

平成 22 年 3 月 11 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ~ 2009

課題番号：19540306

研究課題名 (和文) 原子核のパートン分布および構造関数

研究課題名 (英文) Nuclear parton distributions and structure functions

研究代表者

ベンツ ヴォルフガング (BENTZ WOLFGANG)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：20168769

研究成果の概要 (和文)：

原子核中に束縛された核子のパートン分布関数および構造関数が単独の核子の場合と異なる。この媒質効果を定量的に評価し、具体的な原子核ターゲットに対して計算を行った。深非弾性散乱過程における中間子生成を記述する破砕関数も評価した。

核子の有効クォーク模型として南部・ジョナ・ラジニオ (NJL) 模型を利用し、核物質および有限な原子核を平均場近似の範囲内に記述した。ただし、平均場を求める際に核子の内部構造を考慮した。媒質中のパートン分布関数を計算するために、核子内のパートン分布関数と媒質内の核子の分布関数との convolution を求めた。その方法を使って、スピンの依存する原子核のパートン分布関数を予言し、媒質効果の重要性を指摘した。パートン分布関数のフレーバー依存性も求め、その結果を使ってニュートリノ・原子核の深非弾性散乱のデータ (NuTeV 実験) およびパリティを破る電子散乱を記述した。主な結果として、媒質効果を取り入れることにより有名な NuTeV anomaly の問題を解決することができた。

破砕関数を記述するときも NJL 模型を用いた。高エネルギー領域における半包含的パイオン生成過程を記述するとき、ジェット模型を使って多重破際プロセスも取り入れた。計算結果と最近のデータ解析から得られた結果を比較し、多重破際プロセスの重要性を指摘した。

研究成果の概要 (英文)：

The parton distributions and structure function of a nucleon bound in the nucleus are different from the case of a free nucleon. We assessed these medium effects quantitatively, and performed calculations for several nuclear targets. We also evaluated the fragmentation functions, which describe meson production in deep inelastic scattering processes.

For our model calculations, we used the Nambu-Jona-Lasinio (NJL) model to describe the nucleon as a 3-quark bound state. Nuclear matter and finite nuclei were described in the mean field approximation, taking into account the internal quark structure of the nucleons. The parton distributions in the nuclear medium were obtained by a convolution of the parton distributions in the single nucleon and the nucleon distributions in the medium. Using this method, we predicted the spin-dependent parton distributions for several nuclei, and pointed out the importance of medium modifications. We also assessed the flavor dependence of the nuclear parton distributions, and applied our results to deep inelastic neutrino scattering from nuclear targets (NuTeV experiment) and parity-violating electron

scattering. One of our main conclusions was that the famous problem of the NuTeV anomaly can be solved by taking into account the medium modifications of parton distributions.

For the description of the fragmentation functions we also used the NJL model. We described pion production in semi-inclusive high energy scattering processes, taking into account the multifragmentation processes in the framework of the jet-model. We compared our results with recent analyses of semi-inclusive pion production data, and pointed out the important role of the multifragmentation processes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード： ハドロン物理学 クォーク クォーク有効理論 構造関数 媒質効果
破砕関数

1. 研究開始当初の背景

(1) 核物質中のパートン分布関数を求めるために、媒質の状態方程式とそれとを構成する核子の内部構造を取り入れるモデルが求められていた。そのために本研究では南部・Jona-Lasinio (NJL) 模型を利用することにした。以前の研究で我々が NJL 模型を用いて相対論的な3クォーク方程式を解き、核子の性質について研究した。また、同じ枠組み内に原子核を平均場近似で記述し、EMC 効果について研究した。従って、本研究の目的を達成するために非常に有意義なものであると判断した。

(2) 核子の transversity 分布関数およびクォークの破砕関数について、まだ十分なモデル計算が行われていなかった。特に破砕関数について、従来のモデル計算で素過程の破砕プロセスのみ取り入れられたので、破砕関数に対する和側（運動量およびアイソスピン和側）を満たしていなかった。本研究では、和側の成立に重点をおき、NJL モデルの枠組み内に計算を行うことにした。

2. 研究の目的

(1) クォーク有効理論における原子核およびその構造関数の記述を目指した。特に構造関数のアイソスピン依存性について研究することが目的であった。そのアイソスピン依存性は高エネルギー散乱データにどのように影響を及ぼしているかについて調べることも目的であった。

(2) 核子の transversity 分布関数およびクォークの破砕関数の記述を目指した。特に破砕関数に対する運動量和側、アイソスピン和側が成立するモデルを作り上げることが目的であった。そのために素過程の破砕プロセスだけでなく、多重破砕プロセスも取り入れることも目的であった。

3. 研究の方法

(1) 原子核を構成する核子をクォーク・ダイクォークの束縛状態として記述し、原子核の基底状態について平均場近似を利用した。その枠組み内に原子核のパートン分布関数のスピンおよびアイソスピン依存性について

研究した。高エネルギー領域のニュートリノ・原子核散乱を記述するときに、 Z ボゾンおよび W ボゾン交換から生じる微分断面積をクォーク分布関数で表し、弱い相互作用における中性カレントと荷電カレントの比を表している Paschos-Wolfenstein ratio を求め、データの解析から得られた結果と比較した。パリティ保存を破る電子散乱を記述するときに、光子と Z ボゾンとの干渉の項から生じる微分断面積の補正項をパートン分布関数で表し、鉄、鉛などの原子核ターゲットにを想定し、電子のスピン非対称性 (single spin asymmetry) を予言した。

(2) 南部・Jona-Lasinio 模型を使って核子の transversity 分布関数を求め、通常のヘリシティ分布関数との関係について調べた。また同じ枠組み内に、高エネルギーのクォークがパイ中間子へ破砕するプロセスについて調べた。その際、高エネルギーのクォークが多重破砕プロセスを引き起こすことも可能であり、その多重破砕過程を取り入れるためにクォーク・ジェット模型を利用した。クォーク・ジェット模型における積分方程式 (chain equation) を数値的に解き、量子色力学の発展方程式を使って高エネルギーのスケールへ変換し、最近のデータ解析で得られた経験的な破砕関数と比較した。

4. 研究成果

(1) 原子核の構造関数に対する媒質効果を表している EMC ratio を求め、そのアイソスピン依存性について研究した。中性子過剰原子核内の対称エネルギーのために up クォークに引力が働き、そのために down クォークよりも大きな媒質効果が現れることが分かった。そのアイソスピン依存性を使って、原子核・ニュートリノ深非弾性散乱における NuTeV anomaly も解決できることを指摘した。従来の計算では、荷電対象性の敗れの効果 (アップとダウンクォークの質量差) のみ取り入れられたが、媒質効果によるアイソスピン依存性も取り入れることにより観測された Paschos-Wolfenstein 比を説明できることを指摘した。更に、同じアイソスピン依存性に基づき、電子・原子核深非弾性散乱におけるパリティ保存の破れ (電磁気相互作用と弱い相互作用の干渉項) を評価し、それに伴う spin asymmetry を予言した。鉛のような重い原子核の場合は、Bjorken x が大きい領域で媒質効果が重要であることを指摘した。

この研究の結果が専門雑誌と国際会議の他に、2009 年 8 月の CERN Courier および Jefferson 国立研究所の public release な

りで発表され、国内外に大きなインパクトを及ぼした。本研究に基づき、既に Jefferson 国立研究所にて実験計画が提案され、近い将来に我々の予言が確かめられることが期待できる。

(2) 南部・Jona-Lasinio 模型を使って核子の transversity 分布関数およびクォークの破砕関数を計算した。Transversity 分布関数は通常のヘリシティ分布関数と同様な振る舞いを示していることを指摘したが、その結果が後で実験データの再解析で確かめられた。なお、transversity 分布関数の積分である tensor charge も求め、他のモデル計算および格子ゲージ理論の結果と比較した。

クォークの破砕関数について我々の仕事は、運動量と側およびアイソスピン和側を満たす初めてのモデル計算であるので、国内外の会議で注目された。和側を満たすために多重破砕プロセスを取り入れなければならぬことを指摘した。その高次のプロセスを取り入れるためにジェット模型に従って全体の破砕関数を素過程の破砕関数の積で表した。我々の研究で確立された「NJL-jet 模型」はパイオン生成の他に、ケーオンおよび核子・反核子生成過程へも応用できるのでインパクトが大きい。なお、この模型が原子核ターゲットにおける破砕プロセスへ応用可能であり、Hermes 実験で発見された半包含的散乱断面積に対する媒質効果を記述するために有力な道具となる。

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 10 件)

1) T. Ito, W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas, K. Yazaki: The NJL-jet model for quark fragmentation functions. Physical Review D 80 (2009) 074008-1 - 074008-17.

2) I.C. Cloet, W. Bentz, A.W. Thomas: Isovector EMC effect and the NuTeV anomaly. Physical Review Letters 102 (2009), 252301-1 - 252391-4.

3) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas: EMC effect for parity-violating DIS. RIKEN Accelerator Progress Report 42 (2009) 81.

4) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas: An explanation of the NuTeV

anomaly. RIKEN Accelerator Progress Report 42 (2009) 80.

5) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Polarized structure functions of nucleons and nuclei. Progress in Particle and Nuclear Physics 61 (2008), 238 - 244.

6) I.C. Cloet, W. Bentz, A.W. Thomas: Transversity quark distributions in a covariant quark-diquark model. Physics Letters B 659 (2008), 214 - 220.

7) W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas: Isospin dependence of the EMC effect. RIKEN Accelerator Progress Report 41 (2008) 66.

8) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Spin dependent parton distributions and structure functions. Few Body Systems 44 (2008) 71.

9) W. Bentz, S. Lawley, A.W. Thomas: On the EOS in effective quark theories. Modern Physics Letters A 23 (2008) 2477.

10) W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas: Spin dependent structure functions of finite nuclei. RIKEN Accelerator Progress Report 40 (2007) 93.

[学会発表] (計 11 件)

1) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas, K. Yazaki: The NJL-jet model for quark fragmentation functions. Achievements and New Directions in Subatomic Physics, Adelaide (Australia), Feb. 15-19, 2010.

2) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas: Parton distributions in nuclear systems. KEK theory center workshop on High-energy hadron physics with hadron beams, Jan. 6-8, 2010,

3) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas: Parton distributions in nuclear systems. Third joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS, Hilton Waikoloa Village, Hawaii (USA), Oct. 13-17, 2009.

4) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W.

Thomas, K. Yazaki: NJL-jet model for quark fragmentation functions. Workshop on Three-Dimensional Parton Structure of the Nucleon encoded in GPDs and TMDs, Seattle, USA, Sept. 14-18, 2009.

5) W. Bentz, T. Ito, I.C. Cloet, A.W. Thomas, K. Yazaki: Quark fragmentation to pions in an effective chiral theory. 19th International Conference on Few-Body Problems in Physics, Bonn (Germany), Aug. 31 - Sept. 5, 2009.

6) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Structure functions of nucleons and nuclei. European Nuclear Physics Conference, Bochum (Germany), March 16-20, 2009.

7) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Quark distributions in nucleons and nuclei. Quark Confinement and the Hadron Spectrum VIII, Mainz (Germany), Sept. 1-6, 2008.

8) W. Bentz, S. Lawley, A.W. Thomas: On the EOS in effective quark theories. International Workshop Chiral07, Osaka, Nov. 13-16, 2007.

9) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Polarized structure functions of nucleons and nuclei. International School of Nuclear Physics, Erice, Italy, Sept. 10-14, 2007.

10) W. Bentz, I.C. Cloet, T. Ito, A.W. Thomas, K. Yazaki: Spin dependent parton distributions and structure functions. 20th European Few-Body Conference, Pisa, Italy, Sept. 10-14, 2007.

11) W. Bentz, I.C. Cloet, A.W. Thomas: Spin structure functions of nucleons and nuclei (poster presentation). International Nuclear Physics Conference, Tokyo, June 3-8, 2007.

5. 研究組織

(1) 研究代表者

ベンツ 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)
独立行政法人理化学研究所・延興放射線研
究室・客員主管研究員
研究者番号： 60012382