュレーションの予想分解能 103ps と同程度であった。光の伝播距離は約 2.9m であるが、波長分散無しで伝播させた場合の時間分解能は過去の結果より約 170ps である。このことから、波長分散をさせることで時間分解能が大きく向上することを検証できた。

LEPS でのビームテストにおいては、光検出器の大量生産に成功していたため、初めて必要な数の光検出器をすべて使用した実験を行うことができた。その結果においても、シミュレーションで予想される光子数（垂直入射で平均 2.5 個程度）が得られた。また、チェレンコフリングイメージも期待通りのものが得られた（右上図）。

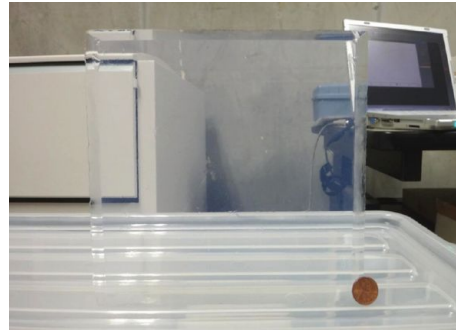
(3) エアロジェル RICH 検出器の開発

光検出器として、浜松ホトニクスと共同で開発しているマルチアノード型ハイブリッドアパランシェ光検出器（HAPD）の開発、およびチェレンコフ輻射体として高透明度シリカエアロジェルの開発に取り組んだ。



高透明度シリカエアロジェルの開発

我々の興味がある屈折率 $n=1.05 \sim 1.06$ 領域での透明度向上のため、ピンホール乾燥法という新製法を用いて作成した。この結果、 $n=1.055$ で従来と比べ、新製法では、60%以上透明度の向上に成功した。また、クラック無しサンプルの大型化にも取り組み、 $180 \times 180 \times 20\text{mm}^3$ という大型エアロジェルの製造（下図）に成功した。



HAPD の開発

磁場中でも高い単光子検出効率を持つ HAPD の性能向上として、” Super bi-alkali ” フォトカソードを HAPD の光電面に適用し、量子効率を約 20%から 30%以上にまで改善した。また、中性子放射線耐性試験として、原子炉からの中性子を照射して、性能劣化について調べた。10 年間に予想される照射量に対して S/N 良く単光子を検出するため、APD のシリコン層の構造を改良し、漏れ電流軽減を達成した。ガンマ線に対する放射線損傷についての改善も同様に行い、100krad までの照射に対して動作する検出器の生産が可能となった。

(4) 高輝度実験に向けた測定器読み出し回路の開発

COPPER システムに使用する転送部のプロトタイプの開発を行った。Belle II 実験の中央飛跡検出器のテストベンチを用いて、その読み出しエレクトロニクスの FPGA にデータリンクの送出側のファームウェアを組み込み、新たに製作した COPPER に装着する受信カードと光ファイバーで接続した。テストチェンバーの宇宙線の信号やテストパルスなど種々の信号を COPPER に送り、データの解

析をおこないデータリンクの動作を確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

1. K. Matsuoka, "Design and performance study of the TOP counter", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 732 (2013) 357-360
2. T. Iijima, "Status and perspectives of vacuum-based photon detectors", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 639 (2011) 137-143
3. K. Inami, "TOP counter prototype R&D", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 639 (2011) 298-301
4. T. Jinno, K. Inami, et al., "Lifetime-Extended MCP-PMT", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 629 (2011) 111-117
5. S. Korpar, T. Iijima, et al., "Measurement of Cherenkov photons by SiPMs with light guides", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 610 (2009) 427-430
6. S. Nishida, I. Adachi, T. Iijima, et al., "Study of an HAPD with 144 channels for the Aerogel RICH of the Belle upgrade", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 610 (2009) 65-67

[学会発表](計27件)

1. T. Iijima, Physics Program of Belle II, Lattice QCD Meets Experiment Workshop, 招待講演, Mar. 7-8, 2014, Fermilab, Batavia, IL, USA
2. 伊藤雄平、飯嶋徹、他、2 GeV/cの陽電子を用いた Belle II 実機仕様 TOP カウンターの粒子識別性能の評価、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27-30 日、東海大学
3. 古村大樹、飯嶋徹、他、Belle II TOP カウンターにおける PMT 光学接着シリコンのガンマ線耐性及び接着試験、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27-30 日、東海大学
4. 米倉拓弥、飯嶋徹、他、Belle II TOP カウンター用 MCP-PMT の磁場中での全数検査と応答特性の研究、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27-30 日、東海大学
5. K. Inami, TOP counter for particle identification at Belle II experiment, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama,

Kanagawa, Japan

6. K. Matsuoka, Development and production of the MCP-PMT for the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
7. K. Suzuki, Mechanical Structure of the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
8. T. Hayakawa, Performance Tests of a full scale prototype of the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
9. S. Hirose, Performance of the MCP-PMT for the Belle II TOP Counter in a Magnetic Field, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
10. 松岡広大、飯嶋徹、他、LEPS ビームラインにおける Belle II TOP カウンター実機の K/ 粒子識別性能の評価、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月 20-23 日、高知大学
11. 早川知克、飯嶋徹、他、宇宙線を用いた Belle II 実験用 TOP カウンターの性能評価、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月 20-23 日、高知大学
12. 廣瀬茂輝、飯嶋徹、他、新しい MCP を用いた Belle II TOP カウンター用 MCP-PMT の寿命改善の評価、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月 20-23 日、高知大学
13. 早川知克、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター用宇宙線試験システムの開発、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26-29 日、広島大学
14. 堀井泰之、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンターの石英輻射体の性能評価、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26-29 日、広島大学
15. 廣瀬茂輝、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の磁場中での特性評価、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26-29 日、広島大学
16. 鈴木一仁、飯嶋徹、他、Belle II 測定器の建設の現状と展望、日本物理学会第 68 回年次大会、企画公演、2013 年 3 月 26-29 日、広島大学
17. K. Matsuoka, Design and performance study of the TOP counter, 13th Vienna Conference on Instrumentation, Feb. 11-15, 2013, Vienna
18. 飯嶋徹、第 4 回次世代光センサー、ワー

クシヨップ&EASIROC 研究会、招待講演、
2012年12月25-26日、大阪

19. K. Inami, Progress of Belle II detector and performance, The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics, 招待講演, Sep. 17-21, 2012, Nagoya
20. 松岡広大、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンターのK/ 粒子識別能力の評価、日本物理学会秋季大会、2012年9月11-15日、京都産業大学
21. 桐部直人、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター石英輻射体の表面欠陥および熱による光路変化の評価、日本物理学会秋季大会、2012年9月11-15日、京都産業大学
22. 廣瀬茂輝、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の光電面長寿命化対策、日本物理学会秋季大会、2012年9月11-15日、京都産業大学
23. 鈴木一仁、居波賢二、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンターの実機仕様プロトタイプによる動作試験、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学
24. 有田義宣、飯嶋徹、他、Belle II 実験に搭載する新型粒子識別装置 TOP カウンターの速度分解能評価、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学
25. 武市秀樹、居波賢二、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の性能評価システムの構築、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学
26. 桐部直人、飯嶋徹、他、Belle II 実験 TOP カウンター石英輻射体の性能評価、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学
27. S. Shiizuka, Study of 144-channel Hybrid Avalanche Photo-Detector for Belle II RICH counter, 12th Vienna Conference on Instrumentation, Feb. 17, 2010, Vienna

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯嶋 徹 (IIJIMA, Toru)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：80270396

(2) 研究分担者

足立 一郎 (ADACHI, Ichiro)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：00249898

河合 秀幸 (KAWAI, Hideyuki)

千葉大学理学研究科・准教授

研究者番号：60214590

(3) 連携研究者

原 康二 (HARA, Koji)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：90432236

坪山 透 (TSUBOYAMA, Toru)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：80188622

青木 和也 (AOKI, Kazuya)

理化学研究所・延与放射線研究室・協力研究員

研究者番号：70525328

味村 周平 (AJIMURA, Shuhei)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：10273575

内田 誠 (UCHIDA, Makoto)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：90397042

居波 賢二 (INAMI, Kenji)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50372529