

令和元年6月18日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05451

研究課題名(和文) 不安定核の陽子中性子分布で解明する中性子核物質の状態方程式

研究課題名(英文) Study of neutron matter equation of state with proton and neutron density distributions of unstable nuclei

研究代表者

銭廣 十三 (Zenihiro, Juzo)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・研究員

研究者番号：70529057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円

研究成果の概要(和文)：核物質の状態方程式(EOS)の解明を目指す実験的研究である。特に対称エネルギーと呼ばれる、陽子・中性子の非対称度に依存する項は原子核の中性子スキン厚と強い相関があることが知られており、我々は陽子弾性散乱測定から正確な密度分布及び中性子スキン厚を決定する手法を確立してきた。本研究ではこの手法をより大きな中性子スキンを持つと見込まれる非対称度の大きい不安定核へ展開し、理研RIBFにおいて錫132の逆運動学陽子弾性散乱を測定することに初めて成功した。また、新しいEOS研究手法を密度分布の系統変化や、クラスター発現の観点から展開することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙に存在する天体現象や元素の起源の解明は物理学における非常に重要なテーマの一つである。特に中性子星と呼ばれる天体は中性子でできた巨大な原子核とでも言うべき物質で、特に重い元素の生成起源として大いに注目されている。しかしその構造やダイナミクスについてはまだ良くわかっていない。そこで鍵となるのが、核子(陽子・中性子)を構成要素とする物質(核物質)の状態方程式である。特に陽子が極端に少ない系はそのまま中性子星の構造を示していることに他ならない。核物質の特に中性子物質の状態方程式を知ることはそのまま宇宙の成り立ちを知ることにつながっているのである。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the nuclear matter equation of state (EOS), especially the isospin asymmetry term, so-called "symmetry energy", we have established the method to directly determine the nucleon density distributions and the neutron skin thicknesses because the symmetry energy is known to have strong correlation with the neutron skin thicknesses of double magic nuclei. We have also extended this experimental method to unstable nuclei, finally have successfully measured proton elastic scattering of ^{132}Sn in inverse kinematics. In addition, we have developed new methods to investigate the EOS with the systematic change of density distributions, or alpha-clustering in medium-heavy nucleus.

研究分野：原子核物理学

キーワード：核物質状態方程式 中性子星 中性子密度分布 不安定核 陽子弾性散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核は陽子と中性子という2種類のフェルミ粒子から成る量子多体系である。近年、陽子と中性子の数が極端に異なる不安定な原子核の研究から、安定核では見られなかったエキゾチックな現象(ハローやスキン構造、魔法数の変化等)が確認されてきた。安定核よりはるかに多く存在する不安定核を含む包括的な原子核物性の理解が課題となっている。中でも原子核物質の状態方程式(Equation Of State; EOS)の解明は、原子核物理学の最も大きな未解決問題の1つである。

EOSの中でも特に陽子と中性子の密度の違い(アイソスピン非対称度)に依存する項である対称エネルギーを明らかにすることは巨大な原子核とも言える中性子星の構造解明に重要な役割を果たすことが知られている。対称エネルギーは実は重い原子核の中性子スキン厚(陽子と中性子分布の半径の差)や飽和密度と強く相関している事がわかってきた。特に注目されている原子核が二重魔法数を持つ鉛 208 である。しかし過去の研究では、核構造モデルの不訂正が非常に大きく正確な密度分布や中性子スキンの決定が困難であった。最近ではアイソスピン非対称度の大きい不安定核の中性子スキンも注目されておりこの決定が待たれている。しかし実験の困難さから主に安定核に実験的研究が限られている状況であった。

2. 研究の目的

中性子核物質の状態方程式(EOS)の解明を目指す研究である。特に、陽子と中性子の非対称度に依存する対称エネルギーと呼ばれる項を実験的に決定することを目指している。これにより原子核構造の包括的理解だけでなく天体現象である中性子星の構造や超新星爆発過程や宇宙に存在する元素の成り立ちを知ることが可能となる。我々は安定な原子核だけでなくアイソスピン非対称度のより大きな不安定核の陽子弾性散乱測定を実現し、系統的な陽子・中性子密度分布及び中性子スキン厚を精密に決定することで、対称エネルギーの決定を目指す。

3. 研究の方法

理研 RIBF において重い不安定核での逆運動学陽子弾性散乱実験(Elastic Scattering of Protons with RI beams: 通称 ESPRI 実験)を実現させる。ESPRI 実験のために開発してきた検出器である Recoil Particle Spectrometer(RPS)に加えて、重い大強度不安定核ビーム識別用検出器を新たに開発しこれを用い効率的な実験データの取得を行う。これまで安定核で培ってきた手法を不安定核の実験データに適用することで不安定核での中性子スキン測定を行う。同時に他の安定核での系統的な研究も進め、両者を合わせることで EOS の対称エネルギーの解明を進める。

4. 研究成果

理研 RIBF は世界でも類を見ない大強度の重イオンビームを供給可能なサイクロトロン加速器施設である。それ故、純度も強度も大きな不安定核ビームを作る能力を有している。しかし、作る事はできてもこれを利用することには大きな隔りがある。通常不安定核ビームを使うには検出器による一粒子毎の識別が必須である。原子番号が大きくあまりに高い強度の不安定核ビームの場合、検出器が大きな放射線損傷や高頻度による低効率のために実質的に使用できなくなってしまいう現状があった。結果、粒子識別能力がボトルネックとなり強度を落とした精度の低い実験を行わざるを得なかった。しかし、本研究では精密なデータが必須であるため、十分な量のビームが不可欠である。そこで、我々は新たに放射線損傷に強く応答の速い検出器(多芯線ドリフト型位置検出器、ダイヤモンド検出器等)の開発を行い、さらには新しい粒子識別手法(Bp-Bp-ToF 法)の開発実験を行った。これにより、これまでの10倍以上の強度の不安定核ビームの識別に成功してきた。この結果は本研究だけでなく RIBF で行われる他の多くの実験の効率を改善することに繋がる大きな成果である。

大強度不安定核ビームの粒子識別法の開発によって、本研究のハイライト実験である、錫 132 の陽子弾性散乱測定を成功するに至った。世界で初めて核子あたり 200MeV での陽子弾性散乱現象を高い分解能で取得することができた。また、RIBF で初めてのパラサイト型実験を行うことで不安定核ビームの効率的な利用を実現させた。限られた実験期間で複数の実験がビームを共有することで、効率的に高精度データを取得できることを示した。しかし、残念ながら加速器から供給される1次ビーム強度は当初予定していたものより一桁少なかったため、統計精度が低くなっただけでなく、純度も低い不安定核ビームを利用することになった。このことはその後予定していた300MeVでの同測定や提案予定であったより稀少な不安定核でのESPRI実験計画の変更を余儀なくされてしまった。300MeVでの同測定と合わせることで初めて陽子・中性子密度分布及び中性子スキン厚を決めることができるため、両方のエネルギーでの測定は不可欠で

ある。そこで、我々はさらに高精度で高効率なビーム利用を目指し、新しい検出器、Xe ガスシンチレータの開発に着手し、このテストを放射線医学総合研究所にある HIMAC 等で行ってきた [1]。その結果非常に高いエネルギー、時間分解能や高頻度測定に対する耐性を有することがわかった。Xe ガスシンチレータは本研究においてだけでなく、RIBF の次世代の粒子識別検出器として期待されている。RIBF のビーム時間割当の制限から残念ながら本研究課題期間中にはできなかったが、2019 年度に Xe 検出器を用いた 300MeV での錫 132 の ESPRI 実験を予定している。

また延期を余儀なくされた、錫 132 より稀少な不安定核での研究に代わり、カルシウム 48 での研究を並行して行って来た。近年の理論研究の進歩により、中重核領域での第一原理計算が可能となったことで、カルシウム 48 の陽子・中性子密度分布や中性子スキン厚の理論と実験の直接比較からモデル依存性の小さい核物質 EOS 研究を進めることができた [2]。また、中性子スキンだけでなく密度分布の直接比較とアイソトープ間での密度変化から EOS にアプローチする新しい研究手法も可能となった。この研究を足がかりに、今後カルシウム 52, 54 へ展開していく予定である。

さらに、これまでの核物質 EOS では構成要素が陽子と中性子だけであったが、あらたにヘリウム 4 原子核(アルファ粒子)が 3 つ目の構成要素として存在する系が理論研究から注目されている。そこで我々は錫同位体原子核中に存在するであろうアルファ粒子を陽子によるノックアウト反応測定から探る実験的研究を開始した。大阪大学 RCNP での本測定に成功し、実際にアルファ粒子が原子核表面に存在することを初めて確認しアイソスピン依存性があることがわかった。こちらを系統的な研究を展開するため RIBF で同様の実験を不安定核で行う計画を進めている。

また、これまでの研究成果を Review 論文にまとめて発表することができ、本研究の意義が認知されるに至っている [4]。本研究に関連した Workshop を年 1 回程度主催し、実験と理論との意思疎通により新しい研究展開を進めることができた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] J. Zenihiro, T. Harada, S. Terashima, Y. Matsuda, S. Ota, H. Sakaguchi, K. Kawata, S. Ishida, Y. Kasamatsu and E. Takada, Development of the gaseous Xe scintillation detector, 査読有, RIKEN Accel. Prog. Rep. 51, 156 (2018).
- [2] J. Zenihiro, H. Sakaguchi, S. Terashima, T. Uesaka, G. Hagen, M. Itoh, T. Murakami, Y. Nakatsugawa, T. Ohnishi, H. Sagawa, H. Takeda, M. Uchida, H.P. Yoshida, S. Yoshida, and M. Yosoi, Direct determination of the neutron skin thicknesses in $^{40,48}\text{Ca}$ from proton elastic scattering at $E_p = 295$ MeV, 査読無, arXiv ID:1810.11796v1 (2018).
- [3] S. Chebotaryov, S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Akiyama, Y. Ando, M. Assie, D. Beaumel, N. Chiga, M. Dozono, A. Galindo-Uribarri, B. Heffron, A. Hirayama, T. Isobe, K. Kaki, S. Kawase, W. Kim, T. Kobayashi, H. Kon, Y. Kondo, Y. Kubota, S. LeBlond, H. Lee, T. Lokotko, Y. Maeda, Y. Matsuda, K. Miki, E. Milman, T. Motobayashi, T. Mukai, S. Nakai, T. Nakamura, A. Ni, T. Noro, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Park, A. Saito, H. Sakai, M. Sasano, H. Sato, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, I. Stefan, L. Stuhl, M. Takaki, K. Taniue, K. Tateishi, S. Terashima, Y. Togano, T. Tomai, Y. Wada, T. Wakasa, T. Wakui, A. Watanabe, H. Yamada, Zh. Yang, M. Yasuda, J. Yasuda, K. Yoneda, and J. Zenihiro, Proton elastic scattering at 200 A MeV and high momentum transfers of $1.7\text{-}2.7\text{ fm}^{-1}$ as a probe of the nuclear matter density of ^6He , 査読有, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 053D01.
- [4] H. Sakaguchi, and J. Zenihiro, Proton elastic scattering from stable and unstable nuclei – Extraction of nuclear densities, 査読有, Progress in Particle and Nuclear Physics 97, 1-52 (2017).

[学会発表] (計 8 件)

- [1] J. Zenihiro, “ ESPRI project and Nuclear density distributions ” (invited)
電子光理学研究センター拠点研究会, “ 電子散乱による原子核研究 -陽子半径、不安定核の電荷密度分布を中心に- ”, 2019年3月20日-21日
- [2] J. Zenihiro, “ Direct determination of neutron skin thickness of ^{48}Ca via proton elastic scattering ”
13th International conference on nucleus-nucleus collisions (NN2018),

Saitama Japan, 4th - 8th December, 2018.

- [3] J. Zenihiro, “ Direct determination of neutron skin thickness of ⁴⁸Ca from proton elastic scattering and the ESPRI project ”
Hawaii2018 -Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 23rd - 27th October, 2018
- [4] J. Zenihiro, “ New detector design for (p,p), (p,pX) experiments ” (invited)
SAMURAI Workshop, RIBF week 2018, 3rd - 4th September 2018
- [5] J. Zenihiro, “ Overview of RIBF ” (invited)
The 17th CNS International Summer School (CNSSS18), 22nd - 28th August 2018
- [6] J. Zenihiro, “ Recent status of the ESPRI project ”
One-day Workshop at RIKEN Nishina Center “ Current status of the microscopic description of nucleon-nucleus scattering ” , 17th November 2017
- [7] J. Zenihiro, “ Radius experiments at RIBF ” (invited)
International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, 4th - 5th, December 2017
- [8] J. Zenihiro, “ Proton elastic scattering and nucleon density distributions ”
International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016), Sendai, Japan, 21–24 November 2016

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 寺嶋知

ローマ字氏名 : Satoru Terashima

研究協力者氏名 : 松田洋平

ローマ字氏名 : Yohei Matsuda

研究協力者氏名 : 坂口治隆

ローマ字氏名 : Harutaka Sakaguchi

研究協力者氏名 : 上坂友洋

ローマ字氏名 : Tomohiro Uesaka

研究協力者氏名 : 大田晋輔

ローマ字氏名 : Shinsuke Ota

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。