

氏名・(本籍)	なか がわ いたる 中 川 格
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1729号
学位授与年月日	平成11年11月17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)物理学専攻
学位論文題目	Study of Elastic Magnetic Electron Scattering from ^3He (^3He からの弾性磁気電子散乱の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 笠木 治郎太 教授 高木 富士夫 助教授 玉江 忠明

論 文 目 次

CONTENTS

Acknowledgements

1. INTRODUCTION

- 1.1. Few-Body Systems and Experimental Probes
- 1.2. Ground State Properties of Three-body Systems
- 1.3. Elastic Electromagnetic Form Factors of Three-body Systems
- 1.4. The Elastic Magnetic Form Factor of ^3He : Existing Data
- 1.5. Goals of This Experiment

2. THEORIES

- 2.1. Formalism
- 2.2. Wave Function
- 2.3. Nucleon-Nucleon Interaction Model
- 2.4. Exchange Current Operator
- 2.5. Nucleon Electromagnetic Form Factors
- 2.6. Theories Compared with Deuteron Observables
- 2.7. Hybrid Quark Model

3. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURE

- 3.1. Overview
- 3.2. Electron Beam
- 3.3. Target System
 - 3.3.1. Overview
 - 3.3.2. Target Cell
 - 3.3.3. Target Loop
 - 3.3.4. Gas Handling System

- 3.3.5. Target Gas Control System
- 3.4. Slit and Collimator
- 3.5. OHIPS Spectrometer
- 3.6. OHIPS detectors
 - 3.6.1. Scintillators
 - 3.6.2. Vertical Drift Chambers
 - 3.6.3. DCOS Drift Chamber Readout System
 - 3.6.4. Cherenkov Counter
 - 3.6.5. Lead-Glass Shower Counters
- 3.7. Electronics and Data Acquisition
- 4. DATA ANALYSIS
 - 4.1. Overview
 - 4.2. Particle Identification
 - 4.2.1. Lead-Glass Gain Match
 - 4.2.2. Particle Identification Cuts
 - 4.3. Particle Track Reconstruction
 - 4.3.1. Overview
 - 4.3.2. Drift Time to Interception Distance
 - 4.3.3. Tracking Algorithm
 - 4.3.4. Using Lead-Glass Blocks as a Position Detector
 - 4.4. Spectrometer Optics
 - 4.5. Reconstruction Efficiency
 - 4.6. Background Rejection
 - 4.7. Solid Angle
 - 4.8. Extended Target Efficiency
 - 4.9. Density of The Gas Target
 - 4.9.1. Density of ^4He Gas
 - 4.9.2. Density of ^3He Gas
 - 4.10 Local Heating Effect
 - 4.10.1. Beam Spot Size Dependence
 - 4.10.2. Beam Current Dependence
- 5. RADIATIVE CORRECTION
 - 5.1. Overview
 - 5.2. Bremsstrahlung Losses
 - 5.2.1. Internal Bremsstrahlung
 - 5.2.2. External Bremsstrahlung
 - 5.3. Collision and Ionization Losses
 - 5.4. Convolution
 - 5.4.1. Full Line Shape
 - 5.5. Near Elastic Peak Approximation
 - 5.6. Comparison with the First Order Approximation

- 5.7. Target-Averaged Line Shape
- 5.8. Resolution Unfolding
- 5.9. Comparison with Experimental Line Shape
- 5.10. Radiative Correction Factor and Breakup Contribution
- 5.11. Summary of Chapter 5
- 6. EXTRACTING MAGNETIC FORM FACTORS
 - 6.1. Overview
 - 6.2. Cross Section
 - 6.3. Target Averaged Kinematics
 - 6.4. Charge Form Factor
 - 6.5. Coulomb Distortion Correction
 - 6.5.1. Ground State Charge Distribution and MI Transition Density
 - 6.5.2. Calculated Results
 - 6.6. Systematic Uncertainties
- 7. RESULTS AND DISCUSSION
 - 7.1. Comparison with World Data
 - 7.1.1. Charge Form Factor of ^4He
 - 7.1.2. Magnetic Form Factor of ^3He
 - 7.2. Discussion
 - 7.2.1. Comparison with Nucleon-Meson Basis Theories
 - 7.2.2. Comparison with Hybrid Quark-Hadron Model
 - 7.3. Conclusion
 - 7.4. Future
- APPENDIX A VDC Coordinates
- APPENDIX B OHIPS Matrix Element
- APPENDIX C Density Effect Correction
- APPENDIX D Ground State Charge Distribution and MI Transition Density
- APPENDIX E Cross Section of Carbon Targets
- BIBLIOGRAPHY

論文内容要旨

本研究では、高移行運動量領域における ^3He の弾性磁気形状因子(FM)を電子散乱によって測定することにより、中間子交換電流を始めとした核子以外の自由度の探索を行った。これらの効果は高移行運動量領域で顕著になるが、従来、 ^3He の磁気形状因子の測定領域は移行運動量 $Q^2 < 31\text{fm}^{-2}$ に限られていた。本研究では、既存の実験値領域をさらに高移行運動量領域($Q^2 = 43\text{fm}^{-2}$)へと広げた。また同じ ^3He 荷電形状因子では、移行運動量が 50fm^{-2} よりも高い領域でクォークのスケーリング効果が反映しているとの主張もあり、この領域は核子・中間子自由度からクォーク自由度への遷移領域として関心が高い。

少数核子系の理解は近年めざましく、3体系もFaddeev方程式を解くことにより信頼できる理論計算が

可能になった。こうして核子の自由度の理解が深まるにつれ、核子以外自由度への関心が高まり、そこで精度の高い ^3He 原子核の磁気形状因子の実験データが必要になっている。

^3He の磁気形状因子の第一の谷は移行運動量 17fm^{-2} 付近にあるが、核子のみの自由度を仮定したインパルス計算では、原子核のS状態とD状態の干渉効果によって谷が移行運動量 8fm^{-2} あたりに現われて、全く実験値を再現しない。この核子自由度に加え、中間子交換電流や核子励起と言った核子以外自由度の寄与を考慮することにより、理論計算の第一の谷は移行運動量 15fm^{-2} 付近に移動して、始めて実験値の傾向に合致する。従ってこの第一の谷の位置は、中間子交換電流や核子励起などの核子以外自由度を研究する上で極めて重要な手がかりの一つと言える。しかしながら、既存の実験値は誤差が大きく、その位置に不確定さが残っている。この現状は、この移行運動量領域において後方散乱でもクーロン散乱の寄与が大きく、断面積を占める割合の微少な磁気形状因子の検出が容易ではない事に起因している。移行運動量が 43fm^{-2} まで達すると核子以外の自由度が支配的になり、その取り扱いの違いによって理論計算は数桁に及ぶ違いをみせる。核子以外の自由度の効果を検証するために、この高移行運動量領域における実験が望まれていたが、冒頭でふれたように1982年にSaclay (仏)のグループが 31fm^{-2} まで測定して以来、その断面積の小ささゆえの実験の困難さから、永く更新されていなかった。この実験を実現するためには高電流と厚い標的、さらに膨大なバックグラウンドから効果的に真の散乱電子を抽出できる検出システムが必要不可欠である。我々は独自にこの厚い標的システムを開発し、さらに既存の検出器系を改造し、第一の谷領域と未踏の高移行運動量領域に狙いを定め ^3He 原子核の磁気形状因子を測定した。

実験はMIT-Bates研究所で、大電流のパルス電子ビームを用いて行った。 ^3He 標的は高密度を得るために23Kまで冷やし、さらに50気圧の高圧に保った。実験中の密度のふらつきは断面積を求める上で精度を落とす要因となりうるので、ビームのふらつきを相殺するように標的の温度を外部からコントロールすることにより、実験を通して密度の分散は1%以内に抑えられた。

今実験の主なバックグラウンドにパイ中間子があるが、新しく設置した粒子識別用のチェレンコフ検出器及び鉛ガラス検出器の情報を元に、オフライン解析で効果的に電子と中間子を識別する事ができた。さらにドリフトチェンバーの解析ソフトを改善し、粒子の飛跡の再現能力を高めた。これにより、正規の軌道からずれた飛跡をバックグラウンド事象としてより高い精度で除去することが可能となった。その結果1日1カウント弱という極めて希少なカウンティングレートの事象の抽出に成功した。また、使用した標的が非常に厚い事から、入射電子の標的中の輻射損失を含めたエネルギー損失に対する補正を細心の注意を払って行なった。

測定した断面積の内クーロン散乱の寄与は、既存の実験データを元に見積もった。この磁気形状因子の抽出過程の際には、運動学に依存したクーロン歪曲の効果を計算で求めて補正した。今回の実験と既存データとのconsistencyは、 $Q^2=5.8\text{fm}^{-2}$ のデータ点が既存データと誤差の範囲内で一致することから確認された。得られたデータは、Hadjimichael, Schiavilla, Sauer等の核子-中間子に基づいた理論計算の結果と比較した。HadjimichaelはSuper Soft Core (SdT)核子-核子ポテンシャルに Δ 中間子励起を伴う3核子力を用いて ^3He の波動関数を求めている。Sauerは核子- Δ Coupled Channel系についてFaddeev計算式をParisポテンシャルを用いて解いている。SchiavillaはArgonne-v18 (AV18)2体プラスUrabana-IX3体ポテンシャルで波動関数を求めている。Schiavillaの計算の最大の特徴は、波動関数を導いたのと同じポテンシャルモデル (AV18)を用いて、電流保存則を満たすように電流演算子を導出していることである。 $Q^2=18.8$ と 21.8fm^{-2} におけるデータ点は既存のSaclayのデータと妥当に一致したが、この第一の谷の位置は理論計算によってあまりよく再現されていない。特にSchiavillaの計算では、谷の位置が実験値よりも低移行方向に大きくずれている。一方、Sauerの計算結果は $Q^2=36.3$ と 42.6fm^{-2} におけるデータ点を一桁上回っている。彼の計算ではこの領域で Δ 粒子及び $\Delta\Delta$ 励起の寄与が支配的な役割を果たしており、我々のデータは、

彼の Δ 粒子励起の寄与の取り扱いに問題があるかもしれないことを示唆している。全体的には Hadjimichael の計算が最も実験値に近い予測をしているが、彼の計算は ${}^3\text{H}$ の荷電形状因子の再現に失敗している。このように核子・中間子自由度に基づく理論計算は、3体系の電磁形状因子を統一的に説明するには未だ至っていない。

クォーク自由度を考慮した理論計算としては、Hybrid Quark-Hadron (HQH)モデルがある。この計算では原子核の内部を分割パラメータ $\gamma_0 \sim 1.0\text{fm}$ を隔てて外側と内側にわけ、それぞれ核子-中間子自由度、クォーク自由度で記述している。この γ_0 および 6-quark クラスターのサイズを主なパラメータとして、Saclay までの実験値をフィットした結果、 $Q^2 \sim 35\text{fm}^{-2}$ 付近では 9-quark クラスターが顕著な寄与を果たすと予測している。HQH モデルはまだ現象論的な域を出ていないが、核子-中間子自由度ではより高い移行運動量領域で記述に限界をきたす可能性もあり、図における核子-中間子自由度に根差した計算が本実験値をよく再現できない原因の一つとして、quark 自由度の重要性を示唆する HQH モデルの計算結果は非常に興味深い。HQH モデルによる quark 自由度の寄与の見積もりは形状因子の高運動量領域のふるまいに敏感であるから、本実験データを含んで再フィットした計算結果が待ち望まれる。

論文審査の結果の要旨

核子や中間子が複数のクォークから構成される複合系であるという描像が確立されて以来、原子核内に於ける核子以下の自由度、特に、クォーク自由度の発現を直接観測する試みが続けられている。その一つに、電子散乱により原子核の電氣的磁氣的形状因子を高移行運動量領域まで測定することがあげられる。原子核に移行する仮想光子の運動量が大きくなればなるほど、空間分解能が良くなり核子以下の自由度の影響をより詳細に研究できるからである。そのためには、対象とする原子核の基底状態があいまいさなしに記述されることが必要であるが、近年、3体系ではFaddeev方程式に基づき信頼できる理論計算との比較が可能となっている。このため、従来から ${}^3\text{He}$ については、荷電形状因子が $Q^2 \sim 50 \text{ fm}^{-2}$ まで、磁気形状因子は $Q^2 \sim 30 \text{ fm}^{-2}$ までの測定がなされている。それらの結果に関しては、核子自由度のみでは実験値を再現できず、中間子交換電流や核子励起等の核子以下の自由度が重要な役割を果たしていることが指摘されている。

中川格提出の本論文は、 ${}^3\text{He}$ の磁気形状因子を運動量移行領域 $Q^2 = 43 \text{ fm}^{-2}$ というこれまで報告のない高移行領域まで測定し、各種理論計算と比較することにより核内でのクォーク自由度の観測可能性について論じたものである。

著者はまず、高移行運動量領域での磁気形状因子測定の重要性を示すと同時に、磁気形状因子は電子線後方散乱断面積において、クーロン散乱の寄与を取り除いて得られる測定量であるとの実験的な難しさを指摘している。次に、MIT-BATES研究所で行われた実験を詳細に記述している。特に、測定を成功するためには、大電流電子線、高密度 ${}^3\text{He}$ 標的、更に、粒子識別によるバックグランド除去が決定的であることを述べ、そのために開発された低温高圧ガス標的系の構造、密度を一定に保つための制御等の詳細について記述している。また、粒子識別に導入されたチェレンコフ検出器及び鉛ガラス検出器による効果的な電子識別と、ドリフトチェンバーによる飛跡の解析方法の改善によりバックグランド事象を高い精度で取り除くことができ、1日1カウントという極めて希少な散乱電子線事象の抽出に成功した。測定した断面積のうち、クーロン散乱の寄与は既存の実験データから見積り、 $Q^2 = 43 \text{ fm}^{-2}$ までの磁気形状因子を初めて精度良く求めた。著者は更に、得られたデータを中間子交換流と Δ 励起を考慮した計算と比較検討し、現状の核子・中間子自由度に基づく理論計算は、3体系の電磁形状因子を統一的に説明するには至っていないと結論し、クォーク自由度を取り入れた計算の必要性を強調している。

このように本論文は、 ${}^3\text{He}$ の磁気形状因子をこれまでにない高移行運動量領域までにわたって測定した初めての実験であり、核内の核子・中間子の描像に関し基礎となる知見をもたらすと共に、核内クォークの観測の可能性を指摘することにより、これまでにない新たな知見をもたらしている。以上のことは、著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、中川格提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。