

中性子星物質における K 中間子のダイナミクスとハイペロン自由度

課題番号: 13640282

平成 13 - 平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 異 敏隆

京都大学大学院理学研究科 助手

中性子星物質における K 中間子のダイナミクスとハイペロン自由度

課題番号: 13640282

平成 13 - 平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 異 敏隆

京都大学大学院理学研究科 助手

まえがき

本報告書は、平成 13-15 年度の 3 年間にわたり、文部省科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) の助成をうけた研究課題「中性子星物質における K 中間子のダイナミクスとハイペロン自由度」に関する研究成果をまとめたものである。

最近の原子核実験および中性子星などコンパクト星の観測の進歩を考えると、高密度ハドロン物質の研究はますます興味深いものとなっている。物質におけるストレンジネス自由度の発現を考えると、通常の核物質ではストレンジネスは存在しない。一方、クォークからなるクォーク物質を考えると、ストレンジネス自由度は非ストレンジネス自由度と同等に重要になることが知られている。また閉じ込め、非閉じ込めの視点から考えると、ハドロン物質はある密度でクォーク物質に転化すると考えることができる。この研究課題で注目した K 中間子、およびハイペロン自由度は核物質からクォーク物質にいたる一つの間状態として考えることができる。このような見地から我々はハドロン物質だけでなくクォーク物質まで視野に入れて研究した。

この研究期間 (2002 年春)、二つの重要な観測結果が NASA により発表された。一つはクォーク星候補天体の発見であり、他の一つは歴史的な中性子星の表面温度が異常低温であったことである。これらの結果はコンパクト星内部の高密度物質では新しい物質の存在様式があることを強く示唆するものとして注目された。前者はこれまで高密度領域で期待されていたハドロン物質からクォーク物質への非閉じ込め転移を意味しており、その観測結果の解釈が確かめられると画期的な発見となるものである。後者は年齢のはっきりした若い中性子星であることおよびその表面温度が通常の中性子星の描像では説明できないことで重要な意味をもつ。これまでも異常な低温の中性子星が数例報告されていたが、この発見によって高密度核物質における物質の新しい存在形態の存在が一層明確になったと考えられる。

一方、ハイパー核物理の発展や最近報告された原子核に深く束縛された K^- 中間子や π 中間子の発見は核物質中でのハイペロンや K 中間子の振る舞いに関する新たな情報を提供しており、これらは高密度核物質でのさまざまな相転移の研究にも重要な刺激となるものである。それら原子核実験の進歩とコンパクト星の観測の進歩があいまって近い将来高密度核物質の物理が大きく発展していくことが期待される。

理論的な側面としては、高密度核物質で期待される物質の新しい形態として K 中間子、ハイペロン自由度とともに π 中間子、クォークの自由度までさまざまな相転移が提案され、研究されてきたが、現象との関連でそれらの中で何が本質的な自由度なのかという問題がある。例えば中性子星の冷却の問題である。中性子星の表面温度に対する最近の観測は明らかに従来の中性子星の描像では説明がつかないほど低温になっている例がいくつか報告されている。この観測データを説明するためには上記の新しい自由度を導入することが求められるが、どのような自由度が本質的であるかについてはまだはっきりしていない。我々は従来から π 中間子の自由度が重要であることを強調し、他の自由度と比べて一番もっともらしいことを議論した。

実験的進歩と理論的進展があいまって今後もこの分野の発展が望まれる。

本報告書は、研究成果の概要、研究実績、代表論文の収録からなっている。

研究組織

研究代表者 巽 敏隆 京都大学大学院理学研究科 助手
研究分担者 丸山 智幸 日本大学生物資源科学部助教授

研究経費

平成 13 年度	130 万円
平成 14 年度	120 万円
平成 15 年度	90 万円
計	340 万円

研究成果概要

(1) K 中間子凝縮相転移における混合相の存在

化学ポテンシャルを二つ以上含む系での一次相転移での幾何学的構造をもつ混合相は依然議論のある問題である。中性子星物質での多くの相転移に適応可能でありその結果得られる状態方程式は現象との関連でも重要な意味を持っている。混合相では密度が非一様であるばかりでなく、電荷密度も非一様になることからクーロン相互作用を適切に取り扱う必要になる。クォーク・ハドロン非閉じ込め転移に対してクーロン相互作用を適切に取り扱った結果、電荷化学ポテンシャルのゲージ依存性を指摘し、電荷密度の再配位による Debye 遮蔽の重要性を指摘した。実際この効果によって混合相の幾何学的構造が力学的に不安定になることを示した。 K 中間子凝縮は強い KN_s 波相互作用によって数倍の核密度で起こると考えられるが、この場合も一次相転移である。 K 中間子凝縮に対して混合相の問題を考える意味としては次の二点がある。クォーク・ハドロン非閉じ込め転移とは違いクォーク・ハドロン境界面の不定性はまったく存在しないことから理論上結論がはっきりしていること、相転移の密度はクォーク・ハドロン非閉じ込め転移に比べて低く実際のコンパクト星の内部に実現し、現象に大きく関わってくると考えられることがある。密度汎関数法の考え方を基礎にして核子、 K 中間子、電子密度およびクーロンポテンシャルを自己無撞着に決定することを試みた。連立微分方程式を緩和法を用いて数値的に解くことによって各粒子密度を決定し、状態方程式を導出した。その結果クーロン相互作用は非常に重要であり、例えば正確に自己無撞着に解いた密度分布と Coulomb 相互作用を無視した密度分布では大きな違いが見られた。この結果から状態方程式を導出すると、従来の計算で示されていた広い範囲の混合相の存在は否定され、むしろ大きな物質間の相平衡という Maxwell 構成法によって得られる描像に近くなるという結果が得られた。この結果は以前クォーク・ハドロン非閉じ込め転移に対して得られたものと同様の結果である。また我々の理論形式は原子核密度以下での核物質の液・気相転移の議論にも適応可能であり、そこでのクーロン相互作用の効果も議論することができた。

(2) 高エネルギー重イオン衝突で観測された K^+ 中間子の異常生成

高エネルギー重イオン衝突実験においては K^+ 中間子の過剰生成が報告されている。我々のこれまでの研究から K^- 中間子は核子との引力的な相互作用により核物質内部ではそのエネルギーが非常に減少するのに対し、 K^+ 中間子と核子の相互作用は斥力的でありそのエネルギーは少し増加することが知られている。以前の研究において、それまで示唆されていた核物質中での K^+K^- 対の凝縮の可能性は否定されたが、 Λ ハイペロンを考慮すると、核子 (N)、 Λ に対する平均場の違いから $NN \rightarrow N\Lambda K^+$ の反応によって K^+ 中間子が凝縮する可能性があることを示した。ここでは NAK の微分結合を考慮してこの問題を検討した。核物質中の K^+ 中間子のプロパゲーターを書き下し、その極の位置から K^\pm の量子数をもつモードの励起エネルギーがわかるが、その中には K^\pm 中間子に対応するもの他に Λ 空孔からなる集団的励起 (K_s^-) がある。 K^+ 中間子のエネルギーは低密度では密度ともに増加す

るが、高密度になるとやがて減少に転じる。一方 K_s^- の状態のエネルギーは密度とともに大きく減少する。ある密度において両者のエネルギーの和は零になり、この密度で $K^+K_s^-$ の対凝縮が発生する。この密度は以前 K^+ 中間子が凝縮する可能性を調べていたときの密度より充分低いので、高エネルギー重イオン反応での K^+ 中間子の生成と関係していると期待できる。

(3) ハイペロン物質と中性子星の冷却

最近の 3C58 の発見をはじめとして従来の核子からなる中性子星描像では説明できない程有意に低い表面温度の観測が数例報告されている。これらのデータは中性子星内部の高密度核物質において”新しい物質の存在様式”の存在を強く示唆している。我々は従来から π 中間子凝縮、 K 中間子凝縮などによって急速な冷却機構が働くことを示し、天体物理学者(鶴田氏)との共同研究を通して実際に冷却曲線を求めることにより観測データとの対比を議論してきた。3C58 の発見と同時期には現在の観測データと理論的に考えられる可能性を批判的に検討し π 中間子凝縮がもっとも有力な可能性であると結論した。その後ハイペロン物質の存在を考慮して観測データが説明できるか検討した。その際に重要になるのがハイペロンまで含めたバリオン超流動である。最近では臨界温度近くでの準粒子対消滅によるニュートリノ対放出過程が重要であることがわかっているが、この過程のバリオン行列要素では中性流のものが本質的である。これまでの研究を検討した結果それらの行列要素に間違いがあることがわかり訂正した。さらに、フレーバー重項の行列要素はいわゆる”陽子のスピン問題”と呼ばれているものに関係しており、クォークがになう陽子のスピン割合が行列要素の大きさに効いてくることを示した。今後は正しい行列要素を用いた計算によってハイペロン物質下での中性子星冷却の問題を議論して何が急速冷却をもたらしているのか理論的にはっきりさせたい。

(4) クォーク物質の磁性とマグネター

2002年春に報告されたクォーク星候補天体の”発見”は、長年期待されていたコンパクト星の新しい分枝であるクォーク星がついに発見されたか、ということで大きな関心を呼んだが、その観測結果の解釈を巡って論争されておりまだ確証されていない。少なくとも複数個の同様の観測データがさらに不可欠であると考えられるが、クォーク物質の現実性およびその性質に対して再び大きな関心を引き起こした。クォーク星の”発見”以前においても超強磁場をもつマグネターが発見され、中性子星の磁場の起源とともにそのような強磁場の起源が興味ある話題の一つになっていた。現在ではマグネターは多く存在しており、その磁場もこれまでの周期による間接的観測からサイクロトロン共鳴によって直接観測されるようになった。我々はこのような磁場の起源はその内部に存在するハドロン物質やクォーク物質の強磁性によるというアイデアを提出していたが、クォーク物質が現実味を持ちつつある現在さらに深くクォーク物質の磁性について研究しておくことが重要であると考えた。このようなアイデアは我々独自のものである。

そこでクォーク物質での磁性の発現をカラー超伝導やカイラル相転移との関連で研究した。

カラー超伝導との関連ではスピンの向きがそろったクォーク対による対相関を考えることにより、強磁性と超伝導が共存できる可能性を示した。またカイラル相転移との関連では、自発的対称性の破れに伴う基底状態の縮退を考慮してスカラー密度、擬スカラー密度が反対の位相で空間的に振動する二重カイラル密度波に対する基底状態の不安定性を考えると、二重カイラル密度波は強磁性的性質をもたらせることがわかった。

研究発表

原著論文

- 1 M. Yasuhira and T. Tatsumi,
"Protoneutron Stars with Kaon Condensation and their Delayed Collapse",
Nucl. Phys. A690 (2001) 769 - 789.
- 2 T. Maruyama, T. Tatsumi,
"Ferromagnetism of Nuclear Matter in the Relativistic Approach",
Nucl. Phys. A693 (2001) 710-730.
- 3 D.N. Voskresensky, M. Yasuhira and T. Tatsumi,
"Charge screening at first order phase transitions",
Phys. Lett. B541 (2002) 93-100.
- 4 S. Tsuruta, M.A. Teter, T. Takatsuka, T. Tatsumi and R. Tamagaki,
"Confronting neutron star cooling theories with new observations",
ApJ. 571 (2002) L143-146.
- 5 T. Tatsumi, T. Takatsuka and R. Tamagaki,
"Neutrino interactions in octet baryon matter",
Prog. Theor. Phys. 110(2003) 179-184.
- 6 T. Muto, M. Yasuhira, T. Tatsumi and N. Iwamoto,
"Neutrino opacities in neutron stars with kaon condensates",
Phys. Rev. D67(2003)103002.
- 7 D.N. Voskresensky, M. Yasuhira and T. Tatsumi,
"Charge Screening at First Order Phase Transitions and Hadron-Quark Mixed Phase",
Nucl. Phys. A723(2003) 291-339.
- 8 E. Nakano, T. Maruyama and T. Tatsumi,
"Spin Polarization and Color Superconductivity in Quark Matter"
Phys. Rev. D68(2003)105001.
- 9 T. Maruyama, S. Chiba,
"In-medium Effects in the Eta-Photoproduction through the S_{11} Resonance in the Relativistic Approach"
Prog. Theor. Phys. 111 (2004) 229-243.

その他

1 異 敏隆

クオーク星のきらめき,
異 敏隆, 数理科学 2003 年 5 月号.

国際会議での口頭発表

- 1 T. Tatsumi and M. Yasuhira,
Delayed collapse of protoneutron stars by kaon condensate,
Proc. of Int. Nuclear Physics Conf.(INPC2001), American Inst. of Physics, 475-479,
(2002).

- 2 T. Tatsumi, M. Yasuhira and D.N. Voskresensky,
Hadron-quark mixed phase in neutron stars,
Proc. of 7th Int. Sympo. of "Nuclei in the Cosmos" (NIC7), Nucl. Phys. A718 (2003)
359c.

- 3 T. Tatsumi,
Superconductivity and Ferromagnetism in Quark Matter
DAAD Summer School (2002年8月4日-10日)

- 4 T. Tatsumi,
Pseudoscalar Mesons in Nuclear Medium,
Proc. of "MEDIUM02", World Scientific, 2003, p.18.

- 5 T. Tatsumi,
Ferromagnetism and Color Superconductivity of Quark Matter
APCTP seminar(2002年11月6日)

- 6 T. Tatsumi,
New Form of Matter and Compact Stars
Lecture at Ewha W.U.(2002年11月9日)

- 7 T.Maruyama, H.Yabu, T.Suzuki,
Time-Dependent Dynamics of the Bose-Fermi Mixed Condensed System,
Proc. of the Int. Sympo. on Frontier of Collective Motions (CM2002), edited by H.Sagawa
and H.Iwasaki, WS (2003), p271-275.

- 8 T.Maruyama and T. Tatsumi,
Ferromagnetism of Nuclear Matter in the Relativistic Approach

- the 16th International Conference on Particle and Nuclei (PANIC02), 9月30日-10月4日
Nucl. Phys. A721 (2003) 265c-268c.
- 9 T. Maruyama and S.Chiba,
The Eta-Photoproduction in the Relativistic Approach
the 16th International Conference on Particle and Nuclei (PANIC02), 9月30日-10月4日
Nucl. Phys. A721 (2003) 697c - 699c.
- 10 T.Maruyama and T.Tatsumi,
Spontaneous Magnetization of Nuclear Matter in the Relativistic Approach
First Joint Meeting of the Nuclear Physicists of the American and Japanese Physical
Societies, 2001年10月17日-20日
- 11 T. Tatsumi, T. Maruyama and E. Nakano,
Ferromagnetism and superconductivity in quark matter - Color magnetic superconductivity
Proc. of FQCD, July 2003 (hep-ph/0312347)
- 12 T. Tatsumi, T. Maruyama and E. Nakano,
Possibility of color magnetic superconductivity
Proc. of NATO Advanced Study Institute (hep-ph/0312351)
- 13 T. Tatsumi and D.N. Voskresensky,
Screening effect in quark-hadron mixed phase
Proc. of OMEG03, 17-19 Nov. 2003 (nucl-th/0312114)
- 14 Toshiki Maruyama, Toshitaka Tatsumi, Dmitri N. Voskresensky, Tomonori Tanigawa,
Satoshi Chiba and Tomoyuki Maruyama,
Coulomb screening effect on the nuclear-pasta structure
Proc. of OMEG03 (Origin of Matter and Evolution of the Galaxies), Wako, Japan, 17-19
Nov. 2003, to be published (nucl-th/0402002)
- 15 Toshiki Maruyama, Toshitaka Tatsumi, Dmitri N. Voskresensky, Tomonori Tanigawa,
Satoshi Chiba and Tomoyuki Maruyama,
Kaon condensation and the non-uniform nuclear matter
Proc. of MATTER03 (Nuclear Matter under Extreme Conditions), Kyoto, Japan, 1-3

Dec. 2003, Prog. Theor. Phys. Suppl., to be published

16 T. Tatsumi,

Quark matter and compact stars

Proc. of MATTER03 (Nuclear Matter under Extreme Conditions), Kyoto, Japan, 1-3

Dec. 2003, Prog. Theor. Phys. Suppl., to be published

物理学会、研究会等での口頭発表

- 1 巽 敏隆
若手夏の学校 (2001 年 8 月)
クォーク物質は中性子星の描像をいかに変更するか?
- 2 T. Tatsumi,
Dual chiral density wave in quark matter
第 4 回「極限ハドロン物質」研究会 (原子力研究所先端基礎センター, 2002 年 3 月 4-6 日)
- 3 巽 敏隆、
高密度核物質
Physics of High-Density Nuclear Matter at JHF,
KEK Proceedings 2002-13, 66 - 72(2002).
- 4 巽 敏隆
 π 中間子凝縮の現代的視点
理研セミナー (2002 年 8 月 24 日)
- 5 巽 敏隆
高密度核物質・クォーク物質と中性子星冷却物理学会 (2002 年 9 月 13 日-16 日)
- 6 巽 敏隆、D.N. Voskresensky,
多成分系の一次相転移と混合相の構造
第 5 回「極限ハドロン物質」研究会 (原子力研究所先端基礎センター、2003 年 3 月 18-20 日)
- 7 巽 敏隆、高塚 龍之、玉垣 良三、
バリオン八重項物質でのニュートリノ相互作用
第 5 回「極限ハドロン物質」研究会 (原子力研究所先端基礎センター、2003 年 3 月 18-20 日)
- 8 巽 敏隆
高密度核物質での中間子凝縮相転移
原研セミナー (2003 年 6 月 26 日)
- 9 巽 敏隆
高密度 QCD

関西若手合宿 (京都、2003年6月)

10 巽 敏隆

Quark matter and compact stars
基研研究会 (2003年12月1日-3日)

11 巽 敏隆

クォーク物質について
岩手研究会 (2004年2月6日-8日)

12 巽 敏隆

高密度ハドロン物質
KEK 研究会 ('04 3月15-17日)

13 丸山智幸、藪 博之、鈴木 徹、

Collective Motion and Damping in the Bose-Fermi Mixed Condensed System
日本物理学会 2003年秋の分科会 (岡山大学、2003年9月20日-23日)

14 丸山智幸、武藤 巧、巽 敏隆

高密度中性子物質中での K_0 凝縮の研究
日本物理学会 2003年秋の分科会 (宮崎ワールドコンベンションセンター、2003年9月9日-12日)

15 丸山智幸、藪 博之、鈴木 徹、

Landau Damping of the Collective Oscillation in the Bose-Fermi Mixed Condensed System
日本物理学会 2003年春の年会 (東北大学、2003年3月28日-31日)

16 丸山智幸、千葉敏、

Nuclear Electro-Magnetic Current in the Relativistic Approach with the Momentum-Dependent Selfenergies
日本物理学会 2002年秋の分科会 (立教大学、2002年9月13日-16日)

17 丸山智幸、武藤 巧、巽 敏隆、

Medium Properties of K_0 in Dense Matter

日本物理学会 2002 年秋の分科会 (立教大学、2002 年 9 月 13 日-16 日)

- 18 丸山智幸、藪 博之、鈴木 徹、
ボーズ・フェルミ混合系での時間依存ダイナミクスの研究
日本物理学会 2002 年春の年会 (立命館大学、2002 年 3 月 24 日-27 日)

- 19 丸山智幸
相対論的模型による光核反応での S11 共鳴を経由する n 粒子生成における媒質効果
第 4 回「極限ハドロン物質」研究会 (原子力研究所先端基礎センター、2002 年 3 月 4-6 日)

- 20 丸山智幸、武藤 巧、巽 敏隆、
Kaon Condensation and Nuclon-Lambda Loop ,
Nuclear Matter under Exterme Conditions (Matter03) (京大基研、2003 年 12 月 1 日~3 日)

- 21 丸山敏毅、巽敏隆, D.N. Voskresensky, 谷川知憲, 千葉敏, 丸山智幸
核物質の非一様構造とクーロン遮蔽効果
日本物理学会 2004 年春の分科会 (九大, 2004 年 3 月 27 日-30 日)

- 22 名和要武、仲野英司、巽 敏隆、
Breached CSC Pairing under Spontaneous Spin Polatrization in Quark Matter
日本物理学会 2004 年春の分科会 (九大, 2004 年 3 月 27 日-30 日)

- 23 仲野英司、巽 敏隆、
カイラル密度波とカレント質量の効果
日本物理学会 2004 年春の分科会 (九大, 2004 年 3 月 27 日-30 日)

- 24 遠藤友樹、丸山敏毅、谷川知憲、千葉敏、 D.N. Voskresensky、巽敏隆、
クォーク・ハドロン物質相転移における混合相の構造不安定性
日本物理学会 2004 年春の分科会 (九大, 2004 年 3 月 27 日-30 日)