

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17660

研究課題名(和文)炭素14原子核の陽子弾性散乱測定による三体力の定量的抽出と核物質への応用

研究課題名(英文) Study of effective interactions and the nuclear equation of state by measuring elastic scattering of protons from ^{14}C

研究代表者

松田 洋平 (Matsuda, Yohei)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：50569043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：核物質の状態方程式において飽和密度付近から高密度側にかけての状態方程式を決定するには、二体力だけでなく三体力も定量的に評価する必要がある。本研究では、この三体力を300 MeVでの炭素14偏極陽子弾性散乱測定から評価できることに着目した。炭素14標的は非密封RIとなるため安全な標的の作成、保管、使用が求められる。各工程で安全対策を施し、標的作成から散乱実験終了まで被曝や汚染の問題なしに終えることができた。また炭素14からの散乱イベントも観測できたことから、不安定核を標的とした順運動学での偏極陽子弾性散乱測定の手法を本研究においてほぼ確立できたと言える。

研究成果の概要(英文)：Three-body forces play an important role to determine the equation of state of the nuclear matter. The three-body forces also play an important role to describe the elastic scattering of polarized protons from ^{14}C at 300 MeV. Therefore, in order to evaluate the effect of the three-body forces, we plan the experiment in normal kinematics. Great care must be taken when handling ^{14}C which is not sealed. By taking safety measurements, we could make the ^{14}C target, and observe the scattering without radiation exposure and radioactive contamination. Therefore, it is concluded that we established a basis for measuring the elastic scattering of protons from unstable nuclei in normal kinematics.

研究分野：数理系科学

キーワード：放射性同位体 偏極陽子弾性散乱 炭素14

1. 研究開始当初の背景

無限個の核子(陽子と中性子)からなる核物質の状態方程式を現実的な核力から記述することは、核子多体系が引き起こす多様な現象を予言し、その根底にある基本法則を理解する上で重要である。また状態方程式の決定は、重力崩壊型の超新星爆発、中性子星の構造、重元素の起源といった現在の宇宙を構築する過程を説明する上でも重要である。

現在、現実的な核力のみでは飽和点の実験値を再現できないことが知られている。これは飽和密度付近から高密度側にかけて二体力だけでなく、三体力の寄与が無視できないことに由来するものであり、三体力の効果を定量的に評価する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、300 MeV での ^{14}C 偏極陽子弾性散乱を実験誤差 5% で運動量移行 3 fm^{-1} まで測定することで(散乱を記述する光学ポテンシャルを決定することで)、飽和密度付近での斥力の三体力を定量的に求めることである。

陽子弾性散乱と核物質は密接な関係にある。歴史上、陽子弾性散乱を記述するために作られた反応モデルのうち、実験値をよく再現できたモデルは核物質での理論を有限系の原子核に適用したものであった。このような陽子弾性散乱と核物質の密接な関係性を利用して観測量を解析すれば状態方程式に対する三体力の効果を定量的に評価できる。300 MeV における炭素 14 陽子弾性散乱を記述する光学ポテンシャルにおいて、中心力の実部は斥力の三体力を表す成分によってほぼ占められている。他の核種やエネルギー領域では、核表面から内部まで中心力が三体力の成分で占められることはない。申請者らのグループでは、相対論的手法の一つである相対論的インパルス近似を用いて安定核の偏極陽子弾性散乱測定から光学ポテンシャルを精度よく抽出する手法を開発している。この手法を用いることで、本研究の遂行が可能となっている。

3. 研究の方法

炭素 14 は放射性物質であるが寿命が長いので、固体標的にすることが可能である。通常、不安定核の場合、測定したい不安定核をビームとして使い、逆運動学で実験が行われる。しかし、この方法では実験的困難から研究の目的で述べた精度での測定は難しい。そこで本研究では、炭素 14 を標的として用い安定核と同じ順運動学で測定することで、この問題を解決する。但し、炭素 14 は粉末状でしか購入できないため、油圧プレス機で固めて標的を自作する必要がある。この標的は非密封 RI として扱うことになり、安全な標的の作成、保管、使用が求められる。これらはいずれも大阪大学核物理研究センター(RCNP)の管理区域内で行う。

標的作成から実験までの手順を以下(1)-(3)に示す。

- (1) RCNP 内にセンター長直属の諮問機関「炭素 14 安全委員会」を設け、本研究の安全審査を行う。委員会は RCNP 内 6 名、外部機関 4 名の有識者(計 10 名)で構成される。
- (2) 炭素 14 標的作成を RI 棟 セミホット化学東実験室のドラフトチャンバー内で行う。ドラフトチャンバー内に図 1 のグローブボックスを設置する。右側のグローブボックス内に設置された油圧プレス機で炭素 14 粉末を固める。出来た標的は左側のグローブボックスに移され、周囲を汚染しないよう密封された状態で取り出される。
- (3) WS コースの Grand Raiden スペクトロメーターを用いて 300 MeV での炭素 14 偏極陽子弾性散乱測定を行う(図 2)。

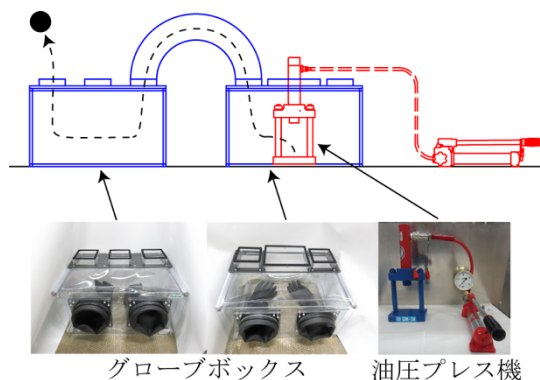


図 1: ドラフトチャンバー内に設置したグローブボックスと油圧プレス機。

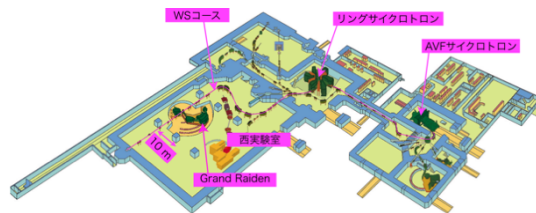


図 2: RCNP 加速器施設の鳥瞰図。

4. 研究成果

(1) 炭素 14 標的の作成

本研究では 40 mCi/g の粉末を 20 mg 用いた。粒径とプレス圧を変えながら作成を試み、最適な作成条件を導くことに成功した。図 3(a) に作成した直径 1 cm、厚さ 20 mg/cm² の標的を示す。この標的に 300 MeV、6-200 nA の陽子ビームを合計 8.3 $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ 照射した後の写真を図 3(b) に示す。粉末が外部に飛散ないように表面に貼られた 4 μm 厚のアラミ

ドは変色していた。一方、標的自体はセルフサポートでありながら、熱伝導率を下げる接着剤等の不純物を混ぜなかったため、温度上昇による劣化は見られなかった。

製作段階で出た RI 廃棄物については、安全委員会からの助言をもとに「日本アイソトープ協会から借用する RI 廃棄容器に収まる寸法」、「容器あたりの放射能制限値を超えない」、「再利用できるものは可能な限り除染する」といった計画を立てていたため、廃棄手続きで問題が生じることはなかった。表面汚染は、低エネルギーβ線を検出できるガスフローカウンターを用いて直接測定法と間接測定法で測定した。標的作成から廃棄作業の間で汚染が確認されることはなかった。これら RI 廃棄物の量と汚染検査の情報は、今後より高い放射能の標的を作成する際の安全対策に役立つ。

以上の成果については、日本物理学会 2017 年秋季大会にて報告した([学会発表 (8)])。

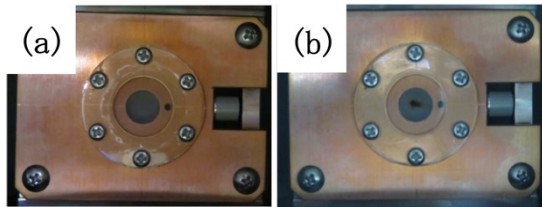


図 3: (a) ビーム照射前、(b) 照射後の標的。

(2) 偏極陽子弾性散乱測定

2017 年前半に炭素 12, 13, 14 の偏極陽子弾性散乱測定を行なった。実験中は実験室への入室制限、標的を扱うための専用ブースの設置等を行い、被曝しない環境を整えた。またカメラと放射温度計を用いて、標的が破損しないか常時監視を行なった。他にも過去に標的が真空リークによる圧力上昇で破損した例があったことから、リークを検知してから 20 msec で閉まるシャッターを標的直前に設置し、対応した。真空リークが起きてから標的位置で圧力上昇が起きるまで約 40 msec であり、このシャッターで対応可能である。これらの対策により実験中に被曝や汚染といった問題は生じなかった。

図 4 に炭素 14 標的を用いて得られた励起エネルギー分布を示す。質量数 12, 13, 14, 16 の粒子からの弾性散乱事象が見られる。質量数 12, 13 のピークは粉末に含まれる炭素の安定同位体によるものである。これらの収量から、粉末に含まれる炭素の安定同位体比は自然存在比と同じであることがわかった。また作成した標的の厚さは、計画通り 20 mg/cm² であることもわかった。

炭素 14 の測定では同じ質量数の窒素 14 がバックグラウンドとなる。窒素 14 は放射能が外部に漏洩しないように設けられている標的窓に含まれている。バックグラウンドの

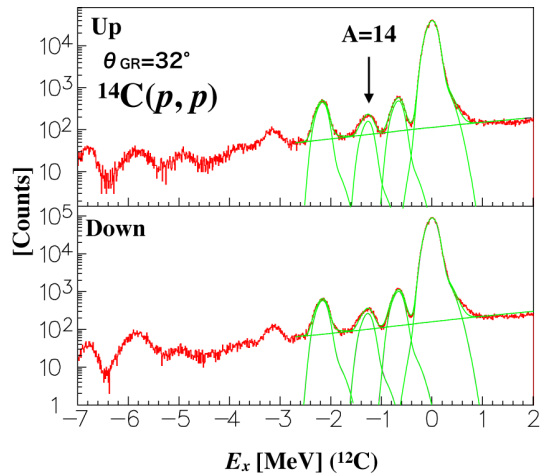


図 4: 実験室系 32° での励起エネルギー分布。

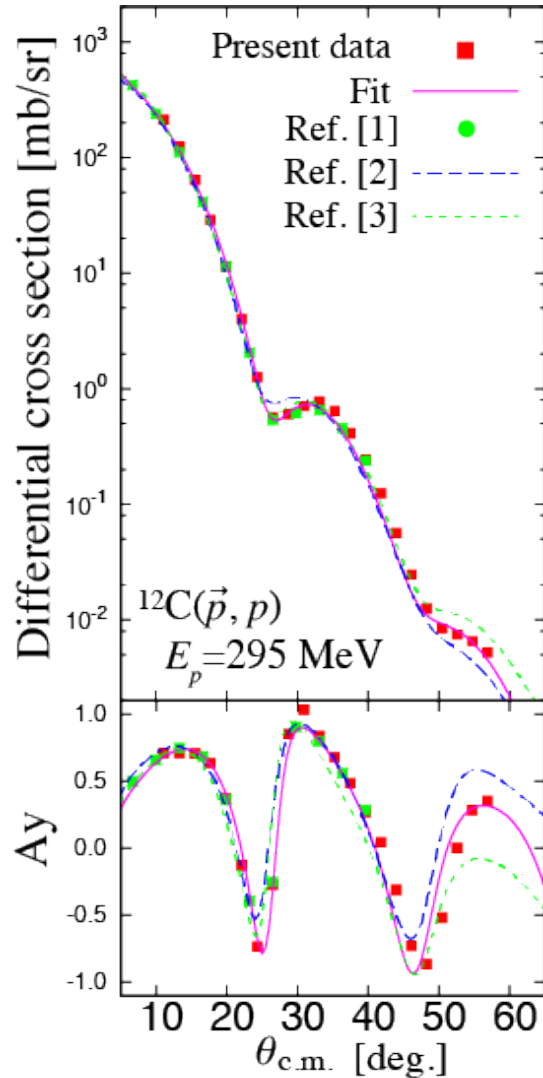


図 5: 炭素 12 の微分断面積と偏極分解能の角度分布。Ref. [1]: A. Tamii et al., NIMA 605, 326 (2009). Ref. [2]: H. O. Meyer et al., PRC 31, 1569 (1985). Ref. [3]: E. D. Cooper et al., PRC 47, 297 (1993).

引き算を行なった結果、窒素 14 とほぼ同程度の収量が得られていることがわかった。これより、実験中に被曝や汚染といった問題がなかったことと合わせて、不安定核を標的とした順運動学での偏極陽子弾性散乱測定の手法をほぼ確立できたと言える。

炭素 12 と炭素 13 標的については、過去の測定(Ref. [1])よりもさらに後方角度での微分断面積と偏極分解能の値も取得した(図 5)。実験値を再現するように有効相互作用を調整した計算結果を実線で示す。点線と破線で示した先行研究に比べ、後方散乱角度まで実験値を非常によく再現していることがわかる。後方散乱角度までの実験値を再現するよう有効相互作用を調整したことで、密度分布の抽出精度を上げることが可能となった。

今回用いた炭素 14 標的には炭素の安定同位体が混じっていた。この割合を減らすとともに窒素 14 を含まない物質を標的窓として用いることができれば、測定データの誤差を小さくできる。次のステップに向けて解析結果をもとに上記の可能性を検討した。

以上の成果については、物理学会第 73 回年次大会で報告した([学会発表 (5)])。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Adachi, T. Kawabata, ..., Y. Matsuda et al., “Systematic analysis of inelastic α scattering off self-conjugate $A=An$ nuclei”, 査読有, Phys. Rev. C **97** (2018) 014601, DOI: 10.1103/PhysRevC.97.014601
- ② Y. K. Gupta, U. Garg, ..., Y. Matsuda et al., “Are there nuclear structure effects on the isoscalar giant monopole resonance and nuclear incompressibility near $A\sim 90$?”, 査読有, Phys. Lett. B **760** (2016) 482-485, DOI: 10.1016/j.physletb.2016.07.021
- ③ J. Yasuda, M. Sasano, ..., Y. Matsuda et al., “Inverse kinematics (p, n) reactions studies using the WINDS slow neutron detector and SAMURAI spectrometer”, 査読有, Nucl. Instr. Meth. B **376** (2016) 393-396, DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.007
- ④ Y. Matsuda et al., “Solid hydrogen target for missing mass spectroscopy in inverse kinematics”, 査読有, J. Radioanal. Nucl. Chem. **305** (2015) 897-901, DOI: 10.1007/s10967-014-3903-6

[学会発表] (計 28 件)

- (1) 原田 知也, ”大強度イオンビーム用の Xe ガスシンチレーション検出器の開発”, 日本物理学会第 73 回年次大会、

2018 年 3 月 25 日、東京理科大学(千葉県野田市)

- (2) 平川景史, “多層プラスチックシンチレータによる位置感応型(アクティブ)陽子標的の開発”, 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 25 日、東京理科大学(千葉県野田市)
- (3) 石田 駿野, ”不安定核ビームの TOF 検出器としてのガスシンチレーション検出器の開発”, 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大学(千葉県野田市)
- (4) 笠松 幸生, “10GHz ECR イオン源の引き出し電極改良によるビーム電流の増強”, 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大学(千葉県野田市)
- (5) 松田 洋平, ”炭素 14 偏極陽子弾性散乱測定の実状”, 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大学(千葉県野田市)
- (6) 松本 翔汰, “BigRIPS における高精度パイ中間子原子分光・二重 Gamow-Teller 巨大共鳴探索実験に向けた新検出器システムの性能評価(ii)”, 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22 日、東京理科大学(千葉県野田市)
- (7) 高橋 祐羽, “パラ水素を用いた薄型自己保持固体水素標的の開発”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- (8) 松田 洋平, “偏極陽子弾性散乱実験のための炭素 14 標的の開発”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- (9) 阪上 朱音, “RCNP におけるパイ中間子原子分光のためのビームエネルギー評価手法”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- (10) 岩本 ちひろ, “ガスアクティブ標的 CAT の大型化に向けた二重増幅率制御型多層 THGEM の開発”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- (11) 平郡 克吉, “逆運動学による ^{36}Ar のアルファクラスター状態探索”, 日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- (12) 那須 裕, “崩壊 α 粒子測定による炭素 13 の α クラスターガス状態の探索”, 日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- (13) 阪上 朱音, “($p, ^2\text{He}$) 反応を用いたパイ中間子原子分光のためのイオン光学系の開発”, 日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 19 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- (14) 原田 知也, ”不安定核 ^{132}Sn の逆運動学陽子弾性散乱測定”, 日本物理学会第

- 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- (15) 小山 俊平、“ ^{16}C のクラスター構造”、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- (16) 阪上 朱音、“Grand Raiden による ^2He 検出に向けた光学系の開発”、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 24 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)
- (17) 渡辺 珠以、“RCNP におけるパイ中間子原子分光実験の検討”、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 22 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)
- (18) 津村 美保、“ ^{12}C 原子核における稀 γ 崩壊モード探索のためのテスト実験”、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)
- (19) M. Tsumura, “Search for the rare gamma-decay mode in ^{12}C ”, Symposium on Nuclei in the Cosmos, Niigata, Japan (2016).
- (20) M. Tsumura, “Search for the rare gamma-decay mode in ^{12}C ”, 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Naples, Italy (2016).
- (21) 平郡 克吉、“ ^{36}Ar のアルファクラスター状態探索実験のための焦点面装置開発”、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- (22) 安田 淳平、“ $^{132}\text{Sn}(p, n)$ 反応によるガモフテラー遷移の研究”、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 20 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- (23) 山本 哲也、“核子移行反応を用いた、中性子数 20 の中性子過剰核における殻進化の研究”、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- (24) 小山 俊平、“不変質量法を用いた ^{16}C のクラスター状態の研究”、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- (25) 古野 達也、“MAIKo アクティブ標的における飛跡構築アルゴリズム”、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- (26) 高木 基伸、“重イオン二重荷電交換反応による ^{48}Ti の二重ガモフテラー共鳴探索”、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 27 日、大阪市立大学(大阪府大阪市)
- (27) 岩本 ちひろ、“ジルコニウム同位体のピグミー双極子共鳴及び双極分極率”、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 27 日、大阪市立大学(大阪府大阪市)
- (28) Y. Matsuda, “First ESPRI experiment

at RIBF “, RIBF Users Meeting 2015, Saitama, Japan (2015).

[その他]
ホームページ等
<http://choukai.cyric.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 洋平 (MATSUDA, Yohei)
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教
研究者番号：50569043