

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24684013

研究課題名(和文)三核子系0度散乱による三体力高運動量成分の決定

研究課題名(英文) Three-nucleon scattering at zero degrees and three-nucleon forces in high-momentum region

研究代表者

関口 仁子 (Sekiguchi, Kimiko)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70373321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、原子核の諸性質を理解には、三つの核子が集まる事によって生じる三体力の重要性であることが指摘されている。本研究は、核物質の理解などに必要な三体力の高運動量成分を定量的に評価することを目的として、入射エネルギーが核子あたり200～400 MeVの重陽子・陽子散乱の超後方角度の測定を行うものである。理研RIBFにおいて重陽子・陽子弾性散乱の全ての偏極分解能測定を実施した。三体力と相対論効果のどちらをも考慮した理論解析との比較を行った。結果、相対論効果は小さいが、実験値と理論に大きな差があることがわかった。この差は、計算に取り込まれていない三体力の高運動量成分に起因しているという結論に至った。

研究成果の概要(英文)： Three nucleon forces (3NFs) are taken as key elements for fully understanding nuclear phenomena. In order to study 3NFs in high-momentum region measurement of all deuteron analyzing powers for deuteron-proton scattering at very backward angles at 200-400 MeV/nucleon has been performed at the RIKEN RIBF. Obtained data are compared with the relativistic Faddeev calculations in which 3NFs are also taken into account. Large discrepancies have been found at backward angles, and relativistic effects are estimated to be small. These results indicate that high-momentum components of 3NFs, which could play significant roles in nuclear matter properties, are missing elements and should be taken into account in the calculations of three-nucleon scattering at the higher energies.

研究分野：実験核物理

キーワード：三体力 核力 少数系 スピン 偏極重陽子 高運動量

1. 研究開始当初の背景

原子核の中ではフェルミオンである核子(陽子と中性子)が狭い領域に密集している。そこでは、主に二つの核子の間を中間子が交換する事で説明される核力が働いている。これは、湯川秀樹が提唱した中間子論であり、二体力である。しかしながら原子核では、核子が三つ同時に作用する事によって生じる力の存在も想定されている。これは二体力では説明できない三体力(核子間三体力)と呼ばれる力である。三体力は二体力に比べて非常に小さいことから、今までその効果を探し出すことは難しいとされてきた。

1990年代、核力研究は一つの転機を迎える。二体力の完成である。ここでの完成とは、二体力が入射核子の運動エネルギー350MeVまでの約4,000に及ぶ核子-核子散乱の実験データを $2\sim 1$ という精度で記述するまでに至ったということの意味する。これにコンピュータの飛躍的な高速化が伴い、三核子系散乱、原子核の結合エネルギー、核物質の状態方程式などにおいて二体力を用いた厳密理論計算が発表されるようになった。この結果、原子核の様々な性質が二体力のみでは実験値を説明出来ない事が示され、三体力研究の重要性が指摘されるようになった。

三核子系散乱では、研究代表者の関口等が理化学研究所(理研)で行った中間エネルギー(入射粒子のエネルギーが核子あたり100MeV付近)の重陽子と陽子の弾性散乱の微分断面積の高精度測定から、三体力が寄与している証拠が示された。図1に核子あたりの入射エネルギーが135MeV(135MeV/N)の重陽子と陽子の弾性散乱の微分断面積の結果と三核子系散乱の厳密理論計算(ファデーエフ計算)を示した。断面積が最小となる付近に見られる、二体力のみの計算(青い線束。現実的な二体の核力ポテンシャル:CDBonn、ArgonneV18、Nijmegen I、Nijmegen IIを使用)と実験値との約30%の違いは、Tucson-Melbourne(TM)型(赤い線束、上記の二体の核力ポテンシャルにTM型の三体力を考慮したもの)、Urbana型(黒い実線。ArgonneV18にUrbana型の三体力を考慮したもの)の二つの三体力によって説明される。二つの三体力は共に、三つ核子の間を中間子が交換する間に中間の核子が核子の励起状態であるデルタ励起を引き起こす、藤田・宮沢型と呼ばれる三体力を主要成分としている。この結果より、理論的に予言されていた三体力の大きさがほぼ正しいことが明らかになり、重陽子・陽子散乱において三体力の定量的な議論が可能な事が初めて示された。またスピン観測の結果では、現在の三体力モデルでは、実験値が説明されない事も明らかになった(Phys. Rev. C. 65, 034003-01-016(2002), Phys. Rev. C. 70, 014001-01-17(2004), Phys. Rev. Lett. 95, 162301-01-04(2005)に発表。)

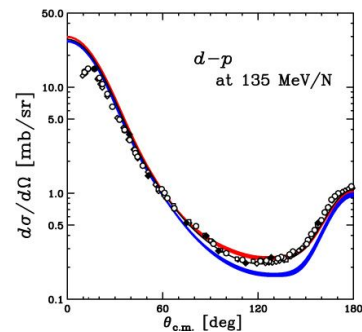


図1 入射エネルギー核子あたり135MeVにおける重陽子陽子弾性散乱の微分断面積。

上記で述べたように、三体力は原子核の様々な性質でその重要性が指摘されている。例えば、

- 1) 核物質においては、高密度の領域で三体力が非常に重要であると示唆されている。
- 2) 比較的軽い原子核では、結合エネルギーの約10~25%が三体力によるものであり、ヘリウム原子核などでは中性子数が過剰になるほど三体力の寄与が大きくなると指摘されている。

これらの研究が進むと同時に、低運動量領域から高運動量領域に渡って三体力を含む核力の検証が可能な少数核子散乱系を用いた核力の吟味が要請されるようになった。

この状況を受け、我々は、100MeV/Nより高いエネルギーにおける三核子系散乱、特に実験室系で0度(重心系で後方散乱)の三核子系散乱を行い、高運動量領域の三体力の情報を実験的に得ることが重要であると考えに至った。

2. 研究の目的

核子あたりの入射エネルギー200—400MeVの重陽子—陽子弾性散乱の超後方散乱(重心系)の測定を行い、三体力の高運動量領域の性質を定量的に評価する。また、この目的の達成には欠かせない、同反応における相対論的な効果について定量的な評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 理研RIBFにおける偏極重陽子偏極度計における重陽子・陽子弾性散乱の測定:

理研RIビームファクトリ(RIBF)において200~300MeV/N偏極重陽子ビームを用いた重陽子-陽子散乱実験を展開する事を目的として、ビームライン偏極度計BigDpolを用い、重陽子陽子弾性散乱の重陽子の全ての偏極分解能の測定を行う。

(2) 理研RIBFのSAMURAI磁気分析器による0度散乱の測定

理研RIビームファクトリ(RIBF)基幹施設SAMURAIスペクトロメーターにおいて重陽子一次ビームを用いた重陽子陽子弾性散乱の

実験室系 0 度散乱を含む測定を行う。

4. 研究成果

(1) RIBF に我々が建設したビームライン偏極度計 BigDpol を用いて、核子あたりの入射エネルギー 190, 250, 300 MeV (以後、MeV/N と略す) の重陽子 陽子弾性散乱の全ての偏極分解能 (iT_{11} , T_{20} , T_{21} , T_{22}) を重心系角度 $\theta_{c.m.} = 40^\circ \sim 160^\circ$ と広い角度範囲に渡って測定する事に成功した。本結果はエネルギー 200 ~ 300 MeV/N 付近において初めて系統的に高精度に得られた重陽子のすべての偏極分解能である。

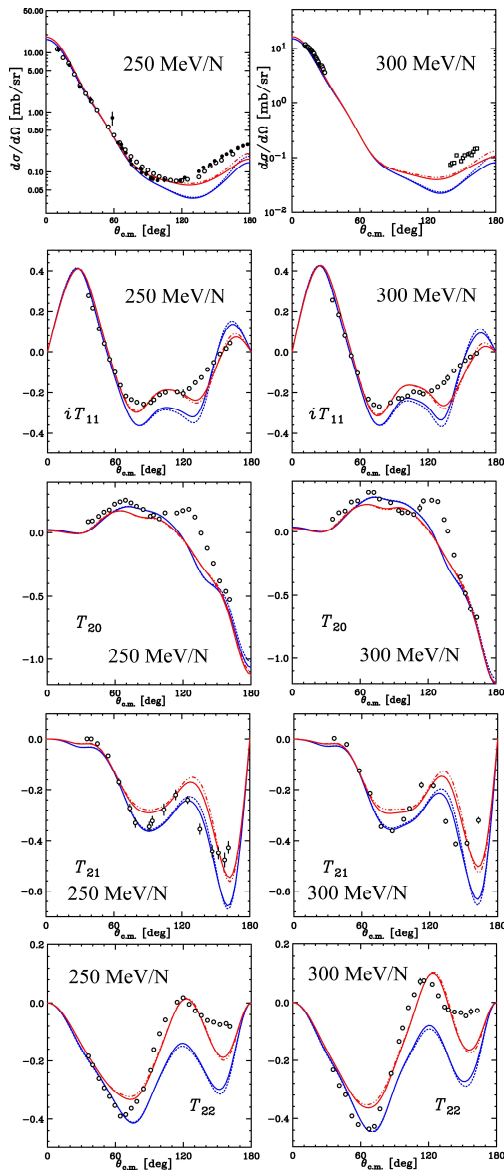


図2 入射エネルギー核子当たり 250MeV と 300MeV における重陽子 陽子弾性散乱の微分断面積と重陽子の全ての偏極分解能 (iT_{11} , T_{20} , T_{21} , T_{22})。

図2 に得られた実験結果を三核子系厳密理論計算 Faddeev 計算と比較を示した。青い実

線は 2 体力を考慮した Faddeev 理論計算、赤い実線は 3 体力を考慮した Faddeev 理論計算である。およそ 120 度より後方の角度では藤田・宮型三体力を導入しても理論と実験に大きな不一致(微分断面積では約 50%)が見つかるという、100MeV/N 付近の弾性散乱とは全く異なる状況がある事がわかった。

この結果は、三核子系散乱における高運動量領域の記述は、現在の三体力を含む核力では説明出来ない事を意味する。この実験結果を受け、三体力に相対論効果をも考慮した理論解析(図2中の赤い破線)が進んだ。この結果、相対論効果は、重陽子 陽子弾性散乱では無視できる程に小さく、我々の実験と理論計算との差は、核力の高運動量成分、特に现阶段では取り込まれていない三体力の高運動量が見えているという結論に至った

(Phys.Rev.C 89,64007(2014))。

現在、本測定で得られた実験結果を理解すべく様々な理論解析が進みつつある。例えば、より重い質量を持つ中間子交換型の三体力 (σ 型, ρ - ρ 型) や、複数の 励起を伴う三体力を考慮する試みである。一方、近年核構造の記述などにおいて精力的な研究が進んでいるカイラル有効場理論に基づく核力による三核子系散乱の理論計算も進んでおり、計算の収束性は良くないが 200MeV/N 付近までの理論計算が実現しつつある。

高運動量領域の三体力は、対称核物質の記述や、中性子星の質量の記述に重要な役割を果たすと予測されており、我々の実験によって得られた結果は、これら核物質の記述にも大きな影響を及ぼすことになると予想される。

(2) SAMURAI における重陽子-陽子散乱の測定については、施設側の事情により、研究期間内に実験を実施することはできなかった。(1)で行った実験と理論解析の進展から、高運動量領域における三体力の情報の概要は掴むことができつつある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

関口仁子(他 29 名,1 番目)

“Complete set of deuteron analyzing powers for dp elastic scattering at 250-294 MeV/nucleon and three-nucleon force”, Physical Review C 誌, Vol.89,064007-01-11(2014)

DOI:10.1103/PhysRevC.89.064007

I. Ciepal, 関口仁子, (他 33 名, 29 番目), “Investigation of Three-Nucleon Dynamics in the Deuteron-Proton Breakup Reaction”, Few-Body Systems 誌, 査読有, Vol.55, 639-644(2014)

関口仁子, (他 22 名,1 番目), “Complete set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three-Nucleon Forces”,

Few-Body Systems 誌, 査読有,
Vol.55,717-719(2014)
関口仁子, (他 22 名, 1 番目), " Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces ", EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, 査読有, Vol.66,03076(2014)
関口仁子, (他 22 名, 1 番目), " Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces ", JPS Conference Proceedings 誌, 査読有, Vol.1, pp.013037-01-04(2013)
DOI:10.7566/JPSCP.1.013037
和田泰敬, 関口仁子, (他 20 名, 2 番目), " Measurement of all Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at 294 MeV/nucleon ", Few-Body Systems 誌, 査読有, Vol.54,1335-1338(2013)
DOI:10.1007/s00601-013-0606-4
関口仁子, " Experimental Approach to three nucleon forces via few nucleon systems ", Few-Body Systems 誌, 査読有, Vol. 54, p911-916 (2013)
DOI:10.1007/s00601-013-0636-y
関口仁子, " Experimental Approach to Three Nucleon Forces in Few Nucleon Systems, Few Body Systems ", Few-Body Systems 誌, 査読有, Vol. 54, 177-183 (2012)
I. Ciepal, St.Kistryn, 関口仁子, (他 37 名, 32 番目), Vector analyzing powers of deuteron-proton elastic scattering and breakup at 130 MeV, Physical Review C 誌, 査読有, Vol. 85, 2012, pp.017001-01 017001-04(2012)
DOI:10.1103/PhysRevC.85.017001

〔学会発表〕(計 11 件)

関口仁子(招待講演), " Science with Q3D mode of SAMURAI ", 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the APS and JPS, 2014 年 10 月 7 日, ハワイ, アメリカ合衆国
関口仁子(招待講演), " Approach to Three Nucleon Forces from Experiment ", International Conference on Nuclear Theory in the Supercomputing Era, 2014 年 6 月 27 日, ハバロフスク, ロシア
関口仁子, " Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces ", 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, 2014 年 6 月 5 日, 東京
関口仁子, " Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies

and Three Nucleon Forces ", the 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics, 2013 年 9 月 13 日, クラクフ, ポーランド
関口仁子(招待講演), " Exploring Three Nucleon Forces in Few Nucleon Scattering ", International Workshop on Nuclear Dynamics with Effective Field Theory, 2013 年 7 月 3 日, ボホム, ドイツ
関口仁子, " Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces ", International Conference of Nuclear Physics 2013, 2013 年 6 月 4 日, フィレンツェ, イタリア
和田泰敬, 関口仁子, " 294MeV/nucleon の重陽子-陽子弾性散乱における重陽子偏極分解能の測定 ", 日本物理学会年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学
関口仁子(招待講演), " Experimental Approach to Three Nucleon Forces in Few Nucleon Systems ", International Symposium on Exotic Nuclear Structure from Nucleons, 2012 年 10 月 10 日, 東京
関口仁子(招待講演), " Complete set of deuteron analyzing powers for Deuteron-Proton Elastic Scattering at Intermediate Energies ", the 20th International Spin Physics, 2012 年 9 月 27 日, ドゥブナ, ロシア
和田泰敬, 関口仁子, " Measurement of all deuteron analyzing powers for *d-p* elastic scattering at 294 MeV/nucleon ", the 20th IUPAP International Conference on Few Body Problems in Physics, 2012 年 8 月 24 日, 福岡
関口仁子(招待講演), " Experimental Approach to Three Nucleon Forces in Few Nucleon Systems ", the 20th IUPAP International Conference on Few Body Problems in Physics, 2012 年 8 月 23 日

〔その他〕

関口仁子, 湯浅年子賞銀賞受賞, 2014 年 12 月, お茶の水女子大学
宮崎純平, 修士論文 " 重陽子エネルギー 588MeV における偏極重陽子-陽子弾性散乱の偏極分解能測定 ", 2013 年 2 月, 東北大学
関口仁子, 守田科学研究奨励賞受賞, 2013 年 5 月, 大学女性協会

6 . 研究組織

(1)研究代表者

関口 仁子 (SEKIGUCHI KIMIKO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70373321