

氏名・（本籍）	栗木雅夫 くり き まさ お
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	理博第1461号
学位授与年月日	平成8年3月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）原子核理学専攻
学位論文題目	Study of Deep Inelastic Scattering of Polarized Electrons off Polarized Deuterons （偏極電子・偏極核子の深非弾性散乱の研究）
論文審査委員	（主査） 教授 湯田 春雄 教授 鈴木 厚人 教授 藤岡 學

論 文 目 次

第1章	Introduction
第2章	Theory of Deep Inelastic Scattering
第3章	Experimental Setup
第4章	Analysis
第5章	Results
第6章	Conclusion and a Look into the Future

論文内容要旨

1 Introduction

Hadron が複数の Quark と Gluon から成り立っているという Parton 模型は、Baryon や Meson の Quark 量子数による分類など Hadron の統一的理解を大いに助けて来た。その模型においては、核子の Spin を全体として担っているのは、核子の他の量子数を決定している 3 個の Valence Quark である。Sea Quark 及び Gluon は全体として偏極しておらず、核子の Spin には寄与しない。この模型は、静的な 3 個の Quark を核子の構成子とする SU(6) 模型のダイナミックな拡張であり、その SU(6) 模型が Baryon の磁気双極子モーメントの比を的確に表現するという実験的な事実によって長い間信じられてきた。

しかし、1988年に発表された European Muon Collaboration (EMC) による陽子のスピン構造関数 g_1 の測定結果は、上のような単純な描像では核子の Spin を理解できないという衝撃的な事実を明らかにした。その結果によると、u,d,s 各 flavor の核 Spin 方向の偏極度の和は、 $\Delta u + \Delta d + \Delta s = 0.012 \pm 0.116 \pm 0.234$ で、Quark は Spin をほとんど担っていない。また、Strange Sea Quark の偏極度は $\Delta s = -0.226 \pm 0.038 \pm 0.078$ で、核子の中の Spin とは逆向きに偏極している。

この問題を受けて、核子の Spin 構造を明らかにするために、SLAC-E143 Collaboration は Stanford Linear Accelerator Center, SLAC において偏極電子ビームを用いた深非弾性散乱実験を行った。標的に偏極した NH_3 と ND_3 を使用し、陽子の Spin 構造関数を飛躍的に高い精度で測定するとともに、当時未測定であった重陽子の Spin 構造関数を測定した。本研究では、重陽子のデータを中心に解析を行った。

2 Theory of deep inelastic scattering

核子の Spin 構造関数は $g_1(x)$ は、偏極した電子と、偏極した核子の深非弾性散乱における電子の Spin 反転による断面積の Asymmetry から求めることができる。このスピン構造関数 g_1 は、parton 模型により $2g_1(x) = \sum_i e_i^2 [q_i(\uparrow, x) - q_i(\downarrow, x)]$ と解釈される。ここでは e_i は電子電荷を単位とする各 Flavour の電荷、 q_i は反クォークを含むクォークの分布関数で、矢印は核スピンを上向きにとった場合の Quark Spin の方向をあらわしている。

中性子の β 崩壊の Axial と Vector の比、 $\left(\frac{g_A}{g_V}\right)_n$ と、陽子と中性子のスピン構造関数の積分値、 $\Gamma^{p,n} \equiv \int_0^1 dx g_1^{p,n}(x)$ は Iso Spin 対称性の仮定のもとで、 $\Gamma^p - \Gamma^n = \frac{1}{6} \left(\frac{g_A}{g_V}\right)_n$ という関係にある。この Scaling 領域 ($Q^2 = \infty$) における Bjorken Sum Rule に対しては、有限の Q^2 における予測値が Perturbative Quantum Chromodynamics, P Q C D により求められており、Bjorken Sum Rule と測定値との比較は P Q C D を検証することに他ならない。 $Q^2 = 3 (\text{GeV}/c)^2$ における予測値は $\Gamma^p - \Gamma^n = 0.169 \pm 0.008$ である。

SU(3) Flavour 対称性のもとで、Hyperon の崩壊定数は Quark の偏極度と $F + D = \Delta u - \Delta d$ 、 $F - D = \Delta d - \Delta s$ という関係にあり、 $\Gamma^{p,n}$ は F、D そして Δs により

$$\Gamma^{p,n} = \frac{1}{36} [\pm 3(F + D) + (3F - D)] + \frac{1}{9} [3F - D + 3\Delta_s] \quad (1)$$

と表される。ここで符号は陽子に対して+である。この式において、Strange Sea Quark が無偏極と仮定することにより、 $\Gamma^{p,n}$ はそれぞれ既知のパラメーターFとDにより記述され、その関係式は Ellis-Jaffe Sum Rule と呼ばれる。 $Q^2 = 3 (\text{GeV}/c)^2$ における予測値は、 $\Gamma^d = 0.068 \pm 0.005$ 、 $\Gamma^n = 0.009 \pm 0.006$ である。一方、 $\Gamma^{p,n}$ の測定は核子中での Quark の偏極度を決定する。

3 Experimental setup

E143 実験は1993年11月より翌年2月まで、SLAC の End Station A、ESA において行われた。

偏極電子は、偏極光子を歪みを加えた GaAs 結晶に照射することによって得られる。GaAs 結晶は $J=3/2$ と $J=1/2$ の電子の束縛状態をもち、偏極光子による伝導帯への遷移は、量子力学的な抑制に加え、結晶構造の歪みによるエネルギー差により $J=2/3$, $m_j = \pm 2/3$ 状態からの遷移が支配的となる。したがって、得られる電子は入射する光子の偏極状態によって、特定の方向に偏極する。E143 実験においては $0.1 \mu\text{m}$ の厚の歪み GaAs 結晶を用いて、偏極度 84~86% の電子ビームが得られている。

電子の偏極度は ESA 入口に設置された Møller Polarimeter により 2% の精度を以て較正、決定された。Møller 散乱の電子のスピン反転による Asymmetry と、標的となる Foil (Fe49%、Co49%、Va2%) 中の電子の偏極度の測定から、ビームの偏極値を求めた。

$^{15}\text{N H}_3$ あるいは $^{15}\text{N D}_3$ を 1 K、5 Tesla という低温、高磁場中に置き、周波数約 140 GHz の Microwave をかけることにより、アンモニア中の陽子、あるいは重陽子を偏極させる。この Dynamic Nuclear Polarization、DNP と呼ばれる方法を用いて、90% 及び 40% の陽子、重陽子の偏極がそれぞれ得られている。標的の偏極度は Nuclear Magnetic Resonance, NMR の信号を Q-meter と呼ばれる回路により測定し、校正された。

図 1 に示されている様に、偏極標的による電子の散乱確率をビーム軸から 4.5 度と 7 度の方向に設置された二つの Spectrometer を用いて測定した。各 Spectrometer に二つの Dipole Magnet は電子の軌道を互いに逆向きに曲げ、検出器位置における収束性をたかめることで、6 GeV/c から 22 GeV/c を越える広い運動量領域での観測を可能にしている。さらに二つの角度方向での観測は、 $0.029 < x < 0.8$ という広い測定領域を実現している。

Magnet の後方には、電子と π を区別するための 2 m 長、及び 4 m 長の Cerenkov Counter、電子の軌道を再構成するための 7 面の Hodoscope、通過時間を高い時間分解能で測定する 2 面 Scintillator Trigger Counter、そして再後方にエネルギー測定のための Lead Glass Shower Counter が設置され、散乱された電子の運動量、エネルギー、散乱角を測定した。

4 Analysis

再構成された粒子のうち、次の 3 つの条件を満たすものを電子として解析に用いた。まず Cerenkov Counter の出力がそれぞれ ADC カウントで 40 以上あること。次に Shower Counter で得られた粒子のエネルギーと、軌道から決定された粒子の運動量比、E/P 比が 0.8 から 1.2 の間にあること。次に Shower Counter でのエネルギー損失の状態が、Neural Network により電子

らしいと判断されることである。

この電子のサンプルをもちいて、Spin 反転による電子の散乱確率の Asymmetry をもとめ、その値をビームの偏極度、標的の偏極度、標的中での重陽子の割合を示す Dilution Factor、Hadron の崩壊等による Background 補正、高次反応や放射仮定に対する Radiative Correction などの補正をおこない、Cross Section Asymmetry を求めた。

5 Results

g_1/F_1 という量が Q^2 に依存しないという経験的事実を仮定し、測定された Cross Section Asymmetry から共通の $Q^2=3.0(\text{GeV}/c)^2$ における g_1 を求めた。計算の際に必要なスピに依存しない構造関数 F_1 と F_2 は過去に SLAC 及び CERN においておこなわれた e-N 散乱実験の結果を使用した。図 2 は本解析で求められた重陽子のスピン構造関数 g_1 をあらわしている。中性子の g_1 は、本解析の重陽子の結果と、E143 で得られた陽子の g_1 を用いて求められた。

$g_1(x)$ の Bjorken x についての積分値を次の 3 つの領域にわけて求めた。(a) $0 < x < 0.029$: $g_1(x)$ が x^α ($0 < \alpha < 0.5$) に比例するという仮定のもと、領域 $0.55 < x$ 内のデータを用いてその曲線を決定し、積分値を求めた。(b) $0.029 < x < 0.8$: データを方形近似し、積分値を求めた。(c) $0.8 < x < 1$: $g_1(x)$ が $(1-x)^3$ に比例するという仮定のもと、領域 $0.55 < x$ 内のデータを用いてその曲線を決定し、積分値を求めた。積分結果を表 1 にまとめている。この結果は、重陽子と中性子の Ellis-Jaffe Sum Rule と、それぞれ 4σ 、 2σ レベルの食い違いを示す一方、Bjorken Sum Rule とは良い一致を示している。

Γ^d の測定値を用いた Quark の偏極度の計算結果は、3 つの Flavour についての和が $\Delta \Sigma = 0.286 \pm 0.055$ 、Strange Sea Quark の偏極度が $\Delta s = -0.101 \pm 0.023$ となった。図 3 は $\Delta \Sigma$ と Δs を、他の測定結果とともにプロットしたもので、本解析での結果が最も高い精度で Quark の偏極度を決定していることを示している。

6 Conclusion and a look into the future

本研究では、重陽子に対する Ellis-Jaffe Sum Rule の破れを確認すると共に、核子中での Quark の偏極度を従来の測定を大幅に上回る精度で測定した。その結果は、核子の Spin のおよそ 30% が Quark の Spin により担われていることを示しており、SU(6) モデルの値と大きく食い違っている一方、Lattice QCD や Skyrme モデルによる値と誤差の範囲内で一致するものである。

また、 $Q^2=3(\text{GeV}/c)^2$ において Bjorken Sum Rule を検証し、PQCD がスピン構造関数においても、その Scaling の破れを正しく記述することを確認した。

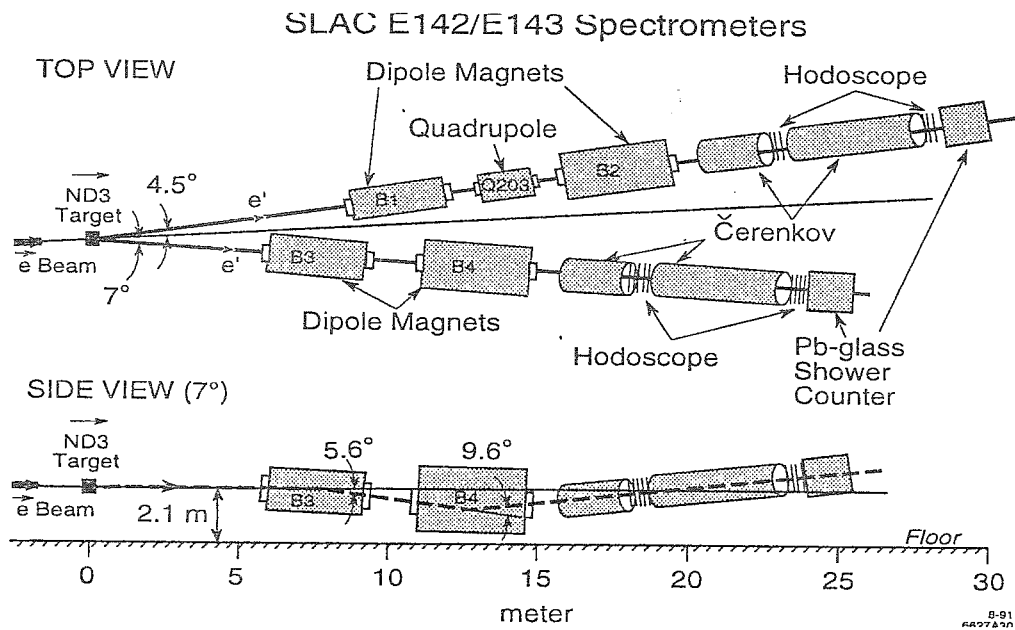


図1: E143実験のレイアウト

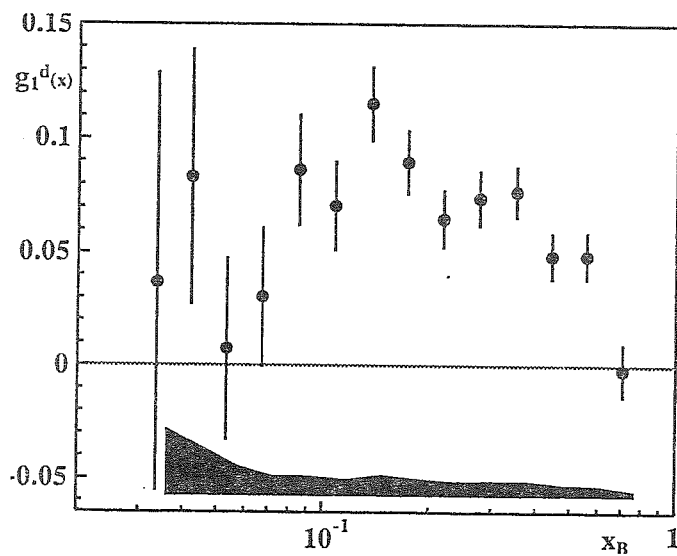


図2: $g_1^d(x, Q^2 = 3.0 \text{ (GeV/c}^2\text{)})$

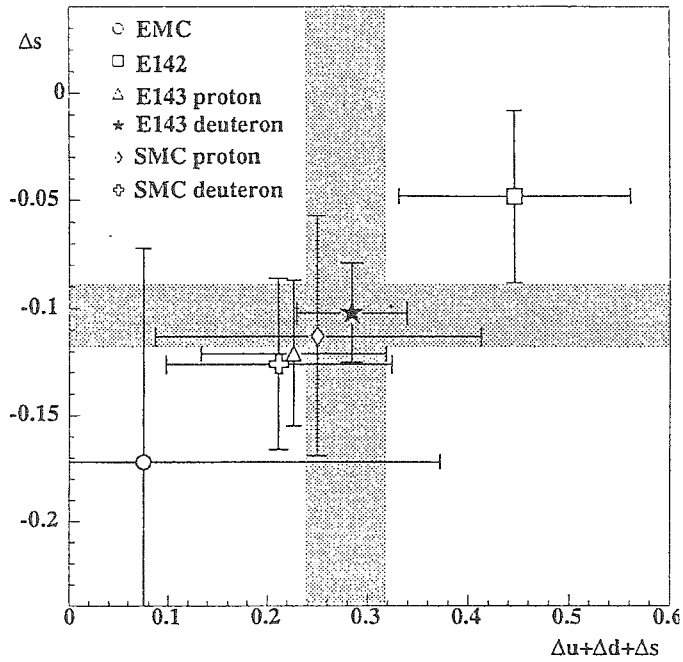


図3 : Quark Polarization ($\Delta \Sigma \times \Delta s$)

		g_1^d	g_1^n	$g_1^p - g_1^n$
Γ		0.0396	-0.0358	0.1586
statistical error		0.0035	0.0084	0.0103
systematic error	beam pol.	0.0011	0.0008	0.0039
	target pol.	0.0018	0.0049	0.0071
	dilution fac.	0.0016	0.0054	0.0079
	Radiative corr.	0.0024	0.0057	0.0068
	F_1, R	0.0009	0.0022	0.0053
	D-state prob.	-	0.0012	0.0012
	Low x ext.	0.0009	0.0030	0.0060
	High x ext.	0.0002	0.0005	0.0007
Total		0.0039	0.0105	0.0162

表1 : $Q^2 = 3.0 (GeV/c)^2$ における g_1 の積分値

論文審査の結果の要旨

本論文は、米国スタンフォード研究所における30GeV線型加速器を用いて、偏極電子・偏極核子の深非弾性散乱の実験を行い、電子・陽子及び電子・重陽子散乱の断面積の非対称性の測定から、核子のスピン構造関数を求め、Ellis-Jaffe 及び Bjorken の sum rule の検証及びクォークの偏極度を測定したものである。

第1章序論では電子・核子散乱の研究の歴史的な背景を述べ、核子内のクォークのスピン構造関数の測定実験が進むにつれて、今までゼロと考えられていたシークォークのスピンが、有限値を有することが分かり、この驚くべき結果を検証するために、偏極電子・偏極陽子と偏極電子・偏極中性子の散乱の研究が必要であることを述べている。

第2章では、この深非弾性散乱の理論的背景を述べ、更に、スピン構造関数の導出、Bjorken、Ellis-Jaffe sum rule の導出、クォークのスピンの導出について記述している。

第3章では、実験装置について述べている。まず偏極電子ビームを作るための Strained GaAs を使用する理論的説明、ビーム・ライン、偏極度測定器、偏極標的を述べ、更に、データ収集のためのスペクトロメータにつき詳細に記述している。

第4章では、データ解析について述べている。まず、事象の選択法について、主として、チェレンコフ・カウンターとシャワー・カウンターの情報を用いて、新しい Neural Network 法による電子の同定を行った。この解析により得られた、断面積の非対称性は更に、種々の補正を行い、最終的な重陽子と陽子の断面積の非対称性を決定した。同時に、この測定に対する系統誤差を算出している。

第5章では、以上の解析結果を基に、重陽子と陽子のスピン構造関数を導き sum rule の検証のため、それぞれの積分値を求め次の結果を得た。

$$\int g_1^d dx = 0.0396 \pm 0.0035(\text{stat}) \pm 0.0039(\text{syst})$$

$$\int g_1^n dx = -0.0396 \pm 0.0084(\text{stat}) \pm 0.0105(\text{syst})$$

$$\int (g_1^p - g_1^n) dx = 0.1586 \pm 0.0103(\text{stat}) \pm 0.0162(\text{syst})$$

このことから、Ellis-Jaffe sum rule の理論的予想値から 4σ で破れており、Bjorken sum rule は 1σ 以内で一致していることを示した。また、クォーク偏極度については $\Delta\Sigma = 0.286 \pm 0.055$ 、 $\Delta S = -0.101 \pm 0.023$ の結果を示した。この結果は Lattice QCD 及び、Skyrme 模型の理論計算値と良い一致を示し、更に、クォークが核子のスピンのほぼ30%しか担っていないこと、また、シークォークが核子のスピンと逆向きに偏極していることを示す、極めて重要な結果を測定した。このことは、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示すものである。よって、栗木雅夫提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。