

## 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 24 年 5 月 24 日現在

機関番号： 14401  
 研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2009 ~ 2011  
 課題番号： 21540268  
 研究課題名 (和文) パートン分布の荷電対称性の破れと海クォーク分布のフレーバー非対称性  
 研究課題名 (英文) Charge-symmetry breaking of parton distribution functions and flavor-asymmetry of sea-quark distributions  
 研究代表者  
 若松 正志 (WAKAMATSU MASASHI)  
 大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号： 40135653

## 研究成果の概要 (和文)：

核子中のクォーク分布および反クォーク分布の荷電対称性、フレーバー対称性の破れの効果を、量子色力学の有効模型であるカイラル・クォーク・ソリトン模型の枠組みで統一的に扱い、NuTeV アノマリーへの影響を調べた。簡単な模型に基づくこれまでの研究の結論と異なり、核子中のストレンジ・反ストレンジ・クォーク分布の非対称性の方が、荷電対称性の破れの効果より、5 倍ぐらい大きいことがわかった。

## 研究成果の概要 (英文)：

We investigated the effects of charge-symmetry breaking and flavor-symmetry breaking on the quark and antiquark distribution functions in a unified manner within the framework of the chiral quark soliton model. Different from the past analysis based on a naïve model, we find that the effect of strange and anti-strange quark asymmetry is more than a factor of 5 larger than the charge-symmetry breaking effects.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

## 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：核子の内部構造、カイラル対称性、海クォーク分布、荷電非対称性、深部非弾性散乱、NuTeV アノマリー、ストレンジ・クォーク分布

## 1. 研究開始当初の背景

LHC が始動し、標準理論を越える現象の探索が始まったわけであるが、軽粒子だけが関与する現象は別として、クォークやグルオンは常にハドロンの中にしか存在しないので、新

物理の探索においても、ハドロンの構造、特にその中のパートンの分布を正確に知ることが、益々重要になっていた。例えば、NuTeV group による Paschos-Wolfenstein ratio と呼ばれる断面積比の測定が話題になっていた。ニュートリノおよび反ニュートリノ散乱

で測定されるこの断面積比は、標準理論の Weinberg 角を決めるクリーンな手段の一つを提供するものと考えられていた。ところが、NuTeV グループの解析から得られた Weinberg 角は標準的に受け入れられている値から 2 標準偏差以上ずれており、この事実は、NuTeV アノマリーと呼ばれた。これに対し、核子中のストレンジクォークと反ストレンジクォークの分布に非対称性があればアノマリーが解消する可能性が、私達を含め、何人かの研究者によって指摘された。さらに驚くべきことには、現象論的パートン分布の解析の大御所である Glueck らは、当時の最新の論文の中で、これまで非常に小さいと信じられていた、クォーク分布の荷電対称性の破れが、Paschos-Wolfenstein ratio に対して、ストレンジ・反ストレンジ・クォークの海の非対称性と同じぐらいか、むしろそれ以上に効く可能性を指摘した。

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、核子中のパートン分布の荷電対称性の破れ、海クォーク分布のフレーバー非対称性、アイソスピン非対称性等を、QCD の有効模型であるカイラル・クォーク・ソリトン模型の枠組みで統一的に解析することである。既に存在する実験から得られる情報が十分でない現状で、上述の目的にかなう理論は少なくとも以下の条件を満たす必要がある。

- バレンス・クォーク分布だけでなく、海クォーク分布に対しても信頼できる予言ができなければならない。
- できるだけ少ないパラメータで、より多くの観測量を既に説明できている。

一般的に、最も期待されている格子ゲージ理論は、そもそも分布関数、ましてや海クォーク分布を計算できる段階にはないので、両方の条件を満たす理論は、今のところ、カイラル・クォーク・ソリトン模型のみである。実際、これから調べたい荷電対称性の破れを導入する前のカイラル・クォーク・ソリトン模型は、本質的にはパラメータ・フリーの模型であるが、例えば、Drell-Yan 過程を通じて測定された  $u\bar{v} / d\bar{v}$  比という理論的にはその記述が非常に難しい量の特徴を見事に再現する。もちろん、この観測量に留まらず、模型の信頼性は、陽子、中性子や重陽子のスピン構造関数を含む広範な観測量の再現によっても既に確立されていることは言うまでもない。本研究課題で調べる予定の物理についても、可能な限り信頼しうる

予言を与えると共に、その予言の特徴を鑑みて、実際にその予言を確かめるためにどんな実験が最適かを提案していくことが重要であると考えている。

## 3. 研究の方法

以前に、私達は、フレーバーSU(3)のCQSMの枠組みで、s-クォークとu, d-クォークの質量差を摂動論的に取り扱い、パートン分布のSU(3)対称性の破れを取り入れた解析を行った。u-クォークとd-クォークの質量差は、これに比べて遙かに小さいので、同じ手法を、パートン分布のSU(2)対称性を評価するために用いることは、より強く正当化されるはずである。そこで、u-クォークとd-クォークの質量差と、s-クォークとu, d-クォークの質量差が0のカイラル極限のカイラル・クォーク・ソリトン模型を第0近似として、これらの両方の質量差を摂動論的に取り入れてパートン分布関数を求めるための理論的定式化を行い数値計算を実行する。カイラル極限でのカイラル・クォーク・ソリトン模型は、本質的には自由パラメータを含まない模型なので、ここで新たに持ち込まれるパラメータは、u-クォークとd-クォークの質量差 $\Delta m$ と、s-クォークとu, d-クォークの質量差 $\Delta m_s$ のみである。カイラル・クォーク・ソリトン模型は、核子中のパートン分布の荷電対称性の破れ、海クォーク分布のフレーバーSU(3), SU(2)対称性の破れを、u, d-クォークの質量差 $\Delta m$ 、s-クォークとu, d-クォークの質量差 $\Delta m_s$ という2つのパラメータのみに依存する形で、統一的に記述できるので、いったん、これらのパラメータを適当な観測量から決めれば、特に、上述の破れの相対的な大きさに関して、初めての信頼できる情報を与えることができるはずである。

## 4. 研究成果

研究の過程で、核子スピンのゲージ不変な完全分解が可能かという核子スピン物理 20 年来の懸案の解決の糸口をつかみ、この問題の解明にかなりの力を注いだこともあり、本研究計画の目的である「パートン分布の荷電対称性の破れと海クォーク分布のフレーバー非対称性」の研究は多少遅れ気味であったが、ようやく数値計算を含むすべての研究が完成し現在論文にまとめつつある。これまでのパートン分布の荷電対称性の破れの研究は、ほとんどが、Sather の模型 (あるいはその変種) という信頼性のはっきりしない模型に基づくものであった。これに基づく Thomas や Londergan の研究によれば、有名な NuTeV ア

ノマリーの解消のために果たす核子中のパートン分布の荷電対称性の破れの役割は、ストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォークの分布の非対称性の役割にくらべてはるかに重要であると結論されていた。今回の私達の研究は、パートン分布の研究で既に信頼性が確立しているカイラル・クォーク・ソリトン模型の枠組みの中で、u-クォークとd-クォークの質量差を摂動として扱うことにより、パートン分布の荷電対称性の破れと、ストレンジ・反ストレンジ分布の非対称性を、同一の理論基盤で扱うことを目指したものである。非常に面白いことに、ストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォークの差に対する私達の模型の予言は、イタリアの NNPDF グループの最新の global fit の結果と、 $x$ -依存性を含めて驚く程よく似ていることがわかった。さらに、NuTeV アノマリーの問題で、パートンの荷電対称性の破れが果たす役割は、ストレンジ・反ストレンジ分布の非対称性の役割に比べて、1/5 以下であり、Thomas や Londergan の結論は必ずしも正当化されないことがわかった。その他の分布に対しても、NNPDF グループの fit との比較を通じて、反クォークを含む様々なクォーク分布に対する私達の模型の信頼度の高さを確信することができた。これは、実験的に未だ制限されていないパートン分布に対する私達の模型の予言の信頼度を高めるものと考えられる。

## 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 M. Wakamatsu, Recent work on angular momentum, IL Nuovo Cimento, 査読無、35C、(2011)、247-254
- ② M. Wakamatsu, Orbital angular momentum of quarks and gluons in the nucleon - model-dependent and model-independent extraction -, AIP Conference Proceedings., 査読無、1418、(2011)、39-46
- ③ M. Wakamatsu, Gauge-independence of gluon spin in the nucleon and its evolution, Phys. Rev., 査読有、D84、(2011)、037501/1-4
- ④ M. Wakamatsu, Gauge-invariant decomposition of nucleon spin,

J. Phys. : Conf. Ser., 査読無、295、(2011)、012038/1-8

- ⑤ M. Wakamatsu, Gauge- and frame-independent decomposition of nucleon spin, Phys. Rev., 査読有、D83、(2010)、014012/1-16
  - ⑥ M. Wakamatsu, Reply to the comment by A.W. Thomas et al. on "The role of the orbital angular momentum in the proton spin", European Physics Journal A, 査読有、A46、(2010)、327-328
  - ⑦ M. Wakamatsu, Gauge-invariant decomposition of nucleon spin, Phys. Rev., 査読有、D81、(2010)、114010 / 1-9
  - ⑧ M. Wakamatsu, The role of orbital angular momentum in the proton, European Physics Journal A、査読有、A44、(2010)、297-303
  - ⑨ M. Wakamatsu, Chiral quark soliton model and nucleon spin structure functions、Bled Workshop in Physics, Univ. of Ljubljana and Jozef Stefan Institute、査読無、10、(2009)、62-70
  - ⑩ M. Wakamatsu, Transverse momentum distributions of quarks in the nucleon from the chiral quark soliton model, Phys. Rev., 査読有、D79、(2009)、094028 / 1-13
  - ⑪ M. Wakamatsu, Chiral-odd generalized parton distributions, transversity decomposition of angular momentum, and tensor charge of the nucleon, Phys. Rev., 査読有、D79、(2009)、014033 / 1-14
- [学会発表] (計 13 件)
- ① M. Wakamatsu, Is a complete decomposition of nucleon spin possible?, International workshop on hadron structure and spectroscopy, 2012.4.16, Lisbon, Portugal
  - ② M. Wakamatsu, Toward a complete decomposition of nucleon spin, INT Workshop INT-12-49W : Angular momentum in QCD, 2012.2.8, Institute for Nuclear Study, Univ. of Washington, Seattle, USA

③ M. Wakamatsu, Recent work on orbital angular momentum, Transversity 2011 - Third International Workshop on Transverse Polarization Phenomena in Hard Scattering, 2011.9.1, Veli Losinj, Croatia

④ M. Wakamatsu, QCD Theory and Models, PHENIX Spinfest 2011, 2011.7.19-20, Riken, Wako, Japan

⑤ M. Wakamatsu, Orbital angular momenta of quarks and gluons - Model-dependent and model-independent extraction -, The 7<sup>th</sup> Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Physics, 2011.6.20, Cairns, Australia

⑥ M. Wakamatsu, Generalized parton distributions and transverse-momentum dependent distributions, New development of nucleon structure functions, 2011.1.8, KEK, Tsukuba, Japan

⑦ M. Wakamatsu, Gauge-invariant decomposition of nucleon spin, The 19<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium, 2010.9.27, Forschungszentrum, Juelich, Germany

⑧ M. Wakamatsu, Gauge- and frame-independent decomposition of nucleon spin, High Energy Strong Interaction 2010 - Parton Distributions and Dense QCD Matter, 2010.8.27, Yukawa Institute, Kyoto, Japan

⑨ M. Wakamatsu, Gauge- and frame-independent decomposition of nucleon spin, Brookhaven Summer Program on Nucleon Spin Physics, 2010.7.23, BNL, NewYork, USA

⑩ M. Wakamatsu, Nucleon spin structure, theoretical basis of orbital-angular-momentum measurement, relation with GPD and TMD distributions, Riken Workshop on nucleon structures and orbital angular momentum, 2010.2.12, RIKEN, Wako, Japan

⑪ M. Wakamatsu, The role of orbital angular momentum in the proton spin, KEK theory center workshop on high-energy hadron physics with hadron beams, 2010.6.8, KEK, Tsukuba, Japan

⑫ M. Wakamatsu, Nucleon spin structure from chiral quark soliton model, The 6<sup>th</sup> Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, 2009.9.17, Yamagata, Japan

⑬ M. Wakamatsu, The chiral quark soliton model and nucleon spin structure functions, Mini Workshop Bled : Problems in Multiquark States, 2009.7.1, Bled, Slovenia

[図書] (計 1 件)

① M. Wakamatsu, and many others, Nova Science Publishers, USA, Handbook of Solitons : Research and Technology (2009), pp. 621-666

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

若松 正志 (WAKAMATSU MASASHI)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 40135653

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :