

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2014

課題番号：25707018

研究課題名(和文) 重イオン研究所における 中間子原子核の高統計測定

研究課題名(英文) Spectroscopy of eta-prime mesic nuclei with high statistics at GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research

研究代表者

藤岡 宏之 (Fujioka, Hiroyuki)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30513395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,100,000円

研究成果の概要(和文)：有限密度下に置かれた η' 中間子は、量子色力学におけるカイラル対称性の部分的回復とUA(1)量子異常の影響により質量が大きく減少することが理論的に予想されており、 η' 中間子が原子核中に束縛した中間子原子核が存在する可能性がある。本研究では、ドイツの重イオン研究所において一次陽子ビームを用いた(p,d)反応による η' 中間子原子核の分光実験を実施し、励起エネルギーの関数として(p,d)反応の微分断面積を求めた。また、将来さらなる高強度のビームを用いた実験を見越し、Belle-II実験用に開発された一体型読み出しボードを用いた多芯ドリフトチェンバーの新しいデータ収集システムの開発と性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The mass of an η' meson at finite density is theoretically expected to be reduced because of partial restoration of chiral symmetry and the UA(1) quantum anomaly in Quantum ChromoDynamics. It leads to a possible existence of an η' -mesic nucleus. We conducted a spectroscopy experiment of η' -mesic nuclei by the (p,d) reaction, using a primary proton beam at GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research, Germany, and obtained the differential cross section of the (p,d) reaction as a function of the excitation energy. In addition, we performed R&D of a new data acquisition system for multi-wire drift chambers with all-in-one readout boards, which was developed for the Belle-II experiment, and evaluated its performance.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：中間子原子核 ハドロン物理学 η' 中間子

1. 研究開始当初の背景

擬スカラー中間子の一つである η' 中間子は、 π 中間子などの他の擬スカラー中間子と比較して極めて大きな質量を持つという特徴を有する。このことは、量子色力学が有する $U_A(1)$ 量子異常に起因しているとされている。一方で、真空中で破れているカイラル対称性は有限密度ないし温度中で部分的に回復するとされており、それに伴って η' 中間子の質量が大きく減少することが NJL 模型などによって予想されている。

有限密度における η' 中間子の質量を調べる有力な手法として、 η' 中間子原子核の分光が挙げられる。原子核内部に置かれた η' 中間子が軽くなるということは、 η' 中間子と原子核の間に引力的な相互作用が働いていることに対応する。そのため η' 中間子が原子核中に束縛した状態、 η' 中間子原子核が存在する可能性がある。

従来、 η' 中間子原子核の崩壊巾が大きいために、実験において実際に観測するのは非常に困難であると考えられてきた。しかしながら、CBELSA/TAPS 実験において、光反応により原子核中に生成された η' 中間子が原子核外に出てくる割合(透過率)を測定した結果、 η' 中間子は原子核に吸収されにくく、崩壊巾はわずか 10MeV 程度であることが示唆されている。

もし NJL 模型が予想するように原子核中において η' 中間子の質量が顕著に減少し、さらに η' 中間子原子核の崩壊巾が小さい場合には、 η' 中間子原子核が実験によって観測できる可能性がある。それにより原子核中の η' 中間子の質量の変化を調べることができれば、 $U_A(1)$ 量子異常・カイラル対称性の破れと η' 中間子の質量の関係について知見を得ることができると期待される。

2. 研究の目的

理論的に存在が予想されている η' 中間子原子核を探索するため、ドイツの重イオン研究所において一次陽子ビームを炭素標的に照射することで (p,d) 反応の欠損質量 (missing-mass) 分光を行う。

η' 中間子原子核の質量は、反応によって射出される重陽子の運動量を測定し、既知の陽子ビームのエネルギー (約 2.5GeV) を用いることで算出することができる。また、 η' 中間子原子核の崩壊粒子を検出しない包括的測定 (inclusive measurement) を行うことにより、 η' 中間子原子核の崩壊様式に関する仮定を必要としないバイアスのないスペクトルを得ることができる。その反面、包括的測定では複数 π 中間子生成などの背景事象と直接区別できないために S/N 比は高々 1/100 程度であると事前に見積りを行った。それを克服するために、高分解能かつ高統計の測定を実施する。毎秒 10^{10} 個の大強度一次ビームを利用し、

また核破碎片分離器 (fragment separator) により重陽子の運動量を高分解能で測定する。それにより、 η' 中間子の原子核中での質量減少が大きく、さらに η' 中間子原子核の崩壊巾が小さいときには η' 中間子原子核に対応するピーク構造が励起エネルギースペクトルに現れると期待される。ピーク構造が観測されれば、 η' 中間子原子核束縛エネルギーや崩壊巾、生成断面積などの情報を引き出し、原子核という有限密度の媒質中における η' 中間子の性質の理解を深めることができる。なおシミュレーションを用いたピーク構造の観測可能性を含む定量的な評価については K. Itahashi, H. Fujioka (corresponding author) et al., Progress of Theoretical Physics 128 (2012) 601 にまとめられている。

また、重イオン研究所に隣接して反陽子イオン研究施設の建設が現在進められている。完成した暁には、さらに大強度の陽子ビームを用いることでより高い感度での測定が可能になるが、それにはデータ収集システムの刷新によるデータ収集速度の向上が必要である。本研究ではドリフトチェンバーの読み出しの手段として Belle-II 実験向けに開発されている一体型読み出しボードの導入を目的とし、高レート下における信号の読み出しが問題なくできるかを調査することとした。

3. 研究の方法

(1) 2014年8月に重イオン研究所で最初の実験 (GSI S437実験) を実施し、目標としていた統計量を取得した。

核破碎片分離器の最上流に $4\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素標的を設置し、2.5GeVの陽子ビームを照射した。標的から射出された重陽子は核破碎片分離器を通り抜け、最終焦点面に設置した検出器群 (図1) により検出される。中間焦点面と最終焦点面の間の飛行時間の情報を用いることで重陽子と陽子を識別し、重陽子の運動量をドリフトチェンバーの通過位置から決定する。

また陽子-重陽子の後方散乱のデータを較正用反応として取得した。さらに背景事象の

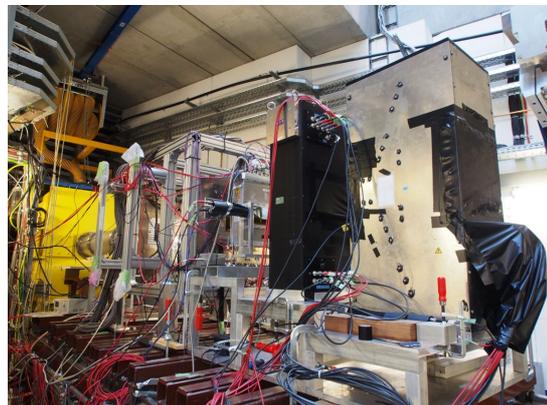


図1 核破碎片分離器最終焦点面付近の様子。標的での散乱粒子は左奥から入り、ドリフトチェンバー、プラスチックシンチレータ、チェレンコフ検出器を通過する。

理解のために重水素化ポリエチレン標的も用い、 η' 中間子生成閾値付近における陽子と重陽子の反応も調べた。

(2) ドリフトチェンバー用の一体型読み出しボード (64ch RAINER) を6台購入し、また全てのボードに対してイベントタグ情報を配布することでイベント照合を可能とするトリガー分配モジュールの仕様策定に携わり、実機を1台購入した。

一体型読み出しボードの概略は以下の通りである。ドリフトチェンバーからのアナログ信号をASDによって増幅・波形整形・波高弁別をした後、時間情報とFADCによりデジタル化した波形をFPGAのリングバッファにためこむ。トリガー信号が入力された場合に、入力時刻から定まった時間分遡ってFPGAからデータが取り出され、SiTCPプロセッサからイーサネットで計算機に転送される。

またトリガー分配モジュールは、12bitのイベント番号と8bitのスパル番号を一体型読み出しボードに配布する役割を持つ。これらのイベントタグ情報をデータのヘッダに付与させることで、複数の一体型読み出しボードから個々に流れてくるデータのイベント照合を可能とする。

図2のようにドリフトチェンバーからの信号の読み出しを、一体型読み出しボード3台を使って行い、線源からの線の飛跡を問題なく再構成できるかを調べた。

また、高トリガーレートにおける一体型読み出しボードの挙動を調べるため、光電子増倍管の暗電流から作ったランダムトリガーをトリガー分配モジュール経由で5台の一体型読み出しボードに配布し、不感時間やイベント照合の誤差率について評価を行った。

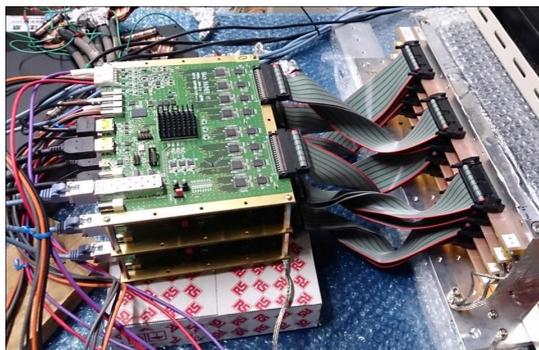


図2 一体型読み出しボード(中央)とドリフトチェンバー(右)を接続し、アナログ信号を読み出している様子。

4. 研究成果

(1) 2014年8月に重イオン研究所において取得したデータの解析を進めた。まず粒子識別に関しては、飛行時間によるカットを適用することで陽子の大半を除去することができるものの、2個の陽子が短い時間差で発生し、うち一方が最後まで通り抜けなかった場合に背景事象となることが分かった。このよう

な背景事象の除去のために、中間焦点面に設置したプラスチックシンチレータを光電子増倍管で読み出した信号を波形解析し、通過した粒子の数が1個か2個以上かを判別するという解析手法を確立した。結果、信号である重陽子の検出効率を96-97%に保ったまま、陽子の混入率を 10^{-4} のオーダーにまで下げることが成功した。

また前述の陽子-重陽子の後方散乱事象に由来する重陽子の運動量が決まった値を利用しスペクトロメータの較正を行った上で、運動量の解析を進めた。それにより励起エネルギーをイベント毎に求めた。図3はデータ全体の約1%の統計量に相当する、暫定的な励起エネルギースペクトルである。 $^{11}\text{C}+\eta'$ 閾値を基準とした励起エネルギーを横軸にプロットしてあり、負・正の領域はそれぞれ η' 中間子の束縛領域・非束縛領域となる。さらにアクセプタンス補正をすることで $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応の微分断面積を励起エネルギーの関数として得た。その結果と η' 中間子原子核に関する議論を論文にまとめ投稿した。

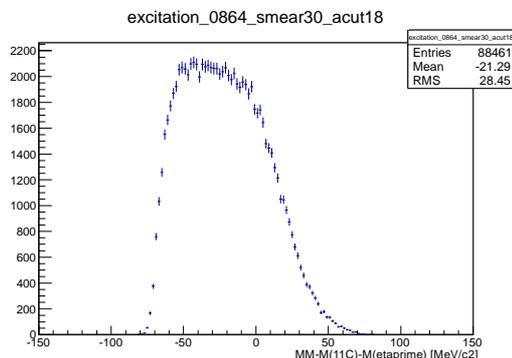


図3 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応の励起エネルギースペクトル。全統計の約1%に相当する。

(2) 線源をドリフトチェンバーのそばに置き、線の飛跡の再構成を試みた。検出効率・位置分解能ともに従来の結果とほぼ同様の結果が得られることを確認した。

また高トリガーレートにおける不感時間について調査したところ、一体型読み出しボードが1台の場合には40kHzまで、5台の場合には10kHzまで不感時間なしに動作し、それ以上のトリガーレートにおいては時折ビジー信号が出て、トリガーを受け付けなくなることがあった。また計算機側で書き込み処理を行わなかった場合には、さらにトリガーレートを増やしても不感時間が生じなかったため、ビームが出ていないオフスパルの間にデータをまとめてストレージに書き込むことにより対処可能であると考えられる。

トリガー配布モジュールによるイベント照合の評価として、個々の一体型読み出しボードから出力されたデータに記録されているイベント番号の照合を行った。50kHzという高トリガーレートで評価したところ、誤差率0.00010%という結果を得た。

これら一連のR&Dを経て、一体型読み出

しボードの導入によるドリフトチェンバーのデータ収集システムの刷新が可能であると結論付けた。2014年8月の実験時と比べて数倍以上のトリガーレートにおいても高効率を維持できるデータ収集システムを今後構築していく予定である。

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4件)

H. Fujioka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K.-T. Brinkmann, ... (計57名), "Spectroscopy of η' -nucleus bound states at GSI and FAIR — very preliminary results and future prospects —", *Hyperfine Interactions*, 査読有, 234, 2015, 33-39
DOI: 10.1007/s10751-015-1145-9

H. Fujioka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K.-T. Brinkmann, ... (計54名), "Search for η' (958)-nucleus bound states by (p,d) reaction at GSI and FAIR", *Acta Physica Polonica B*, 査読有, 46, 2015, 127-132
DOI: 10.5506/APhysPolB.46.127

H. Fujioka, K.-T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Geissel, ... (計20名), "Spectroscopy of η' Mesic Nuclei via Semi-Exclusive Measurement at FAIR", *EPJ Web of Conferences*, 査読有, 66, 2014, 09006
DOI: 10.1051/epjconf/20146609006

H. Nagahiro, D. Jido, H. Fujioka, K. Itahashi, S. Hirenzaki, "Formation of η' (958) -mesic nuclei by the (p,d) reaction", *Physical Review C*, 査読有, 87, 2013, 045201
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.045201

[学会発表](計11件)

H. Fujioka, "Experimental studies of η' -nucleus system with hadron beam", *ELPH workshop C013 "Meson Production and Meson-Baryon Interaction"*, 2015年9月14日, 東北大学電子光物理学研究センター(宮城県仙台市)

山上 大貴, 『 η' 核分光実験におけるMWDC系データ収集システムの開発状況』, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学(東京都新宿区)

田中 良樹, 『(p,d)反応の分光による η' 中間子原子核の探索』, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学(東京都新宿区)

H. Fujioka, "Future plans for missing-mass spectroscopy experiment of η' mesic nuclei at FAIR", 第4回日米物理学会合同核物理分科会, 2014年10月9日, ハワイ島ワイコロア(アメリカ)

Y.K. Tanaka, "Search for η' mesic nuclei with (p,d) reaction at GSI", 第4回日米物理学会合同核物理分科会, 2014年10月9日, ハワイ島ワイコロア(アメリカ)

H. Fujioka (招待講演), "Search for η' (958)-nucleus bound states by (p,d) reaction at GSI and FAIR", *II Symposium on applied nuclear physics and innovative technologies*, 2014年9月26日, クラクフ(ポーランド)

H. Fujioka (招待講演), "Spectroscopy of η' -nucleus bound states at GSI and FAIR — very preliminary results and future prospects —", *International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2014)*, 2014年9月18日, ウィーン(オーストリア)

藤岡 宏之, 『FAIR Super-FRSにおける η' 中間子原子核の分光実験に関する検討』, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学(神奈川県平塚市)

山上 大貴, 『MWDC用一体型読み出しボードを用いた η' 核分光実験データ収集システムの開発状況』, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27日, 東海大学(神奈川県平塚市)

藤岡 宏之, 『GSIとFAIRにおける(p,d)反応を用いた η' 中間子原子核分光実験』, *ELPH研究会C008「GeV領域光子で探るメソン生成反応の物理」*, 2014年2月20日, 東北大学(宮城県仙台市)

田中 良樹, 『GSIのFRSでの η' 核分光実験のための光学系と検出器の開発』, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月22日, 高知大学(高知県高知市)

[その他]

ホームページ等

<https://researchmap.jp/fujioka/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤岡 宏之 (FUJIOKA, Hiroyuki)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 30513395

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者
該当なし