

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月13日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654091

研究課題名（和文） 仮想光子偏極測定によるカイラル磁場生成の直接的検出

研究課題名（英文） Direct Detection of Chiral Magnetic Field Production via Virtual Photon Polarization Measurement

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

研究成果の概要（和文）：

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直接的検出手段として、直接生成仮想光子の電子・陽電子対崩壊過程を用いた非等方性および偏光の測定を提唱した。RHIC 加速器 PHENIX 実験および LHC 加速器 ALICE 実験において、仮想光子の偏光測定を実現し、衝突事象毎の三次元的衝突幾何決定手法と併せて幾何学相関解析手法を確立して、高強度磁場生成検出に向けた測定解析を推進した。また、量子電磁力学に基づく数値計算により、上記加速器のエネルギー領域で期待される測定量の定量的見積を行い、上記二実験における高強度磁場生成の検出実現性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We proposed measurement of anisotropy and polarization of direct virtual photons via di-electron decay channel, aiming at direct detection of intense magnetic field production in high energy nucleus-nucleus collisions. Polarization measurement of virtual photons has been accomplished at RHIC-PHENIX and LHC-ALICE experiments. Detection of intense magnetic field production has been pursued, via geometrical correlation measurement and analysis of di-electron decay anisotropy with event-by-event three-dimensional collision geometry. Feasibility of intense magnetic field detection at these experiments has been clarified, with a quantitative estimation of the expected anisotropy and polarization in the energy regions at RHIC and LHC accelerators, by numerical calculations based on Quantum Electromagnetic-Dynamics.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：原子核物理学

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：原子核衝突、高強度磁場、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反応による高温非束縛パートン相発見の過程において、生成相の超低粘度流体挙動や生成粒子集団運動の構成クォーク数スケーリングなど、新規かつ物理的に興味深い現象の多数発見に至った。なかでも、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

注目された。カイラル対称性の回復と再度の破れに伴い、強い相互作用における CP 非保存の可能性も議論され、これに関連するカイラル磁気効果の前提条件となる高強度磁場生成に対する関心が高まってきた。一方で、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実験的検証はまったく不十分であり、幾多の理論モデルの混沌状況を許して

いた。

2. 研究の目的

直接生成仮想光子の電子・陽電子対崩壊過程を用いた偏光測定に着目し、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直接的検出に挑む。背景雑音成分の精度よい差引により、系統誤差を十分に抑え込んで物理議論を可能とする。衝突反応軸を衝突事象毎に測定し、直接生成仮想光子偏光測定との幾何学相関解析により高強度磁場生成の有無を検証する。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など、まったく新規の現象に対する大きな実験的知見を目指す。

3. 研究の方法

優れた電子測定能力を有するRHIC加速器 PHENIX実験と、より高い衝突エネルギーにより更なる高強度磁場生成が期待されるLHC加速器ALICE実験において、電子・陽電子対検出による仮想光子測定を発展展開し、電子と陽電子の角度分布非対称性から、高エネルギー原子核衝突からの仮想光子の偏光を測定する。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偏光測定により、高強度磁場生成を直接的に検証する。

生成粒子の集団運動において従来最も注目されてきたフーリエ展開2次成分(楕円流)に代えて1次成分(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た反応軸を衝突事象毎に測定する。また、熱的光子探索において実光子以上に有効な手段と示され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する。衝突反応軸と直接生成仮想光子偏光測定との幾何学相関解析により高強度磁場生成の有無を検証する。

仮想光子検出による直接生成光子測定においては、ハドロン崩壊起源の電子・陽電子対に代表される背景雑音の除去が必須である。相関を持たない電子と陽電子の組合せによる背景雑音成分は、事象混合を用いた統計的手法により見積り差引く。中性パイ中間子やエータ中間子の二重ダリツ崩壊およびジェット中の多粒子崩壊による相関を持った電子・陽電子対成分は、電子・電子対および陽電子・陽電子対を用いて見積り差引く。さらに中性パイ中間子のダリツ崩壊に代表されるハドロン崩壊起源成分を見積り差引き、その僅かな残余成分として、量子色力学過程に起因する直接生成仮想光子を検出測定する。同時に、各背景雑音成分の非等方性および偏光を模擬計算も用いて見積り、全仮想光子からの差引により、直接生成仮想光子の非等方性および

偏光を検出する。

強エネルギー原子核衝突における高強度磁場生成の直接的検出を実現し、強い相互作用における CP 非保存を含むカイラル磁気効果を巡る理論模型の混沌状況に実験的知見を与える。

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、直接生成光子の非等方性および偏光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 RHIC 加速器と LHC 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 RHIC 加速器で $10^{13} \sim 10^{14}$ T、LHC 加速器で $10^{14} \sim 10^{15}$ 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 4×10^9 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複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、熱的光子の探索において実光子以上に有効な手段と示され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。RHIC 加速器 PHENIX 実験および LHC 加速器 ALICE 実験において、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。

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ーリエ展開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応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。

また、石川健一(研究協力者、広島大学・理学研究科・准教授)らと協同して、量子電磁力学に基づく数値計算により、磁場中の光子の真空偏極テンソルを計算し、RHIC 加速器および LHC 加速器のエネルギー領域での原子核衝突反応において期待される直接生成仮想光子の非等方性および偏光度の定量的見積りを行い、PHENIX 実験および ALICE 実験における高強度磁場生成の検出実現性を明らかにした。

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。PHENIX 実験では光子・

低質量ベクトル中間子・ハドロン・集団運動物理作業部会において、ALICE 実験ではレプトン対・クォーク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ている。

圧倒的多数の背景雑音成分の精度よい差引と系統誤差の抑え込みによる物理議論が現在の直近課題である。背景雑音の主成分はハドロン崩壊電子に由来するため、集団運動を含むハドロン生成の非等方性などが、仮想光子測定において見掛けの非等方性や偏光の原因となる。これらの効果をハドロン測定の結果に基づき精度よく見積り差引く。仮想光子の非等方性および偏光度の質量および横運動量に対する依存性が、最終的な信号と背景雑音との峻別の鍵と期待される。

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、極めて高い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 0.7×10^{-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. K. -I. Ishikawa, D. Kimura, K. Shigaki, and A. Tsuji, 「A numerical evaluation of vacuum polarization tensor in external constant magnetic fields」, arXiv:1304.3655 [hep-ph]、査読なし、2013年。

[学会発表] (計6件)

1. 志垣賢太、他、ALICE Collaboration, 「ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 鉛原子核衝突における直接仮想光子測定を用いた強磁場探索の展望」、日本物理学会、2013/3/26-29、広島大学。
2. 星野知也、志垣賢太、他、PHENIX

Collaboration, 「PHENIX 実験における核子対あたり重心エネルギー 200 GeV の銅原子核衝突からの電子対測定による強磁場探索」、日本物理学会、2013/3/26-29、広島大学。

3. 辻亜紗子、志垣賢太、他、ALICE Collaboration, 「Perspectives of search for ultra-strong magnetic field via direct virtual photon measurement with ALICE at LHC」、国際会議 Asian Triangle Heavy Ion Conference 2012、2012/11/14-17、韓国・釜山。
4. 志垣賢太、他、「Intense Magnetic Field Production in Non-Central Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions」(ポスター発表)、国際会議 Quark Matter 2012、2012/8/13-18、米国・ワシントン特別区。
5. 志垣賢太、「Strong Magnetic Field Production in Non-Central Collisions」、ALICE-Japan/Management Meeting、2012/3/27、大阪大学中之島センター。
6. 辻亜紗子、志垣賢太、他、「高エネルギー原子核衝突における強磁場生成の検出実現性」日本物理学会、2012/3/24、関西学院大学。

[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：70354743

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

石川 健一 (ISHIKAWA KEN-ICHI)
広島大学・理学研究科・准教授
研究者番号：60334041

渡辺 大輔 (WATANABE DAISUKE)
広島大学・理学研究科・大学院学生

星野 知也 (HOSHINO TOMOYA)
広島大学・理学研究科・大学院学生

辻 亜紗子 (TSUJI ASAKO)
広島大学・理学研究科・大学院学生