

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24105004

研究課題名(和文)高密度中性子過剰核物質の状態方程式

研究課題名(英文)EOS for High-Density Neutron-Rich Nuclear Matter

研究代表者

村上 哲也(Murakami, Tetsuya)

京都大学・理学研究科・講師

研究者番号：50219896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 147,500,000円

研究成果の概要(和文)：超新星爆発の結果作られる中性子星の外核の熱力学性質、状態方程式(EOS)を地上実験で決定することを目指し、理化学研究所の放射性同位元素ビーム工場(RIBF)で加速される中性子を多く含む錫原子核を通常の錫原子核に正面衝突させる実験を行った。この実験で一時的に作られる高密度原子核物質の密度はちょうど中性子星の外核のものに対応している。作られた高密度核物質から放出される正負荷電パイ中間子を新たに開発した大型の時間射影型検出器で3次的に捉え、予定を上回る統計のデータ収集に成功した。荷電パイ中間子の生成比のデータ解析は現在進行中で、間もなく高密度領域での中性子星物質EOSが抽出できる見通しである。

研究成果の概要(英文)：Neutron star is believed to be created as a remnant of super nova explosion. In order to determine a thermodynamical character of outer core of neutron star through terrestrial experiments we have performed a series of measurements using RIKEN Radio Isotope Beam Factory (RIBF). Various central collisions between neutron-rich tin nucleus and normal tin nucleus were measured. The density achieved by the collisions nearly corresponds to the one for the outer core of neutron star. Both positive and negative pions emitted from the high density nuclear matter were detected by a newly developed large time projection chamber which can provide 3-dimensional image of their tracks. We have successfully accumulated data with higher statistics than planned. Data analysis to extract precise yield ratios between charged pions is in progress. We expect to constrain the EOS for neutron star soon.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：中性子星 高密度核物質 状態方程式 時間射影型検出器

1. 研究開始当初の背景

新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」では、まだ謎に包まれている中性子星内部の物質の性質を様々の分野の連携で探ることを目指している。中性子星核物質の熱力学的性質は、状態方程式(EOS)と呼ばれている内部エネルギー、圧力、温度、密度 $\rho = \rho_n + \rho_p$ 、そして次式で定義されるアイソスピンの非対称パラメータ δ

$$\delta = (\rho_n - \rho_p) / (\rho_n + \rho_p)$$

相互の関係式で特徴づけられると考えられている。ここで、 ρ_n 、 ρ_p はそれぞれ核物質中にある中性子と陽子の密度を表している。 δ がゼロである中性子の密度と陽子の密度が釣り合っている対称な核物質のEOSは、これまでの広汎な実験研究の結果、かなり広い密度領域でその性質が分かっている。これに対して、陽子数と中性子数がアンバランスな非対称核物質のEOSについては、中性子星の巨視的な観測量であるその質量と半径の間の関係を決める重要なものであるにもかかわらず、まだ十分な理解が進んでいない。非対称な核物質中の核子の持つ平均エネルギー $E(\rho, \delta)$ は、経験的に

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2$$

のように、対称核物質($\delta=0$)の状態方程式 $E(\rho, 0)$ に δ の自乗に比例する項を加えた式で書き表せる。 $E_{sym}(\rho)$ は対称エネルギーと呼ばれている。飽和密度領域(通常の原子核密度 ρ_0 の周辺)での $E_{sym}(\rho)$ の振る舞いについては、世界各国で精力的に行われている鉛原子核の陽子分布と中性子分布の違いの測定をはじめとする様々な物理量の測定である程度の制限が与えられている。一方、飽和領域外、特に $\rho > 2\rho_0$ となる高い密度領域での $E_{sym}(\rho)$ については、ほとんど制限がつけられていない。この領域でのEOSを探るためには、中間エネルギー領域での不安定核(中性子過剰核)ビームを安定中性子過剰核に正面衝突させ、広い範囲の δ をもつ高密度中性子過剰核物質を作りだして、その崩壊の様相を調べる必要がある。今世紀初頭、アメリカの原子核理論家Bao-An Li等は原子核衝突の理論シミュレーションを使い、不安定核衝突実験を行えば $E_{sym}(\rho)$ に強い制限がかけられることを示唆した。測定すべき物理量としては、高密度中性子過剰核物質が原子核衝突で作り出される途上前平衡過程で放出される中性子と陽子の収量比、高密度核物質が崩壊することで生成される破砕片の同位体分布、Transverse flow、中性子-陽子のdifferential flowと呼ばれる放出軽粒子の巨視的な流れ、それに高密度中性子過剰核物質から放出される正負荷電パイオンの比 π^-/π^+ 等が、対称エネルギーの密度依存性に非常に敏感だとされている。これらの観測量の中で、 π^-/π^+ 比は、理化学研究所の不安定核ビ

ーム工場(RIBF)で得られるビームのエネルギー領域(核子当たり200-300 MeV)で特に $E_{sym}(\rho)$ の違いに対する感度が増していると期待されている。

2. 研究の目的

新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」の計画研究B01班は、中性子星の半径と質量の関係を支配する中性子過剰核物質の状態方程式(EOS)の中でも特に重要な項、“対称エネルギー” $E_{sym}(\rho)$ が、通常核物質の約2倍程度の密度領域で‘堅い’のか‘柔らかい’のかを世界に先駆けて決定することを目標とした。具体的には、理研RIBFで加速される幅広い陽子数/中性子数比を持つ中間エネルギー不安定核ビームを標的核(安定核)に衝突させ、中心衝突で通常核物質の約2倍程度の核物質を作る。そしてこの高密度核物質から発生する π^+ と π^- の生成比を衝突系の陽子数/中性子数比を幅広く変化させ系統的に調べ、理論計算の予言と対比することにより対称エネルギーの密度依存性に強い制限を与えることを目指した。まずは実験に必要な装置の整備から始め、期間内にRIBFを使った実験を実施、データ解析を行うことを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 重イオン衝突実験のデータからEOSの情報を出導する際、“輸送方程式”を使った反応のシミュレーション計算が必要になるが、この理論計算の信頼度が常に問題になってくる。そこで衝突実験プロジェクトを開始するに先立ち、飽和密度領域での $E_{sym}(\rho)$ の情報が重イオン衝突実験と“輸送方程式”計算から正しく導けるのか海外の研究者たちと比較検討してみた。その結果、重イオン衝突実験から得られる、 $E_{sym}(\rho)$ を ρ_0 近辺で ρ について展開した時の0次、及び1次の係数が他の実験で求めたものとよく一致することが確認できた。

(2) “輸送方程式”を解く理論計算の信頼度向上させることを目的に、D01理論班と共同で平成25年7月に理化学研究所で国際研究会RIBF-ULIC-miniWS:027を開き、現存する典型的な理論計算コードBUU、QMD、AMD等の長所、短所などについて議論し、コードによって π^-/π^+ 比について全く異なった予言値が出されている現状の理解を試みた。この研究会では、東北大の小野氏が開発した世界中で信頼を得ているAMDコードを改良して π^-/π^+ 比の計算をするのが最も適当であるという結論になり、D01理論班と密接に議論を続けることになった。ここでの議論は同じ年にミシガン州立大学で開かれた国際会議NuSYM13にも引き継がれ、国際的に“輸送方程式”計算コードの相互比較の機運が高まることになった。

(3) 測定に用いるビームのエネルギー領域(核子当たり200-300 MeV)が荷電 π 生成に必要な

閾値付近であるので、収量の少ない π^- と π^+ の生成比を正確に測定するため、理研 RIBF に設置されている大型 SAMURAI 超伝導電磁石に組み込んで使う汎用性の高い大立体角を覆える大型の多重飛跡検出器(TPC) (総パッド電極数 12096) をアメリカミシガン州立大学の研究協力者たちとともにアメリカで製作した。TPC の製作は平成 25 年度に終了し、年度末に実験現場である RIBF に搬入した。

(4) TPC からの信号の高速読み出し回路系 GET(General Electronics for TPC)を、フランスのサクレーを中心とする国際共同研究グループと共同開発した。最初の年度にテスト生産をした回路の要にあたる新規に開発した ASIC の半数近くに想定外のバグがあることが分かり、パターンを起こし直し、チップの再生産をすることになってしまった。プロジェクトの遅延を防ぐため、バグが見つからなかった残り半分の ASIC を実装した基板を作り、実際の実験状況に近い環境を放射医学総合研究所 HIMAC に構築し、その動作テストを核子当り 400 MeV の ^{132}Xe ビームを用いて行った。そして試作基板の設計に問題ないことが確認できたので、基板の量産を開始した。

(5) 中心衝突を選び出すため、核反応の激しさを測定する検出器群の開発を行った。磁場中で動作させる衝突径数を限定する多重度検出器として、押し抜き型のプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバーそれに MPPC を組み合わせた 60 枚のパッドを作り TPC の側面を覆った。信号の読み出しには計画研究 A02 班が開発した VME-EASIROC システムを採用し、彼らのアドバイスを受けながら短時間で荷電粒子の多重度を判断する FPGA 用のソフトを開発した。また周辺衝突で放出され測定邪魔になるビーム粒子に近い質量数の粒子を効率的に排除する前方検出器をポーランドの研究協力者とともに開発した。そして平成 27 年秋までにそれぞれの実機製作を完了した。

(6) 多重度検出器等からの情報をもとに中心衝突だけをを選び出してデータ収集するため、収集したい事象が発生した時にだけ TPC を動作させる Gating Grid Driver (GGD) システムの開発を行った。高速で電場の切り替えをするため、切り替えノイズが信号に悪影響を与えてしまうが、電源供給ラインのインピーダンスを TPC 本体のインピーダンスに合わせるよう微調整することでその影響を極小化することが出来た。この調整により中心衝突事象を認識した後 350 ns 以内にデータ収集が始められるようになった。

(7) 読み出し回路系のサンプルについてデバッグを十分行った後、必要台数の GET を TPC 本体に組み込み宇宙線を使って総合性能テストを行った。その際、不幸にして正の電気

信号を処理する際にだけ増幅度が安定しないという不具合が見つかってしまったが、フランス人研究協力者が簡単な対処方法を発見してくれたので、TPC に直接取り付けの基板の全てを一度フランスに送り返し、必要な修理を行った。平成 27 年夏に修理から戻ってきた基板を再び TPC に取り付け、まず 10 月に RIBF からのビームを使った全 TPC システムのコミッショニング実験を SAMURAI 電磁石の下流で行い、本実験とほぼ同じ状況下で問題なく動作することを確認した。この時収集したデータを使い、TPC 内に作られた荷電粒子の飛跡を解析するソフトウェアのデバッグを行った。

(8) 最終年度春、平成 25 年に採択されていた高密度中性子過剰核物質の EOS を探究する総計 13.5 日の実験、核子当り 280 MeV の不安定核ビーム ($^{108,132}\text{Sn}$) を安定錫標的に衝突させ、 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{124}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 、 $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 等の中心衝突から発生する π^- と π^+ との比を系統的に求める実験を実施し、予定を上回る総計 220 TB のデータ収集に成功した。

(9) これまでに開発してきた解析ソフトウェアのチューニングを行い、 π^- と π^+ との生成比を正確に決定する作業を D01 班のメンバーと議論をしながら進めている。間もなく実験データと理論計算結果との比較から対称エネルギーの密度依存性に有意な制限がつけられる見通しである。

4. 研究成果

(1) ポーランドの研究協力者とともに開発を進めた中心衝突事象のデータ収集をする際に邪魔になる周辺衝突事象を効率的に排除する KATANA と名付けられた前方検出器システムは、想定通りの性能を示し、2016 年春に行った本実験でも安定に動作した。KATANA の詳細については、論文 1 で公表している。

(2) 中心衝突事象が起こったときにだけ、検出器に入射した荷電粒子が作り出す電離電子を増幅領域に導き、データ収集を可能にする GGD 回路開発には、当初想定していたより時間がかかったが、中心衝突事象に対しての不感時間が 350 ns と非常に短い回路システムの開発に成功した。GGD に関しては、論文 2 に公表している。

(3) 平成 28 年度春に核子当り 280 MeV の $^{108,112}\text{Sn}$ (中性子不足錫同位体) ビームを使った第 1 シリーズ本実験、それに同じく核子当り 280 MeV の $^{124,132}\text{Sn}$ (中性子過剰錫同位体) ビームを使った第 2 シリーズ本実験を行った。この時収集した計 4 組のデータセット(おおよそ 220 TB)のデータ解析を理研、ミシガン州立大学、京都大学にあるサーバー計算機を用いて開始し、まずは中性子星核物質の状態方程式を決定するために必要な正負荷電

パイオンが明確に分離でき、その生成比の導出が可能であることを確認した。

この実験の経緯と予備的に得た大ざっぱな荷電パイオンの生成量の報告を、6月のNIC16(新潟)、7月のNuSYM16(北京)、9月のINPC16(アデレード)等の国際会議で行い、非常に注目された。

(4) 本実験に先立ち行い、成功裏に終わったTPCシステムのコミッショニング実験の結果と、このTPCのために新たに開発した収集データ解析に使うソフトウェアについてまとめた公表論文を出版した[論文5]。

(5) 大型TPCの製作が終了した段階で、このTPCの技術情報についてまとめた公表論文を出版した[論文10]。

(6) 長年開発を進めてきたTPC用の高集積度、高速読み出し回路システムGETは世界中の研究所で導入されるようになってきた。この新学術領域内でも計画研究A01班がダブルハイパー核探索のために開発したTPCの読み出し系に採用している。GETの開発状況の詳細を記述した最初の公表論文を出版した[論文18]。

(7) 飽和密度領域での $E_{sym}(\rho)$ の情報が重イオン衝突実験と”輸送方程式”計算から正しく導けるのか海外の研究者たちと比較検討した結果を公表論文として出版した[論文19]。この論文は既に276回引用され高く評価されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計141件)

1. P. Lasko, *P. Pawlowski, T. Isobe(14番目), M. Kurata-Nishimura, T. Murakami(19番目), et al. (計22名), "KATANA-A charge-sensitive triggering system for the $\sqrt{s_{NN}}$ experiment", Nucl. Instr. and Meth. A, 査読有, **856** (2017) 92-98.
2. S. Tangwanchaoen, *M.B. Tsang, T. Isobe(8番目), M. Kurata-Nishimura, T. Murakami(10番目), et al. (計12名), "A gating grid driver for time projection chamber", Nucl. Instr. and Meth. A, 査読有, **853** (2017) 44-52.
3. *M.B. Tsang, T. Isobe(14番目), M. Kurata-Nishimura, T. Murakami(17番目), et al. (計18名), "Pion production in rare-isotope collisions", Phys. Rev. C, 査読有, **95** (2017) 044614.
4. *P. Russotto, T. Isobe(39番目), et al. (計92名), "Results of the ASY-EOS experiment at GSI: The symmetry energy at suprasaturation density", Phys. Rev. C, 査読有, **94** (2016) 034608.
5. *G. Jhang, T. Isobe(4番目), M. Kurata-Nishimura, T. Murakami(14番目), H. Baba

(19番目), et al. (計29名), "Beam Commissioning of the $\sqrt{s_{NN}}$ Time Projection Chamber", J. Korean Phys. Soc., 査読有, **69** (2016) 144-151.

6. *T. Peach, T. Murakami(18番目), T. Kawabata(22番目), et al. (計24名), "Effect of ground-state deformation on isoscalar giant resonances in ^{28}Si ", Phys. Rev. C, 査読有, **93** (2016) 064325.
7. *H. Otsu, T. Isobe(4番目), T. Murakami(10番目), M. Kurata-Nishimura, et al. (計19名), "SAMURAI in its operation phase for RIBF users", Nucl. Instr. and Meth. B, 査読有, **376** (2016) 175-179.
8. A. Adare, T. Isobe(135番目), *B. Johnson, K. Kurita(179番目), A. Taketani(333番目), et al. (計389名), "Measurement of the higher-order anisotropic flow coefficients for identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Rev. C, 査読有, **93** (2016) 051902.
9. *Y.K. Gupta, T. Murakami(18番目), T. Kawabata(22番目), et al. (計23名), "Deformation effects on isoscalar giant resonances in ^{24}Mg ", Phys. Rev. C, 査読有, **93** (2016) 044324.
9. *T. Hashimoto, T. Kawabata(15番目), et al. (計36名), "Dipole polarizability of ^{120}Sn and nuclear density functionals", Phys. Rev. C, 査読有, **92** (2015) 031305.
10. *R. Shane, T. Isobe(3番目), H. Baba(5番目), K. Ieki(12番目), T. Murakami(16番目), A. Taketani(22番目), et al. (計28名), "SpiRIT: A Time-projection chamber for symmetry-energy studies", Nucl. Instr. and Meth. A, 査読有, **784** (2015) 513-517.
11. *D. Patel, T. Kawabata(9番目), T. Murakami(12番目), et al. (計18名), "Excitation of Giant Monopole Resonance in ^{208}Pb and ^{116}Sn using inelastic deuteron scattering", Phys. Lett. B, 査読有, **735** (2014) 387-390.
12. *K. Yoshida, N. Fukuda, Y. Yanagisawa, N. Inabe, Y. Mizoi, and T. Kubo, "High-power beam dump system for the BigRIPS fragment separator at RIKEN RI Beam Factory", Nucl. Instr. and Meth. B, 査読有, **317** (2013) 373-380.
13. *D. Patel, T. Murakami(12番目), et al. (計17名), "Testing the Mutually Enhanced Magicity Effect in Nuclear incompressibility via the Giant Monopole Resonance in the $^{204,206,208}\text{Pb}$ Isotopes", Phys. Lett. B, 査読有, **726** (2013) 178-181.
14. *H. Sato, T. Isobe(10番目), T. Murakami(16番目), et al. (計19名),

- "Superconducting Dipole Magnet for SAMURI Spectrometer", IEEE Trans. on Applied Super., 査読有, 23 (2013) 4500308.
15. *Y. Matsuda, T. Murakami(7 番目), et al. (計 17 名), "Elastic scattering of protons from ${}^9\text{C}$ with a 290 MeV/nucleon ${}^9\text{C}$ beam", Phys. Rev. C, 査読有, 87 (2013) 034614.
16. *P. Russotto, T. Isobe(52 番目), et al. (計 92 名), "The ASY-EOS experiment at GSI: investigating the symmetry energy at supra-saturation densities", J. Phys. Conf. Ser., 査読有, 420 (2013) 12092.
17. *K. Fujiwara, T. Isobe, T. Kobayashi, and A. Taketani, "Design of low-cross-talk readout pads for time projection chamber", J. Instrumentation, 査読有, 7 (2012) C06004.
18. *E. Pollacco, H. Baba(3 番目), T. Murakami(17 番目), A. Taketani(24 番目), et al. (計 28 名), "GET: A Generic Electronic System for TPCs for nuclear physics experiments", Phys. Procedia, 査読有, 37 (2012) 1799-1804.
19. *M.B. Tsang, T. Murakami(13 番目), et al. (計 19 名), "Constraints on the symmetry energy and neutron skins from experiments and theory", Phys. Rev. C, 査読有, 86 (2012) 015803.

[学会発表] (計 75 件)

1. T. Isobe, "Application of transport model to design experiments", Transport 2017, Mar. 27-31, 2017, East Lansing, USA
2. T. Murakami, "Pion data and transport model calculations", Transport 2017, Mar. 27-31, 2017, East Lansing, USA
3. T. Isobe, "Experimental Study of Neutron rich Matter EOS at RIKEN-RIBF", Jint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australia Institute of Physics Congress, Dec. 7, 2016, Brisbane, Australia
4. T. Murakami, "Symmetry energy at supra nuclear density from heavy-ion reactions", YIPQS2016, Oct. 17-21, 2016, Kyoto, Japan
5. M. Kurata-Nishimura, "First Experiment with the SPiRIT-TPC", The 26th International Nuclear Physics Conference, Sep. 11-16, 2016, Adelaide, Australia
6. T. Isobe, "Constraint on nuclear symmetry energy through heavy RI collision experiment by using SPiRIT device at RIBF-SAMURAI", Symposium on Nuclei in the Cosmos 2016, Jun. 19-24, 2016, Niigata, Japan
7. T. Murakami, "The Status of the RIKEN SpRIT experiment", International

- Symposium on Nuclear Symmetry Energy 2016, June 13-17, 2016, Beijing, China
8. T. Murakami, " $\Sigma\pi$ RIT project at RIBF, RIKEN - exploring symmetry energy at supra-density", Science with Beams of Radioactive Isotopes (Pacifichem 2015), Dec. 17-18, 2015, Hawaii Convention Center, USA
 9. T. Murakami, "Pion productions in mass asymmetric ${}^{28}\text{Si}+{}^{\text{In}}$ reactions at 400, 600, 800 MeV/nucleon", Symposium on Nuclear Symmetry Energy 2015, Jun 29- July 2, 2015, Krakow, Poland
 10. T. Isobe, "Current status of the SpRIT TPC project", Symposium on Nuclear Symmetry Energy 2015, Jun 29- July 2, 2015, Krakow, Poland
 11. T. Isobe, "Integration of GET electronics on TPC for HIC program at RIBF", Workshop on Active Targets and Time Projection Chambers for Nuclear Physics Experiments, May 18-20, 2015, East Lansing, USA

[その他]

ホームページ等

SPiRIT TPC Experiments at RIKEN

https://groups.nsl.msu.edu/hira/NP1306_SAMURAI15/index.htm

出前講義

○村上哲也

平成 26 年 12 月 13 日 京都府立鳥羽高等学校 (2 年生) 「元素誕生の謎」

平成 26 年 1 月 25 日 京都府立菟道高等学校 (2 年生) 「元素誕生の謎」

○磯部忠昭

平成 29 年 2 月 7 日 新潟県立長岡高等学校 SSH 講演会

平成 28 年 11 月 21 日 細田学園高等学校 社会人講演会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 哲也 (MURAKAMI, Tetsuya)

京都大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号 : 50219896

(2) 研究分担者

家城 和夫 (IEKI, Kazuo)

立教大学・理学部・教授

研究者番号 : 10159577

磯部 忠昭 (ISOBE, Tadaaki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器センター・専任研究員

研究者番号 : 40463880

川畑 貴裕 (KAWABATA, Takahiro)

京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80359645

(3) 連携研究者

竹谷 篤 (TAKETANI, Atsushi)
国立研究開発法人理化学研究所・中性子ビーム技術開発チーム・副チームリーダー
研究者番号：30222095

溝井 浩 (MIZOI, Yutaka)
大阪電気通信大学・工学部・講師
研究者番号：30388392

栗田 和好 (KURITA, Kazuhiro)
立教大学・理学部・教授
研究者番号：90234559

馬場 秀忠 (BABA, Hidetada)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器センター・研究員
研究者番号：10415268

(4) 主な研究協力者 (計 67 名)

W. Lynch
NSCL, Michigan State University, USA,
Professor

M. B. Tsang
NSCL, Michigan State University, USA,
Professor

S. J. Yennello
Cyclotron Inst., Texas A&M Univ., USA,
Professor

Z. Xiao
Department of Physics, Tsinghua Univ.,
China,
Professor

J. Lukasik
INP, Poland
Professor

P. Pawlowski
INP, Poland
Professor

B. Hong
Department of Physics, Korea Univ.
Korea,
Professor

E. Pollacco
IRFU/SPhN, CEA-Saclay, France
Professor

(5) 科研費雇用研究員

西村 美月 (NISHIMURA, Mizuki)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器センター