The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | Study of Quark Distributions using the Light-cone Wave Function based on the Chiral Quark Soliton Model |
| Author(s) | 大西, 陽一 |
| Citation | 大阪大学, 2006, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/46475 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

【34】

| | |
|---|---|
| 氏　　名 | 大西陽一（おおにしよういち） |
| 博士の専攻分野の名称 | 博　士（理　学） |
| 学　位　記　番　号 | 第　２０００４　号 |
| 学位授与年月日 | 平成 18 年 3 月 24 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第４条第１項該当<br>理学研究科物理学専攻 |
| 学　位　論　文　名 | Study of Quark Distributions using the Light-cone Wave Function based on the Chiral Quark Soliton Model<br>（カイラル・クォーク・ソリトン模型に基づく光円錐波動関数を用いたクォーク分布の研究） |
| 論　文　審　査　委　員 | （主査）<br>教　授　浅川　正之<br>（副査）<br>教　授　岸本　忠史　　教　授　土岐　　博　　助教授　窪田　高弘<br>助教授　若松　正志 |

## 論　文　内　容　の　要　旨

The spin structure of the nucleon is one of the most active fields of the recent hadron physics. There are introductions and researches of the new parton distribution functions called generalized parton distribution functions (GPDs), which are the biggest progresses in recent years in this field. It is expected that GPDs which can be observed through deeply virtual Compton scattering, include various interesting information, for example, contribution of parton's orbital angular momentum to the nucleon spin. In this thesis, we study and predict behavior of GPD using the light-cone wave function of the nucleon based on the low energy effective model of QCD. The partonic interpretation becomes very clear by using the wave function in light-cone coordinate for GPDs which are characterized by the non-local quark operators separated along the light-cone. Especially, GPDs in a certain kinematics domain are described by the overlap integrals of the non-diagonal nucleon wave function in terms of Fock components. Therefore, the unified theory systematically treating with the nucleon bound state problem including higher order Fock components beyond three valence quark approximation becomes indispensable to cover GPD in a full-kinematical domain and to predict it. In this thesis, it is studied based on the chiral quark soliton model which is one of the most promising effective models in such a theory. The prediction for the usual Feynman distribution function which is the forward limit of GPD was first given by using the light-cone wave function based on this model. Under approximation of taking only five quarks in the Fock space expansion, we confirm reproducing qualitative behavior of the isospin asymmetry of the sea quark (anti-quark) distribution, asymmetric strange sea distribution in the nucleon. These facts show clearly that the effect of vacuum polarization of the Dirac sea quarks in this model closely relates to the effect of the clouds of the pion as Goldstone boson which surrounds the core of three valence quarks in the nucleon. Next, predictions of off-forward distributions, GPDs, were similarly given in the 5 quark approximation. The model predicts that the behavior of the non-polarized distribution H (x, $\xi$, t) strongly depends on the longitudinal momentum

transfer, $\xi$, around $x=\xi/2$. If there is such behavior, we point out that a deeply virtual Compton scattering cross section may be enhanced. Thus, the low energy chiral dynamics of QCD taken in as a vacuum polarization effect of the Dirac sea quarks predicts very characteristic behavior of GPD and Feynman distribution which are the quantity of observation of high energy deeply inelastic scatterings. From these facts, we have recognized anew the importance of the non-perturbative dynamics of QCD even in the high energy physics.

核子のスピン構造は、最も活発に研究されているハドロン物理の分野のひとつである。この分野の物理における近年の最も大きな進展のひとつに、一般化パートン分布関数（GPD）と呼ばれる新しいパートン分布関数の導入とその研究がある。深部仮想コンプトン散乱を通して観測可能な GPD は、核子のスピンに対するパートンの軌道角運動量の寄与の情報を初めとして、様々な未知の面白い情報を含んでいると期待されている。本研究は、QCD の低エネルギー有効模型に基づいて導出された核子の光円錐波動関数を用いて、GPD の振る舞いを予言したものである。光円錐的に離れた座標を有する非局所的なクォーク演算子で特徴付けられる GPD は、光円錐座標における波動関数を用いることでそのパートン的解釈が非常に明確になる。特に、ある運動学領域での GPD は、核子波動関数の非対角なフォック成分の重なり積分で記述される。したがって、GPD を全運動学的領域に渡って予言するためには３クォーク近似を超えた高次のフォック成分まで統一的に扱える核子の束縛状態を扱う理論が不可欠となる。本論文では、そのような理論の中でも最も有望なもののひとつである、カイラル・クォーク・ソリトン模型に基づいて研究を行った。この模型に基づいて得られた光円錐波動関数を用いて、まず初めに、GPD の前方極限である通常のファインマン分布関数に対する予言を与えた。波動関数のフォック空間展開で５クォークまでを取り入れるという近似のもとで、核子中の海クォーク（反クォーク）分布のアイソスピン非対称などの振る舞いを定性的に再現することを確かめ、これを通して、この模型における海クォークの真空偏極の効果が、核子中の３クォークの芯を取り巻くゴールドストンボソンとしての$\pi$中間子の雲の効果と密接に関係していることを明らかにした。次に、同様に５クォーク近似の範囲で、非前方分布である GPD の予言を与えた。模型は非偏極分布 H（x, $\xi$, t）が、$x=\xi/2$ 付近で光円錐方向の運動量移行$\xi$に強く依存した振る舞いを持つことを示唆する。もしこのような振る舞いがあれば、深部仮想コンプトン散乱断面積を増幅させる可能性がある。このように、海クォークの真空偏極の効果としてとりいれられた QCD の低エネルギーカイラルダイナミクスは、高エネルギー深部非弾性散乱の観測量である GPD やファインマン分布の非常に特徴的な振る舞いを予言し、高エネルギー散乱の物理における QCD の非摂動論的力学の重要性が改めて認識された。

## 論文審査の結果の要旨

カイラル・クォーク・ソリトン模型は、低エネルギー量子色力学の最も重要な性質と考えられるカイラル対称性とその自発的破れの効果を、効果的に取り入れたバリオンの有効模型である。大西陽一君の研究は、このカイラル・クォーク・ソリトン模型に基づき、それを基礎として導かれる光円錐波動関数を用いて、核子のパートン分布関数や一般化パートン分布関数を研究したものである。相対論的平均場近似を基礎とするこの模型によれば、バリオンは自己無撞着なカイラル場（古典的パイ中間子場）に束縛された３個の構成子クォークの局在状態という描像が成り立つ。ただし、このカイラル場は、３個の構成子クォークを束縛する働きをするだけでなく、負エネルギーのディラックの海を偏極させ、バリオンの中にクォーク・反クォークの励起を引き起こすのが大きな特徴である。カイラル場の影響の下でのクォークや反クォークの伝播を有限時間グリーン関数法を用いて扱うことにより、バリオンの状態を表す波動関数は、３個の価クォークの波動関数とクォーク・反クォーク対の励起を表すコヒーレント指数関数と呼ばれる部分の積で与えられることが示せる。さらに、こうして得られたバリオンの波動関数をローレンツ変換することにより、パートン分布関数や一般化パートン分布関数を計算するのに便利な光円錐座標系に移るのが便利である。なぜなら、この座標系では、これらの分布関数はバリオンの始状態および終状態の Fock 成分の重なり積分として表されるからである。大西君は、このような理論形式を構成し、３個のクォークに加えて５個のクォーク（４個のクォークと１個の反クォーク）の Fock 成分も取り入れるという近似の下で、バリオンのクォーク構造を解明するために本質的に重

要と考えられる様々な分布関数に対する予言を与えた。例えば、一般化パートン分布の前方極限として得られる通常のパートン分布関数の解析においては、陽子中の海クォーク分布のアイソスピン非対称性の解析を通じて、５クォーク成分の重要な役割を明らかにした。また、一般化パートン分布関数には、特殊な運動学的領域が存在し、この領域の分布関数は通常のパートン分布の理論式には全く現れないバリオン波動関数の Fock 成分の非対角行列要素で与えられることを指摘した。この他にも、衝突係数依存パートン分布関数、横方向運動量依存パートン分布など、現在、核子の構造関数の物理において興味の焦点となっている重要な観測量に対する興味深い予言を与え、これを通じて、これらの高エネルギー観測量の中に潜む量子色力学のカイラル対称性の重要な役割を明らかにした。これらの成果は、それを更に発展させることにより、この分野の物理に重要な寄与を与えるものであると期待される。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。