



The Spin Structure of Nucleon and High Energy Reactions

Yamanishi, Teruya

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1994-03-31

(Date of Publication)

2012-06-20

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1311

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3078439>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001311>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



| | | |
|------------|---|----------|
| 氏名・（本籍） | やまにし てる や 山西輝也 | （大阪府） |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（学術） | |
| 学位記番号 | 博い第224号 | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 | |
| 学位授与の日付 | 平成6年3月31日 | |
| 学位論文題目 | The Spin Structure of Nucleon and High Energy Reactions (核子のスピン構造と高エネルギー素粒子反応) | |
| 審査委員 | 主査 教授 森井俊行 教授 位田正邦 | 教授 小早川恵三 |

論文内容の要旨

原子核の構成要素である陽子（一般にハドロン）はより基本的なクォーク（適当な有効質量を持つスピン $1/2$ の粒子）と呼ばれる粒子から構成されていると考えられており、その質量レベルや磁気モーメントなどの静的性質は非相対論的クォークモデルによってうまく説明されてきた。他方、運動量移行 Q^2 の大きな高エネルギー反応に対してはクォークをほとんど質量を持たない点粒子と考えるパートンモデルが成功し、クォークとその間に働く力を媒介するグルーオンの力学を記述する量子色力学（QCD）の発見とあいまって、ハドロンの構造の理解は飛躍的に深まった。しかし、最近行われた陽子の構造に関する実験の結果は我々のこれまでの陽子についての理解を大きく揺るがすものであった。

1988年、CERN（ヨーロッパ共同原子核研究所、スイス）の European Muon Collaboration（EMC）によって陽子のスピン依存構造関数 $g_1^p(x)$ が x の小さい領域まで詳しく解析された。その解析結果は、陽子のスピンはその構成子であるクォークが担っているという従来の考えを否定するような驚くべきものであった。この興味ある結果に対して既に多くの理論的解釈が提案されているが、その一つに QCD の $U_A(1)$ アノマリーを通じて陽子スピンに寄与するグルーオンの効果を考慮すべきだと言う考えがある。この考えに従えばグルーオンが大きく陽子スピンに寄与する結果、クォークの寄与も大きくなりうる。このモデルの正否を確かめるためには陽子スピンに寄与するグルーオン（偏極グルーオン）の大きさを他の実験で測る必要がある。

この論文は EMC の解析結果を説明するための一つの新しいモデルを提案し、陽子スピンの根源を探ると共にハドロンの構造についてのより深い理解を得ることを目指したものである。この新しいモデルによる陽子のスピン依存構造関数 $g_1^p(x)$ の分析を通じて偏極グルーオンの重要な役割が明らかにされ、また幾つかの高エネルギー素粒子反応を分析することによって、偏極グルーオンの効果を測定するにはどの反応および物理量が適しているかが論じられる。本論文で示された偏極グルーオンを調べる方法は、陽子のスピン構造を理解する上で今後重要となるであろう。

本論文は以下のように構成される。

第1章において、我々の新しいモデルの導入の準備として高エネルギー深非弾性散乱とそれをうまく記述するパートンモデルの簡単なレビューを行った後、陽子のスピン問題の発端となったEMCの解析結果について述べる。そして実験結果を解釈する一つの有力な考え方である $U_A(1)$ アノマリーについて概説すると共に陽子のスピン問題の内容を簡単にまとめた。

第2章において非相対論的クォークモデルとパートンモデルの両方の特徴を取り入れた新しいモデルを提案することによってEMCの実験結果であるスピンに依存した陽子構造関数 $g_1^p(x)$ を理論的に説明することを試みた。このモデルは高エネルギーおよび低エネルギーでの陽子構造に対するそれぞれの描像をうまく結び付ける一つのモデルであるCarlitz-Kaur modelを発展させることによって提案された。まず非相対論的クォークモデルでは陽子は3つのconstituentクォークのみで構成されるが、パートンモデルによれば陽子は3つのvalenceクォークの他にseaクォークやグルーオンで構成される。従って、現実の陽子はseaクォークの成分も持っていると考えられるので陽子の波動関数は3体、5体、7体、…のクォークの波動関数の重ね合わせで記述できるはずである。このような考察から我々の新しいモデルでは、まず現実的な陽子の構造としてseaクォークの成分を含むようにその波動関数が拡張される。さらにQCDの $U_A(1)$ アノマリーの効果を考慮してグルーオンのスピン依存分布関数が導入され、クォークの修正されたスピン依存分布関数が計算される。これらのスピン依存分布関数を用いた計算結果はEMC実験の $g_1^p(x)$ ばかりでなく、最近SMCグループによって測定された重陽子のスピン依存構造関数 $g_1^d(x)$ も新たなパラメータ無しによく再現した。このときクォークが陽子のスピンの約 $3/4$ を担うことになったが、アノマリーを通じてグルーオンが大きく偏極していることも分かった。

第3章では偏極グルーオンが種々の高エネルギー素粒子反応におけるスピン非対称パラメータにどれくらい影響を与えるかを議論した。第2章で導入したモデルが正しいかどうかを知るためには、実際に実験によって偏極グルーオンの量が測られる必要がある。そこでまず、偏極グルーオンが実験データにどのように影響するか調べるために、次のような4種類のスピン依存グルーオン分布関数を考えた。

- (a) 第2章で導入された大きく偏極したグルーオン ($0 \leq x \leq 1$ での積分値が5~6)で、その分布は $x < 0.01$ で大きなピークを持ち、 x の増加に伴い急激に減少して小さくなるように振る舞う場合。
- (b) (a)と同じく大きく偏極したグルーオンであるが、 $x \sim 0.05$ でピークを持ち、 x の増加に伴いゆっくりと減少する場合。
- (c) 偏極グルーオンの量は0.53と小さく、 $x \sim 0.15$ 付近でブロードに広がり、 x の増加に伴いゆっくりと減少する場合。
- (d) グルーオンが偏極していない場合。

この内(b)はこれまで多くの人たちによって提案されてきた分布である。これらのスピン依存グルーオン分布関数を用いて偏極陽子(反陽子) - 偏極陽子衝突における π^0 生成反応のスピン非対称 $A_{LL}^{\pi^0}(p_p)$ を理論的に計算し、E581/704グループの実験結果と比較した。その結果、 $A_{LL}^{\pi^0}(p_p)$ は偏極グルーオンの分布関数の振る舞いに依存し、type(b)およびtype(c)では実験を再現できないが、type(a)およびグルーオンが偏極していないtype(d)の場合には実験結果を再現できることが分かった。従って、E581/704グループの結果は必ずしも偏極グルーオンが陽子内に存在していないことを示しているのではなく、偏極グルーオンの振る舞いについての制限を与えたものであるということを明らかにした。

さらに将来の実験を期待して、偏極陽子（反陽子）－偏極陽子衝突における high- p_T direct photon 生成反応と J/ψ 生成反応の $A_{LL}(\vec{p}_p)$ と $A_{LL}(\vec{p}_p)$ を上の 4 種類のスピン依存グルーオン分布関数を用いて予言した。high- p_T direct photon 生成反応の断面積は曖昧さの残る fragmentation function を含まないし、 J/ψ 生成反応はグルーオン－グルーオン fusion 過程が素過程の最低次で寄与するので偏極グルーオンの振る舞いが直接、実験値に反映する。しかしながら、type(b)とtype(c)を除き、type(a)とtype(d)のスピン依存グルーオン分布関数からの予言値はほとんど同じ値を示し、ここで考えた生成反応からは(a)と(d)の違いを見分けることは困難であることが分かった。

第 4 章では偏極グルーオンの type(a)とtype(d)を見分ける方法を考え、さらに詳しくその振る舞いを実験から測る方法を議論した。DESY（ドイツ）の HERA が稼働し始めたことを念頭において、偏極グルーオンの分布を引き出すための有効な反応として偏極電子－偏極陽子衝突における J/ψ －leptoproduction を提案した。この生成反応の主なプロセスは光子－グルーオン fusion であり、その断面積はスピン依存グルーオン分布関数に直接比例した形で書かれる。従って、この反応の実験が行われれば比較的簡単にスピン依存グルーオン分布関数の情報が導き出せることが示された。

第 5 章ではこの論文の要約と結論を述べ、今後に残された課題を示し、陽子のスピン問題の解決とそれを通じてハドロンの構造をより深く理解するための方向性を議論した。またこの論文で扱われたテーマに関係した最近の実験と今後の展望について述べた。

論文審査の結果の要旨

陽子（一般にハドロン）はより基本的な構成子であるクォーク（適当な有効質量を持つスピン 1/2 の粒子）から構成されるとする非相対論的クォーク模型はハドロンの質量レベルや磁気モーメントなどの静的性質をうまく説明してきた。一方、運動量転移 Q^2 の大きな高エネルギー反応に対してはクォークを殆ど質量を持たない点粒子と考えるパートン模型が成功し、クォークとその間の力を媒介するグルーオンの基本的相互作用を記述する量子色力学（QCD）の発見とあいまって、クォークの力学についての理解は飛躍的に深まった。しかしながら、最近発表された CERN（ヨーロッパ共同原子核研究所）の EMC グループによる偏極陽子構造関数 $g_1^p(x)$ の測定結果は、陽子スピンのその構成子であるクォークによって殆ど担われていないことを示唆しており、陽子の構造についての我々のこれまでの理解を越えるものであった。

本論文は、この EMC グループの結果を説明するための一つの新しいモデルを提案し、陽子のスピン問題の根源を探ると共にハドロンの構造についてのより深い理解を得ることを目指したものである。本論文の第 1 章では、新しいモデルの導入の準備として高エネルギー深非弾性散乱とそれをうまく説明するパートン模型の簡単なレビューを行った後、陽子のスピン問題の発端となった EMC グループの実験結果について述べている。更に、実験結果を解釈する一つの有力な考え方である UA(1) アノマリーについて概説すると共に陽子のスピン問題の内容について簡単にまとめている。

第 2 章において、本論文で提案された新しいモデルを組み立て、偏極陽子構造関数 $g_1^p(x)$ の実験結果の解析を議論している。まず、非相対論的クォーク模型とパートン模型の両方の特徴を取り入れた一つの簡単なモデルである Carlitz-Kaur model を発展させることから出発する。非相対論的クォーク模型では陽子は 3 つの valence quark のみから構成されるが、パートン模型ではこれらの他に sea quark やグルーオンを含む。現実の陽子はこれらの成分をも持つと考えられるので陽子の波動関数は 3 体、5 体、・・・のクォークの束縛系の波動関数の重ね合わせで記述できると考え、こ

の成分を含むように波動関数が拡張される。更に、QCDの $U_A(1)$ アノマリーの効果を取り入れて偏極グルーオンの分布関数が導入され、修正されたクォークの偏極分布関数が計算される。これらのスピン依存分布関数を用いた計算結果はEMCの $g_1^p(x)$ だけでなく、最近のSMCグループによる重陽子のスピン依存構造関数 $g_1^d(x)$ をも新たなパラメーターなしに再現した。また、このとき陽子スピンの約 $3/4$ はクォークが担うことになり、アノマリーを通じて偏極グルーオンが大きな値を持つことも指摘している。

第3章では、前章で導入されたモデルの有効性を広く他の反応でも調べるために、偏極(反)陽子-偏極陽子衝突での種々の粒子生成におけるスピン非対称パラメーターに偏極グルーオンがどのように影響するかを議論している。具体的には、(a)このモデルで導入された偏極グルーオン分布関数で、偏極グルーオンの値($0 < x < 1$ での積分値)は大きい($\approx 5 \sim 6$)が、 $x < 0.05$ でピークを持ち $x > 0.05$ で急激に減少する場合、(b)これまで多くの人によって広く使われたもので、偏極グルーオンの値は大きいとその振舞いが、 $x \sim 0.1$ でピークを持ち x の増加と共にゆっくり減少する場合、(c)最近Brodskyらによって導入されたもので、偏極グルーオンの値は小さいが $x \sim 0.15$ を中心にブロードに広がった場合、(d)グルーオンが偏極していない場合、の4種類の典型的な型を取り上げて検討した。これらの分布関数を用いた計算を、最近のE581/704グループによる偏極(反)陽子-偏極陽子衝突での π^0 生成反応におけるスピン非対称パラメーターの実験と比較することによって、(b)の場合は実験を再現出来ないし、(c)の場合も $p p$ ではやや困難であるのに対して、(a)、(d)の場合は実験を再現すること示し、そのことによって実験結果は実験グループが主張するように必ずしも偏極グルーオンが0であることを示したのではなく、偏極グルーオンの振舞いについての制限を与えたものであることを明らかにしている。更に、将来の実験を期待して、偏極(反)陽子-偏極陽子衝突での γ 生成と J/ψ 生成でのスピン非対称パラメーターの予言を行っている。 γ 生成の場合は崩壊関数による曖昧さを含まないし、 J/ψ 生成の場合はグルーオンfusion過程がQCDの最低次で寄与するので偏極グルーオンの影響をより調べやすく、今後の実験でテストされることが期待される。

第4章では、E581/704グループによる実験で区別出来なかった偏極グルーオンの分布(a)と(d)を見分け、もっと直接的にその振舞いを調べる方法を議論している。DESY(ドイツ)のHERAが稼働し始めたことを念頭におきながら、偏極グルーオンの情報を引き出すための最も有効な反応として偏極電子-偏極陽子衝突における J/ψ 生成を提案している。この反応の主な過程は光子-グルーオンfusionであり、その断面積は偏極グルーオン分布関数に直接比例するので、将来の実験で偏極グルーオンについてより深い理解が得られることが期待できる。

第5章では、本論文の要約と結論が述べられ、残された課題と今後の展望が纏められている。

以上見てきたように、本論文は Q^2 の小さい静的領域で成功した非相対論的クォーク模型と Q^2 の大きな領域で有効なパートン模型の両方の特徴を取り入れた新しいモデルを提案し、それに基づいて陽子のスピン問題を深く分析し偏極グルーオンの重要な役割を解明したものであり、ハドロンの構造について重要な新しい知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって学位申請者山西輝也は、博士(学術)の学位を得る資格があると認める。