

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244022

研究課題名(和文)カイラル対称性とUA(1)問題

研究課題名(英文)Chiral symmetry and the UA(1) problem

研究代表者

清水 肇 (SHIMIZU, Hajime)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授

研究者番号：20178982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,900,000円

研究成果の概要(和文)：粒子の質量はヒッグス粒子によって創成されると考えられているが、その質量は非常に小さく、実質的に物質の質量を創る機構が他に必要である。南部陽一郎は、強い相互作用における自発的対称性の破れによって物質はその質量を獲得すると説明した。しかし、そのことを証明した実験はまだない。本研究はこの壮大なテーマに挑み、そのために必要な実験手段を開拓した。世界最高エネルギーのレーザー電子光ビームLEPS2を新たに開設し、1 GeV領域の光子に対して世界最高エネルギー分解能を持つ電磁カロリメータBGOeggを完成した。この2つを組み合わせることによって、計画通りのクォーク核物理研究環境を構築し、データ収集を行っている。

研究成果の概要(英文)：The mass of elementary particles is thought to be caused by the Higgs particle, which, however, explains only a small part of the mass of matter. Another mass generation mechanism is required to address this problem. Nambu Yoichiro discovered the mechanism of mass generation with the concept of spontaneous broken symmetry in the strong interaction world. Up to date no experiments have proved this theory. We set this ambitious goal to assess the scenario, building up a means of experiments to search for unexplored phenomena concerning mass generation. We have opened at SPring-8 a new GeV photon beam line, which provides the world highest laser-electron-photon beam (LEPS2). We have completed an electromagnetic calorimeter, BGOegg, which shows the world best energy-resolution for high energy photons around 1 GeV. Combining these two distinctive equipments together, We have successfully constructed a desirable experimental setup for quark nuclear physics to attain the goal.

研究分野：クォーク核物理

キーワード：カイラル相転移前駆現象 UA1問題 QCD真空 BGOegg FOREST

1. 研究開始当初の背景

宇宙開闢後、質量のない世界から質量が創成され、物質がどのように形成されてゆくかという問題は、科学の最も重要な問題の一つである。物質の質量の殆ど全てを担う原子核・ハドロンの質量が如何に創られるかを研究する手段としては、宇宙開闢時のような超高温・高密度状態を創り、その環境下でハドロンの性質を調べるといった手法がとられる。

そのような環境は、原子核の大きさ程度の空間に限れば実験で再現することは可能である。実際、RHIC や LHC などでは高エネルギー重イオン衝突を利用して、超高温・高密度状態を実現しようとしている。そして、RHIC で温度約 400MeV を達成したという報告が 2010 年になされている。高エネルギー重イオン衝突を用いる手法では、一つの実験に数百人が参加する大規模な研究となる。

一方、地上に存在する最大の高密度状態は原子核の内部にある。その原子核を超高密度状態の実験室として捉え、その中にハドロンを創り、超高密度状態におけるハドロンの性質を研究することができる。このような研究は主に日本で進められており、これまでに KEK 陽子ビームを用いた核内ベクトルメソンの e^+e^- 崩壊を捉えた優れた研究がある。(この研究は J-PARC で継続されることになっている。)この種の実験の規模は 10~30 人程度である。密度と温度で表した QCD の相図によれば、カイラル相転移の臨界温度 T_c は 150-200 MeV であり、臨界密度 ρ_c は $(3-7)\rho_0$ と予想されている。原子核の標準密度 ρ_0 は、 $\sim 10^{14} g/cm^3$ であり、宇宙開闢後 $\sim 10^{-3}$ 秒後の宇宙の密度に匹敵する。そこでは、強い相互作用におけるカイラル対称性が部分的に回復し、ハドロンの質量が変化するなどのカイラル相転移前駆現象が現れると考えられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、QCD カイラル相転移前駆現象を新しい手法で捕らえると共に関連するクォーク核物理の問題解決に挑むことである。この研究では、世界最高エネルギーのレーザー電子光ビーム LEPS2 を開設し、1GeV 領域では世界最高のエネルギー分解能 ($\sigma E/E \approx 1.3\% @ 1\text{GeV}$) を誇る 4 電磁カロリメータ BGOegg を完成させ、これらを駆使して、クォーク核物理の未踏領域を開拓する。特に、QCD カイラル対称性と軸性 U(1) 問題の観点から原子核中の η メソンの振る舞いを主な研究対象とし、 η メソンと原子核の結合状態 (η -mesic 核) を探索する。

3. 研究の方法

LEPS2 ビームラインの 2.4GeV/2.9GeV 光子ビームを用いて原子核内部に擬スカラーメソン η (958) 等を生成し、その原子核内部で発現するカイラル相転移前駆現象を探索する。まず η -mesic 核探索には、前方に放出さ

れる陽子のエネルギースペクトルを測定する必要がある。この測定は、京大グループが開発した抵抗板検出器 (RPC) を用いて陽子の飛行時間を測定することによって行う。しかし、それだけでは莫大なバックグラウンドのために η -mesic 核を探索することはできない。このため、反応の終状態で放出される種々のメソンの崩壊を始めとする様々な崩壊過程を選択的に捉えるために 4 電磁カロリメータ BGOegg を用いる。

4. 研究成果

(1) BGOegg at SPring-8/LEPS2

平成 24 年度

12 月までに 1320 本の BGO クリスタルの装着を完了し、中空卵形の電磁カロリメータ BGOegg が形を成した。BGOegg は、長さ 22cm (20 放射長) の角錐台 BGO クリスタル 60 本を一組として 360° を覆い、これを 22 組合わせて極角 24° ~ 144° を覆っている。クリスタル同士が総重量約 2t の荷重を圧縮応力のみで支えるアーチ機構なので、ケーシングは無くこれによる不感領域は一切ない。組立後すぐにそのままの状態に仙台から SPring-8 へ輸送した。平成 25 年 1 月下旬に LEPS2 ビームラインのコミッションングを行い、ビームラインの調整を進めた。

平成 25 年度

11 月までに 1320 本の光電子増倍管の装着、遮光作業を終え、LEPS2 ビームライン軸上

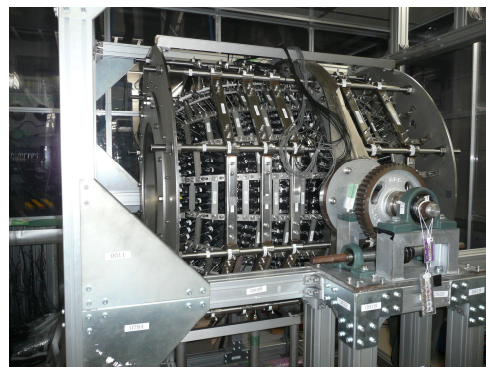


図 1. LEPS2 ビームラインに設置した BGOegg

に BGOegg を整列、設置した。高圧ケーブルを含む約 5000 本のケーブル配線を行い、光子ビームによる調整に入った。

平成 26 年度

1320 本の検出器エネルギー校正は、LEPS2 光子ビームを BGOegg 中心に置かれた標的に入射して生成される大量の中性パイオンを用いて行われた。中性パイオンはほぼ 100% の割合で 2 つの光子に崩壊するため、同時に生成された数個の中性パイオンから崩壊する多数の高エネルギーガンマ線が生成される。その中から適切な 2 つのガンマ線を選ぶことによって元の中性パイオンの質量を再生することができる。この方法で一つ一つの BGO 検出器のエネルギー校正を行った。BGOegg エネルギー校正の第一段階で、

中性パイオンの質量分解能として6.5MeVを得ており、世界のクォーク核物理研究で稼働中の電磁カロリメータの中で最高の質量分

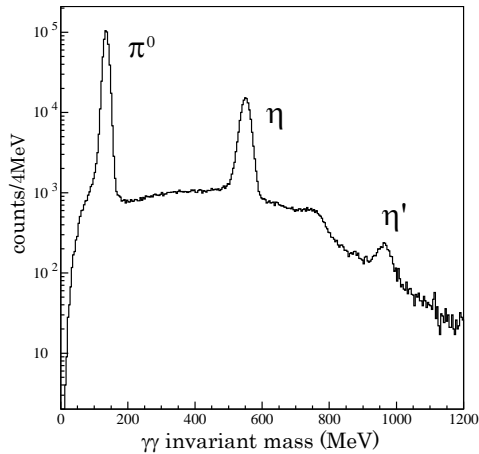


図2. BGOeggで測定した2 不変質量分布

解能を達成した。図2は、このときに得られたγγ不変質量分布である。メソンや'メソンも観測されており、それぞれの質量分解能は13.7MeV, 18.8MeVである。データ収集は平成27年度も続けており、期待通りの成果が予想できる。

(2) FOREST at ELPH

BGOegg 建設と併行して行われた関連するクォーク核物理研究として、東北大学電子光物理学研究センター既設の電磁カロリメータFORESTを用いて得られたデータの解析も進められた。東日本大震災によって、加速器と共に基幹検出器FORESTは破壊され、研究は停止した。加速器施設は壊滅的被害を受け、この復興にそれ以来3年の年月が費やされた。今日までに復興作業と並行して、限られたデータでできる限りの研究を進めた。

FORESTは3種類の異なる検出器で構成されるためそのエネルギー校正は困難を極めたが、図3に示すように、重水素を標的と

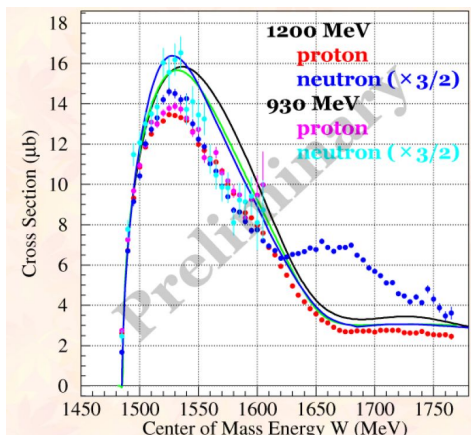


図3. 準自由 メソン光生成反応全断面積

するメソン光生成反応断面積が得られた。ここに示したデータはメソンと同時に核子

(陽子/中性子)も捕らえたもので、重水素中の中性子に対してのみ1670 MeV付近に明らかなバンプが現れている。部分波解析により、このバンプの素性を明らかにすることで所期の目的を達成できる見込みである。

$2\pi^0$ 光生成反応では、反応全断面積の導出以外に $\pi^0\pi^0$ 事象の Bose-Einstein (BE)相関の抽出に成功した。得られたBE相関係数は、 $\pi^0\pi^0$ の時空広がりを示す r_0 と相関の強さを表す λ_2 として、 $r_0 = 0.91 \pm 0.01 \pm 0.04$ fm、及び、 $\lambda_2 = 0.66 \pm 0.01 \pm 0.23$ である。図4は補正前のBE相関係数で、入射エネルギーに依存しない。これまでに行われた $\pi^\pm\pi^\pm$ に関するBE相関の研究は、各種のコライダ-実験な

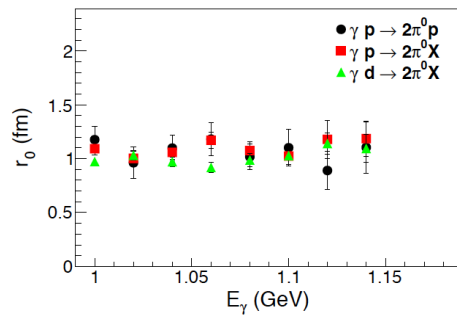


図4. $\pi^0\pi^0$ BE相関係数

ど全てパイオンの多重度が大きい高エネルギー反応事象に対して行われていた。数個のパイオンしか生成されないバリオン共鳴領域における 2π BE相関の研究は過去に例を見ない。更に、 $\pi^0\pi^0$ BE相関については、重心系エネルギー91GeVで行われたLEPの実験しかない。FOREST実験は、s channel バリオン共鳴1.7GeV/c²までをカバーするが、この領域では Δ 連続崩壊(Δ sequential decay)事象が体勢を占めている。この特徴を活かし、 $\pi^0\pi^0$ BE相関を用いて、 $\Delta(1232)$ のRMS半径を測定する方法が開拓されつつある。この他、single π^0 や $\pi^0\pi^\pm$ などの詳細データが得られている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

“Backward-angle photoproduction of ω and η' mesons from protons in the photon energy range from 1.5 to 3.0 GeV”

Y. Morino, Y. Nakatsugawa, M. Yosoi, M. Niiyama, M. Sumihama, T. Nakano, D.S. Ahn, J.K. Ahn, S. Ajimura, W.C. Chang, J.Y. Chen, S. Daté, H. Fujimura, S. Fukui, K. Hicks, T. Hiraiwa, T. Hotta, S.H. Hwang, K. Imai, T. Ishikawa, Y. Kato, H. Kawai, M.J. Kim, H. Kohri, Y. Kon, P.J. Lin, K. Mase, Y. Maeda, M. Miyabe, N. Muramatsu, H. Noumi, Y. Ohashi, T. Ohta, M. Oka, J.D. Parker, C. Rangacharyulu, S. Y. Ryu, T. Saito, T. Sawada, H. Shimizu, E.A. Strokovsky, Y. Sugaya, K. Suzuki, K.

Tanida, A. Tokiyasu, T. Tomioka, T. Tsunemi, M. Uchida, R. Yamamura and T. Yorita,

Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 013D01.

DOI: 10.1093/ptep/ptu167[査読有]

“Experiments at ELPH/Sendai before and after the disaster”

H. Shimizu,

International Journal of Modern Physics 26 (2014) 1460092.

DOI: 10.1142/S2010194514600921[査読有]

"Search for the K^-pp bound state via $\gamma d \rightarrow K^+\pi^-X$ reaction at $E_\gamma = 1.5-2.4$ GeV"

A.O. Tokiyasu, M. Niiyama, J.D. Parker, D.S. Ahn, J.K. Ahn, S. Ajimura, H. Akimune, Y. Asano, W.C. Chang, J.Y. Chen, S. Date, H. Ejiri, H. Fujimura, M. Fujiwara, S. Fukui, S. Hasegawa, K. Hicks, K. Horie, T. Hotta, S.H. Hwang, K. Imai,

T. Ishikawa, T. Iwata, Y. Kato, H. Kawai, K. Kino, H. Kohri, Y. Kon, N. Kumagai,

D.L. Lin, Y. Maeda, S. Makino, T. Matsuda, T. Matsumura, N. Matsuoka, T. Mibe,

M. Miyabe, M. Miyachi, N. Muramatsu, R. Murayama, T. Nakano, Y. Nakatsugawa,

M. Nomachi, Y. Ohashi, H. Ohkuma, T. Ohta, T. Ooba, D.S. Oshuev, A. Sakaguchi,

C. Rangacharyulu, S.Y. Ryu, T. Sawada, P.M. Shagin, Y. Shiino, H. Shimizu, E.A.

Strokovsky, Y. Sugaya, M. Sumihama, J.L. Tang, Y. Toi, H. Toyokawa, T. Tsunemi, M.

Uchida, M. Ungaro, A. Wakai, C.W. Wang, S.C. Wang, K. Yonehara, T. Yorita, M.

Yoshimura, M. Yosoi, R.G.T. Zegers,

Phys. Lett. B728 (2014) 616-621.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2013.12.039>[査読有]

“Development of High Intensity Laser-Electron Photon Beams up to 2.9 GeV at the SPring-8 LEPS Beamline”

N. Muramatsu, Y. Kon, S. Daté, Y. Ohashi, H. Akimune, J.Y. Chen, M. Fujiwara, S.

Hasegawa, T. Hotta, T. Ishikawa, T. Iwata, Y. Kato, H. Kohri, T. Matsumura, T. Mibe,

Y. Miyachi, Y. Morino, T. Nakano, Y. Nakatsugawa, H. Ohkuma, T. Ohta, M.

Oka, T. Sawada, A. Wakai, K. Yonehara, C.J. Yoon, T. Yorita, M. Yosoi,

Nucl. Instr. Meth. A737 (2014) 184-194.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.11.039>[査読有]

“Study for the π^-N interaction through photoproduction near the threshold”

R. Hashimoto, H. Fujimura, H. Fukasawa, Q. H. He, Y. Honda, T. Ishikawa, T. Iwata,

S. Kaida, J. Kasagi, A. Kawano, K. Maeda, S. Kuwasaki, S. Masumoto, M. Miyabe, F.

Miyahara, K. Mochizuki, N. Muramatsu, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada,

Y. Onodera, K. Ozawa, Y. Sakamoto, M.

Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, Y. Tajima, S. Takahashi, Y. Taniguchi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, R. Yamazaki, H. Y. Yoshida,

Few Body Systems 54 (2013) 1135-1050.

DOI: 10.1007/s00601-013-0658-5[査読有]

“ π^0 and η photoproduction on the deuteron at ELPH, Tohoku University”

T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, Q. He, Y. Honda, T. Iwata, S.

Kaida, J. Kasagi, A. Kawano, K. Maeda, S. Kuwasaki, S. Masumoto, M. Miyabe, F.

Miyahara, K. Mochizuki, N. Muramatsu, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada,

Y. Onodera, K. Ozawa, Y. Sakamoto, M. Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, Y.

Tajima, S. Takahashi, Y. Taniguchi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, R. Yamazaki, H.

Y. Yoshida,

Few Body Systems 54 (2013) 1047-1050.

DOI: 10.1007/s00601-013-0676-3[査読有]

「レーザー電子光ビームライン(BL31LEP)稼働」村松憲仁、中野貴志、與曾井優、依田哲彦、清水肇、石川貴嗣、宮部学、

SPring-8 利用者情報 18(2013)75-79. [査読無]

「SPring-8 新レーザー電子光ビームラインLEPS2:建設とコミッションング」村松憲仁、

與曾井優、依田哲彦、鈴木伸介、

学会誌「加速器」10(2013)171-180. [査読無]

“Spin-Density Matrix Elements for $\gamma p \rightarrow K^*\Sigma^+$ at $E_\gamma = 1.85-3.0$ GeV with Evidence for the $\kappa(800)$ Meson Exchange”

S. H. Hwang, K. Hicks, J. K. Ahn, T. Nakano, D. S. Ahn, W. C. Chang, J. Y. Chen,

S. Daté, H. Ejiri, H. Fujimura, M. Fujiwara, S. Fukui, W. Gohn, T. Hotta, K. Imai, T.

Ishikawa, K. Joo, Y. Kato, H. Kohri, Y. Kon, H. S. Lee, Y. Maeda, M. Miyabe, T. Mibe, Y.

Morino, N. Muramatsu, Y. Nakatsugawa, M. Niiyama, H. Noumi, Y. Oh, Y. Ohashi, T.

Ohta, M. Oka, J. Parker, C. Rangacharyulu, S. Y. Ryu, T. Sawada, Y. Sugaya, M.

Sumihama, T. Tsunemi, M. Uchida, M. Ungaro, and M. Yosoi,

Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 092001.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.092001>[査読有]

“A detailed test of a BSO calorimeter with 100-800 MeV positrons”

T. Ishikawa, H. Fujimura, R. Hashimoto, J. Kasagi, R. Kitazawa, S. Kuwasaki, A.

Nakamura, K. Nawa, Y. Okada, M. Sato, H. Shimizu, K. Suzuki, Y. Tajima, S.

Takahashi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, H.Y. Yoshida,

Nucl. Instr. Meth. A694 (2012) 348-360.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.085>[査読有]

〔学会発表〕(計 41 件)

H. Shimizu, “Peculiar physics by intense gamma rays”, International Workshop of Laser Compton Scatter Gamma Rays at Electron Storage Rings, Nov. 7, 2014, Saskatoon, Canada.

N. Muramatsu, “Search for the η ’n bound state in the $d(\gamma,p)$ reaction”, APS-JPS Joint Meeting, Oct. 11, 2014, Hawaii, USA.

T. Ishikawa, “Baryon spectroscopy at ELPH and LEPS2”, APS-JPS Joint Meeting, Oct. 7, 2014, Hawaii, USA.

M. Miyabe, “Recent result of LEPS and prospects of LEPS2”, Hadron from Quarks and Gluons, Jan. 13, 2014, Hirschegg, Austria.

T. Ishikawa, “ π^0 and η photoproduction on the deuteron at $E_\gamma < 1.2\text{GeV}$ ”, XV International Conference on Hadron Spectroscopy, Nov. 5, 2013, Nara

M. Miyabe, “Recent status and plans at SPring-8 LEPS2 facility”, TITP Workshop on Hadron in Nucleus, Nov. 1, 2013, Kyoto.

N. Muramatsu, “First beam observation and near future plans at SPring-8 LEPS2 experiment”, International Conference on the Structure of Baryons, June 27, 2013, Glasgow, Scotland.

H. Shimizu, “Experiments at ELPH/Sendai before and after the disaster”, 14th International workshop on the physics of excited nucleons, May 29, 2013, Peniscola, Spain.

T. Ishikawa, “ π^0 and η photoproduction on the deuteron at ELPH”, the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Aug. 22, 2012, Fukuoka.

N. Muramatsu, “Recent Progress and Results of LEPS, LEPS2, and ELPH”, the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Aug. 20, 2012, Fukuoka.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

清水 肇 (SHIMIZU, Hajime)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授

研究者番号： 20178982

(2)研究分担者

村松 憲仁 (MURAMATSU, Norihito)

東北大学・電子光物理学研究センター・准教授

研究者番号： 40397766

石川 貴嗣 (ISHIKAWA, Takatsugu)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号： 40400220

宮部 学 (MIYABE, Manabu)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号： 10613672

山崎 寛仁 (YAMAZAKI, Hirohito)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器

研究機構・放射線科学センター・准教授

研究者番号： 90260413