

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244048

研究課題名(和文) 中間子束縛系生成反応と崩壊の同時測定によるハドロン質量起源の解明

研究課題名(英文) Study of hadron mass origin through simultaneous measurements of generations and decays of meson bound states in nucleus

研究代表者

小沢 恭一郎(Ozawa, Kyoichiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：20323496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円、(間接経費) 10,560,000円

研究成果の概要(和文)：原子核中での中間子の束縛状態探索と不変質量測定のための二つの測定を同時に行い、強い相互作用によって動的に中間子の質量が生まれる過程に対する明確な実験的知見を与えることを目的に研究を遂行した。実験には、線検出器(BGO EGG検出器)、薄型シンチレータ、円筒型ドリフトチェンバーを用いる。これらの検出器は完成し、Spring-8において検出器の性能評価を行い、炭素標的を用いた中間子束縛状態の有無に関するデータ収集と解析を進めた。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we perform an experiment to study a process of a dynamic mass generation of hadrons. The experiment aims to measure clearly bound states and invariant mass spectra of omega mesons in nucleus, simultaneously. Detectors used in the experiment are gamma-ray detectors (BGO EGG), thin scintillators and a cylindrical drift chamber (CDC). The CDC has a narrow drift length (1.25 mm) and it is difficult to design and manufacture the CDC. Constructions of these detectors are finished. We evaluate performances of these detectors using a gamma-ray beam at Spring-8. The detectors show enough performances for our experiment. Achieved energy resolution of the BGO EGG for a gamma-ray of 1 GeV energy is 1.2% and a reconstruction of neutral pi meson is already succeeded using data taken at Spring-8. Physics data to search for a bound state of omega mesons in nucleus are collected using a carbon target and a gamma-ray beam at Spring-8 LEPSII.

研究分野：ハドロン物理実験

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：実験核物理 ハドロン質量起源 カイラル対称性 対称性の自発的破れ 中間子 線検出器 円筒型ドリフトチェンバー MPPC

1. 研究開始当初の背景

(1) ハドロンの動的な質量獲得

我々の宇宙において、眼に見える物質部分は、主に陽子や中間子などの強い相互作用をする粒子(ハドロンと呼ばれる)を基に構成されている。この強い相互作用の性質の実験的解明とそれを支配する理論(量子色力学:QCD)の研究は、近年の宇宙論・原子核物理学の重要な課題のひとつである。

陽子や中間子は、クォークと呼ばれるさらに小さな粒子から成り立っている。そのクォークの質量は、ヒッグス機構により元々は数 MeV 程度の質量しか持たないと考えられているが、陽子、中性子中でのみかけの質量は約 300MeV 程度となっており、その差をどのように獲得したかが長年の研究課題となってきた。この質量獲得機構に関する有力な考えが、カイラル対称性の自発的な破れによる動的な質量の獲得である。

カイラル対称性は、自然界でしばしば見られる右手系と左手系を保存する対称性である。強い相互作用の存在する“真空”(QCD の真空)では、クォークと反クォークが対になってボーズ・アインシュタイン凝縮をおこし、そのポテンシャルによりこの対称性が自発的に破れ、その結果、元々数 MeV の裸の質量しか持たないクォークが約 300MeV の動的質量を獲得すると考えられている。この描像では反クォーク・クォーク凝縮の量と動的質量には密接な関係があり、原子核などの有限密度下では、反クォーク・クォーク凝縮量に変化が起こり、それがさらに中間子質量分布の変化を引き起こすと予想されている。

そのため、この有限密度下での中間子質量分布の変化とその影響を測定することが、ハドロン(内部クォーク)の質量獲得過程に対する大きな実験的情報となる。

(2) 過去の実験方法

原子核中での中間子質量分布の測定に関する研究に関しては、二つのアプローチが存在する。一つ目は原子核内で崩壊した中間子の質量分布を直接的に測定するというもの。二つ目は原子核内に中間子を束縛した系を生成し、その束縛状態に現れる質量変化の影響を詳細に調べるというものである。

直接測定の方法においては、理論的に予想される反クォーク・クォーク凝縮の量などから計算されたベクター中間子の質量分布と実験結果が比較される。ここでベクター中間子を用いるのは、クォーク間の相互作用項が小さく、中間子質量がクォーク質量を素直に反映するという良い性質を持つからである。我々は、前駆的な実験として、KEK の PS 加速器を用いた実験を行い、図に示すようなベクター中間子の質量変化を示す証拠を得た。

中間子を示すピークの左側に予想分布との差として中間子質量の変化が観測されている。

これに対して、ドイツの ELSA での TAPS 実

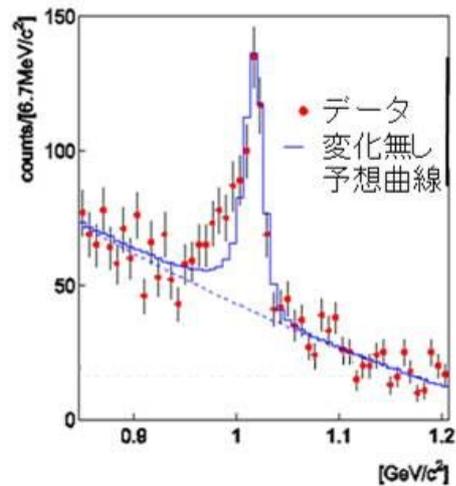


図: KEK実験の結果

験では、線を原子核中に入射し、中間子を生成し、その0中間子と線への崩壊を捉え、質量分布を得た。しかし、この実験では、分布に変化は得られず、実験自体に質量変化を捉えるための十分な感度が無かったという結論となっている。

このような既存の実験において得られた分布は、原子核外で崩壊した中間子が持つ自由空間中での質量分布を含んでいる。それに対して、原子核内で崩壊した中間子のみが質量変化を示すが、TAPS 実験ではそのような中間子の統計としては不十分であった。

また、理論的に予想される原子核密度下での中間子質量分布を実験的に取り出すことに成功した実験は無い。このことが、過去の実験での本質的な問題であった。

本研究は、この問題を解決するために2番目の方法である束縛系を用いる方法と併用する実験手法を編み出した。

2. 研究の目的

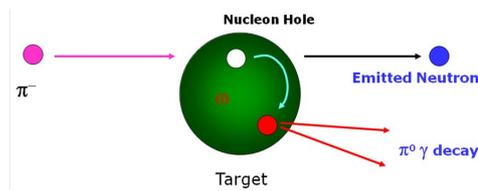
本研究の目的は、ハドロンが動的に質量を獲得する過程に対する基礎的な実験的情報を提供することにある。動的に質量獲得する機構であるカイラル対称性の自発的な破れの程度は、媒質中の反クォーク・クォーク凝縮量に因っている。そのため、この機構の詳細を明らかにするためには、媒質中の反クォーク・クォーク凝縮量の評価が重要である。

本研究では、有限密度下(原子核中)での反クォーク・クォーク凝縮量を評価するために、ベクター中間子の質量分布を測定する。

本研究では、これまでの実験の困難を克服するために、束縛系を用いる方法と崩壊質量の直接測定を併用する。

これにより、原子核内に束縛された中間子のみを対象とした測定を行うことになり、原子核密度中の中間子を捉えていることを担保し、原子核中での質量分布を得ることが可能となり、カイラル対称性の破れを基礎とした理論的予想との直接的な比較が可能となる。このような実験は、J-PARC においてハドロ

ンビームとハドロン反応を用いて十分な統計を得ることでしか実現できない。この実験は J-PARC E26 実験として採択されている。測定概念を図で示す。



図：測定概念図

3. 研究の方法

本研究は、茨城県東海村に建設中の J-PARC 加速器のハドロン実験ホール・K1.8 ビームラインを用いて行う。具体的には π^- 中間子ビームと原子核中に存在する陽子との、 $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ 反応を用いて π^0 中間子を生成する。入射 π^- 中間子の運動量を適切に選び、反応中性子が 0° 方向で入射 π^- 中間子とほぼ同じ運動量を持っていることを要求する。その結果、 π^0 中間子を原子核内に静止（束縛）して生成する。さらに、その π^0 中間子 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 崩壊を捉える。これには大立体角の γ 線検出器を用いる。

本実験では、 π^- 中間子ビームと原子核中に存在する陽子との、 $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ 反応を用いて π^0 中間子を生成する。入射 π^- 中間子の運動量を適切に選び、反応中性子が 0° 方向で入射 π^- 中間子とほぼ同じ運動量を持っていることを要求する。その結果、 π^0 中間子を原子核内に静止（束縛）して生成する。KEK で申請者が行った実験から予想される 9% (50MeV/c²) 程度の質量減少が存在する場合、 π^0 中間子の運動量を 1.8GeV/c で入射すると π^0 中間子を運動量を持たずに生成できる。K1.8 ビームラインでは、最大 2.0GeV/c の運動量に対応しており本実験の要求を満たしている。

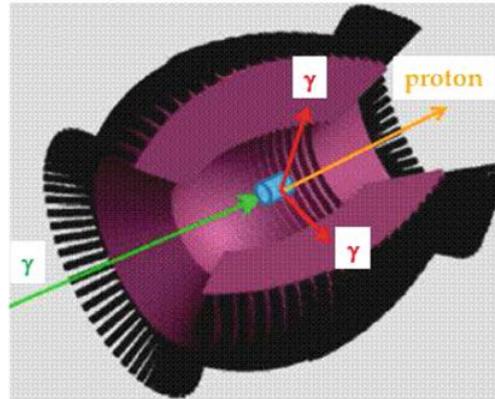
このように生成した π^0 中間子を、前方で反応中性子を捉える Missing Mass 法（束縛系の測定）と $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 崩壊による不変質量分布（質量の直接測定）の二つの方法により同時に測定する。さらに、液体水素標的・炭素標的・カルシウム標的・ニオブ標的などを用い、原子核依存性を測定することで、実験的な不定性を最小限に抑える。

このエネルギー領域での π^0 中間子に関して、生成断面積を測定した実験はあるが、束縛系の実験データは存在しない。束縛系に関する理論的な予測が存在するのみである。そのため、 π^0 中間子束縛系の探索自体が π^0 中間子核子相互作用の基礎測定として重要である。この束縛系の測定実験において質量の直接測定を同時に行うことで、低運動量領における運動学的な不定性の少ない低バックグラウンドの実験が可能となる。

束縛系の測定には、前方 0° 方向に出る中性

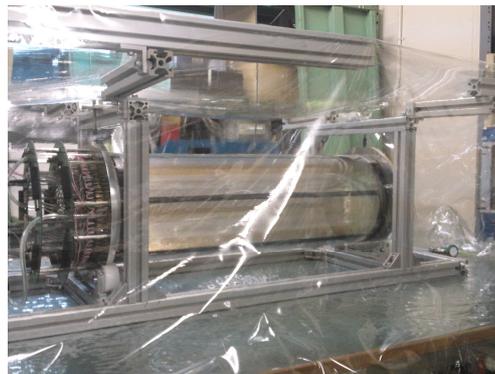
子をシンチレーション検出器による飛行時間測定を用いて検出する。この実験に必要な中性子検出器は、科研費・「若手研究(A)」・「中間子束縛系の生成と崩壊の同時測定による中間子質量起源の探索」により製作した。

π^0 中間子の質量測定は、 π^0 中間子と γ 線への崩壊を用いて測定される。この崩壊からの π^0 中間子はさらに二つの γ 線に崩壊するので、計 3 つの γ 線を検出する。この γ 線検出に十分な分解能を持った大立体角の検出器を用いる。これには、東北大学との協力で製作した BGO EGG 検出器を用いる。BGO EGG 検出器を図に示す。



図：BGOEGG 検出器

また、束縛状態の測定において、バックグラウンドを抑制するために、 π^0 中間子が原子核中の核子と反応して生成する低運動量陽子などを測定するための円筒型ドリフトチェンバーとシンチレータを設置した。製作した円筒型ドリフトチェンバーの写真を図に示す。



図：円筒型ドリフトチェンバー

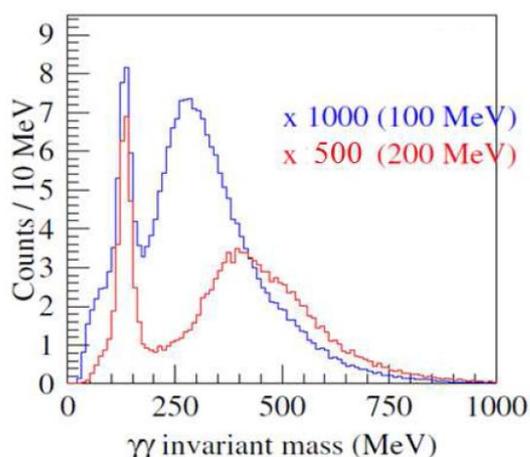
4. 研究成果

残念ながら J-PARC 実験施設でのデータ収集は、実験施設の状況により遂行できなかったが、検出器の準備は完了し、Spring-8 LEPS II ビームラインに導入することで、検出器の性能評価と本研究の基礎データとなる π^0 線ビームによる物理データの収集に成功した。この物理データにより本研究の目標の一つである炭素標的を用いた π^0 中間子原子核束縛

状態の有無に関するデータ解析も進行中である。

本研究で製作した実験用検出器としては、線測定用電磁カロリメータ(BGO EGG 検出器)、バックグランド事象抑制のための荷電粒子測定用円筒型ドリフトチェンバー、薄型シンチレータ - がある。これらの検出器は、世界最高性能を達成しており、この検出器群の開発が大きな学術的成果といえる。

線測定用電磁カロリメータは、1320 個の BGO 結晶を用いた 線検出器で、前方 24 度から後方 144 度までの大立体角をカバーしつつ、1GeV の光子に対して、1.3%の高分解能を達成している。既に、LEPS II ビームラインにおいてデータ収集が開始されており、図に示すように、2本の 線から π^0 中間子の再構成に成功している。

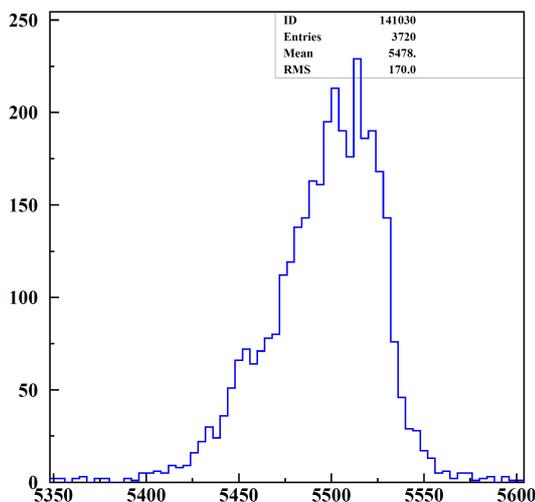


図：2本の 線の不変質量分布。左側の細かいピークが π^0 中間子に対応。2種類の線は、閾値の違いによるもの。

円筒型ドリフトチェンバーと荷電粒子検出用シンチレータ - は、この 線検出器の内側、標的まわりに設置される。荷電粒子検出用シンチレータは、円筒型ドリフトチェンバーと 線検出器の間の狭スペースに設置され、また、長手方向も 線検出器のフレームの中に設置する都合上、アクセプタンスぎりぎりの設計が必要であった。そのため、5mm厚のシンチレータ - の端面にMPPCを5つ接着し、シーケンシャルに読み出すなどの工夫を行い、十分な光量と検出効率を得る検出器を開発した。

円筒型ドリフトチェンバーは、荷電粒子を捉えることでバックグランドの抑制と反応点の測定精度の向上を狙ったものである。そのため、ビーム方向(ワイヤ方向)に位置を測定する必要があり、また、 線などの中性粒子との同時測定をし運動学的な再構成を行う必要上、高い測定効率が要求されている。そのため、4層を確保し、ステレオ角の違う層の組を2組用意した。これを10cmの間に収めるために、ワイヤピッチ2.5mmという極めて狭ピッチの円筒型ドリフトチェンバ

ーの製作に成功した。これも、Spring-8 LEPS II で検出器性能の評価のためのデータ収集を行った。以下に、収集した円筒型ドリフトチェンバーの時間分布を示す。



図：円筒型ドリフトチェンバーの時間分布(横軸は、ns)

また、本研究において使用する J-PARC ビームラインの軌跡測定に用いるガス電子増倍器(GEM)や電子同定検出器の開発も行い、十分な性能が達成できた。

今後は、完成した検出器を用いて Spring-8でのデータ収集を続けつつ、可及的速やかに J-PARC での実験を遂行する予定である。これにより、原子核内での π^0 中間子の質量分布が確定し、反クォーク・クォーク凝縮に関する基礎的な実験的知見が得られる予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

Y. Komatsu, K. Aoki, K. Ozawa 他 13名(10 番目), “Development of the GEM tracker for the J-PARC E16 experiment”, Nucl. Instrum. and Meth. A732(2013), 241-244, 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2013.08.024

R. Hashimoto, T. Ishikawa, S. Masumoto, K. Ozawa 他 31名(23 番目), “Study for the π^0 -N Interaction Through Photoproduction Near the Threshold”, Few-Body System 54 (2013), 1135-1140, 査読無
DOI: 10.1007/s00601-013-0658-5

K. Ozawa, “Status and hadron physics program at J-PARC”, EPJ conf. 37 (2012), 01005-1-01005-5, 査読無
DOI: 10.1051/epjconf/20123701005

(3)連携研究者
なし

K. Aoki, Y. Komatsu, K. Ozawa 他 13 名 (10 番目), "A development of HBD for the J-PARC E16 experiment", Nucl. Instrum. and Meth. A628(2011), 300-303, 査読有 DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.340

〔学会発表〕(計 18 件)

小沢 恭一郎、「New primary beam line and related physics at J-PARC」, The first Heavy-Ion workshop、2014年3月17日、茨城県東海村

小沢 恭一郎、「高運動量ビームラインと核物質中でのハドロン質量変化」, 日本物理学会 秋の分科会(招待講演)、2013年9月20日、高知大学

小沢 恭一郎、「原子核中でのベクター中間子測定の物理と課題」, 研究会「原子核媒質中でのハドロン研究 = 魅力と課題 =」, 2013年8月6日、茨城県東海村

小沢 恭一郎、「QCD 媒質中でのハドロン物理」, 研究会「四国セミナー」(招待講演)、2012年12月15日、高知大学

小沢 恭一郎、「New beam line at J-PARC」, 韓国物理学会(招待講演)、2012年10月24日、韓国

小沢 恭一郎、「Status and hadron physics program at J-PARC」, MESON2012、2012年5月31日、ポーランド

小沢 恭一郎、「Measurements of meson mass at J-PARC」, Zimanyi school、2011年11月30日、ハンガリー

〔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

<http://high-p.kek.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小沢 恭一郎 (OZAWA, Kyoichiro)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 20323496

(2)研究分担者

なし