

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05442

研究課題名(和文)シグマ陽子散乱の位相差導出によるクォークパウリ斥力芯の大きさの決定

研究課題名(英文) Determination of the size of the repulsive core due to the quark Pauli effect in the Sigma-Nucleon interaction by a Sigma-proton scattering

研究代表者

三輪 浩司 (Miwa, Koji)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50443982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,100,000円

研究成果の概要(和文)：我々はJ-PARCハドロン実験施設にてシグマ(Σ)陽子(p)散乱実験を行い、高統計で Σ -p 散乱事象を検出する実験手法を確立した。粒子は寿命が短く数cm飛行すると崩壊してしまうため、散乱事象を検出することが非常に困難であったが、出来る限り強い強度のビームを用いて、粒子を生成することと、散乱実験に特化した反跳陽子検出器を開発することで、この実験を可能にした。我々は過去の統計の約100倍の量に当たる数1000の Σ -p 散乱事象の同定を見込んでいる。今後、散乱微分断面積を導出することにより、2体の相互作用を散乱実験を通して解明するというプロセスを確立できると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在まで、シグマ粒子のようなストレンジクォークを持つハイペロンと陽子の相互作用の究明は、ハイペロンを原子核に入れたハイパー核の研究から行われていた。これは散乱実験が困難であったことが大きな要因である。本研究において Σ と陽子の散乱実験の手法を確立し、 Σ -Nの2体の相互作用を散乱実験から決定する道筋を作ることが出来た。今後は Σ 粒子の他に Λ 粒子と陽子の散乱実験なども検討し、2体の相互作用は散乱実験で決定し、原子核の持つ多体効果をハイパー核構造から調べるといった新たな流れを確立できると考える。これは宇宙に浮かんでいる巨大な原子核とも言える中性子星の内部構造を解明することにも繋がると考えている。

研究成果の概要(英文)：We have performed a Sigma proton scattering experiment at the J-PARC hadron experimental facility and could establish the experimental method for a high statistics Sigma proton scattering experiment. Because the lifetime of Sigma hyperon is very short and it decays just after a few cm flight, the scattering experiment between Sigma hyperon and proton was quite difficult. In order to overcome the experimental difficulty, we proposed a new experimental method where a high intensity pi beam was used to produce a lot of Sigma hyperons. A recoiled proton detector which is dedicated to this experiment was developed. In our experiment, we could identify about 150 Sigma proton scattering events from the analysis of two-days beam time. We expect about a several thousand of scattering event can be identified during the whole experimental data which is about 100 times more statistics. We will soon derive a differential cross section.

研究分野：原子核物理学

キーワード：ストレンジネス核物理 ハイペロン陽子散乱実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核子を原子核として束縛する源の力である核力は、遠距離では中間子の交換に基づく引力があり、一方で核子が重なり合うような短距離では大きな斥力となるということは豊富な陽子陽子散乱実験から実験的に分かっている。しかし、なぜこのような大きな斥力芯が出来るのかという、その物理的起源はいまだに明らかではない。核子同士が重なり合うような近距離の相互作用であるので、陽子を構成するクォークの描像に立って、斥力芯の起源を理解することが重要となる。クォーク描像によるバリオン間相互作用の理論では、核力の斥力芯はクォーク間のカラー磁気相互作用とクォークレベルでのパウリ斥力によって形成されると記述される。核力をハイペロンを含めたバリオン間力に拡張することにより、SU(3)フレーバー対称性の下で生じる多重項の寄与によって、近距離での相互作用は非常に強い斥力芯や逆に引力芯など、多彩で興味深い性質を示すことが、クォーク描像にたった理論によって予言され、現在では格子QCDシミュレーションによっても、定性的に予言されている。その特徴的な多重項の一つが、 Σ^+p チャンネルに現れる多重項(10)によるクォークレベルでのパウリ効果による非常に大きな斥力芯の存在である。 Σ^+ はアイソスピンが1であるため、 Σ^+p の4つのアップクォークのうち2つが、スピン、カラーともに同じ状態を取る確率が非常に高く、斥力芯が非常に高く、遠距離まで押し出されていると予言されている。この斥力の強さを実験的に定量的に決定することは、バリオン間相互作用の近距離斥力芯の起源の解明する上で非常に重要であった。

現在まで、粒子に代表されるハイペロンと核子の相互作用を調べるには、粒子を原子核の中に取り入れたハイパー核を作り、そのエネルギー構造を精密に調べることで、原子核の構造から2体のN相互作用を抜き出すという方法が用いられてきた。一方で、本研究での研究対象である粒子は、N相互作用が斥力的に働くチャンネルが多いため、粒子を原子核の中に入れてハイパー核を作ることは非常に難しい(実験的には ^4He のみが同定されている)ため、ハイパー核の構造からN相互作用を詳細に調べることは不可能である。そのためN相互作用は、そのスピンおよびアイソスピンの依存性などの詳細な実験データは非常に不足している状況であった。そこで粒子と核子との相互作用を、アイソスピンを分けて直接的に測定するには、粒子と陽子の散乱実験を行う必要があるわけである。一方で、ハイペロンは寿命が短く、生成後に数cm走ると弱い相互作用で崩壊してしまうため、陽子との散乱事象を高統計で測定することは極めて難しく、現在でもハイペロンと陽子の散乱の事象数は数100イベント程度にとどまっている。

このような状況の中で、この実験的な困難さを克服し、と陽子の散乱実験の実験的手法を確立し、散乱実験からN相互作用を調べる必要があった。逆に、散乱実験が可能になれば、 ^+p 弾性散乱(アイソスピン3/2)、 ^-p 弾性散乱(アイソスピン3/2および1/2の重ね合わせ)、 $^-p \rightarrow ^-n$ 非弾性散乱(アイソスピン1/2)と、アイソスピンを分離し、N相互作用を調べることが可能となる。また、散乱断面積のビームの運動量依存性を調べることが出来れば、それは相互作用の位置依存性を調べていることと同義である。そのため散乱実験を通した直接的なN相互作用の研究が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、と陽子の散乱の微分断面積を高統計で導出することによって直接的にN相互作用の解明を目指す。そのため我々は次の3つの反応の微分断面積の測定を行う。

- (1) ^+p 弾性散乱
- (2) ^-p 弾性散乱
- (3) $^-p \rightarrow ^-n$ 非弾性散乱

特に ^+p のチャンネルは系に含まれる4つのアップクォークのうち2つがスピンとカラーが同じ状態になり、クォークレベルでのパウリ効果により非常に斥力が強いとクォーク模型では予想しており、それに伴って微分断面積も大きくなることが予想されている。実験的に微分断面積を10%程度の精度で測定することによって、これらの理論計算にフィードバックをかけることを目的としている。また重心系で90度の微分断面積の大きさからS波の散乱の位相差の値を導出することが出来るため、この位相差の値を実験的に決定することによりクォークパウリ効果による斥力芯の大きさに対して定量的な情報を与えることが大きな目的の一つである。また上記の3つのチャンネルの微分断面積を測定することにより、系統的なN相互作用の解明を行うことも目的の一つである。

3. 研究の方法

我々の最終的な目標はJ-PARC K1.8ビームラインにおいて、シグマ陽子(^-p)散乱実験(J-PARC E40)を遂行し、 ^-p 散乱の微分断面積を導出することである。E40では液体水素標的を生成および ^-p 散乱標的として用い、終状態の粒子を標的周囲の反跳陽子検出器で捕らえることにより、「生成」と「散乱」の2つの二体運動学を再構成し、 Σ^+p 散乱事象を同定する新たな方法を開拓する。粒子の生成には、J-PARCで供給される大強度の ^+p ビームを用いて、 $^+p \rightarrow K^+ + ^+p$ 反応を用いて生成する。過去の実験で、 ^-p 散乱事象の検出数が非常に乏しかった原因の一つは、この生成される ^-p の量自体が非常に少なかったことが挙げられる。我々は、20M/spill (spillはビームの繰り返しの周期で5.2秒の繰り返しのうちの約2秒間ビームが供給される)の大強度

のビームを使用することによって、一日あたりそれぞれ 10^6 および 4×10^6 の $-$ および $+$ を同定するように改善を行う。そして液体水素標的を取り囲む大立体角の反跳陽子検出器 (CATCH) を設置し、 p 散乱で反跳された陽子の飛跡とエネルギーを測定し、 p 散乱を同定する。CATCH は、ビーム方向には広い有感領域を持ちつつ、動径方向にはコンパクトな 3 次元飛跡検出器である円筒形ファイバー検出器 (CFT) および BGO カロリメーターからなり、散乱陽子の散乱角度、エネルギーを測定する。

本研究で開発の中心となったのが、図 1 に示す CATCH の開発であった。CFT は約 5000 本のシンチレーションファイバーを手作業で配置することによって製作を行った。この 5000 本のシンチレーションファイバーは 1 本ずつ光検出器 MPPC を用いて読み出すこととしたため、MPPC の多チャンネル読み出しに特化した読み出し回路 (VME-EASIROC) の開発を行った。また BGO カロリメーターはシンチレーション光の時定数が約 300 ns と長いので、信号のパイルアップ事象を分離するために、Flash ADC による波形読み出しを選択した。実際に CFT と BGO カロリメーターを組み合わせ CATCH 検出器群として組み上げた。この CATCH の性能が十分であるかを評価するために、2017 年 1 月にまず東北大学のサイクロ施設 (CYRIC) にて 80 MeV の陽子ビームを用

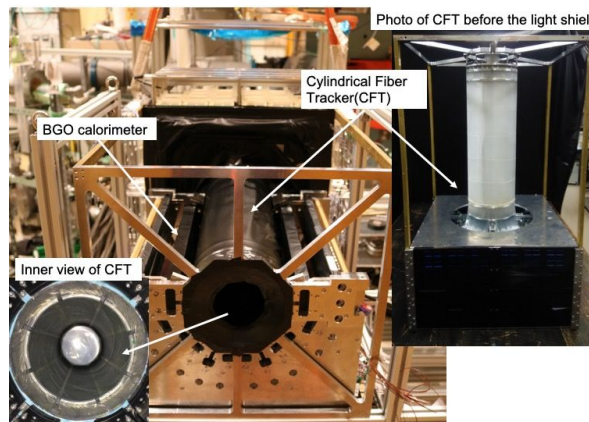


図 1 : CATCH 検出器の組み上げ時の写真。一番内側に右上の写真に示すファイバー検出器がありその周りを BGO 検出器が取り囲む構成となっている。

いて陽子陽子 (pp) 散乱の微分断面積を測定する実験を行った。これで pp 散乱が十分に同定できることおよび、導出した微分断面積の角度依存性 (ビーム量を測定できなかったため断面積の絶対値の測定は出来なかった) が、これまでの実験データとコンシステントであることを確認し、その後 2017 年の 3 月、CATCH を J-PARC に移送して、本格的に陽子散乱実験に取り掛かった。2017 年の 8 月から K1.8 実験エリアをシグマ陽子散乱実験に最適化されたセットアップにするために、磁気スペクトロメーターである KURAMA スペクトロメーターの再配置を行い、2017 年の 12 月には CATCH 検出器を K1.8 実験エリアにインストールした。2018 年の 2 月に約 2 日程度の J-PARC のビームタイムを用いて、KURAMA スペクトロメーターおよび CATCH のコミッションングを行い、各検出器が正常に動作していることを確認することが出来た。この 2 月のビームタイムでは液体水素標的ではなく、ポリエチレン標的を用いたが、その後液体水素標的を CATCH 検出器の中に挿入することによって、すべてのセットアップを完了し、2018 年の 6 月に、シグマ陽子散乱実験の物理データを 2 日程度収集した。これについては研究成果で詳しく述べる。我々の提案したこの実験手法で p 散乱事象を効率的に検出することが出来ることをこの 2 日の実験で証明することが出来た。その後、2019 年の 2 月から約 2 ヶ月に渡って、 p 散乱実験の残りのビームタイムを行い、データの収集を行うことが出来た。

4. 研究成果

2018 年 6 月に行った 2 日間の物理データ収集において、まず p 散乱実験から開始した。1.32 GeV/c の $-$ ビームを用いて $p \rightarrow K^+$ 反応によって $-$ を生成し、 $-$ によって反跳された陽子を CATCH で捉えることにより p 弾性散乱事象を捉える。また同時に $p \rightarrow n$ 反応も測定することが可能である。我々は 2 日のビームタイムで約 10^6 の $-$ の生成を同定し、これを $-$ ビームと呼ぶことにする。過去の KEK の実験では数ヶ月のビームタイムを用いて同定できた $-$ ビームの数が約 180,000 であったことを考えると、圧倒的に $-$ ビームの量を増やすことができていくことが分かる。この実験で得られた結果を図 2 に示す。これらの図は、 $p \rightarrow n$ 反応 (左図) および p 弾性散乱 (右図) に対して運動学が一致しているかを調べたものであり、x 軸の 0 の付近のピークがそれぞれの散乱イベントに対応している。このように非常に高い統計的な有意度を持って散乱事象を同定することが出来ている。同定した散乱事象の数は、 p 弾性散乱および $p \rightarrow n$ 反応の双方に対して約 150 であった。これは過去の KEK の実験で 40 事象しか同定できなかったことと比べると、散乱事象の数も格段に増えていることが分かる。この 2 日間の実験で、我々の実験手法の有効性を示すことが出来た。2019 年 2 月からの物理実験では $-$ ビームを合計で 17×10^6 、そして $+$ ビームを 40×10^6 貯めることが出来た。これにより p のチャンネルでは合計で数千散乱事象が、また $+$ p のチャンネルでも数千散乱事象が同定されることが期待される。現在、詳細な解析を行っている段階ではあるが、出来る限り速やかに微分断面積の導出まで行う予定である。

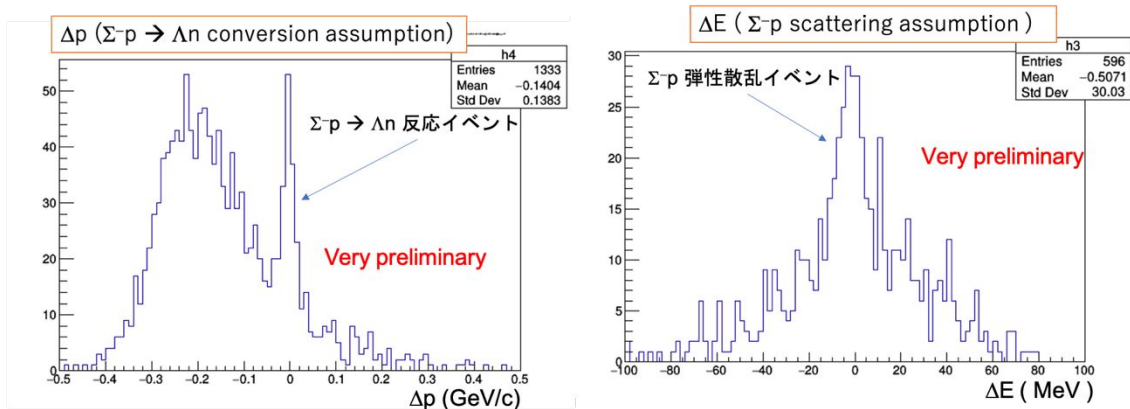


図 2: $\bar{p} \rightarrow n$ 反応および \bar{p} 弾性散乱の運動学的な一致を見たもの。x 軸が 0 の領域にあるピークがそれぞれの散乱事象に対応する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

- (1) Nakada Yoshiyuki, Akazawa Yuya, Hasegawa Shoichi, Hayakawa Shuhei, H., Honda Ryotaro, Ikeda Michihiko, Miwa Koji, Sakaguchi Atsushi
 “Scattered Proton Detection System for \bar{p} Scattering Experiment with the Cylindrical Scintillating Fiber Tracker and BGO Calorimeters”
 JPS Conf. Proc. 17 (2017) 043002, 査読有り
- (2) K. Miwa et. al
 High Statistics \bar{p} Scattering Experiment Using High Intensity Pion Beams at J-PARC
 JPS Conf. Proc. 17 (2017) 041002, 査読有り

[学会発表](計 16 件)

- (1) K. Miwa “Current status of \bar{p} scattering experiment at J-PARC”
 The 52nd Reimei Workshop (国際学会), 2019 年
- (2) Y. Akazawa “Operation of multi-MPPC system for cylindrical scintillation fiber tracker”, PD18(国際学会), 2018 年
- (3) Y. Nakada “ \bar{p} Scattering Experiment at J-PARC and the Analysis Status”
 QNP2018, 2018 年
- (4) Y. Nakada “Analysis Status of \bar{p} -p Scattering Experiment at J-PARC”
 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, (国際学会), 2018 年
- (5) N. Fujioka “The analysis for \bar{p} -yield in \bar{p} scattering experiment (J-PARC E40)”
 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, (国際学会), 2018 年
- (6) R. Honda “DAQ upgrade for the use of the high intensity beam in the \bar{p} scattering experiment (J-PARC E40)”
 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, (国際学会), 2018 年
- (7) K. Miwa “ \bar{p} scattering experiment at J-PARC -- results of commissioning run --”, HYP2018, (国際学会), 2018 年
- (8) K. Miwa “Experimental proposal of hyperon proton scattering experiment at the K1.1 beamline”, International workshop on the project for the extended hadron experimental facility of J-PARC(招待講演)(国際学会), 2018 年
- (9) Koji Miwa “Study of the \bar{p} -N interaction from the \bar{p} +p scattering experiment”, NSMAT2016(国際学会), 2016 年
- (10) Yuya Akazawa “Study of three-nucleon force with a new experiment of a proton-deuteron break-up reaction”, NSMAT2016(国際学会), 2016 年
- (11) Kazuya Kobayashi “Development of an aerogel Cherenkov counter for the \bar{p} scattering experiment”, SNP school(国際学会), 2016 年
- (12) Shotaro Ozawa “Construction of cylindrical fiber tracker and its readout preparation”

- for a p scattering experiment ” ,SNP school(国際学会), 2016 年
(13)Koji Miwa “ High statistics Sigma p scattering experiment using high intensity pion beams at J-PARC ” , HYP2015 (国際学会)、2015 年
(14)Koji Miwa “ Strangeness nuclear physics with high intensity secondary beams ” , HINT2015(国際学会) , 2015 年
(15)Koji Miwa “ Hyperon-proton scattering experiment using Kaon and pion beams ” ,(国際学会) 2016 年
(16)三輪浩司 “ p 散乱実験による N 相互作用の研究 ” ,日本物理学会, 2015 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号(8桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名 :

ローマ字氏名 :

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。