

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：34535

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03676

研究課題名(和文)大強度連続ミュオンビームによる三核子系の三体力の解明

研究課題名(英文)Study of three nucleon force by continuous high intensity muon beam

研究代表者

高久 圭二 (Takahisa, Keiji)

神戸常盤大学・保健科学部・教授

研究者番号：30263338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：大強度連続ミュオン発生装置MuSICにより、散乱状態の3体力が顕著に現れる、放出重陽子のエネルギーが8MeVから20MeVのエネルギー領域における実験を行うため、陽子と重陽子の粒子識別が可能で、エネルギーが測定できるCsI(Tl)検出器の開発を行った。また、J-PARCでのパルスビームによるパルス幅の短い粒子識別可能な検出器の開発も行いLYSO+ZnS(Ag)によるホススイッチタイプの検出器の開発を行った。ZnS(Ag)をE検出器として、パルスシェイプによりEとE成分を分けて粒子識別するシステムである。検出器の開発により、特許を申請し、特許査定が通った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多体系である原子核を核子間に働く核力から理解するためには、核子-核子間の二体力だけでは十分でなく3つの核子が関与する三体力を考える必要があることがわかっている。3体系以上の原子核に用いるためには、ファデーエフ法はクーロン力を取り入れることができないので、クーロン力が関与しない系の散乱実験を説明可能な三体力の詳細な情報が必要となる。本研究では、 3He のミュオン捕獲反応 $\mu^- + 3\text{He} \rightarrow \text{d}n + \mu$ により、クーロン力の関与しない散乱状態における三体力の寄与を求める。3体力が顕著に現れる、放出重陽子のエネルギーが8MeVから20MeVのエネルギー領域の測定を初めて行うことができる検出器系の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The high-intensity continuum muon generator MuSIC is used to perform experiments in the energy range of 8 MeV to 20 MeV, where the three forces in the scattering state are prominent. We have developed a CsI(Tl) detector that can measure discrimination of particles. In addition, we developed a detector capable of discriminating particles with a short pulse width using a pulsed beam at J-PARC, and developed a phos-switch type detector using LYSO+ZnS(Ag). This is a system that uses ZnS(Ag) as a E detector and discriminates particles by separating E and E components according to the pulse shape. We applied for a patent for the development of the detector, and the patent was granted.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：三体力 ファデーエフ法 ミュオン 3He ホススイッチ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多体系である原子核を核子間に働く核力から理解するためには、核子-核子間の二体力だけでは十分でなく 3 つの核子が関与する三体力を考える必要があることがわかっている。3 体系の基底状態は、ファデーエフ法による二体力を用いた厳密解による束縛エネルギーでは実験値を説明できず、三体力の寄与が必要である。3 体系以上の原子核に用いるためには、ファデーエフ法はクーロン力を取り入れることができないので、クーロン力が関与しない系の散乱実験を説明可能な三体力の詳細な情報が必要となる。本研究では、 ${}^3\text{He}$ のミュオン捕獲反応 $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow \text{d}n$ により、クーロン力の関与しない散乱状態における三体力の寄与を求める。核物理研究センターに新設の大強度連続ミュオン発生装置 MuSIC により、3 体力が顕著に現れる、放出重陽子のエネルギーが 8MeV から 20MeV のエネルギー領域の測定を初めて行うことができる。これにより、束縛エネルギーを再現する三体力が散乱状態の実験を説明できるのかが初めて知ることができるようになる。

2. 研究の目的

三核子系の三体力の研究はこれまでに、 ${}^3\text{He}$ や ${}^3\text{H}$ の束縛エネルギーが、二体力だけでは説明できないことから始まり、重陽子-陽子弾性散乱の散乱微分断面積や偏極分解能の測定等が行われてきたが、重陽子-陽子弾性散乱の散乱微分断面積のデータは三体力が強く効く後方角は説明できても、クーロン力の影響で前方角の計算はできず、さらには偏極分解能はほとんど説明できない。

本研究は、始状態が弱い相互作用で、終状態はクーロン力が働かないので、二体のポテンシャルと波動関数から求め、散乱状態の三体力を調べるのに理想的な反応である。2 交換型の三体力は S 波の N 散乱の a 項と P 波の N 散乱の b, d 項が藤田宮沢型、Tucson-Melbourne 型、UrbanaIX 型によって異なっており、どの三体力が良いのかを、初めて明らかにすることができる。中間子と核子が相互作用する際に、核子が広がりを持っていることに起因する効果 (N 形状因子) が中間子の運動量に対してどのような依存性をもつかとか、三体系の中での中間子と核子の相互作用は、自遊空間でのそれとはことなるので、その差をどのように取り入れるのかとか、核子が中間子を吸収する以前に核子から中間子が放出される「交叉」の過程が今の三体力にはとりいれられていないなど、三体力の理解を格段に進めるために散乱状態の三体力の寄与を調べるのは重要である。

3. 研究の方法

${}^3\text{He}$ のミュオン捕獲反応において 8MeV 以上 20MeV 以下のエネルギーの重陽子を効率良く測定し、理論計算と比較して、三体力の違いを判断する。第一図に三体力がある場合とない場合の比を重水素のエネルギーにより % で表した理論計算 [A] を示す。図のように 8MeV の領域は三体力の効果が少なく、それ以外は大きくなっている。三体力による寄与がほとんどない 8MeV 付近を基準として、8% 異なる 16MeV 付近を比較することにより、三体力の寄与を明らかにすることができる。

この重水素のエネルギー領域で効率よく測定するため、ガス圧やチェンバーの大きさ、シンチレーターの位置などを変化させ、シミュレーションを行った結果、第二図のようなチェンバーを設計した。このチェンバーで、ヘリウムガスの圧力を 8 気圧にすることにより、ミュオンの 3 割がガス中で止まり、側面に配置した検出器ではミュオン粒子が止まらない理想的な条件を見出した。また、 ${}^3\text{He}$ ガスは高価なことから、ガスの回収システムを構築し、実験が終了したら、次の実験のために回収して使用する。

放出される重陽子はチェンバーを覆う 6 面の 10cm 長のシンチレーターで測定する。シンチレーターは、 ${}^3\text{He}(\mu, \text{d})n$ 反応と ${}^3\text{He}(\mu, \text{p})nn$ 反応を波形弁別法により粒子識別を区別することが可能な CsI(Tl) 検出器を使用する。これにより ${}^3\text{He}(\mu, \text{d})n$ 反応の、それぞれ統計制度 3% のエネルギーを変えた三点以上のデータを測定し、各三体力の計算値と比較する。ミュオンの入射エネルギーは 50MeV/c で FWHM で 8MeV のガウス分布のビームであり、毎秒 10000 個のミュオンが入射される。シミュレーションの結果から毎秒 2500 個が ${}^3\text{He}$ ガス中に止まり、 ${}^3\text{He}(\mu, \text{d})n$ 反応は一分間に 150 個起こることになる。検出効率を考慮すると毎分 45 個の測定が可能で、三日間の測定で 194400 イベントの測定が可能である。三体力が効かない 8MeV \pm 0.5MeV では 8640 イベントとなり、三体力の効果の現れる 16MeV \pm 0.5MeV では 2160 イベントとなり、統計精度を 3% 以上で測定することが核物理研究センターの MUSIC を用いることにより、初めて可能となった。

4. 研究成果

核物理研究センターに新設の大強度連続ミュオン発生装置 MuSIC により、3 体力が顕著に現れる、放出重陽子のエネルギーが 8MeV から 20MeV のエネルギー領域の測定を初めて行い、束縛エネルギーを再現する三体力が散乱状態の実験を説明できるのかが初めて知ることができるようになる。そのための CsI(Tl)検出器の開発を行った。光電子増倍管に変えて MPPC を使用しても問題なく、陽子と重陽子の粒子識別が可能であることが分かった[B, C]。

検出器の開発中に AVF サイクロトロン of 更新作業が始まり当初予定としていた大強度連続ミュオン発生装置 MuSIC での実験ができなくなってしまったため、J-PARC でのパルスビームでの実験を行う計画に変更し、プロポーザルは通った。そのためパルス幅の短い粒子識別可能な検出器の開発が必要で LYSO+ZnS(Ag)によるホススイッチタイプの検出器の開発を行った。ZnS(Ag)を E 検出器として、パルスシェイプにより E と E 成分を分けて粒子識別する。これにより時定数が 1 μ s の CsI(Tl)検出器での問題点をクリアし、京大複合原子力研究所の 11MeV ライナックや九大タンデムを使用した陽子イオン及び重陽子ビームによる検出器のテスト実験を行い粒子識別が可能であることが分かり検出器の開発は成功した[D]。その後 J-PARC での実験はコロナ禍で延期となり、中止となった。

大阪大学核物理研究センターの AVF サイクロトロン of 更新作業が終了し、再開の見込みが見ついたことから、方針を見直し、CsI(Tl)検出器の開発を再開する計画で、今年度は試験ができるような環境を整える作業を行った。しかしながら、サイクロトロン of 更新作業が長引き実験に至らなかった。

現状としては、検出器系 of 開発は終了したので、体制を整えてからビームタイムを申請する予定である。また、本研究による検出器システムを発展させ、新方式による低自然環境放射線バックグラウンド計数検出器 of 原理の特許を申請し、特許査定が通ったのは大きな研究成果である[E]。

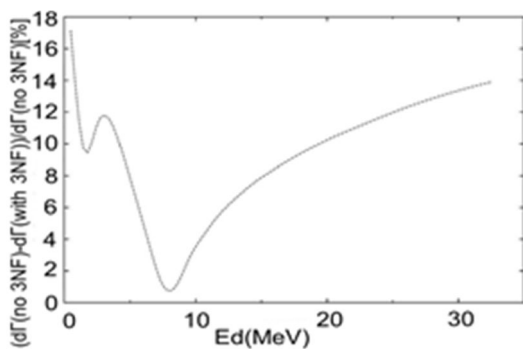
[A] J.Golak et al., PRC90(2014)024001, Private communication to Prof.Kamada

[B] Viet, 大阪大学修士論文 2020, Pulse shape discrimination for study muon capture on ^3He experiment

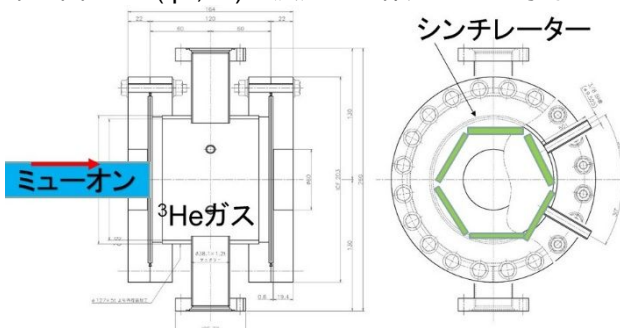
[C] Viet Nguyen V. H., Nomachi M., Takahisa K., Shima T., Khai B. T., Takaishi R., Miyamoto K.. IEEE Transactions on Nuclear Science 2021, Pulse Shape Discrimination of CsI(Tl) With a Photomultiplier Tube and Multipixel Photon Counters

[D] 宮元, 大阪大学修士論文 2021, ^3He ミュオン捕獲実験のための検出器開発と性能評価

[E] 高久 圭二, 神戸常盤大学紀要 2023, 新方式による低自然環境放射線バックグラウンド計数検出器 of 原理の実証



第一図 $^3\text{He}(\mu, nd)$ 反応の三体力による寄与が全体の中で占める割合。



第二図 チェンバー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Viet Nguyen V. H., Nomachi M., Takahisa K., Shima T., Khai B. T., Takaishi R., Miyamoto K.	4. 巻 68
2. 論文標題 Pulse Shape Discrimination of CsI(Tl) With a Photomultiplier Tube and Multipixel Photon Counters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 203 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tns.2020.3047615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Viet Nguyen V. H.	4. 巻 1
2. 論文標題 Pulse shape discrimination for study muon capture on ^3He experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 大阪大学修士論文	6. 最初と最後の頁 1,43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮元幸太郎	4. 巻 1
2. 論文標題 ^3He ミューオン捕獲実験のための検出器開発と性能評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大阪大学修士論文	6. 最初と最後の頁 1.36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高久 圭二	4. 巻 16
2. 論文標題 新方式による低自然環境放射線バックグラウンド計数検出器の原理の実証	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 神戸常盤大学紀要	6. 最初と最後の頁 83 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮元幸太郎
2. 発表標題 3Heミューオン捕獲実験のための検出器開発と性能評価II
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高久圭二
2. 発表標題 3Heミューオン捕獲実験のための新検出器系の計画及び開発状況
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Viet Nguyen V. H.
2. 発表標題 Performance evaluation of new detection system for the μ capture on 3He experiment
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 放射線検出器	発明者 高久圭二	権利者 学校法人玉田学園
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-024289	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------