

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 28 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610071

研究課題名(和文)原子核偏芯衝突を用いた宇宙最高強度磁場の実験的検出と非線形量子電磁力学への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to experimental detection of the most intense magnetic field in the universe utilizing non-central nucleus-nucleus collisions and to non-linear quantum electrodynamics

研究代表者

志垣 賢太(Shigaki, Kenta)

広島大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70354743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：LHC加速器ALICE実験およびRHIC加速器PHENIX実験において、直接生成仮想光子の非等方性および偏光の検出測定解析を推進した。仮想光子偏光の有意な検知には至らなかったが、流体模型を用いて背景効果に関する知見を進展させた。実験室系に加えて3つの偏極観測座標系を導入し、CS観測系が最も感度に優れるとの結果を得た。また、生成粒子の偏向流に着目し、反応平面に巨視的回転方向の情報を加えて、幾何学相関解析による高強度磁場生成の検出手法を確立して、ALICE実験において生成磁場による偏向力に制限を与えた。理論側からも新たな進展を誘起し、本分野において近年最も注目を集める研究課題の一つとなった。

研究成果の概要(英文)：We have promoted measurements of anisotropy and polarization of direct virtual photons at LHC-ALICE and RHIC-PHENIX. Knowledge about the background effects has been improved, while no significant polarization has been detected. We introduced three polarization frames in addition to the laboratory frame. The Collins-Soper frame was found to have the most sensitivity. We have also established a method to detect the intense magnetic field via geometrical correlation analysis based on the global rotation of the collision system whose orientation is determined by the directed flow. The ALICE data give a constraint on the bending power of the produced magnetic field. Further progress has been made also on the theory side. This topic has become one of those attracting most attention in this field of physics.

研究分野：実験核物理

キーワード：高強度磁場 高エネルギー原子核衝突 仮想光子 偏光

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー原子核衝突による高温非束縛パートン相生成の知見確立の後、反応平面に関する荷電粒子数の非対称性の観測が実験と理論の両面から注目を集め、高強度磁場生成と強い相互作用における CP 非保存の相互交錯の可能性が議論されてきた。期待される生成磁場強度は  $10^{13} - 10^{15}$  T と、マグネターと呼ばれる中性子星表面の  $10^{11}$  T を超える宇宙最高強度であり、電子の臨界磁場  $4 \times 10^9$  T を大きく上回るため、通常は線形な量子電磁力学に様々な非線形挙動が期待される領域である。一方で、すべての議論の礎である高強度磁場生成自身が実験的には未検証であり、理論模型の混沌状況を許していた。

## 2. 研究の目的

強い相互作用における CP 非保存の議論も含めて注目される、高エネルギー原子核の偏芯衝突における宇宙最高強度磁場の生成に対して、直接生成仮想光子に着目した複数の測定量を提案し、世界初の直接的検出に挑む。前段階として、量子電磁力学計算および高エネルギー原子核衝突の流体・粒子描像複合模型計算の助けを得て、現存衝突型加速器において、直接生成仮想光子の非等方生成、偏極、崩壊電子・陽電子対非対称性の3測定量が検出可能な領域との、定量的見積を確立した。熱的光子探索において実光子以上に有効な手段と示した仮想光子測定に特化する新着想により、高エネルギー原子核衝突反応における高強度磁場生成を初めて検証し、電子の臨界磁場を超えた量子電磁力学の非線形領域に初めて実験的に踏込む新規な研究舞台を創始する。

## 3. 研究の方法

LHC 加速器における TeV 領域の鉛原子核相互衝突反応および RHIC 加速器における 100 GeV 領域の金原子核相互衝突反応において、電子・陽電子対検出による仮想光子測定を新たな次元に敷延展開し、電子と陽電子の角度分布非対称性から仮想光子の非等方生成、偏極、崩壊電子・陽電子対非対称性の3つを測定する。この際、量子電磁力学計算と高エネルギー原子核衝突反応の流体・粒子描像複合模型計算を駆使して、期待される信号強度と差引くべき背景雑音成分を定量的に評価して、ハドロン崩壊光子に代表される背景雑音の差引により、直接生成光子成分を抽出する。量子色力学過程に起源を持つ仮想光子の、衝突系の巨視的回転方向に対する非等方性に関する複数の測定により、宇宙最高強度の磁場生成と時空発展を直接的に検出する。電子の臨界磁場を上回る高強度磁場生成を実験的に確立し、非線形量子電磁力学の研究舞台を開拓する。

前段階として、量子電磁力学に基づく光子の真空偏極テンソル計算により、高強度磁場中での仮想光子の非等方生成および偏極の

信号強度を、低不変質量および低横運動量領域に関して定量的に評価した。漸近展開を用いてこの計算を拡張し、実験的に測定可能な不変質量と横運動量の領域における信号強度評価を完結する。

RHIC 加速器 PHENIX 実験において核子対あたり 200 GeV の金原子核相互衝突反応の高品質高統計データを収集する。平成 23 年に導入した衝突点近傍飛跡検出器により背景雑音電子除去が可能のため、従来収集済の衝突事象データ以上に本研究計画の物理解析に最適である。また、LHC 加速器の設計衝突エネルギー到達に伴い、ALICE 実験において前人未踏の核子対あたり 5.5 TeV の鉛原子核相互衝突反応事象を収集する。衝突エネルギー増加に伴い生成磁場強度もさらなる増加が期待され、より顕著な効果の検出測定と、磁場の強度および時空発展のより高精度での決定を可能とする。

ALICE 実験および PHENIX 実験における原子核衝突反応事象を用いて、低不変質量領域 ( $100 - 300 \text{ MeV}/c^2$ ) の電子・陽電子対生成を測定する。生成粒子の集団運動解析に用いる反応平面を基準として、生成磁場方向に関する仮想光子生成の非等方性と偏極を検出する。全仮想光子の生成非等方性および偏極から、ハドロン崩壊光子を中心とする背景雑音光子の寄与を差し引き、量子色力学過程に起因する直接生成光子の非等方性と偏極を抽出する。高エネルギー原子核衝突反応における高強度磁場生成の最初の直接的検出となる。前後方擬ラピディティ領域 (ALICE では  $-3.7 < \eta < -1.7$  および  $2.8 < \eta < 5.1$ 、PHENIX では  $3.1 < |\eta| < 3.9$ ) を覆う衝突反応検出器を用いて、生成粒子の集団運動のフーリエ展開 1 次成分 (偏向流) から、反応平面に巨視的回転方向の情報を加えた反応軸を事象毎に測定する。これにより、生成磁場の方向を、初めて符号まで含めて決定する。衝突系の巨視的回転方向を基準として、仮想光子崩壊電子・陽電子対の角度非対称性を検出し、より直接的に高強度磁場生成を検証する。

新たに収集したデータを含めた解析結果と、量子電磁力学計算および高エネルギー原子核衝突の流体・粒子描像複合模型に基づく時空発展計算の結果を総合して、生成磁場の強度と時空発展の様相を明らかにする。極めて動的な衝突系における磁場の時空発展の理解は、実験的測定量に基づく生成磁場強度の決定とその精度評価に不可欠である。特に本研究の最終結果の系統誤差評価において決定的重要性を有する。宇宙最高強度磁場生成を直接的に検証し、非線形量子電磁力学およびカイラル対称性の自発的破れに伴う CP 非保存などの新規現象に対する実験的知見を獲得する。電子の臨界磁場を上回る高強度磁場の確実な検証の下、実光子の電子・陽電子対崩壊、実光子の二光子崩壊、光子の複屈折など、通常の線形な電磁気学では現れない

特異な現象を実験的に探索し、非線形量子電磁力学の実験的研究の創始に挑戦する。

#### 4. 研究成果

強い相互作用における CP 非保存とも関連するカイラル磁気効果を含めて注目を集める、高エネルギー原子核衝突反応における高強度磁場生成に対して、仮想光子の非等方生成、偏極、崩壊電子・陽電子対非対称性の測定による直接的検出を提唱した。

原子核衝突のグラウバー模型および LHC 加速器と RHIC 加速器における衝突原子核の阻止能に基づき、生成磁場強度の衝突エネルギー依存性、衝突中心度依存性、時間発展などを評価した。到達磁場強度は LHC 加速器で  $10^{14} \sim 10^{15}$  T、RHIC 加速器で  $10^{13} \sim 10^{14}$  T 程度となる。これは宇宙最高強度とされる強磁場中性子星（マグネター）の表面磁場  $10^{11}$  T を大きく上回る。また、電子の臨界磁場  $4 \times 10^9$  T を超えるため、実光子崩壊などの非線形量子電磁力学現象も期待され、シンクロトロン放射や屈折などの興味深い現象も議論される。

高強度磁場生成の実験的検出に向けて、LHC 加速器 ALICE 実験および RHIC 加速器 PHENIX 実験において、熱的光子の探索において実光子以上に有効な手段と示した仮想光子測定に着目し、電子・陽電子対の角度分布非対称性により偏光測定を実現した。原子核相互衝突からの電子・陽電子対の測定を用いて、直接生成仮想光子の非等方性および偏光の検出測定解析を推進した。

ALICE 実験の実データを用い、直接生成仮想光子を含む信号領域（不変質量  $120 - 300$  MeV/ $c^2$ ）と中性パイ中間子のダリツ崩壊が支配的な無偏光領域（不変質量  $0 - 30$  MeV/ $c^2$ ）における偏光度を測定した。現時点の統計では信号の有意度は 1 以下と見積もられ、実際に有意な信号検知には至らなかったが、高エネルギー原子核衝突の流体模型を用いて無偏光領域の観測量挙動を詳細に議論し、背景効果に関する知見を進展させた。

また、実験室系における偏光解析に加えて、ヘリシティ (HX) 観測系、Gottfried-Jackson (GJ) 観測系、Collins-Soper (CS) 観測系の 3 つの偏極観測座標系を導入した。模擬計算を用いて各観測系における偏光検出実現性を議論し、いずれの観測系においても無偏光、垂直横偏光、平行横偏光の異なった物理シナリオを区別可能であり、特に CS 観測系が最も感度に優れるとの結果を得た。また、無相関の電子・陽電子対にも測定上見掛けの偏光が現れ、差引の必要性を示した。特に HX 観測系は運動学の影響を受けやすく、取扱いに注意が必要である。

また、生成粒子の集団運動において現在まで最も注目されてきたフリー工展開 2 次成分（楕円流）に加えて 1 次成分（偏向流）にも着目し、反応平面に巨視的回転方向の情報を加えた反転軸を事象毎に測定して衝突幾

何を三次元的に決定し、直接生成仮想光子測定との幾何学相関解析により、高強度磁場生成を検出する解析手法を確立した。この手法を ALICE 実験の実データに適用し、電子・陽電子対の非対称度を測定した。有意な偏向は検出されず、核子対あたり 2.76 TeV の鉛原子核衝突において、生成磁場による偏向力に  $2.1 \times 10^{14}$  T·fm 以下（84% CL）という弱い制限を与えた。

これらの成果を複数の国際会議および国内学会などで公表し、実験と理論の両面から大きな注目を集めた。ALICE 実験ではレプトン対・クォーク物理作業部会において、PHENIX 実験では光子・ハドロン・低質量ベクトル中間子・集団運動物理作業部会において、各々非常に興味深い新規物理解析として評価され、多くの物理議論を喚起した。また理論側からも、カイラル磁気効果に加えてカイラル渦効果など、新たな進展を誘起し、高エネルギー原子核衝突物理学分野において近年最も注目を集める研究課題の一つとなった。

強い相互作用における CP 対称性については、中性子の電気双極子測定により、極めて高精度での成立が既知である。一方でこの対称性は、強い相互作用を記述する量子色力学の直接的帰結ではなく、いわゆるシータ項の存在が T 非保存（すなわち CP 非保存）を原理的に許す。シータ項の実験上限値  $0.7 \times 10^{-11}$  に現れた極端な非保存抑制の原因として、アクシオン粒子に繋がる新たな対称性の自発的破れも議論される。強い相互作用が支配する高エネルギー原子核衝突反応では、高強度磁場生成に伴い、通常の真空とは異なった CP 対称性非保存領域の生成可能性が議論される。高強度磁場生成の直接的検出は、強い相互作用が支配する系での CP 非保存の可能性に対して実験的解明の足掛りを与える。生成磁場強度の決定は、生成荷電粒子分布の非対称性など CP 非保存の帰結に対する、実験的測定の定量的予測と評価にも必須である。

#### 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 1 件)

1. J.Adam, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), Charge-dependent flow and the search for the chiral magnetic wave in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, Phys. Rev. C93, 044903, 査読あり, 2016 年。

〔学会発表〕(計 8 件)

1. K.Shigaki, Dreams in the LHC Heavy Ion Programme, 国際会議第 71 回藤原セミナー, 2016/7/6-8, 静岡県下田市。

2. 志垣賢太, 高エネルギー原子核衝突を用

いた極限状態の実験的探究，東北大学大学院理学研究科セミナー，2015/7/3，東北大学。

3. 上田庸資，高エネルギー原子核衝突時の強磁場による仮想光子偏光検出に最適な運動学変数の考察，チュートリアル研究会，2015/3/25-27，理化学研究所。

4. 信廣晃秀，高エネルギー原子核衝突における仮想光子偏光測定および流体モデル計算を用いた背景効果評価，チュートリアル研究会，2015/3/25-27，理化学研究所。

5. 山川皓生，高エネルギー原子核衝突における仮想光子偏光の偏極観測系を用いた解析，チュートリアル研究会，2015/3/25-27，理化学研究所。

6. R.Tanizaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), Search for intense magnetic field via electron-positron pair asymmetry measurements in Pb-Pb collisions at  $s_{NN} = 2.76$  TeV with ALICE, 国際会議 Asian Triangle Heavy Ion Conference 2014, 2014/8/5-8, 大阪大学。

7. K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), Search for Intense Magnetic Field via Di-Electron Asymmetry in Pb-Pb Collisions at  $s_{NN} = 2.76$  TeV with ALICE at LHC, 国際会議 Quark Matter 2014, 2014/5/19-24, ドイツ・ダルムシュタット。

8. K.Shigaki, Physics at High Energy Nucleus-Nucleus Colliders: Prospect and Relevance to Hadron Physics, 国際会議 Hadron Physics Symposium, 2014/4/17-19, 名古屋大学。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.alice-j.org/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

志垣 賢太 (SHIGAKI KENTA)  
広島大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：7 0 3 5 4 7 4 3

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

石川 健一 (ISHIKAWA KEN-ICHI)  
広島大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：6 0 3 3 4 0 4 1

平野 哲文 (HIRANO TETSUFUMI)  
上智大学・理工学部・教授  
研究者番号：4 0 3 1 8 8 0 3

板倉 数記 (ITAKURA KAZUNORI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号：3 0 4 1 5 0 4 6

### (4)研究協力者

谷崎 麗未 (TANIZAKI REMI)  
広島大学・理学研究科・大学院学生

上田 庸資 (UEDA YOSUKE)  
広島大学・理学研究科・大学院学生

信廣 晃秀 (NOBUHIRO AKIHIDE)  
広島大学・理学研究科・大学院学生

山川 皓生 (YAMAKAWA KOSEI)  
広島大学・理学研究科・大学院学生