

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20684008

研究課題名（和文）  $\omega$ 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

研究課題名（英文） Study of meson mass origin by simultaneous measurements of production of omega bound states and its decays

研究代表者

小沢 恭一郎 (OZAWA KYOICHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号：20323496

研究成果の概要（和文）：クォークをその構成要素とする陽子や中間子などのハドロン粒子は、クォークが単体で持つ質量の合計よりも数十倍程度の大きな質量を持つことが知られている。本研究では、その質量起源を実験的に調べるため中間子の原子核内における質量分布の精密測定を目指す。実際には、 $\omega$ 中間子と呼ばれる特殊な中間子に焦点を絞りその生成と崩壊を同時に捉えることによる選択的な測定を行う。当初計画にあった中性子測定装置の製作に成功した。

研究成果の概要（英文）：Hadrons, such as proton or meson, consists of quarks. It is known that hadrons have larger mass than sum of quark mass. In this study, we aim to measure mass distribution of mesons in nucleus precisely to study origin of hadron mass experimentally. We will perform an exclusive measurement using omega meson and simultaneous detection of production and decay processes. We have succeeded to construct a neutron detector.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	17,500,000	5,250,000	22,750,000

研究分野：原子核（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：原子核（実験）、ハドロン質量の起源、カイラル対称性、 $\omega$ 中間子、J-PARC、中性子検出器、 $\gamma$ 線検出器

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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。特に、摂動論の適用できない領域での強い相互作用の振舞いが重要視されている。

(2) 中間子を構成するクォークの質量は、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。しかし、実際のみかけの質量は約 300MeV 程度であり、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存在するクォーク・グルーオンの影響で反クォーク・クォーク凝縮量に変化が起こり、それが中間子質量の変化を引き起こすと予想されている。

- (3) そのため、質量起源を実験的に調べる方法として、原子核中での中間子の質量分布を測定することが有力なアプローチとして行われてきた。この原子核中での中間子質量分布に関する測定に関しては、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、その束縛状態のエネルギー準位を詳細に調べるといったものである。現在までの研究では、それぞれのアプローチを独立した実験として遂行しており決定打に至っていない。

## 2. 研究の目的

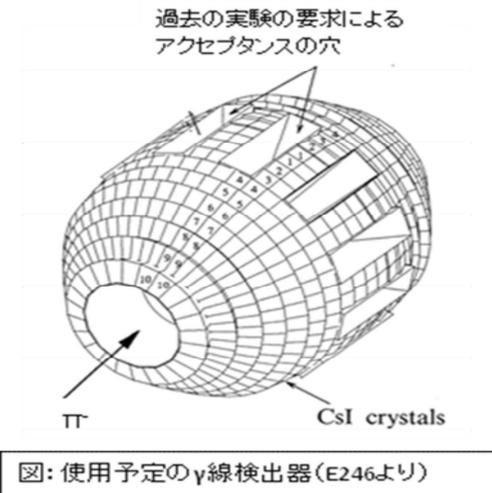
- (1) これまでの研究では、前項で説明したそれぞれのアプローチを独立した実験として遂行しており、原子核中での中間子質量分布に関する決定打に至っていない。本研究では、原子核中での中間子の束縛状態と崩壊時の質量の二つの測定を同時に行い、強い相互作用によって動的に中間子の質量が生み出される過程を探索することにある。具体的には、茨城県東海村の J-PARC 実験施設において、 $\pi$  中間子ビームにより原子核中にベクター中間子(本研究では $\omega$  中間子)と呼ばれる性質の良い中間子を生成し測定を行う。
- (2) 質量分布を直接的に測定する方法では、理論的に予想される反クォーク・クォーク凝縮の量などからベクター中間子の原子核密度中での質量分布が直接的に計算され実験と比較される。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。
- (3) 理論的には、ベクター中間子の質量の減少や巾の変化が予想されている。しか

し、これまでの実験方法で得られた質量分布は、原子核内の質量分布と原子核外で崩壊した自由空間における $\omega$  中間子の質量分布との重ね合わせである。そのため理論との定量的な比較が難しい。これは質量変化の直接測定法に共通な問題であるが、本研究では束縛状態を生成するアプローチとの併用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で原子核密度中の中間子を捉えていることを担保し、理論的予測分布と直接的に比較できる質量分布を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 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 $\pi$ -中間子ビームと原子核中に存在する陽子との、 $\pi^- + p \rightarrow \omega + n$  反応を用いて $\omega$  中間子を生成する。入射 $\pi$  中間子の運動量を適切に選び、反応中性子が 0 度方向で入射 $\pi$  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、 $\omega$  中間子を原子核内に静止(束縛)して生成する。
- (2) 入射ビームの運動量としては、 $\omega$  中間子を原子核内で静止させる運動学を選ぶ。KEK で申請者が行った実験からは、9% ( $50\text{MeV}/c^2$ ) 程度の減少が予想されており、入射する $\pi$  中間子の運動量が  $1.8\text{GeV}/c$  であれば、 $\omega$  中間子がほぼ運動量ゼロ(縦軸が 0)で生成されることが運動学的な計算から分かる。使用する K1.8 ビームラインでは、最大  $2.0\text{GeV}/c$  の運動量のビームを得る事が可能である。
- (3) このように生成した $\omega$  中間子の質量を前方で反応中性子を捉える Missing Mass 法と $\omega \rightarrow \pi^0 + \gamma$  崩壊による不変質量分布の二つの方法により同時に測定する。Missing mass 法により $\omega$  中間子の原子核束縛状態を探索する。
- (4)  $\omega \rightarrow \pi^0 + \gamma$  崩壊の測定は、以下の要領で行う。 $\omega$  中間子の崩壊からの $\pi^0$  中間子はさらに二つの $\gamma$  線に崩壊するので、計 3 つの $\gamma$  線を検出する。この $\gamma$  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。これは、KEK 今里教授の協力で E246 実験に使用された CsI を用いた $\gamma$  線検出器(図 1)を使用する。この検出器は、Intrinsic には  $200\text{MeV}$  の $\gamma$  線に対して 2.8% の分解能を持つ。分解能のエネルギー依存性を考慮に入れると、 $\omega$  中間子の質量測定に関して  $20\text{MeV}/c^2$  程度の分

解能が十分期待できる。これは予想される質量変化(50 MeV/c<sup>2</sup>)より十分小さい。



(5) 前方中性子による Missing Mass の測定は、以下の要領で行う。前方 0 度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。同様の実験が、 $\pi$  + 中間子を入射し陽子を捉えることでも可能だが、この実験では 0 度に出る粒子を捉えることが重要なので、入射  $\pi$  中間子や生成された荷電粒子を SKS 磁石でスweepすることが可能な中性子を捉えることを選択した。束縛状態を測定するために最低限の Missing mass 分解能(30MeV/c<sup>2</sup>)を得るため、7m の飛行距離で 80ps の飛行時間分解能が必要である。また、十分な収量を得るために前方±2 度のアクセプタンスが必要である。そのため、検出器の大きさは縦横 60cm 程度が必要で、分解能を得るために 10cm 巾とし光電子増倍管で両読みする。中性子検出効率を考えプラスチックシンチレータを 4 層並べた間に真鍮の板を挟む。

#### 4. 研究成果

(1) 実験に用いる中性子検出器の開発を行った。より高い時間分解能を得るために、立ち上がりの早い光電子増倍管(PMT)・浜松ホトニクス H2431 を使用した。プラスチックシンチレータとしては SAINT-GOBAIN CRYSTALS の BC404, BC408, BC412, BC416, BC420 の 5 種類 (50mm x 50mm x 300mm) を用意し、時間分解能を評価した。時間分解能の評価のために、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の Fuji test beamline におけるビームテストを 2009 年 11 月に行った。本テストで、BC404, BC408 のプラスチックシンチレータを用いることで時間分解能として 50ps (10

~20ps の系統誤差) との結果を得られた。これは、十分な値である。

さらに、東北大学電子光学研究センターにおいて引き続き検出器のテストを行い、実際の実験に使用する面積を持つ検出器に対して、60ps の時間分解能が達成可能であることを示した。

この成果を基に、実際の実験で使用する中性子検出器を製作した。

(2) また、モンテカルロシミュレーションパッケージ FLUKA を用いて中性子に対する反応、検出効率を評価した。その結果、シンチレータのみでは数%の検出効率しか得られず十分ではないことがわかった。そのため、シンチレーションカウンターの直前に 1cm 程度の真鍮板を置いた場合の計算などを行い、中性子と真鍮内の原子核との反応を利用し、20%の検出効率を得られることが判明した。

(3)  $\gamma$  線検出器は、768 個の CsI(Tl) クリスタルと PIN フォトダイオードで構成されるカロリメーターである。

この検出器は KEK の実験 E246 で使用され、J-PARC での T-violation 実験 (E06) に向けアップグレードされているものを使用する。

この検出器は、過去の実験であるため、エネルギー分解能のエネルギー依存性やシャワーの漏れの効果などが十分理解されている。過去の知識を基に我々の実験で期待される質量分解能などの評価を行った。評価には、既知のエネルギー分解能を input とした Fast Monte Carlo コードを開発し使用した。

その結果、 $\omega$  中間子の質量 (782MeV/c<sup>2</sup>) に対して 18MeV/c<sup>2</sup> の質量分解能が得られた。これは、予想される質量変化 (50MeV/c<sup>2</sup>) に対して十分小さい。

(4) 本実験の目指す複合測定に関して、奈良女子大学の比連崎悟氏や永廣秀子氏との協力で期待されるスペクトラムや収量の評価を行った。永廣秀子氏による  $\omega$  中間子生成の計算を input とし、実験の効果や核内巾の増大を効果に入れた計算を行った。その結果、十分大きな立体角を持つ  $\gamma$  線検出器を用いることで、核内で完全に静止し崩壊する  $\omega$  中間子を 2000 個以上収集できることが分かった。このため、 $\gamma$  線検出器のアクセプタンスの穴を新たなクリスタルで埋める事が必須であることが分かった。

さらにシミュレーションを進め、最終的に期待されるスペクトラムとして図 2 を得た。図の a) と b) は、質量変化の起

源の違いにより相関に変化がある様子を表している。

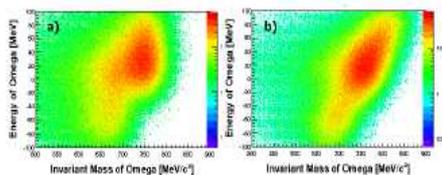


図 2 : Missing mass と不変質量の相関図

(5)  $\gamma$  線検出器のアクセプタンスの穴を新たなクリスタルで埋める必要があることが分かったため、 $\gamma$  線検出器の新たなクリスタルに用いる光検出器部の評価を行った。

$\gamma$  線検出器である CsI(Tl) カロリメータは、E246 実験では Pin Photo Diode, shaper 及び PADC による読出しを採用していた。しかし、J-PARC で使用するためにあたり高強度ビームに対応するため読出し回路の変更が必要である。E06 実験においては数百 kHz/module のレート耐性が要求されるが、E246 でのカロリメータのレート耐性は数十 kHz であった。そのため新しい読出し回路として、Avalanche Photo Diode (APD) 及び FADC の使用を検討し、その性能評価を東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームラインにおいて行った。ビームテストでは、数 kHz の低レートのビームを用いて収集した信号波形に対して波形解析を行い、エネルギー分解能を評価した。図 3 に結果を示す。

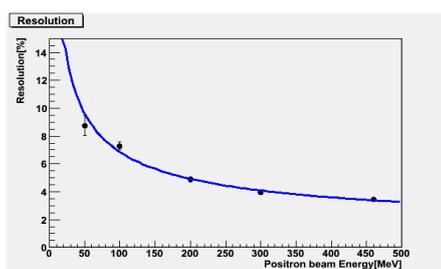


図 3 : エネルギー分解能 (ビームテスト結果)

また、数百 kHz～数 MHz のレートのビームを用いて信号のパイルアップ波形を取得し、低レートのビームテストで得られた波形関数を使用してパイルアップ波形を解析し、レート耐性を評価した。結果、1MHz 程度のレートで 200MeV の陽電子に対し 0.5% 程度のエネルギー分解

能の悪化が見られたが、これは本実験に大きな影響をあたえないため、1MHz/module 程度のレート耐性がある事を示した。

(6) これらの研究成果を基に、J-PARC 課題採択委員会に実験提案書を提出し、採択された。

#### 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 1 件)

小沢恭一郎,  $\omega$  meson in nucleus, experimental study, Progress of Theoretical Physics Supplement, 有, 186(2010), 325-330

[学会発表] (計 16 件)

① 榎本新一, 小沢恭一郎, ``核内  $\omega$  中間子質量分布測定のための検出器開発``, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 28 日

② 小沢 恭一郎, ``ハドロン将来計画``, 第 4 回機構シンポジウム, KEK, 2011 年 2 月 28 日.

③ K. Ozawa, Experimental Activities at University of Tokyo'', Internal Symposium on Nuclear Physics in Asia, Convention Center of Beihang University, Beijing, China, Oct 2010.

④ 榎本新一, 小沢恭一郎, ``J-PARC E06 実験及び P26 実験に向けた CsI(Tl) カロリメータ用新光読出し方式``, 日本物理学会秋季大会, 九州工業大学, 2010 年 9 月 11 日

⑤ 宇都宮和樹, 榎本新一, 小沢恭一郎, ``核内  $\omega$  中間子複合測定のための検出器系設計と開発``, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010.

⑥ 榎本新一, 宇都宮和樹, 小沢恭一郎, ``核内  $\omega$  中間子質量分布測定のための検出器開発の現状``, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010.

⑦ K. Ozawa, ``omega meson in nucleus, experimental study'', New Frontiers in QCD symposium, Feb 22, 2010, YITP, Kyoto, Japan.

⑧ K. Utsunomiya and K. Ozawa, ``New detector design for combined measurements of omega meson'', HAW09, Waikoloa, Hawaii,

Oct 2009.

⑨ K. Ozawa, ``Experimental study of  $\omega$  meson in nucleus'', US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.

⑩ K. Ozawa, ``Direct measurements of  $\omega$  mass modification in  $A(\pi, n\omega)X$  reaction and  $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$  decays'', Physics and Upgrade of the J-PARC hadron Facility, Sep 18, 2009, J-PARC, Ibaraki, Japan.

⑪ K. Ozawa, ``Mass modifications of vector mesons at normal density'', NUCLEAR MEDIUM EFFECTS ON THE QUARK AND GLUON, ECT\*, Villazzano, Italy, June 3-7 2009

⑫ 宇都宮 和樹, 青木 和也, 井濶 勇気, 小沢 恭一郎, 郡司 卓, 小松 雄哉, 四日市 悟, 渡辺 陽介, 「 $\omega$  中間子原子核束縛状態探索のための TOF 中性子検出器の開発」、日本物理学会 第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日

⑬ K. Ozawa, ``Experimental study of hadron mass in QCD medium'', Tokyo-Yonsei Workshop, Yonsei University, Korea, October 30 2008

⑭ K. Ozawa, ``Chiral Properties in Nuclear Medium ~ Origin of mass'', ASIA Science seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, Beijing University, China, October 19-25 2008

⑮ K. Ozawa, ``Dense Matter at J-PARC'', 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008), University of Tsukuba, Japan, October 13-15 2008

⑯ 小沢 恭一郎, 「加速器で探る核媒質中のハドロン」、基研研究会「熱場の量子論とその応用」、京都大学基礎物理学研究所、2008 年 9 月 3-4 日

[その他]

ホームページ:

[http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ozawa\\_g](http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ozawa_g)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小沢 恭一郎 (OZAWA KYOICHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号 : 20323496

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :