

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	よしだ ゆたか 吉田 豊
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 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	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) High Energy Scattering Process and Gauge/String Duality (高エネルギー散乱過程とゲージ/ストリング双対性)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 植松 恒夫 教授 畑 浩之 教授 國廣 悌二 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	吉田 豊			
論文題目	High Energy Scattering Process and Gauge/String Duality (高エネルギー散乱過程とゲージ/ストリング双対性)					
(論文内容の要旨)						
自然界における弱、電磁、強および重力の四つの基本的相互作用を全て統一する最も有力な候補として超弦理論がある。近年の弦理論の研究で5次元の反ド・ジッター(AdS)空間の超重力理論と4次元の超対称共形場理論の間にゲージ/ストリング(弦)双対性と呼ばれる対応関係が存在することが指摘され、これについて様々な角度から研究が進められている。特に、強い相互作用をするハドロンの物理との関係を、この対応関係を用いて分析し、5次元のAdS時空の重力理論を調べることにより、ゲージ理論とりわけ量子色力学(QCD)での振る舞いが解析されている。 本学位申請論文は、ゲージ/弦双対性に基づき、QCDの強結合領域での仮想光子構造関数を求めた研究である。弦理論は当初、ハドロンのスペクトルやハドロン散乱過程の特徴である共鳴状態とレゾナンスの双対性を説明する理論として登場した。しかし散乱角を固定した振幅はエネルギーと共に指数関数的に減衰するなど、実験で見られる大角度散乱の断面積のエネルギーについてのべき的な振る舞いを説明することができなかった。弦理論からこのようなべき的振る舞いが導けることを最初に指摘したのがPolchinskiとStrasslerである。彼らは5次元AdS時空の超重力理論とゲージ理論との対応に基づいて、ハドロンの高エネルギーでのハードな散乱と、形状因子の振る舞いがべき的振る舞いをすることを示した。さらに、深非弾性散乱過程を調べ、構造関数のBjorken変数xに関する依存性を解析した。 本学位論文はPolchinskiとStrasslerのハドロンの構造関数の解析を光子構造関数の場合に拡張した仕事である。't Hooftの結合定数が高い場合は、摂動論的QCDでの演算子積展開の解析で主要な寄与を与えるツイスト2の演算子の異常次元が極めて大きくなり、もはや主要な寄与を与えなくなる。本論文では、Bjorken変数xがそれほど小さくないときは、質量ゼロの弦の状態すなわち超重力近似が成り立ち、クォークやグルーオン等の基本的構成要素の寄与は著しく抑えられ、質量がゼロの弦の状態であるdilatonの寄与が支配的になることが論じられる。すなわち時空は5次元のAdS空間とコンパクトな5次元球面S^5の直積で表され、AdS時空は5次元の動径方向に赤外運動量のカットオフが入っている。ハドロンの結合するカレントはS^5の等長変換(isometry)のKillingベクトルに対応し、5次元のゲージ場とdilatonの相互作用が求められた。 核子の構造関数の場合は、コンパクトな5次元空間すなわち5次元球面S^5でのカルツァ・クライン(KK)質量が始状態と終状態で等しいのに対し、光子の構造関数の場合は、S^5での可能な全てのKK状態が寄与する可能性がある。申請者は、S^5の低い励起のKK状態のみが寄与することを計算で実際に示した。そして、2つの独立な構造関数F_1、F_2をxの解析的な関数として表した。また、申請者は中間的な値をとるxの領域で、仮想光子構造関数のx依存性を導いたのみでなく、F_1とF_2の線形結合で表せる、縦構造関数F_Lが近似的にゼロとなることを示し、Callan-Grossの関係が成り立つことを明らかにした。さらに、高エネルギーの極限では、核子の場合と異なり、強結合領域での構造関数は有限の値を持ち、Bjorkenスケーリングが良い近似で成立することを示した。						

(論文審査の結果の要旨)

重力まで含めた素粒子の基本的相互作用の統一理論として、超弦理論があり、その最近の発展として超弦理論の弱結合領域と超対称ゲージ理論の強結合領域に双対性と呼ばれる対応関係が存在することが、Maldacena によって指摘された。特に質量ゼロのモードを考察すると5次元の反ド・ジッター (AdS) 空間の超重力理論とその境界の4次元超共形場理論との対応関係が導かれ、通常これを AdS/CFT 対応またはゲージ/ストリング (弦) 双対性と呼び、その対応関係の様々な側面が調べられてきた。中でも、ゲージ理論、とりわけ量子色力学 (QCD) で記述されるハドロンの強い相互作用での物理との関係がこの対応関係を用いて分析されている。

本学位申請論文は上記のゲージ/弦双対性を用いて、強結合での仮想光子構造関数を解析した研究である。ハドロンの構造関数については Polchinski と Strassler が、この対応関係を用いて解析を行っており、本論文はそれを拡張した仕事といえる。一方、仮想光子構造関数についての従来の研究においては、摂動論的 QCD で演算子積展開とくりこみ群を用いた手法で解析が行われ、Bjorken 変数 x についての依存性が、その規格因子を含めて求められ一定の成果が得られている。これは QCD の漸近的自由性を基にした弱結合側の研究であり、本論文はそれに対してゲージ/弦双対性を用いて、強結合側の光子構造関数を解析したことに対応する。

論文では、まず Bjorken 変数 x があまり小さくない領域で、超重力近似が良くなることが論じられる。すなわち強結合領域では、弱結合領域で重要なクォークやグルーオン等の基本的構成要素の寄与は著しく抑えられることが示される。そしてこの x の領域では、質量ゼロの弦の状態すなわち超重力近似が成り立ち、質量ゼロの状態である dilaton の寄与が支配的となる。元の 10 次元時空は 5 次元の AdS 空間とコンパクトな 5 次元球面 S^5 の直積で表され、AdS 時空は 5 次元の動径方向に赤外運動量のカットオフが入っている。ハドロンの結合するカレントは S^5 の等長変換 (isometry) の Killing ベクトルに対応し、5 次元のゲージ場と dilaton との相互作用の形を特定することが実行された。核子の構造関数の場合と異なり、仮想光子の構造関数の場合は、 S^5 での可能な全てのカルツァ・クライン (KK) 状態が寄与する可能性がある。本論文では、 S^5 の低い励起の KK 状態のみが寄与することを 5 次元球面上の固有値問題を解析し、具体的に計算で示した。

申請者は、あまり小さくない Bjorken 変数 x の値に対して、構造テンソルの計算で現れるカレントの行列要素の値を得られた中間状態で計算し、これにより 2 つの独立な構造関数 F_1 、 F_2 を超幾何関数を含む解析的な x の関数として表すことに成功した。また、縦構造関数 F_L がゼロとなること、すなわち Callan-Gross の関係が強結合定数に対して成り立つことが明らかにされた。さらに、高エネルギーの極限では、核子の構造関数の場合と異なり、強結合領域での構造関数は有限の値を持ち、Bjorken スケーリングが良い近似で成立することを示した。言い換えれば、弱結合すなわち摂動論的な QCD における計算で求められた構造関数と本論文で扱われた強結合領域での構造関数は該当する x の領域で定性的に類似した振る舞いを示すことが明らかにされた。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 15 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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降