

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540292

研究課題名(和文) QCD高次ツイスト効果をもたらす新奇な現象の解明とハドロン構造の研究

研究課題名(英文) Understanding novel phenomena induced by QCD higher-twist effects and study of hadron structure

研究代表者

小池 裕司 (KOIKE, Yuji)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60262458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：パートン間の量子的多体相関(高次ツイスト効果)が引き起こすシングルスピンの非対称(SSA)に関する研究を、摂動QCDを用いて行い次の成果を得た。(1)核子中のクォークグルーオン相関により、RHICで観測された核子核子衝突におけるSSAが再現できることを示した。(2)核子中の純粋なグルーオン間多体相関の、電子核子および核子核子衝突における種々のSSAへの寄与を表す解析公式を導出し、その性質を明らかにした。(3)終状態ハドロンに対するツイスト3破砕関数のSSAへの寄与を定式化した。また、クォークグルーオン相関と合わせ、電子核子散乱と核子核子衝突のSSAが無矛盾に記述できる可能性も示した。

研究成果の概要(英文)：Based on perturbative QCD, we have studied the single spin asymmetries (SSA) caused by multi-parton correlations (higher twist effect), and obtained the following results: (1) The quark-gluon correlation functions in the nucleon can describe the main features of the SSAs observed in the nucleon-nucleon collision at RHIC. (2) We have derived the formulas for the contribution of the multigluon correlations in the nucleon to SSAs in semi-inclusive deep inelastic scattering and the nucleon-nucleon scattering, and clarified the characteristic features of its contribution. (3) We have established the formalism to calculate the contribution of the twist-3 fragmentation function to SSAs. We have also shown a possibility that the combination of the twist-3 fragmentation function and the quark-gluon correlation function in the nucleon can consistently describe the SSAs in semi-inclusive deep inelastic scattering and the nucleon-nucleon collision.

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：ハドロン物理学 量子色力学 核子構造 摂動QCD シングルスピンの非対称 高エネルギー過程 RHIC

1. 研究開始当初の背景

核子などのハドロンの衝突は、それらを構成しているクォークやグルーオンの散乱を素過程として引き起こされる。特に、高エネルギー反応は、これらパートン(クォークとグルーオン)からの「独立な散乱」に対応する「パートン模型」に摂動論的量子色力学(pQCD)の補正を加えることで良く記述されてきた。しかしながら、近年の電子核子、核子核子衝突で観測されてきたシングルスピン非対称(SSA)は、この伝統的な理論的枠組みでは全く説明できない現象である。SSAはパートン間の「量子的多体相関」によって引き起こされるからである。このパートン間多体相関の効果は、高運動量移行の逆べきの補正を引き起こす「高次ツイスト効果」と呼ばれるが、SSAでは主要項として寄与する。このように高エネルギー過程のQCDによる完全な理解のためには、高次ツイスト効果の理論的定式化は必要不可欠であり発展途上にある。また、SSA研究で定式化された高次ツイストの計算手法はパートンのエネルギー損失や中間子の光円錐波動関数など他の過程の研究にも有用である。

2. 研究の目的

QCDによる高エネルギーハロン反応の完全な記述とハロン構造の解明のため、QCDの「高次ツイスト効果」が決定的な役割をする現象の解明に取り組む。特に、SSAを引き起こすすべての効果に関し、断面積に対する解析公式の導出から、その結果を用いての実験データの解析に至るまでの系統的解析を行う。また、高エネルギーパートンが核物質中を通過する際のエネルギー損失について高次ツイストの立場より定式化する。いずれも、パートンの単純な確率分布としては表現することができないハロン内でのパートン間量子的多体相関やQCDの力学について新たな情報を与える。

3. 研究の方法

pQCDに基づく高エネルギー過程の解析では、断面積をパートン間のハードな散乱を表す短距離部分とハドロンの内部構造を反映した長距離部分に分離する(因子化)ことが重要である。本研究では、後者にクォーク場やグルーオン場について3体以上の相関関数が現れる現象を扱う。対応する短距離部分は、外線数の多い膨大な数のファインマン図形から得られるため Mathematica を用いて計算する。主な共同研究者は、研究分担者、連携研究者の他、大学院生の吉田信介氏(学振特別研究員 DC2 PD, H22-23 年度)、金沢功一氏(学振特別研究員 DC2 PD H24-25 年度)、及び別部寛生氏である。大学院生とは研究室での議論を通して共同研究を行うが、彼らが学位を取得し他の研究機関に移ってからは、研究分担者や連携研究者と同様に e-mail により共同研究を行った。

我々は、以前より pQCD の Collinear 因子化の枠組みで SSA 研究に取り組んできた。この定式化は生成ハドロンの横運動量 P_T が 1 GeV 程度以上の大きな領域で有効であり、SSA はツイスト 3 観測量として現れる。(一般に高エネルギー過程の断面積は高運動量移行 Q の逆べきで展開できる。断面積に $(M_N/Q)^{t-2}$ (M_N は核子の質量)の次数で寄与する効果を「ツイスト- t 」と呼ぶ。 $t=2$ がパートン模型に対応し、 t が 3 以上が高次ツイストである。SSA では $t=2$ の寄与がゼロであり、 $t=3$ が主要項として寄与する。)このツイスト 3 機構では、SSA の起源となるのは、核子中のパートン間多体相関とパートンが終状態ハロンに破碎する際のパートン間の相関である。前者は、核子中の「クォーク・グルーオン相関関数」及び「3グルーオン相関関数」で表現され、後者は「ツイスト 3 破碎関数」で表現される。SSA の解析では、pQCD に基づきこれら関数の各過程の反応断面積に対する寄与を導出し、実験データの解析をすることになる。また、 P_T が 1 GeV 程度以下の領域では、パートンの固有横運動量を残した分布・破碎関数を用いた横運動量依存因子化(TMD 因子化)の枠組みでも SSA の解析がされている。さらに、クォークグルーオン相関の寄与については、横運動量の間領域ではツイスト 3 機構と TMD 因子化が等価な SSA を与えることが、ドレルヤン過程や SIDIS 過程の一部の構造関数について示されている。本研究では、これらの点に注意し、主としてツイスト 3 機構に基づく SSA の解析を実行する。

4. 研究成果

本研究課題ではシングルスピン非対称の研究に重点的に取り組み以下のような成果を得た。

(1) RHIC で観測されたシングルスピン非対称の解析

横偏極核子中のツイスト 3・クォーク・グルーオン相関関数を基に、RHIC で観測された核子核子衝突における SSA の解析及び今後の実験への予言を提供した。前年の研究で、 K 中間子生成の SSA を再現するモデルをフィッティングで得ていた。クォークグルーオン相関からの寄与は、「ソフトグルーオン極」及び「ソフトフェルミオン極」からの寄与があるが、他の研究グループの解析では、前者のみを取り入れた不完全な解析であったが、我々は後者も取り入れた解析である点が新しい。これにより、 K 中間子の SSA も再現できた。本課題でえた新たな解析結果の特徴は以下のとおりである。RHIC で観測された SSA は生成の横運動量 P_T の関数として、 P_T が数 GeV までは増大するが、その後減少に転じるという特徴的な振る舞いを示していたが、これが我々の解析で再現された。また、 P_T が大きな領域では、 $1/P_T$ のように減少すると期待されていたが、実験ではより

ゆっくりとした減少であり、これもまた我々の理論計算で再現された。我々の解析をもとに中間子生成の SSA に予言を与えた。結果は、中世中間子の SSA に比べ、約2倍大きなものになった。後に RHIC が実験データを報告し、それは我々の予言に近いものであった。これまでの解析は重心系でのエネルギー64 GeV, 200 GeV で行われていた。これを基に、これから実験が始まる 500 GeV での予言を与えた。核子核子衝突におけるドレルヤン過程、及び直接光子生成過程に対しては、ソフトグルーオン極のほか、ハード極やソフトフェルミオン極からの寄与が存在するが、これらに対する解析公式はまだなかったため、それを導出し完全な断面積の公式を導出した。核子核子衝突におけるジェットや直接光子生成過程の SSA は、破碎過程に曖昧さがないため、クォークグルーオン相関のモデルのテストとして格好なプロセスである。そこで、ハドロン生成過程の SSA 研究で得られた関数を基に、RHIC エネルギーでのこれら過程の SSA に予言を与えた。

(2) 横偏極核子中の 3 グルーオン相関の SSA への寄与

純粋なグルーオン間の多体相関も SSA を引き起こす。これは2つの独立なツイスト3「3 グルーオン相関関数」により表わされる。チャームなどの重いクォークはグルーオンの散乱により対生成されるため、電子核子衝突や核子核子衝突における D 中間子生成過程で主要な寄与となる。本研究課題では3 グルーオン相関について以下のような成果を得た。核子核子衝突における D 中間子生成過程の SSA に対する3 グルーオン相関関数の寄与を求めた。さらに RHIC から報告された実験データを基に3 グルーオン相関関数の関数形と振幅に対する制限を得た。ドレルヤンや直接光子生成過程にする3 グルーオン相関の寄与を表す断面積を求め、D 中間子生成で決められた3 グルーオン相関がこれらの過程に与える影響を調べた。横偏極核子の前方への直接光子生成には、ほとんど寄与しないことを明らかにし、この領域での直接光子過程の SSA はすべて(1)のクォーク・グルーオン相関に起因することを示した。電子核子衝突でのハドロン生成や核子核子衝突過程での SSA に対する3 グルーオン相関関数の寄与を導出する際に便利な簡約公式を求めた。この公式は高次補正効果を求める際にも使えるため極めて有用である。核子核子衝突における軽いハドロン生成過程の SSA に対する3 グルーオン相関関数の寄与を導出し、D 中間子生成や直接光子生成過程で用いたモデルが、この過程に与える影響を調べた。その結果、この過程は、RHIC の実験データとの無矛盾性から3 グルーオン相関の振幅や関数形に大きな制限を加えることが明らかになった。

(3) ツイスト3 破碎関数の寄与の定式化と役割

SSA を引き起こす効果として、終状態ハドロンが生成される際のクォーク・グルーオン相関がある。これは「ツイスト3 破碎関数」によって表現され、横偏極核子中のトランスヴァーシティ分布と対になって SSA を引き起こす。これに関し次のような成果を得た。電子核子衝突におけるハドロン生成過程での SSA に対するツイスト3 破碎関数の寄与を定式化した。ファインマンゲージによる定式化により結果のゲージ不変性や因子化が明確に示された。また、この過程の5個の構造関数に対する断面積の解析公式を導出した。更に、ハドロンの横運動量の小さい極限での振る舞いを求め、TMD 因子化との関係を明らかにするための準備をした。核子核子衝突と電子核子衝突の SSA を統一的に無矛盾に記述するため、前者に対しクォークグルーオン相関関数とツイスト3 破碎関数を取り込んだ解析を実行した。核子中のクォークグルーオン相関関数、トランスヴァーシティ分布関数、及び破碎関数の一部 (Collins 関数) は電子核子衝突及び電子陽電子対消滅過程から得られた情報をもとに固定し、ツイスト3 破碎関数を RHIC のデータを基に決定した。この解析により、ツイスト3 破碎関数とクォークグルーオン相関の組み合わせが、電子核子衝突と核子核子衝突の SSA を矛盾なく記述できる可能性を示した。

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 12 件)

H. Beppu, K. Kanazawa, Y. Koike and S. Yoshida, Three-gluon contribution to the single spin asymmetry for light hadron production in pp collision, Phys. Rev. D89, 034029(1-10), (2014). 査読有

K. Kanazawa and Y. Koike, Contribution of the twist-3 fragmentation function to the single transverse-spin asymmetry in semi-inclusive deep inelastic scattering, Phys. Rev. D88, 074022(1-15), (2013). 査読有

K. Kanazawa and Y. Koike, Contribution of the twist-3 fragmentation function to single transverse-spin asymmetry in SIDIS, PoS DIS, 2013, 245-248 (2013). 査読無

K. Kanazawa and Y. Koike, Single transverse-spin asymmetry for direct-photon and single-jet production at RHIC, Phys. Lett. B 720, 161-165, (2013). 査読有

Y. Koike and S. Yoshida, Probing the multi-gluon correlations through single spin asymmetries, Nuovo Cimento, 035N2, 137-142, (2012). 査読無

H. Beppu, Y. Koike, K. Tanaka and S. Yoshida, Single transverse-spin asymmetry in large P_T open charm production at an Electron-Ion collider, Phys. Rev. D 85, 114026(1-11), (2012). 査読有

Y. Koike and S. Yoshida, Three-gluon contribution to the single-spin asymmetry in the Drell-Yan and direct photon processes, Phys. Rev. D 85, 034030(1-8), (2012). 査読有

K. Kanazawa and Y. Koike, Hard- and soft-fermion-pole contributions to the single spin asymmetry for Drell-Yan processes, Phys. Lett. B 701, 576-580, (2011). 査読有

Y. Koike and S. Yoshida, Probing the three-gluon correlation functions by the single-spin asymmetry in $p p$ DX, Phys. Rev. D 84, 014026(1-14), (2011). 査読有

Y. Koike, K. Tanaka and S. Yoshida, Mater formula for the three-gluon contribution to single spin asymmetry in semi-inclusive deep inelastic scattering, Phys. Rev. D 83, 114014(1-14) (2011). 査読有

K. Kanazawa and Y. Koike, A phenomenological study on single transverse-spin asymmetry for inclusive light-hadron productions at RHIC, Phys. Rev. D 83, 114024(1-8), (2011). 査読有

Y. Koike and S. Yoshida, Probing multigluon correlations through single spin asymmetries in pp collisions, AIP Conference Proceedings 1418, 85-90, (2011). 査読無

〔学会発表〕(計 17 件)

Y. Koike, Single Transverse Spin Asymmetry in QCD, 9th Circum-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (招待講演), 2013 年 10 月 28-31 日, Jinan, China.

Y. Koike, Single transverse-spin asymmetry in Twist-3, Berkeley Summer Program 2013 "QCD Landscape of the Nucleon and Atomic Nuclei" (招待講演), 2013 年 8 月 11-16 日, Berkeley, California.

Y. Koike, Single transverse-spin asymmetry: New theory frameworks confront RHIC and eRHIC data, PHENIX Workshop on Physics Prospects With Detector and Accelerator Upgrades (招待講演), 2013 年 7 月 29-8 月 6 日, 理化学研究所, 和光市.

Y. Koike, Single transverse-spin asymmetry in high-energy QCD, The Tenth Particle Physics Phenomenology Workshop (PPP10) (招待講演), 2013 年 5 月 29 日-6 月 1 日, Chung-Yuan Christian University, Taiwan.

K. Kanazawa and Y. Koike, Contribution of the twist-3 fragmentation function to single transverse-spin asymmetry in semi-inclusive deep inelastic scattering, XXI International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, 2013 年 4 月 22-26 日, Marseilles, France.

金沢功一, 小池裕司, SIDIS 過程のシングルスピンの非対称に対するツイスト 3 破砕関数の非ポールの寄与, 日本物理学会第 6 8 回年会, 2013 年 3 月 26 - 29 日, 広島大学.

Y. Koike, Twist-3 single spin asymmetries, 3rd workshop on the QCD structure of the nucleon (QCD-N'12) (招待講演), 2012 年 10 月 22 - 26 日, Bilbao, Spain.

Y. Koike, Single transverse spin asymmetry in the forward and backward directions, RIKEN-BNL Research center workshop "Forward Physics at RHIC" (招待講演), 2012 年 7 月 30 日 8 月 1 日, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

金沢功一, 小池裕司, シングルスピンの非対称に対するツイスト 3 破砕関数の寄与, 日本物理学会第 6 7 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学.

吉田信介, 別部寛生, 小池裕司, 陽子陽子衝突における軽いハドロン生成過程のシングルスピンの非対称に対する 3 グルオン相関の寄与, 日本物理学会第 6 7 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学.

Y. Koike, Probing multi-parton correlations through single-spin asymmetries in QCD hard processes, German-Japaneses Workshop on "Modern Trends in Quantum Chromodynamics" (招待講演), 2011 年 10 月 5 日, DESY, Zeuthen, Berlin, Germany.

金沢功一, 小池裕司, ドレルヤン及び直接光子生成過程のシングルスピンの非対称に対するハードポールとソフトフェルミオンポールの寄与, 日本物理学会第 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス.

吉田信介, 小池裕司, 陽子陽子衝突における直接光子生成過程及び Drell-Yan 過程のシングルスピンの非対称に対する 3 グルオン相関の寄与, 日本物理学会第 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス.

小池裕司, 横偏極非対称度の物理, 日本物理学会第 2011 年秋季大会 (招待講演) 2011 年 9 月 16 日, 弘前大学文京町キャンパス.

Y. Koike, Probing multi-parton correlations through single spin asymmetries, Third International Workshop on "Transverse Polarization Phenomena in Hard Scattering" (招待講演), 2011 年 8 月 30 日, Veli Losinj, Croatia.

Y. Koike, Probing multi-gluon correlations through single spin asymmetries in pp collisions, 8th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics: PacSPIN2011 (招待講演), 2011年6月21日, Cairns, Australia.

Y. Koike, Probing multi-gluon correlations in pp collisions, RIKEN-BNL Research Center Workshop "Opportunities for Drell-Yan Physics at RHIC" (招待講演), 2011年5月13日, BNL, Upton, New York, USA.

〔図書〕(計 1件)

D. Boer, M. Diehl, R. Milner, R.

Venugopalan, W. Vogelsang, D. Kaplan, H.

Montgomery and S. Vignolo, et al., "Gluons and the quark sea at high energies:

Distributions, polarization,

tomography," SLAC-R-995, INT-PUB-11-034,

BNL-96164-2011, JLAB-THY-11-1373,

arXiv:1108.1713 [nucl-th]. 547頁, 2011

年8月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池 裕司 (KOIKE, Yuji)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 60262458

(2) 研究分担者

田中 和廣 (TANAKA, Kazuhiro)

順天堂大学・医学部・准教授

研究者番号: 70263671

(3) 連携研究者

斎藤 直人 (SAITO, Naohito)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号: 00360545

後藤 雄二 (GOTO, Yuji)

理化学研究所・延与放射線研究室・前任研究員

研究者番号: 00360545