

氏 名	ば ば ひで し 馬 場 秀 司
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人 博 第 275 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科 人間・環境学専攻
学位論文題目	偏極仮想光子構造関数における高次ツイストおよび標的質量効果

論文調査委員 (主 査) 教授 植 松 恒 夫 教授 冨 田 博 之 教授 際 本 泰 士

論 文 内 容 の 要 旨

近年、高エネルギーにおける偏極深非弾性散乱実験の進歩に伴い、核子のスピン構造が実験および理論の両面から研究対象として大きな関心を集めている。特に、核子を構成するクォークやグルーオンの強い相互作用を記述するゲージ理論としての量子色力学 (QCD) による理論的研究が注目されている。本学位申請論文は、偏極ビームを用いた将来の電子・陽電子衝突型加速器で測定される光子の偏極構造関数 g_1^T , g_2^T について、QCD 理論で演算子積展開 (OPE) とくりこみ群に基づく解析を行い、高次ツイストおよび仮想光子の標的質量効果を論じたものである。

本論文の第 1 章では、本研究の理論的および実験的背景が、近年の偏極深非弾性散乱で測定される偏極構造関数の研究の発展を中心に論じられ、本論文の研究の動機とその概要が述べられている。

第 2 章では QCD に基づくパートン描像の導入と偏極深非弾性散乱過程の運動学を要約し、ハドロンや光子のスピン構造が構造テンソルの反対称部分に現れるスピン構造関数 g_1 , g_2 によって記述されることが示される。さらにこれらの構造関数と実験で直接測定されるスピン非対称性が論じられている。またハドロンの基本構成子であるクォークおよびグルーオンのパートン描像と構造関数との関連が論じられる。また申請者は仮想光子の場合に、相関関数の手法を用いて Spinor Vector の空間の展開で各構造関数がどのように現れるかを明らかにしている。

第 3 章では、摂動論的 QCD における演算子積展開を用いて、構造関数に対する近距離の物理を非摂動論的な遠距離の物理から因子化し、さらに分散関係式を用いて構造関数のモーメント則を得ることが示される。特に g_1 構造関数の一次のモーメント則にあらわれる演算子は軸性ベクトルカレントで、これらから核子の場合は理論的に特に重要な意味を持つ Bjorken 和則および Ellis-Jaffe 和則が導かれることに言及している。また光子の g_1^T 関数の一次のモーメントは軸性カレントの量子異常に関連づけられることが示される。また、この演算子積展開で、演算子の次元からスピンの大きさを差し引いたツイストといわれる量を定義し、構造関数の光円錐上の振舞いが主にツイストの低い演算子により支配されることが述べられる。

第 4 章では、以上の理論的枠組みに基づいて、仮想光子構造関数に対する高次ツイスト効果が解析されている。特に、 g_2^T に対するツイスト 3 の演算子の効果が論じられる。最初に Box 型のファインマン・ダイアグラムの寄与の中に、ツイスト 3 の効果が存在することを量子電気力学 (QED) の場合に示し、ツイスト 3 の寄与をツイスト 2 の寄与から分離する。次に、 g_2^T の QCD 量子補正を取り入れた $n=3$ のモーメントを主要対数 (LO) 近似で求めている。一般の n 番目のモーメントについては、カラー自由度の群 $SU(N_c)$ の N_c が極めて大きい極限で、フレーバー非一重項の成分について LO の近似で任意のモーメント n に対して計算を行い、その逆 Mellin 変換を遂行して、構造関数の Bjorken 変数 x に対する依存性を求めた。

第 5 章では、高次ツイストの効果と並んで重要な標的質量効果を解析している。標的の仮想光子の質量の 2 乗が P^2 で、もう一方の探索仮想光子の質量の 2 乗が Q^2 のとき、標的質量効果は P^2/Q^2 のべき級数で構造関数に寄与する。これを考

慮することで、Bjorken 変数 x の最大値付近の振る舞いが正しく扱える。特にこの解析の理論的枠組みとして、Nachtmann によって与えられた Gegenbauer の多項式を用いた、一定の $O(4)$ のスピン状態への射影が遂行され、これはまた Georgi-Politzer の ξ 変数を用いたパートン分布関数の展開に等価であることが示される。とりわけ申請者は、偏極仮想光子構造関数の Nachtmann モーメントが、閉じた形で厳密に逆変換できることを示した。この結果、Bjorken 変数 x の最大値で、偏極構造関数がゼロにならないという従来の問題が解消されることが明らかにされた。さらに一方、 g_1^f や g_2^f の 1 次のモーメントに対応する和則の標的質量効果も論じられている。

第 6 章では、チャーム (c) やボトム (b) などの重いクォークの光子構造関数に対する効果を解析している。すなわち前章までは、アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s) の軽いクォークのみを考慮したが、今後行われる高いエネルギーの実験では、これらの実験で生成される重クォークの影響を取り入れて構造関数を解析することが必要であり、非偏極光子構造関数を偏極光子構造関数へ拡張することが試みられている。

第 7 章では、これまでの標準模型である QCD ゲージ理論から一歩先に踏み込んで、弦理論との対応が議論されている。すなわち、重力まで含めた統一理論である弦理論での最近の発展として注目される弦理論とゲージ理論の双対性、いわゆる AdS/CFT 対応に基礎をおいて、Anti-de Sitter (AdS) 時空の弦の散乱により、ゲージ理論の非摂動領域の構造関数の振る舞いが、弦理論の摂動論で解析し得ることが議論されている。

最終の第 8 章では、本論文の内容の総括と今後の研究の展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

自然界に存在する四つの基本的相互作用のうち、強い力は $SU(3)$ のカラー（色）をゲージ化した量子色力学 (QCD) で記述される。核子やメソンなどのハドロンを構成するクォークとその力を媒介するグルーオンがハドロンの中でどのような状態で存在するかを解明するのは素粒子論における一つの重要な課題である。近年、高エネルギーの偏極深非弾性散乱実験の進歩に伴い、陽子や中性子など核子のスピンの構造が実験および理論の両面から研究対象として広く関心を集めている。

本学位申請論文は、偏極ビームを用いた将来の電子・陽電子衝突型加速器において実験的に調べるのが可能な偏極光子構造関数 g_1^f , g_2^f を QCD 理論で演算子積展開 (OPE) とくりこみ群に基づいて解析を行い、高次ツイスト演算子および標的質量の効果を論じたものである。核子の場合と異なり、仮想光子の質量が QCD のスケール Λ よりも十分大きい領域では、光子の構造関数は摂動論的 QCD ですべて計算可能である。これは演算子積展開の近距離の構造を明らかにする上で重要である。特に、核子であまり解明が進んでいない高次ツイストの効果を調べるのに光子を標的とした構造関数は適しているものと考えられる。

深非弾性散乱を解析する手法である演算子積展開において、演算子の次元からスピンの大きさを引いた量をツイストと呼ぶが、二つの光子構造関数のうち g_1^f に寄与するのは、ツイスト 2 の演算子のみであり、もう一方の g_2^f の方には、ツイスト 2 に加えてツイスト 3 の効果が寄与する。一般にツイスト 2 の演算子は通常のクォークやグルーオンのパートン分布に対応するが、ツイスト 3 以上の高次ツイスト演算子は QCD の相互作用によるクォークとグルーオンの相関のダイナミクスを反映した物理量を表す。また、質量がゼロの実光子については g_1^f のみが存在し、 g_2^f は質量がゼロでない仮想光子の場合にのみ現れる。

本論文で申請者は、まずはじめに、深非弾性散乱による構造関数の解析と相関関数について述べ、次に偏極構造関数を解析する理論的枠組みとしての演算子積展開とくりこみ群の手法に触れる。申請者はこれらの考察を踏まえ、摂動論的 QCD に基づいて偏極仮想光子構造関数に対する高次ツイストの効果を解析した。最初に、Box 型のファインマン・ダイアグラムの寄与の中に実際にツイスト 3 の効果が存在することを量子電気力学 (QED) の場合について示し、ツイスト 3 の寄与を分離する。次に、 g_2^f の QCD の量子補正を取り入れた最も低いモーメントすなわち $n=3$ を主要対数 (LO) 近似で求めた。さらに一般のモーメントについては、カラー自由度の群 $SU(N_c)$ の N_c が無限大に行く極限で、フレーバー非一重項の成分について LO の近似で任意のモーメント n について求め、逆 Mellin 変換により、 g_2^f 構造関数の x 依存性を数値的に求めることに成功した。

次に、本学位申請者は、高次ツイストの効果と並んで重要な仮想光子の標的質量効果の解析を遂行した。探索（プロー

ブ)側の仮想光子の質量の2乗が Q^2 で、標的である仮想光子の質量の2乗が P^2 の場合、 P^2/Q^2 のべき級数の効果を取り入れることが Bjorken 変数 x の最大値に近い領域を考察する際には極めて重要となる。この解析の標準的な枠組みは、Nachtmann によって導入された Gegenbauer の多項式を用いた $O(4)$ 展開による一定のスピン状態への射影によって与えられるが、一方これは Georgi と Politzer によって論じられた ξ 変数を用いたパートン分布関数による展開に等価であることが結論される。また、軸性カレントの量子異常に関係づけられる g_1^{γ} 構造関数の1次のモーメントや、 g_2^{γ} 構造関数の1次のモーメントに対応する Burkhardt-Cottingham 和則に対する標的質量効果が明らかにされた。

本学位申請論文はさらに、偏極仮想光子構造関数の一般の n 次の Nachtmann モーメントを求め、これを閉じた形で厳密に逆変換できることを示した。とりわけ、Bjorken 変数 x の最大値で、偏極構造関数がゼロにならないという従来の問題が解消されることを明らかにした。次に、高エネルギーの実験で考慮すべき、チャームやボトムなどの重クォークの寄与の取り扱いを論じた。さらに申請者は、偏極構造関数の問題をより広い視点で捉え、AdS 時空での弦の散乱から偏極構造関数を研究する試みについて言及している。

以上のように、申請者は摂動 QCD 理論における演算子積展開とくりこみ群の手法に基づき、仮想光子の偏極構造関数 g_1^{γ} 、 g_2^{γ} に対する高次ツイスト効果と標的質量効果を考察し、これらの構造関数についての新たな知見を加えた。したがって、本研究は場の量子論に基づき自然界の基礎的構造を探究する人間・環境学専攻自然・人間共生基礎論講座の量子自然構造論での研究目的に合致したものとして高く評価できる。

よって、本論文は博士(人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。