

平成 30 年 6 月 26 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：24105008

研究課題名(和文)中性子星と核物質の理論研究

研究課題名(英文)Theoretical Study of Neutron Stars and Nuclear Matter

研究代表者

大西 明(Ohnishi, Akira)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：70250412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 94,600,000円

研究成果の概要(和文)：高密度多成分物質、中性子過剰物質、コンパクト天体現象の3つの方向から中性子星と核物質の理論研究を進め、約370編の出版論文でその成果を発表した。実験・観測と連携した代表的な成果として、反K中間子核束縛エネルギーの予言と検証、ハイペロン・原子核ポテンシャルの強さの決定、運動量相関による相互作用パラメータの制限、低エネルギーE1強度と中性子スキンの相関の予言、中性子過剰核衝突における π^-/π^+ 比の予言、冷却原子状態方程式を用いた対称エネルギーパラメータの制限、天体現象に適用できる新たな微視的状态方程式の作成、星震データによる対称エネルギーの制限などが挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Neutron star physics has been studied from the view points of multi-component high-density matter, neutron-rich nuclear matter, and compact star astrophysics. Achievements are published in around 370 papers, which include cooperation works with experiments such as, the prediction of the anti-K nucleus binding energy and its confirmation, determination of hyperon-nucleus potential using hyperon production data, constraint on Lambda-Lambda potential using momentum correlation from heavy-ion collisions, predictions of low-energy E1 strength and its relation to neutron skin thickness, prediction of the π^-/π^+ ratio from neutron rich nuclear collisions, constraints on symmetry energy parameters using the cold atom EOS, construction of new ab initio EOS table applicable to compact star phenomena, constraints on the symmetry energy parameter using torsional oscillation of neutron stars.

研究分野：原子核物理学(理論)

キーワード：中性子星 状態方程式 ストレンジネス 対称エネルギー コンパクト天体現象 冷却原子 有効相互作用 3体力

1. 研究開始当初の背景

(1) 中性子星は図1に示すように密度・構成要素ともにバラエティに富む多体問題の宝庫である。近年の実験・観測の進展により、実験データから示唆される相互作用の性質と観測データをつき合わせて中性子星核物質状態方程式を定量的に議論できる時代を迎えつつある。

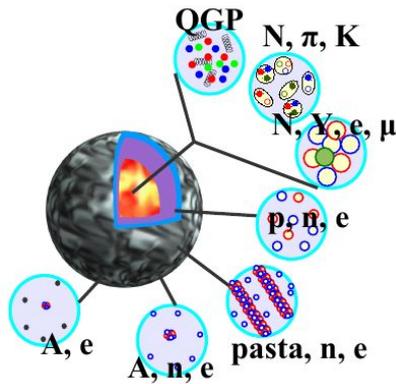


図1. 中性子星の構成要素

(2) 中性子星中心部の高密度領域では核子以外のハドロクォークが現れると期待されるが、これらを含む従来の状態方程式では支えられない重い中性子星が最近見つかり、大きなパズル(ハイペロンパズル)となっている。

(3) 中性子星の大きな体積を占める中性子過剰核物質の性質は不安定核ビーム実験を通じて推定できるが、標準核物質密度の数倍における中性子過剰核物質の性質には大きな不定性がある。特に対称エネルギー(純中性子物質と対称核物質のエネルギー差)の大きさと密度依存性の正確な理解が必要とされている。

(4) 中性子星外殻(クラスト)では一様な物質ではなく、原子核とそこからあふれた中性子、および電子からなる。クラストでは球形ではない奇妙な形の原子核(パスタ原子核)の存在が期待されるが、その存否は不明である。またあふれた中性子が作る純中性子物質は中性子過剰核の研究では推定が困難である。

2. 研究の目的

(1) 本計画研究では原子核理論・天体理論・凝縮系理論の研究者が知恵を出し合い、高密度側での多成分最高密度低温物質、低密度側での非対称核子物質、そしてこれらを含む観測とのインターフェースとして中性子星核物質状態方程式(EOS)とコンパクト天体現象の3方向から中性子星の物理に迫る。

(2) これらの研究において、A班・B班・C班

と協力し、またその成果を利用することにより、最新の実験・観測データに基づいて理論的研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 高密度物質・中性子過剰物質・天体物理の課題のそれぞれを分担者3名とポスドクのグループが中心となって研究を進める。

(2) 高密度物質グループではストレンジクォークを含むハドロク(ハイペロンやK中間子)が中性子星物質に与える影響を調べる。正確なデータが揃いつつあるハイパー核(ハイペロンを含む原子核)の構造研究とともに、ハイパー核、反K中間子原子核についての研究を進める。

(3) 中性子過剰物質グループでは対称エネルギーと対相関についての研究を進める。対称エネルギーと実験データとの相関を核構造・核反応の両面から明らかにするとともに、二中性子の対相関が引き起こす原子核の励起状態を調べる。

(4) 天体物理グループでは原子核物理に基づく中性子星物質EOSと天体現象との関連を調べるとともに、中性子星内部におけるパスタ原子核や非一様相、クォーク物質の存在可能性について研究を進める。

4. 研究成果

(1) 高密度物質グループではハイパー核・反K中間子核の研究、および粒子相関を用いたバリオン間相互作用の研究において成果を得た。

反対称化分子動力学(AMD)を用いた系統的なハイパー核構造研究を進めた。例えば[論文]では粒子が原子核の変形度を変化させ、その結果として励起スペクトルが変わることを示した。

核についての研究を進め、ハイペロンが核物質中で強い斥力を受けることを示すと同時に、チャンネル結合の効果を明らかにした。例えば[論文]では ^4He のp波共鳴状態の存在を予言し、 $^4\text{He}(K^-, \dots)$ スペクトルからNやN-N相互作用の情報が得られることを示した。この結合チャンネル効果は高密度で3体斥力を生み出すことが知られており、データから斥力の強さを推測できることとなる。

反K中間子核についての予言を行い、新たに得られた反K中間子核データの解釈を与えた。例えば[論文]では $K^{\text{bar}}\text{NN}$, Nの結合チャンネル複素スケールリング法を射影法と組み合わせた計算を行い、45 MeV程度の束縛エネルギーをもつ $K\text{-pp}$ 状態の存在を予言した。この束縛エネルギーはJ-PARC E15 実験

データと無矛盾である。

高エネルギー重イオン衝突からの2粒子運動量相関から相互作用情報が得られることを示した。例えば[論文]では新たに得られた相関データから散乱長が $-1.25 \text{ fm} < a_0 < 0$ と制限され、弱い引力であることを示した。また格子QCD計算から得られるN相互作用を用いた粒子相関の予言も行っている。

(2) 中性子過剰物質グループでは対称エネルギー・対相関について研究を進め、次のような成果を得た。

対称エネルギーが中性子過剰核の励起スペクトルから制限出来ることを示した。例えば[論文]では低エネルギーのE1強度の和が中性子スキンの厚み、および対称エネルギーの密度依存性を表すパラメータ(L)と強い相関があることが示された。これらの予言に基づく実験が理研にて行われ、データの解析が行われている。

中性子過剰核衝突からの粒子比の評価を行い、対称エネルギーとの関係を議論した。例えば[論文]では新たに開発した輸送モデルを用いて錫同位体の衝突から得られる粒子のスペクトルと比(n/p)を予言し、高密度での対称エネルギーが小さい場合に比が大きくなることを示した。さらに世界各国で開発されている輸送モデルの比較を進めており、精度の改善を図っている。これらの予言に基づく実験は理研で行われ、データの解析が行われている。

核子間有効相互作用の精密化とそれを用いた平均場計算を進めた。例えば[論文]では鉛等の同位原子核の荷電半径の違いが3核子スピン軌道相互作用の効果により無理なく再現できることを明らかにした。これは数十年に亘る問題を解決に導くものであり、荷電半径データから3核子相互作用の性質を制限する可能性を示唆する。

中性子星内殻において発現する低振動数の集団励起モードを核子密度汎関数理論を用いて分析した。[論文]では、超流動中性子の集団励起であるアンダーソン・ボゴリューボフ音波と原子核クラスターの結合様態に着目し、同音波がクラスター内に侵入しないことを発見した。同音波とクラスターの格子振動の結合が弱いこと、内殻の熱伝導率が大きくなる可能性を示唆するものである。

冷却原子状態方程式から対称エネルギーパラメータの制限を行った。散乱長が発散するユニタリ気体は2体系での束縛状態が無い多体系において最も小さなエネルギーを与えると推測される。[論文]では、この

推測を第一原理計算により確かめるとともに、最小エネルギーの存在から対称エネルギーパラメータに制限がつくことを示した。

(3)天体物理グループでは状態方程式・非一様性・クォーク物質・中性子星振動について研究を進め、以下のような成果を得た。

原子核や中性子星物質をトーマス・フェルミ模型やハートリー・フォック模型によって系統的に記述することにより、対称エネルギーの密度依存性への制限を与えるとともに、核物質の非一様性や低質量中性子星の構造への理解を深めた。例えば[論文]ではハートリー・フォック法により、中性子星クラスタでジャイロイドと呼ばれる奇妙な形のバスタ原子核が現れることを示した。

天体現象に適用できる新たな状態方程式の構築を行った。例えば[論文]では、現実的核力を用いたクラスター変分法による広い密度・温度・陽子混在度領域をカバーする超新星状態方程式を構築した。これらの結果は、数値シミュレーションなど他の研究に有用なテーブルデータとしてウェブ上で提供している。

高密度領域におけるクォーク物質の役割について新たな知見を得た。例えば[論文]では、クォーク物質の存在を仮定すると超強磁場に対して状態方程式が硬化するため、大質量高密度星の第三の分枝(クォーク星)が存在する可能性を指摘した。またクォーク物質での非一様カイラル相転移についての系統的研究も行った。

星震データを用いて中性子星物質物性を調べられることを示した。巨大フレアにおいて観測された中性子星の準周期振動は表面のねじれ振動とみなすことができるが、この振動数はクラスタにおける原子核の非対称度を通じて対称エネルギーと強く相関し、また超流動の性質とも関連する。例えば[論文]では超流動中性子の一部が振動にかかわらないことを考慮するとねじれ振動数が上昇すること、および対称エネルギーへの制限が得られることを示した。

(5)連携研究者が中心になって行った研究からも、冷却原子系における状態方程式の再現、カイラル有効場理論による核物質飽和点の理解、3体力の強度決定とハイペロンパズルの解決、K中間子凝縮とハイペロンの混在、超新星爆発の第一原理計算、核物質非圧縮度の制限、などの多くの成果が得られている。

(6)本研究計画・本領域、およびこの5年間の当該分野の大きな成果として、核物質・中性子星物質の状態方程式の制限が定量的に進んだことが挙げられる。例えば[論文]で

制限が与えられた核物質・対称エネルギーパラメータ、および2倍の太陽質量の中性子星が支えられるという条件を用いて求めた状態方程式と中性子星質量・半径曲線を示す。色を付けた領域はパラメータの不定性を示している。この不定性は本領域研究開始時と比較すれば、対称エネルギーで数分の1、中性子星半径として半分程度にまで精密化している。

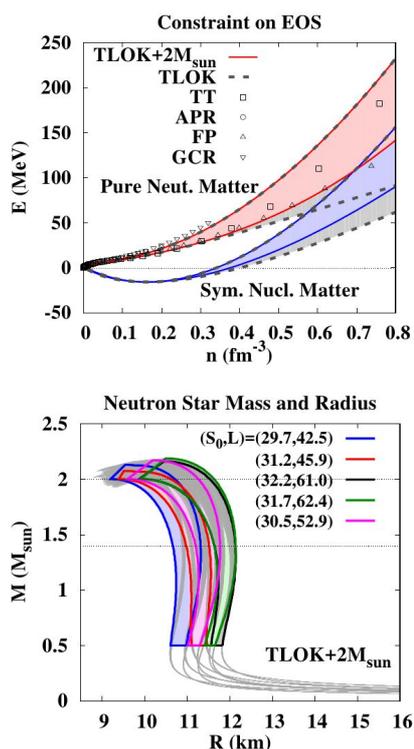


図2 . 状態方程式と中性子星質量・半径曲線の制限

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 373 件)

H. Sotani and T. Tatsumi, Quark matter with strong magnetic field and possibility of the third family of compact stars, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 467 (2017), 1249-1258 (査読有).
DOI: 10.1093/mnras/stx219

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, and M. Takano, Nuclear equation of state for core-collapse supernova simulations with realistic nuclear forces, *Nucl. Phys. A* 961 (2017), 78-105 (査読有).
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2017.02.010

I. Tews, J. M. Lattimer, A. Ohnishi, E.

E. Kolomeitsev, Symmetry Parameter Constraints From a Lower Bound on the Neutron-Matter Energy, *Astrophys. J.* 848 (2017), 105 (1-15) (査読有).
DOI: 10.3847/1538-4357/aa8db9

T. Inakura and M. Matsuo, Anderson-Bogoliubov phonons in the inner crust of neutron stars: Dipole excitation in a spherical Wigner-Seitz cell, *Phys. Rev. C* 96 (2017), 025806 (1-11) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.96.025806

N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara, A. Ohnishi, Probing neutron-proton dynamics by pions, *Phys. Rev. C* 93 (2016), 044612 (1-13) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044612

T. Harada, Y. Hirabayashi, P-wave resonant state of the 4He hypernucleus in the $4\text{He}(K^-, -)$ reaction, *Phys. Lett. B* 740 (2015), 312-316 (査読有).
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.11.057

A. Dote, T. Inoue, T. Myo, Application of a coupled-channel complex scaling method with Feshbach projection to the K^-pp system, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015 (2015), 043D02 (1-25) (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/ptv039

H. Nakada, Further evidence for three-nucleon spin-orbit interaction in isotope shifts of nuclei with magic proton numbers, *Phys. Rev. C* 92(2015), 044307 (1-6) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.044307

B. Schuetrumpf, M. A. Klatt, K. Iida, G. E. Schroder-Turk, J. A. Maruhn, K. Mecke, P.-G. Reinhard, Appearance of the single gyroid network phase in "nuclear pasta" matter, *Phys. Rev. C* 91 (2015), 025801 (1-7) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.025801

K. Morita, T. Furumoto, A. Ohnishi, Lambda-Lambda interaction from relativistic heavy-ion collisions, *Phys. Rev. C* 91(2015), 024916 (1-16) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.024916

T. Inakura(研究協力者・科研費ポスドク), T. Nakatsukasa, K. Yabana, Low-energy $E1$ strength in select nuclei: Possible constraints on neutron skin and symmetry

energy, Phys. Rev. C 88 (2013), 051305(R)(1-5) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.051305

H. Sotani, K. Nakazato, K. Iida, K. Oyamatsu, Effect of superfluidity on neutron star crustal oscillations, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. Lett. 428, (2013), L21-L25 (査読有).
DOI: 10.1093/mnrasl/sls006

M. Isaka, H. Homma, M. Kimura, A. Dote, A. Ohnishi, Modification of triaxial deformation and change of spectrum in 25 Mg caused by the hyperon, Phys. Rev. C85 (2012), 034303(1-8) (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.034303

[学会発表](計 468 件)

A. Ono, Light clusters and light nuclei in collision dynamics, 7th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (2017) (招待講演).

T. Inakura(研究協力者・科研費ポスドク), M. Matsuo, Anderson-Bogoliubov phonon in inner crust of neutron star, Interdisciplinary symposium on modern density functional theory (iDFT) (2017) (招待講演).

H. Nakada, Nuclear mean fields produced from semi-realistic nucleonic interaction, XXII Nuclear Physics Workshop "Marie & Pierre Curie" (2015) (招待講演).

M. Kimura, Exotic nuclear clustering near neutron dripline studied by antisymmetrized molecular dynamics, Gordon Research Conference, Nuclear Chemistry (2015) (招待講演).

A. Ohnishi, Neutron star matter equation of state: current status and challenges, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (2014) (招待講演).

K. Morita(研究協力者・科研費ポスドク), Lambda-Lambda correlation in relativistic heavy ion collisions, Resonance Workshop at Catania (2014) (招待講演).

K. Nakazato, Stellar core collapse with QCD phase transition Compact Stars in the QCD Phase diagram IV (2014) (招待

講演).

A. Dote, T. Inoue, T. Myo, Application of coupled-channel Complex Scaling Method to the $\bar{K}N$ - πY system, IAS-ISF conference on "Inelastic Reactions in Light Nuclei" (2013) (招待講演).

H. Sotani(研究協力者・科研費ポスドク), Possible constraints on density dependence of symmetry energy from oscillations in magnetar giant flares, 3rd Int. Symp. on Nuclear Symmetry Energy (2013) (招待講演).

[その他]

ホームページ

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大西 明 (OHNISHI, Akira)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 70250412

(2)研究分担者

原田 融 (HARADA, Toru)

大阪電気通信大学・共通教育機構・教授

研究者番号: 70238187

中田 仁 (NAKADA, Hitoshi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 80221448

飯田 圭 (IIDA, Kei)

高知大学・教育研究部自然科学系

理工学部門・教授

研究者番号: 90432814

松尾 正之 (MATSUO, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 70212214

木村 真明 (KIMURA, Masaaki)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号: 50402813

土手 昭伸 (DOTE, Akinobu)

高エネルギー加速器研究機構・

素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号: 90450361

巽 敏隆 (TATSUMI, Toshitaka)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号: 40155099

小野 章 (ONO, Akira)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：20281959

中里 健一郎 (NAKAZATO, Ken'ichiro)
九州大学・基幹教育院・助教
研究者番号：80609347

(3) 連携研究者

国広 悌二 (KUNIHIRO, Teiji)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号：20153314

西崎 滋 (NISHIZAKI, Shigeru)
岩手大学・人文社会科学部・教授
研究者番号：60198455

親松 和浩 (OYAMATSU, Kazuhiro)
愛知淑徳大学・人間情報学部・教授
研究者番号：10262883

丸山 敏毅 (MARUYAMA, Toshiki)
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究
センター・研究主幹
研究者番号：50354882

阿武木 啓朗 (ABUKI, Hiroaki)
愛知教育大学・理科教育講座・講師
研究者番号：70378933

大橋 洋士 (OHASHI, Yoji)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：60272134

柴崎 徳明 (SHIBAZAKI, Noriaki)
立教大学・理学部・教授
研究者番号：50206124

山本 康夫 (YAMAMOTO, Yasuo)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
客員研究員
研究者番号：80124866

高塚 龍之 (TAKATSUKA, Tatsuyuki)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
客員研究員
研究者番号：50043427

河野 通郎 (KOHNO, Michio)
大阪大学・核物理研究センター・
協同研究員
研究者番号：40234710

宮川 貴彦 (MIYAGAWA, Takahiko)
愛知教育大学・理科教育講座・准教授
研究者番号：70439925

武藤 巧 (MUTO, Takumi)
千葉工業大学・情報科学部・教授
研究者番号：60212247

住吉 光介 (SUMIYOSHI, Kohsuke)

沼津工業高等専門学校・教養科・教授
研究者番号：30280720

佐川 弘幸 (SAGAWA, Hiroyuki)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
客員主管研究員
研究者番号：50178589

(4) 研究協力者

祖谷 元 (SOTANI, Hajime)
国立天文台・理論研究部・特任助教
研究者番号：70386720

森田健司 (MORITA, Kenji)
ヴロツラフ大学・ポストドク研究員
研究者番号：50339719

山縣 淳子 (YAMAGATA, Junko)
京都産業大学・理学部・准教授
研究者番号：90548215

椿原 康介 (TSUBAKIHARA, Kohsuke)
東京工業大学・先導原子力研究所・研究員

大西 祥太 (OHNISHI, Shota)
北海道大学・大学院理学研究科・研究員

稲倉 恒法 (INAKURA, Tsunenori)
新潟大学・理学部・特任助教
研究者番号：20436249

池野 なつ美 (IKENO, Natsumi)
鳥取大学・農学部・講師
研究者番号：30756086

石塚 知香子 (ISHIZUKA, Chikako)
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教
研究者番号：10399800

李 東奎 (LEE, Tongyu)
高知大学・理工学部・研究員