

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400291

研究課題名(和文)原子核中に生成されたベクター中間子の吸収過程の解明

研究課題名(英文)Study of absorption processes of vector meson in nuclear medium

研究代表者

堀田 智明(Tomoaki, Hotta)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：30332745

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子核中に生成されたベクター中間子が、周囲の複数の核子との相互作用を通して吸収される過程を実験的に研究し、原子核中での中間子の性質を明らかにする事を目指し、高エネルギーガンマ線を原子核標的に照射し、標的から放出される荷電粒子を測定するための検出器システムを開発した。検出器としてシリコンストリップ検出器を用いるものとし、本研究では主にシリコンストリップ検出器の信号を効率良く収集するためのデータ収集回路システムの開発と改良を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to study the properties of mesons inside the nuclear medium, we developed a silicone-strip detector system for charged particles emitted from the nuclear target irradiated by a high-energy photon beam. The aim of the experiment is to detect the multiple protons produced through the absorption process of the vector mesons produced inside the target nuclei. In the research period, we have developed and improved the data processing and acquisition system for the detector.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：中間子光生成 シリコンストリップ検出器

## 1. 研究開始当初の背景

我々の周囲の物質を構成する陽子や中性子を含むハドロンが、その構成要素であるクォークに比べはるかに大きな質量を持つ機構はカイラル対称性の自発的な破れに依るものとして理論的に説明されているが、実験的には十分に検証され理解されるまでには至っていない。実験的な手がかりの一つとして考えられているのは、自由空間と原子核中での中間子の性質の違いである。原子核中ではカイラル対称性が部分的に回復していると考えられ、その結果として原子核中に生成された中間子の質量や崩壊幅が変化することが予想されている。特に $\omega$ や $\phi$ といったベクター中間子について様々な手法での実験と、理論的な研究が進められてきた。

それまでに行われてきた実験の例としては、高エネルギーの陽子ビームを原子核標的に照射し、原子核中及び原子核近傍で生成されたベクター中間子を電子・陽電子対崩壊を通じて観測するもの、原子核標的に高エネルギーガンマ線ビームを照射し、原子核標的にベクター中間子を生成するもの、と、用いるビームの種類が異なる複数の実験があげられる。高エネルギーガンマ線を用いた場合には、ベクター中間子生成と崩壊を、標的から放出されるガンマ線を通して測定する実験、 $\phi$ 中間子の生成と崩壊をK中間子対の測定を通して観測し、標的核の質量依存性を調べる実験が行われてきた。これらの実験は、原子核中での中間子の性質の変化を調べる上でそれぞれ利点や特長を持っているが、得られた実験結果を全て矛盾なく理解することは必ずしも容易ではない。実験の手法によって原子核内での中間子の運動量が異なること、測定する中間子の崩壊様式や終状態が異なることから、中間子の受ける相互作用や測定にかかる粒子が受ける相互作用の影響が異なり、それらを正しく考慮した上で実験結果を解釈する必要がある。また実験結果を解釈する上で理論モデルとの比較や理論モデルの助けを借りた解釈が必要となる。研究開始当初、これらの実験結果を矛盾なく説明できる理論モデルが無く、理論、実験両面での研究の進展が望まれていた。

我々は、SPring-8にレーザー電子光IIビームラインを建設し、大立体角ガンマ線検出による実験と大立体角荷電粒子検出器による実験に着手したところであった。これらの実験装置は、原子核中に生成された中間子の崩壊の様態から様々な方向に粒子が放出される反応の測定に適した実験装置である。

## 2. 研究の目的

本研究では、原子核中の中間子の吸収過程に対し新たな視点から実験的な情報を得ることを目指した。これまでの実験では、用いるビームや測定する崩壊様式の違いはあるものの、原子核に吸収されなかった中間子の崩壊粒子を測定するという点では共通している。

ある意味原子核中で「生き残った」中間子を観測し、自由空間中で生成・崩壊した中間子との違いを調べ、また中間子の生成数を調べて吸収の効果を推定するものであった。これらの測定では、必然的に中間子が原子核外で生成された事象や、原子核中に生成された中間子が原子核外に出てから崩壊した事象が含まれてくる。

一方で、原子核中で中間子が吸収される際、原子核内で具体的にどのような反応が起きるかということについても十分に理解されていない。本研究では、原子核中での中間子の吸収過程の一端を実験的に直接観測することを目指した。

このような視点で本研究が注目したのは、原子核内に生成されたベクター中間子が、原子核中の二核子に吸収される過程の直接測定である。実験的には、原子核標的に高エネルギーガンマ線を照射し、ガンマ線の運動量を受け取った原子核中の陽子が超前方に放出されると同時に、実験室系で静止状態～低運動量(すなわち、原子核中にとどまっている可能性が高い)ベクター中間子を生成する。低運動量の中間子が原子核中で周辺の核子と相互作用して吸収される場合、エネルギーと運動量保存の整合性を考慮すると、周囲の二核子が吸収に関与する可能性が高いと予想される。典型的な事象としては、原子核内に生成された中間子の質量に相当するエネルギーを二核子に分配され、互いに正反対方向の運動量を持って標的核から放出される事象が考えられる。本研究ではこの一連の中間子生成・吸収過程を実験的にとらえることを目標とする。二核子が検出にかかった時点で、この事象は原子核外で生じたものではなく原子核内での反応によるもので有ることが明らかなのがこの測定の利点である。その反面、この二核子の放出事象が目的とする中間子の吸収過程によるものかどうかには曖昧さが残る。中間子生成段階で前方に放出される陽子の高精度測定、ガンマ線エネルギーの測定、測定された二核子の運動量、エネルギー相関等を総合的に解析することで、原子核中での中間子吸収過程の理解に向け、何らかの実験的な手がかりがつかめるものと期待する。

## 3. 研究の方法

SPring-8レーザー電子光IIビームラインにおいて、高エネルギーガンマ線ビームを原子核標的に照射し、大立体角検出器によって標的から放出される荷電粒子を測定する。レーザー電子光IIビームラインでは、高輝度放射光施設SPring-8の8 GeV電子蓄積リングに紫外線レーザーを入射し、後方コンプトン散乱によって最大3 GeVのガンマ線ビームを生成する。実験室において標的に到達するガンマ線(光子)のエネルギーは、光子タギング検出器によって一事象毎に特定されている。

ガンマ線(高エネルギー光子)が陽子と衝突すると、ある確率で入射光子の運動量の

部分を陽子が受け取り、陽子が超前方に放出されると同時に、あたかも標的陽子に置き換わったかの様に静止～低エネルギーの中間子が生成される。エネルギー・運動量保存則から、どのような中間子が生成されたかを質量欠損スペクトルとして観測する事ができる。図1は我々がレーザー電子光ビームラインの前方磁気スペクトロメーターを用いて測定した質量欠損スペクトルの例である。

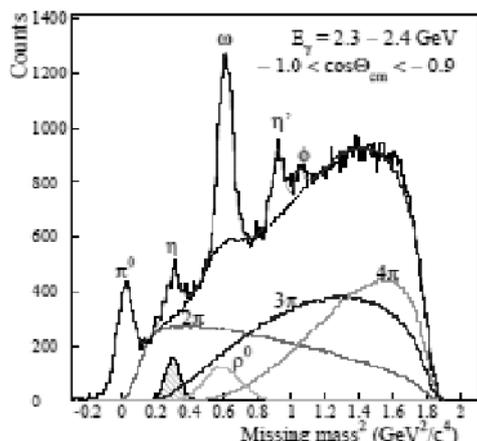
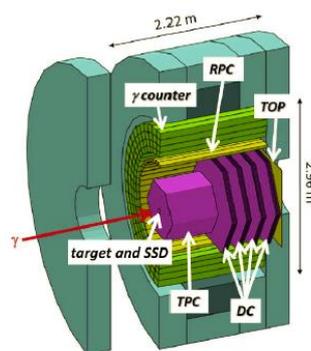


図1. 水素標的(陽子)にガンマ線を入射した場合の質量欠損スペクトルの例。

質量欠損スペクトルに見られるピークが、陽子が超前方に放出される際に生成された中間子の質量に相当する。これが反応の第一段階となる素過程である。本実験では標的が原子核となるため、この素過程は原子核中の陽子に対して起こる準自由過程となる。

原子核中での中間子の吸収によって放出される二つの陽子の検出には二つの方法が考えられる。課題申請時点ではこの検出に大立体角ガンマ線検出器 BGOegg を使用する計画であった。この検出器はガンマ線の高分解能測定を目的とした BGO 無機シンチレータを多数並べた検出器で、磁気スペクトロメーターを使用することなく荷電粒子測定する。反応の第一段階となる超前方への陽子放出事象は、標的から約 12m 先に設置した飛行時間検出器で検出する。もう一つの方法は大立体角ソレノイドスペクトロメーター (LEPS2 ソレノイド) 検出器を用いる方法である。LEPS2 ソレノイド検出器ではソレノイド磁場によって荷電粒子を曲げ、運動量を測定する。

レーザー電子光 II ビームライン全体の検出器開発スケジュールや運転計画を考慮した結果、本研究目的のためには LEPS2 ソレノイド検出器を用いて行った方が効率的に質の高いデータが得られると判断し、本研究課題では LEPS2 ソレノイド検出器にシリコンストリップ検出器を組み合わせるための検出器とデータ収集システムの開発を行う事とした。図2に LEPS2 ソレノイド検出器の概要



を示す。

図2. LEPS2 ソレノイド検出器の概要

大型ソレノイド電磁石は、ビーム軸に方向に平行な磁場を作りだす。内部にはタイムプロジェクションチェンバー (TPC) やドリフトチェンバー (DC) といった大型の三次元飛跡検出器を配置する。ソレノイド磁場の特性から、この検出器では超前方に飛行する粒子は磁場によって大きく曲がる事がなく、側方に放出される粒子に比べて運動量分解能が低下する。本研究では前方の運動量分解能を向上するため、標的の前方にシリコンストリップ検出器を設置することとした。要求される分解能から、ストリップ間隔は 100 $\mu$ m、カバーする面積と面数から、総チャンネル数約 3000 チャンネルの検出器となる。シリコンストリップ検出器は位置分解能及びエネルギー分解能に優れる反面、検出器から読みだされるデータの量が多くなる。シリコンストリップ検出器を LEPS2 ソレノイド検出器と組み合わせるためには、シリコンストリップ検出器のデータ処理・収集が十分に高速で、LEPS2 ソレノイド検出器を構成する他の検出器のデータ収集に悪影響が生じないようにする必要がある。本研究では、シリコンストリップ検出器システムの開発として、特にデータ処理・収集システムに注力し、データ収集能力の向上を実現した。また、LEPS2 ソレノイド検出器と組み合わせるために必要なトリガー回路系の構築や検出器へのバックグラウンドの測定等、実験実現に向けた研究、開発を行う。

#### 4. 研究成果

レーザー電子光 II ビームラインでは最高 10 MHz のガンマ線強度を想定しており、データ収集の頻度は約 3 kHz を想定する。図3に LEPS2 ソレノイド検出器のデータ収集システムの概要を示す。それぞれの検出器から発生した信号は、各検出器を担当するコンピューター (PC や VME コンピュータ) に集められ、それらをネットワークにより転送して事象毎に各検出器のデータを統合し、記録する。一つの事象を測定した後、全ての検出器がデータを転送し終えるまで、次の事象の測定を行う事ができないことから、個々の検出器が十分に高速でデータを処理できるようにしておく

必要がある。目安として、1事象のデータ読み出しに要する時間が  $15\mu\text{sec}$  以下になることを目指して開発を行った。

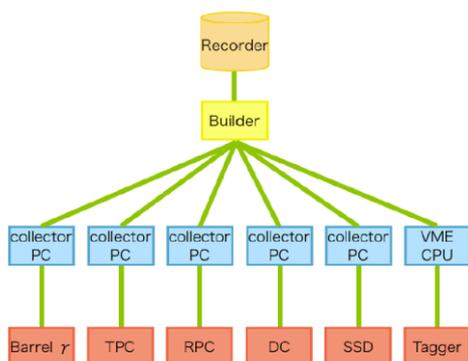


図 3. LEPS2 ソレノイド検出器データ収集システムの概略図

チャンネル数の多いシリコンストリップ検出器のデータ読み出し時間を短縮するためには、検出効率を落とすことなく収集するデータの量を減らす事が重要である。ただし、データ量を減らすための処理に複雑な演算を多数行い、処理の時間が増えるようでは意味がない。

今回使用したシリコンストリップ検出器の信号は、以下の様な経路で処理されている。始めに、シリコンストリップ素子の基板上に取り付けられた VLSI 回路により、多数の素子から発生した信号をサンプリングし、ストリップの順番とサンプリング回数に対応した時間順に並べ直した出力信号に変換する。次に VLSI 回路から出力された信号を、FADC 回路で読み込み、時間順のデータをストリップの順番・サンプリング回数ごとのデータに並べ直しデータ転送に適した形にする。このデータを FADC 回路中のメモリとコンピューターのバスを経由して CPU(あるいは PC)にデータを転送する。FADC 回路から CPU へのデータ転送、CPU から全体データ収集システムへのネットワークデータ転送は、読み出すデータの量が多いほど処理に時間がかかるため、FADC 回路の中でデータ量を小さくする処理を行う必要がある。

回路内の処理に要している時間を測定しながら性能評価を行い、できるだけ簡易なアルゴリズムでデータ量を減らす方法を探り、FADC 回路上の FPGA のプログラムとして実装した。最終的には、1事象あたりに読み込む波高情報のサンプル値を減らすことと、読み出す必要のないチャンネルを早い段階で判断し、そのチャンネルのデータは収集しないようにするという二つの手段により、 $15\mu\text{sec}$  以内でデータを読み出すために必要なプロセスが明らかになった。この処理により検出効率が落ちていないことは、プロトタイプ検出器と改良した読み出し回路を組み合わせたものをレーザー電子光ビームラインに設置し、荷電粒

子を測定することで確認した。

また、LEPS2 ソレノイド検出器の他の検出器と連携してデータ収集を行うためのトリガー関係の回路系及び、標的近傍で測定のためのトリガー信号を作るための、プラスチックシンチレータによる検出器等を開発し実験の準備を整えた。

前述の通り、本研究課題では検出器開発の進捗、レーザー電子光 II ビームライン全体の検出器開発の状況及び運転スケジュールの関係から、当初目標としていた原子核中での中間子吸収過程の解明に向けた実験を完遂させるに至らなかったが、本実験に向けた技術開発を進め、実験を実現するための検出器及び読み出し回路上の問題点を解決することができた。本研究開発の結果を元に、早期に LEPS2 ソレノイド検出器にシリコンストリップ検出器を組み合わせ、原子核中での二核子による中間子吸収過程の検出に向けた実験を進めて行きたい。

## 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 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

① Tomoaki Hotta, “Recent results and prospects from the LEPS and LEPS2 experiments at SPring-8”, 韓国物理学会, 慶州(韓国), 2015 年 10 月

② Tomoaki Hotta, “Hadron Physics at the Laser electron photon experiments at SPring-8”, The International Workshop on Photon Nuclear Physics, 上海(中国), 2016 年 6 月

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 智明 (HOTTA TOMOAKI)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：30332745