

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400270

研究課題名(和文)クォークの破砕関数についての研究

研究課題名(英文)Quark fragmentation functions

研究代表者

ベント ヴォルフガング (Bentz, Wolfgang)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：20168769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：深非弾性レプトン・ハドロン散乱過程におけるクォークの破砕関数についての理論解析を行った。クォークのスピンのみならず横運動量を取り入れ、多重破砕過程を記述した。その際、3次元の運動量保存則およびアイソスピン保存則を表している和則を満たしている理論の枠組みを作り上げた。クォークのスピンのみに依存しない破砕関数をスピンに依存する破砕関数(Collins関数)が互いに連立していることが分かった。クォークのダイハドロン破砕関数に関して、破砕チェーンの中間状態におけるベクトル中間子の寄与を取り入れ、数値解析を使ってダイハドロン破砕関数を定量的に予言した。ハドロン中の分布関数、形状因子および応答関数も求めた。

研究成果の概要(英文)：We calculated the quark fragmentation functions, which describe the hadron production in deep inelastic scattering of leptons on hadron targets. We included the dependence on the spin and transverse momentum of the fragmenting quark to describe multi-fragmentation processes. In our theoretical framework, the 3-dimensional momentum sum rules and the isospin sum rules are satisfied automatically. We pointed out that the spin independent and the spin dependent (so called Collins) fragmentation functions are coupled with each other. We also calculated the fragmentation functions for a quark to two hadrons (dihadron fragmentation functions), and found that the intermediate vector mesons give important contributions. By using our numerical analyses, we made theoretical predictions for the dihadron fragmentation functions.

研究分野：原子核・ハドロン物理学

キーワード：クォーク ハドロン 破砕関数 形状因子 応答関数

## 1. 研究開始当初の背景

(1)

クォーク破砕関数、クォーク分布関数、ハドロンの形状因子および応答関数が高エネルギー電子・ハドロン散乱過程を記述するために重要な物理量である。研究開始の時点、それらの関数についての加速器実験データの理論解析および予言が注目された。特にクォーク破砕関数について、高エネルギー電子・陽電子衝突、電子・ハドロン衝突、陽子・陽子衝突の実験データについて摂動論的 QCD の解析が勢力的に行われ、観測された微分断面積からクォークフレーバ毎に破砕関数についての情報が得られた。その際、破砕するクォークの運動量に対して生成されたハドロンの縦および横運動量分布について経験的な parametrization が行われ、それを再現できるモデル計算が求められた。

(2)

理論解析の方法として、クォークの有理論である南部・Jona-Lasinio モデルが有力な枠組みとして知られていた。我々の従来の研究ではこのモデルを破砕関数およびハドロンの内部構造の研究に適応してきた。例えばハドロン中のクォーク運動量分布関数、ハドロンの形状因子、原子核の応答関数、ハドロン生成過程におけるクォークの破砕関数などの研究を行ってきた。原子核ターゲットを記述するために相対論的なハートリ近似が有力な方法として知られていた。本研究ではこの理論の応用範囲を広げ、ハドロン生成過程における多重破砕プロセスおよび横運動量依存性の他に、ハドロンおよび原子核の内部クォーク構造を直接反映する形状因子および応答関数も同一の枠組み内に記述することにした。

## 2. 研究の目的

(1)

クォーク破砕関数のスピンおよび横運動量依存性について：本研究ではクォークの破砕関数におけるスピンおよび横運動量依存性に重点を置いた。高エネルギー電子・陽電子散乱、電子・ハドロン散乱および陽子・陽子散乱におけるハドロン生成過程に着目し、多重破砕過程を取り入れると同時に3次元運動量の和側を満たす理論の枠組みを作り上げることが主な研究の目的であった。その際、素過程について南部・Jona-Lasinio モデルを使って、多重破砕過程についてクォークジェットモデルを使って記述することを目指した。クォークのダイハドロンへの破

砕過程も今後の加速器実験の対象となるので、ダイハドロン破砕関数の記述も本研究の対象であった。

(2)

ハドロン中のクォーク分布関数、形状因子および応答関数について：それらの関数がクォークの破砕関数に深い関わりがあり、高エネルギー電子・ハドロン散乱過程を記述するために重要な物理量である。従って、クォークの破砕関数と同様な枠組みのなか、それらの関数の理論的記述を目指した。本研究では特に中間子およびバリオンの形状因子と原子核の応答関数に対する媒質効果を研究の対象にした。原子核の応答関数における媒質効果および相対論的な効果を評価するために、単一の核子を南部・Jona-Lasinio モデルを使って記述すると同時に原子核の基底状態および励起状態を平均場近似で記述することにした。その際、最近の電子・原子核散乱の実験データに基づくクォークの和側を解析することが目的であった。

## 3. 研究の方法

(1)

クォークの多重破砕過程を記述するために、我々が従来のクォークジェットモデルの方法を拡張した。全体の破砕関数を沢山の素過程の関数の積で表し、高エネルギーのクォークがハドロンを放出する度にクォークのスピンおよび3次元の運動量が変わることを取り入れ、全体の破砕関数に対する積分方程式を導くことにした。その積分方程式を使って、破砕過程における3次元の運動量保存則およびアイソスピン保存則を表す和側を確かめながら、ハドロン生成過程を定量的に記述できる理論的な解析方法を使用した。

(2)

2つのハドロンの生成過程を表しているクォークのダイハドロン破砕関数についての積分方程式を導いて、数値解析の方法を使用した。素過程の関数について南部・Jona-Lasinio モデルの方法を使用し、中間状態のベクトル中間子を記述する際に Lund モデルの方法を使用した。多重破砕過程、多数のハドロンチャンネルおよびベクトル中間子を取り入れるときに Monte-Carlo の数値解析方法を使用した。ダイハドロン生成過程における横運動量依存性も取り入れながら、全体の破砕プロセスの数値シミュレーションを行った。

(3)

ハドロン（中間子およびバリオン）をクォークの相対論的な束縛状態と見なし、そのクォーク内部構造を直接反映している形状因子および応答関数について数値解析の方法を使用した。今回の研究ではパイオン、ケイオンおよび核子以外にハイペロンおよびベクトル中間子の形状因子に着目し、実験データはまだ少ないため格子ゲージ理論の計算結果との比較を行う方法を使った。非弾性電子散乱過程を表している応答関数を計算する際、単独の核子の形状因子について南部・Jona-Lasinio モデルの方法を使った。その後は原子核ターゲットを想定しながら応答関数に対する相対論的な効果および媒質効果を定量的に評価できる理論の枠組みとして平均場近似を使用した。

#### 4. 研究成果

(1)

##### クォークの破砕関数について：

深非弾性散乱過程におけるクォークの破砕関数に対する多重破砕過程および横運動量依存性を定量的に評価するために本来のクォークジェットモデルを拡張した。多重破砕過程、クォークのスピンおよび横運動量依存性を取り入れた理論解析として本研究が初めてであり、インパクトが大きいと言える。多重破砕プロセスにおける運動量およびアイソスピンの和側を再現できる理論解析としても本研究が初めてである。クォークのスピンに依存しない破砕関数とスピンに依存する破砕関数 (Collins 関数) が互いに連立していることも本研究で初めて明らかにした。従って、本研究が 1980 年頃に Feynman が提案したクォークジェットモデルにクォークのスピンおよび横運動量依存性も加え、重要な拡張であることが言える。その研究成果についての主な論文は Physical Review D および理研出版の RIKEN Accelerator Progress Report に掲載予定であり、今後の研究に大きなインパクトを与えることになる。クォークのダイハドロン破砕関数に関して、破砕チェーンの中間状態におけるベクトル中間子の寄与が重要であることが分かり、数値解析の Monte Carlo 方法を使ってダイハドロンの破砕関数を定量的に求めた。ダイハズロン破砕関数の詳しい研究を目指して今後の加速器実験計画が多いため、本研究の結果が大きなインパクトを与えている。ダイハズロン破砕関数についての研究成果が Physical Review D および国際会議、日本物理学会にて発表を行った。

(2)

##### ハドロン中のクォーク分布関数、形状因子および応答関数について：

それらの関数がクォークの破砕関数に密接な関係があり、最近の高エネルギー加速器実験の解析に不可欠な物理量であるので本研究の対象にした。フレーバー SU(3) の南部・Jona-Lasinio モデルを利用してスピン 0 およびスピン 1 の中間子、スピン 1/2 のバリオンの相対論的な束縛状態の波動関数を求め、ハドロンの形状因子を計算した。今回の研究では特にダイクォーク相関およびパイオン雲 (virtual pion cloud) の効果に着目して数値解析を行った。その結果が最近の実験データおよび格子ゲージ理論のシミュレーションの結果と非常によく一致していることが分かった。即ちクォークの有効理論である南部・Jona-Lasinio モデルが量子色力学の本質的な要素を取り入れていることが分かった。

電子・原子核の非弾性散乱を表している応答関数も同様なクォークの有効理論を使って計算し、最近多数の原子核ターゲットに対する観測結果との比較を行った。特に長年に問題になったクーロンの和側に対する相対論的な効果およびクォークレベルでの媒質効果を定量的に評価し、実験データをよく再現していることが分かった。原子核の応答関数を記述する際、核子間の相関と同時に核子のクォーク内部構造を取り入れた理論研究として本研究が初めてである。

#### 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 11 件)

1 W. Bentz, A. Kotzinian, H.H. Matevosyan, N. Ninomiya, A.W. Thomas, K. Yazaki:  
Quark-jet model for transverse momentum dependent fragmentation functions.  
To be published in Physical Review D (2016).  
<http://arxiv.org/pdf/1603.08333.pdf>

2 W. Bentz, K. Yazaki:  
Transverse momentum dependent jet model for quark fragmentation functions.  
To be published in RIKEN Accelerator Progress Report 49 (2016).

3 M.E. Carrillo-Serrano, W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas:  
Baryon octet electromagnetic form factors in a confining Nambu-Jona-Lasinio model.  
Physics Letters B 759, 178 (2016).

4 I.C. Cloet, W. Bentz, A.W. Thomas:  
Relativistic and medium effects on the Coulomb sum rule.  
Physical Review Letters 116, 032701 (2016).

5 Y. Ninomiya, W. Bentz, I.C. Cloet:  
Dressed quark mass dependence of pion and kaon form factors.  
Physical Review C 91, 025202 (2015).

6 M.E. Carrillo-Serrano, W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas:  
Rho meson form factors in a confining Nambu-Jona-Lasinio model.  
Physical Review C 92, 015212 (2015).

7 H.H. Matevosyan, A.W. Thomas, W. Bentz:  
Dihadron fragmentation functions in the NJL-jet model.  
RIKEN Accelerator Progress Report 47, 105 (2014).

8 H.H. Matevosyan, A.W. Thomas, W. Bentz:  
Dihadron fragmentation functions within the Nambu-Jona-Lasinio-jet model.  
Physical Review D 88, 094022 (2013).

〔**学会発表**〕(計 3 件)

1 W. Bentz, H.H. Matevosyan, A.W. Thomas:  
Quark fragmentation functions in the NJL-jet model.  
Fourth joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Oct. 7-11, 2014, Waikoloa Village, Hawaii, USA.

2 Y. Ninomiya, W. Bentz, I.C. Cloet:  
Dressed quark mass dependence of pion and kaon form factors.  
Fourth joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Oct. 7-11, 2014, Waikoloa Village, Hawaii, USA.

3 H.H. Matevosyan, A.W. Thomas, W. Bentz:  
The effect of vector meson decays on dihadron fragmentation functions.  
International Nuclear Physics Conference, June 2-7, 2013, Firenze, Italy.  
EPJ Web Conf. 66, 06014 (2014).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.sp.u-tokai.ac.jp/~bentz/homepage.html>

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
ベント ヴォルフガング  
(BENTZ, Wolfgang)  
東海大学・理学部・教授  
研究者番号：20168769

(2) 研究分担者  
矢崎 紘一  
(YAZAKI, Koichi)  
国立研究開発法人理化学研究所  
・仁科加速器研究センター・研究員  
研究者番号：60012382

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：