

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540276

研究課題名（和文）エネルギー・フロンティアの物理と量子色力学の摂動論的手法

研究課題名（英文） Physics in the Energy-Frontier and the Perturbative Method of Quantum Chromodynamics

研究代表者

植松 恒夫（UEMATSU TSUNEO）

京都大学・大学院理学研究科・名誉教授

研究者番号：80093194

研究成果の概要（和文）：

本研究計画では素粒子の強い相互作用に対する量子色力学（QCD）の摂動論的アプローチを用いて、欧州合同原子核研究所（CERN）の大型・ハドロンコライダー（LHC）や、近い将来に建設が計画されている国際リニアコライダー（ILC）等の先端加速器で到達されるエネルギー・フロンティアでの標準模型および標準模型を超える物理の研究を行った。特に、電子・陽電子衝突で測定される仮想光子構造関数および仮想光子中のパートン分布に対する重クォークの質量依存性、また超対称性のある QCD での光子構造関数とスクォークやグルイノの質量効果、さらには 2 光子過程での軸性アノマリーと偏極光子構造関数の和則を求めた。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, based on the framework of perturbative QCD we have investigated the physics in the Standard Model and its beyond in the energy-frontier which can be attained by the Large Hadron Collider (LHC) as well as by the future linear collider (ILC). In particular we have studied the heavy quark mass effects on the virtual photon structure functions and parton distributions inside the photon. We also obtained the mass effects of the squark and gluino in the photon structure in the supersymmetric QCD. We further studied the axial anomaly and the sum rule of polarized photon structure function.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：素粒子論，量子色力学，摂動論，QCD，光子構造関数，重クォーク，質量効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子の標準模型の中で強い相互作用を記述する量子色力学（QCD）は漸近的自由性の性質によって、くりこみ群で改良された摂動論が近距離すなわち深非弾性領域で適

用可能である。近年、摂動論的 QCD は高い精度での計算が進み、LHC でのヒッグス粒子の探索や、将来のリニア・コライダーでの素粒子反応における強い相互作用の正確な評価に関心が寄せられている。

(2) 研究代表者らは、これまで摂動論的 QCD で計算可能な仮想光子構造関数を NLO (Next-to-leading Order) および NNLO (Next-to-next-to-leading Order) の近似で、非偏極の場合について理論解析を行った。また偏極仮想光子構造関数 g_1^γ については NLO まで構造関数を摂動論で求め、1 次のモーメント和則に対する QCD の NNLO (Next-to-next-to-leading Order) の高次補正を計算している。ただし、これらの計算はクォークが質量ゼロの場合に限られていたため、重クォークの質量効果を考慮した理論的解析の必要性に迫られていた。

2. 研究の目的

(1) エネルギー・フロンティアにおいて、特に LHC のようなハドロンコライダーではハドロン内部のクォークやグルーオンのパートン分布関数や、またパートンの素過程での散乱行列要素を正確に求めることが標準模型の検証や標準模型を超える物理を探索するために不可欠である。また電子・陽電子のリニア・コライダーにおいても光子中のクォークやグルーオンの分布関数を解析することが重要である。研究代表者らはこれまで仮想光子の偏極および非偏極の深非弾性散乱過程の QCD 高次効果を NNLO (Next-to-next-to-leading Order) の近似で計算しており、これらをさらに発展させることを目的とした。

(2) 仮想光子の構造関数については上述のように図 1 で示される電子・陽電子衝突実験の 2 光子過程で測定される非偏極の構造関数 F_2^γ 、 F_L^γ については NNLO まで、偏極の構造関数 g_1^γ の場合は NLO まで摂動論的 QCD で計算を行った。しかしいずれもクォークの質量をゼロとおいた計算にとどまっていた。本計画では、重クォークの質量効果を取り入れた NLO の近似での計算を遂行すると同時に、DGLAP 型の発展方程式に初期条件と境界条件を設定することで質量効果を取り入れる処方を開発し超対称性がある場合の QCD でスクォークやグルイノが存在する場合の仮想光子構造関数を求めることを目標とした。

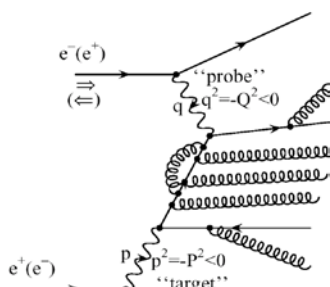


図 1：電子・陽電子衝突 2 光子過程

さらに LHC におけるヒッグス粒子と思われる新粒子の発見では、ヒッグス粒子の 2 光子への崩壊率の測定値と標準模型の理論値が一致するか否かが大きな関心を呼んでいる。そこで崩壊過程とはちょうど逆となる図 2 のように電子・陽電子リニア・コライダーでの 2 光子過程によるヒッグス粒子 H の生成過程を考察し、ヒッグス粒子の遷移形状因子についての標準模型による摂動計算を行い、形状因子の運動量依存性を解析する研究の準備的研究に着手する。

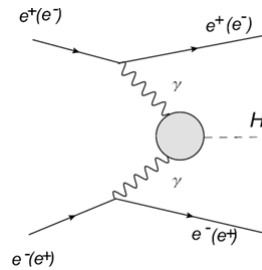


図 2：2 光子過程によるヒッグス粒子生成

3. 研究の方法

(1) 基本的な計算の手法は、QCD の漸近的自由性に基づいて演算子積展開 (OPE) とくりこみ群で改良された摂動論を適用し、特に、演算子の異常次元 (言い換えればパートンの splitting function) を 3 ループまで用い、また係数関数は 2 ループまでのものが必要となる。これに重クォークの質量効果を取り入れるために重クォークの場で表された高次スピンの演算子を光子の状態で挟んだ行列要素の値が必要となる。これに研究代表者らが開発した逆メラン変換の数値計算の方法を使って関数形を求める。その際には、整数値のスピンに依存する異常次元を複素関数空間への拡張し、harmonic form と呼ばれる関数の漸近展開を求めることが必要である。

(2) 従来は質量をゼロとして求めた構造関数の計算を改良するべく、重いクォークの質量効果を演算子積展開で取り込む処方を開発した。すなわち従来の我々の最初の手法を、分布関数 (PDF) に対する DGLAP の発展方程式に初期条件と境界条件を設定することで質量効果を取り入れる手法へと拡張した。これは、核子内のパートン分布関数 (PDF) の研究にも大いにフィードバックが期待される。また、これまでのところ、超対称 QCD でのスクォークおよびグルイノのパートンの 1 ループの splitting function が求められており、DGLAP 型の発展方程式にこの手法を応用することで、スクォークやグルイノといった超対称粒子の質量効果まで取り入れた光子構造関数を計算することが可能となった。

(3) また、探索光子と標的光子いずれもが質量がノンゼロの仮想光子の場合、最も一般的には8つの構造関数が存在する。これら全てのオーダーで質量効果をフルに取り入れた計算を遂行した。このため数式処理のプログラムを駆使して行った。これらの8つの構造関数は、8つの独立なヘリシティ振幅の一次結合とも関連している。その際に構造関数が満たすべき、positivity constraint を導くことが可能である。また、スピニングがフリップする振幅に対応する構造関数の small x 領域にスクォークの兆候を示す特徴が議論できる。

(4) 光子のスピニング構造を表す偏極構造関数については、ちょうど核子の偏極構造関数に1次のモーメントの和則が導かれるように、QCDの補正を考慮した和則が書き下される。これは実験的には、偏極した電子を同じく偏極した陽電子に衝突させる過程で測定可能であり、理論的には軸性アノマリーへの粒子の寄与をカウントすることに対応している。この質量効果も同じく解析できる

4. 研究成果

(1) ILC 等において電子・陽電子衝突の2光子過程で観測される仮想光子中のクォーク・グルーオンの分布関数をチャーム (c) ・クォークやボトム (b) ・クォークの等の重クォークの質量効果をQCDの高次効果を取り入れた枠組みで解析した。特にパートン分布に対する発展方程式を各パートンの質量に依存する初期条件を設定することでその解を求めて、標的仮想光子質量に依存する大きな対数項の再足し上げを行った。これによって、従来よりも摂動計算の精度が高められた。この研究については、基礎物理学研究所で開催された国際シンポジウム「High Energy Strong Interactions (HESI2010)」や日本物理学会 2010 年秋季大会で共同研究者から報告を行った。また学術雑誌 EPJC に発表した。

(2) 超対称 QCD の場合についてクォークやグルーオン以外に、質量の大きな超対称性粒子であるスクォークやグレイノが存在する場合の光子構造関数の研究を遂行した。将来の電子・陽電子線形加速器 ILC での実験でこのような理論的計算を検証することが期待される。研究成果は 2011 年 9 月にインドで開催された輻射補正に関するシンポジウム RADCOR2011 (<http://www.icts.res.in/progr am/all/details/181/>) と、10 月にドイツ・ベルリンの DESY Zeuthen で開催された日独ワークショップにおいてその成果を発表した。
(<https://indico.desy.de/conferenceDisp lay.py?confId=4727>) また、共同研究者より、2011 年秋および 2012 年春の日本物理学会で研究成果の報告を行った。

(3) 電子・陽電子衝突実験の2光子過程における偏極仮想光子構造関数の重クォークによる質量効果について研究を進めた。特に、偏極光子構造関数の1次のモーメント和則の重いクォークの質量効果を摂動論的 QCD で計算し、重いクォークが decouple することを示した。さらに超対称 QCD でクォークやグルーオン以外に、超対称粒子であるスクォークやグレイノが存在する場合の質量効果を考慮した仮想光子構造関数の計算を遂行した。またスクォークの8つの独立な構造関数への寄与を、もっとも一般的な運動学的領域で求めた。これらの研究に関しては 2012 年 7 月にフランスで開催された第 16 回量子色力学国際会議 (QCD12) でその成果を発表した。
(<http://www.lpta.univ-montp2.fr/users/qcd/qcd2012/qcd12/Welcome.html>)

また、この会議で論じられた π 中間子の遷移形状因子の問題からヒッグス粒子の遷移形状因子を研究するヒントを得た。以上の研究計画の遂行にあたっては、横浜国大・KEK の研究者との研究交流が有益・不可欠であった。

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 9 件)

- ① T. Uematsu, Photon structure functions with heavy particle mass effects, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **234** (2013) 70-73, 査読無 doi:10.1016/j.nuclphysbps.2012.11.017
- ② 植松恒夫, Axial anomaly and two-photon processes, 素粒子論研究・電子版 Vol.15 (2013) No.1 P.46-49, 査読無 <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sokened/sokendenshi/voll15/umetsu.html>
- ③ R. Sahara, T. Uematsu and Y. Kitadono Photon Structure Function in Supersymmetric QCD Revisited, Phys.Lett. **B707** (2012) 517-522, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2012.01.002
- ④ 植松恒夫, 川村浩之, 熊野俊三, 日独ワークショップ「量子色力学の最近の動向」日本物理学会誌, 第 67 巻 第 3 号 (通巻 744 号) 201-202 (2012) 査読無 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009420104>
- ⑤ Y. Kitadono, R. Sahara, T. Uematsu and Y. Yoshida, Photon structure in supersymmetric QCD, PoS (RADCOR2011) **003** (2011), 査読無 http://pos.sissa.it/archive/conferences/145/003/RADCOR2011_003.pdf

- ⑥ Y. Kitadono, R. Sahara, T. Uematsu and Y. Yoshida, Squark Contributions to Photon Structure Functions and Positivity Constraints, Phys.Rev.**D84** (2011) 074031, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.074031
- ⑦ Y. Kitadono, K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, Heavy quark mass effects on the virtual photon structure in QCD, PoS (RADCOR2009) **032** (2010), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/092/032/RADCOR2009_032.pdf
- ⑧ Y. Kitadono, R. Sahara, T. Ueda and T. Uematsu, Resummation of large logarithms in the heavy quark effects on the parton distributions inside the virtual photon, Eur.Phys.J. **C70** (2010) 999-1007, 査読有,
DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1494-0
- ⑨ Y. Kitadono, K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, Heavy quark effects on parton distribution functions in the unpolarized virtual photon up to the next-to-leading order in QCD, Phys.Rev.**D81**(2010) 074029, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.074029
- ⑦ 佐原諒, 超対称 QCD における光子構造関数とスクォークの質量効果, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 19 日, 弘前大学, 弘前市
- ⑧ 北殿義雄, 光子パートン分布に対する準主要項まで含めた重クォーク質量効果の再足し上げ, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日, 九州工業大学, 東九州市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植松 恒夫 (UEMATSU TSUNEO)

京都大学・大学院理学研究科・名誉教授

研究者番号：80093194

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

[学会発表] (計 8 件)

- ① 渡辺則之, 2 光子過程におけるヒッグス粒子生成と transition form factor, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学, 東広島市
- ② 植松恒夫, Axial anomaly and two-photon processes, 第 2 回日大理工・益川塾連携素粒子物理学シンポジウム, 2012 年 11 月 3 日, 京都産業大学むすびわざ館
- ③ 植松恒夫, Photon structure functions with heavy particle mass effects, 第 16 回量子色力学に関する国際会議 (QCD16), 2012 年 7 月 6 日, モンペリエ, フランス
- ④ 佐原諒, 偏極光子構造関数 g_1^γ の SQCD 和則における重粒子効果, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学, 西宮市
- ⑤ 植松恒夫, Photon Structure Function in Supersymmetric QCD Revisited, 日独ワークショップ, Modern Trends in Quantum Chromodynamics, 2011 年 10 月 3 日, DESY ツォイテン, ベルリン, ドイツ
- ⑥ 植松恒夫, Photon Structure in Supersymmetric QCD, 第 10 回輻射補正に関する国際シンポジウム (RADCOR 2011) 2011 年 9 月 26 日, ママラプラム, インド